

## 引发浙江短时强降水的后向传播型中尺度对流系统特征研究

桑明慧 舒守娟 李文娟 沈晓玲

### Characteristics of a back-building mesoscale convective system causing short-duration heavy rainfall in Zhejiang province

SANG Minghui, SHU Shoujuan, LI Wenjuan, SHEN Xiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240126>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于因子分析的广东省短时强降水预报模型及其业务试验

A probabilistic forecast model of short-time heavy rainfall in Guangdong province based on factor analysis and its operational experiments

气象学报. 2021, 79(1): 15–30 doi: [10.11676/qxxb2020.076](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.076)

#### 地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用

The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect

气象学报. 2020, 78(4): 551–567 doi: [10.11676/qxxb2020.034](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.034)

#### 产生青海“22·8”极端强降水的三维环流结构分析

Analysis of the three-dimensional circulation changes during the August 2022 extremely heavy rainfall event in Qinghai province, China

气象学报. 2024, 82(1): 37–54 doi: [10.11676/qxxb2024.20230105](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230105)

#### 西南山区5—8月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May—August

气象学报. 2022, 80(1): 21–38 doi: [10.11676/qxxb2022.006](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.006)

#### 基于雷达组合反射率拼图和深度学习的中尺度对流系统识别、追踪与分类方法

Identification, tracking and classification method of mesoscale convective system based on radar composite reflectivity mosaic and deep learning

气象学报. 2021, 79(6): 1002–1021 doi: [10.11676/qxxb2021.062](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.062)

#### 中尺度对流系统：从年际年代际变率到气候响应

Mesoscale convective systems: From interannual and decadal variability to responses to climate change

气象学报. 2025, 83(3): 770–785 doi: [10.11676/qxxb2025.20240112](https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240112)



扫码关注公众号，获取更多信息！

# 引发浙江短时强降水的后向传播型中尺度对流系统特征研究\*

桑明慧<sup>1,2</sup> 舒守娟<sup>3</sup> 李文娟<sup>4</sup> 沈晓玲<sup>2,5</sup>  
SANG Minghui<sup>1,2</sup> SHU Shoujuan<sup>3</sup> LI Wenjuan<sup>4</sup> SHEN Xiaoling<sup>2,5</sup>

1. 绍兴市气象防灾减灾中心, 绍兴, 312000
2. 绍兴市相控阵阵列天气雷达技术与应用重点实验室, 绍兴, 312000
3. 浙江大学地球科学学院大气科学系, 杭州, 310058
4. 浙江省气象台, 杭州, 310051
5. 绍兴市气象台, 绍兴, 312000

1. *Shaoxing Meteorological Disaster Prevention and Reduction Center*, Shaoxing 312000, China
2. *Shaoxing Key Laboratory of Phased Array Weather Radar Technology and Application*, Shaoxing 312000, China
3. *Department of Atmospheric Sciences, School of Earth Sciences, Zhejiang University*, Hangzhou 310058, China
4. *Meteorological Observatory of Zhejiang Province*, Hangzhou 310051, China
5. *Meteorological Observatory of Shaoxing*, Shaoxing 312000, China

2024-08-30 收稿, 2025-04-10 改回.

桑明慧, 舒守娟, 李文娟, 沈晓玲. 2025. 引发浙江短时强降水的后向传播型中尺度对流系统特征研究. 气象学报, 83(5): 1152-1168

Sang Minghui, Shu Shoujuan, Li Wenjuan, Shen Xiaoling. 2025. Characteristics of a back-building mesoscale convective system causing short-duration heavy rainfall in Zhejiang province. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(5):1152-1168

**Abstract** Back-building MCSs (Mesoscale Convective Systems) are highly conducive to sudden, localized short-duration heavy rainfall. In order to reveal the characteristics of this type of MCS and its association with heavy rainfall, this study systematically studies spatial and temporal distribution of back-building MCSs that triggered short-duration heavy rainfall during the warm seasons from 2015 to 2021 in Zhejiang province. Different organizational forms and environmental thermodynamic factors of different types are also explored. The results show that back-building MCSs in Zhejiang province exhibit significant monthly and diurnal variation patterns, i.e., MCSs mainly occur in June and July with peak hourly rainfall intensities of 30 and 50 mm in these two months, respectively. The MCS primarily form between 11:00 and 14:00 BT, with the highest frequency of formation occurring between 12:00 and 13:00 BT. The majority of MCSs have a duration of 12 h or less, with 10 h duration being the most common. The start time of backward propagation shows a quasi-bimodal pattern, which is 2–3 h later than the main formation time of the MCS. For 90% of the cases, the time of maximum hourly rainfall intensity occur within 0–2.5 h after the onset of the backward propagation. Based on the evolution characteristics of convective system organization, the back-building MCSs with short-duration heavy rainfall in Zhejiang province can be categorized into four types: Advective, quasi-stationary, turning, and propagating MCS, with about 42% occurring under the forcing of weak synoptic-scale system. The MCS usually occurs in an environment with medium convective available potential energy (CAPE), high humidity and appropriate vertical wind shear, but with different environmental factors for different

\* 资助课题: 浙江省自然科学基金联合基金重大项目(LZJMD23D050001)、国家自然科学基金项目(42375001)、杭州城市气象联合实验室重点项目(SYSZD202506)。

作者简介: 桑明慧, 主要从事中小尺度灾害天气研究。E-mail: [sangsang8916@163.com](mailto:sangsang8916@163.com)

通信作者: 舒守娟, 主要从事灾害天气和中尺度气象学研究。E-mail: [sjshu@zju.edu.cn](mailto:sjshu@zju.edu.cn)

types. The quasi-stationary MCSs account for the largest proportion (44.7%) and are characterized by significant environmental dynamic features, including strong atmospheric instability, large steering flow, and mid-to-lower-level vertical wind shear. They result in relatively weak maximum hourly rainfall intensity (the median is 50 mm/h). Propagating MCSs (accounting for about 17%) exhibit more distinct environmental thermodynamic characteristics with large CAPE and precipitable water (PW), and lead to the strongest maximum hourly rainfall intensity (the median is 70 mm/h).

**Key words** Back-building, Short-duration heavy rainfall, MCS

**摘要** 后向传播型中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)极易引发突发性、局地性短时强降水。为了揭示该类MCS的特征及其与强降水的联系,对浙江省2015—2021年暖季引发短时强降水的后向传播型MCS的时空分布、不同类型组织形态和环境热、动力因子进行了系统研究,结果表明,引发浙江短时强降水后向传播型MCS存在有显著的月际变化和日变化规律,主要发生在6和7月,且分别以最大小时雨量30和50 mm为主。MCS主要形成在11—14时(北京时,下同),尤其12—13时形成的最多。绝大多数MCS的持续时长 $\leq 12$  h,其中持续10 h的数量最多。后向传播开始的时间呈准双峰型,较MCS生成的主要时间晚2—3 h。近90%的个例最大小时雨量出现时间在后向传播开始之后0—2.5 h内。根据对流系统组织的演变特征,短时强降水后向传播型MCS分为平流型、准静止型、转向型和传播型4种,约42%发生在弱天气尺度系统强迫下。后向传播型MCS常发生在中等能量、高湿、具有一定风垂直切变的热、动力环境中,但不同组织类型的环境因子存在一定差异。准静止型MCS占比最高(44.7%),其环境场动力特征较显著,具有较强的大气层结不稳定、较强的引导气流和中低层风垂直切变,产生的平均最大小时雨强相对较弱(中位数为50 mm/h);而传播型MCS(占比约17%)的环境场热力特征较明显,表现为较大的对流有效位能(CAPE)和整层可降水量(PW),造成的平均最大小时雨强最强(中位数达70 mm/h)。

**关键词** 后向传播, 短时强降水, 中尺度对流系统

**中图法分类号** P445

## 1 引言

中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)是造成短时强降水的直接系统,其移动、组织和演变一定程度上影响了短时强降水的落区及强度。 $\beta$ 中尺度对流系统的移动方向由环境引导气流和系统传播方向共同决定。其中,引导气流由环境平均风决定,传播则由新生单体不断触发而产生(Corfidi, 1996)。当引导气流方向与传播方向交角小于 $90^\circ$ 时为前向传播,大于 $90^\circ$ 时为后向传播(俞小鼎, 2013)。

后向传播是MCS的一种特殊的组织形态。最早的后向传播是指线状对流及其尾部后部的对流单体合并形成飚线的一种组织形态(Bluestein, et al, 1985),此后拓展至描述MCS组织过程并逐渐衍生出准静止后向建立、后部扩展、后向发展等概念(Parker, et al, 2000; 王晓芳等, 2012; 王珏等, 2019)。

后向传播发生时,业务雷达图上通常能看到对流系统后部对流单体的产生和发展,卫星云图上可以观察到系统光滑后边缘伸展出的“指状”形态特征(张家国等, 2015; 王珏等, 2019)。基于雷达等观测资料,学者对后向传播进行了研究,发现新生单体触发后的移动和组织与引导气流(孙敏等, 2015;

武威等, 2021)和风垂直切变(陈明轩等, 2012; 王晓芳, 2012)密切相关。侯淑梅等(2015)和胡启元等(2020)分别对山东省和陕西省后向传播型雷暴进行了统计研究,并基于雷达探测资料给出了后向发展型雷暴的相关分型。冷池在对流系统后向传播的组织演变过程中起重要作用:一方面触发单体产生后向传播,另一方面可与地形、低空急流等相互作用产生辐合(赵宇等, 2017; 黄小彦等, 2020; 苏爱芳等, 2022)。后向传播新生单体的触发还与低层或近地面其他有利的热、动力条件有关,包括惯性重力波(孙继松等, 2013)、低空急流及其次级环流(柯文华等, 2012)、水平对流卷(孙密娜等, 2018)等。在环境场方面,后向准静止型MCS通常具有较大的对流有效位能(Moore, 1993)、暖湿舌,低层风垂直切变(或低层风)方向与出流边界相交甚至接近垂直(Schumacher, et al, 2005; 陈明轩, 2013);产生强降水的后向传播型MCS也可以发生在弱天气尺度强迫的环流背景中(盛杰等, 2020; 李琴等, 2021; 高帆等, 2022; 李明娟等, 2023)。

后向传播发生时, $\beta$ 中尺度单体生成方向与环境场平流方向接近相反,系统传播效应与环境平流效应相互抵消,使得对流系统少动或在某地长期维持(Schumacher, et al, 2006);盛杰等(2020)指出,

后向传播是华北强降水型线状对流系统形成极端降水的中尺度机制。在单体云团“列车效应”的作用下,降雨云团合并加强,极易导致强降水的发生。近年来,有多次强降水天气事件与对流系统的后向传播密切相关(俞小鼎, 2012; 徐珺等, 2014; 傅佩玲等, 2018; 田付友等, 2018; 苏爱芳等, 2022)。

由于后向传播单体触发机制复杂, MCS 组织演变不确定性较大, 对其组织规律研究一直具有较大的挑战。业务上, 模式或预报员对其特殊的组织形态认识不足, 导致灾害天气的短时临近预警难度增大。目前针对 MCS 后向传播的研究大多针对个例开展, 对后向传播型 MCS 活动和组织规律的认识有限; 另外, 不同环境场中 MCS 如何组织形成不同类型的后向传播, 并导致不同强度和落区的短时强降水, 以及各类型 MCS 环境热、动力特征的差异如何, 仍未被清晰揭示。本研究对浙江省连续 7 a 暖季的后向传播型 MCS 进行系统研究, 揭示它们发生、发展的时空分布特征, 从对流触发到强降水产生的组织演变规律及其热、动力环境场特征, 为提升区域短时强降水预报、预警业务水平提供坚实的科学依据。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

利用 2015—2021 年浙江省 14 部 S 波段多普

勒雷达探测资料、同时段浙江省地面气象观测站分钟降水资料, 以及全国常规气象站的高空探测资料进行个例筛选及分类。

利用时间分辨率为 1 h、空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 第 5 代再分析资料 (The fifth generation ECMWF reanalysis, ERA5) 进行环境场综合分析。

### 2.2 方法

考虑到 MCS 主要发生在暖季, 本研究对浙江省 2015—2021 年 4—9 月的 MCS 进行分析。首先使用俞小鼎 (2013) 对中尺度对流系统 ( $\beta$ -MCS) 后向传播的定义方法识别相关的 MCS。

以雷达图上观测引发强降水的  $\beta$ -MCS 为对象, 记对流单体传播方向为  $P$ ; 另外由  $(V_{850} + V_{700} + V_{500} + V_{300}) / 4$  ( $V_{850}$  表示 850 hPa 风速, 其他依此类推) 计算得到引导气流 ( $V$ , 即平流方向)。如图 1a 所示, 当在对流系统后部第 II 和第 III 象限, 对流单体沿  $P$  周期性生成, 且  $P$  与  $V$  夹角范围为  $90^\circ$ — $270^\circ$  时 (即图中粉色箭头覆盖区域), 定义为 MCS 发生后向传播。图 1b 以 2019 年 8 月 28 日一次真实个例为例, 给出后向传播型 MCS 的雷达回波。

传播方向由雷达观测的新生单体的周期性方向判定, 平流方向由相应时刻高空观测资料计算得

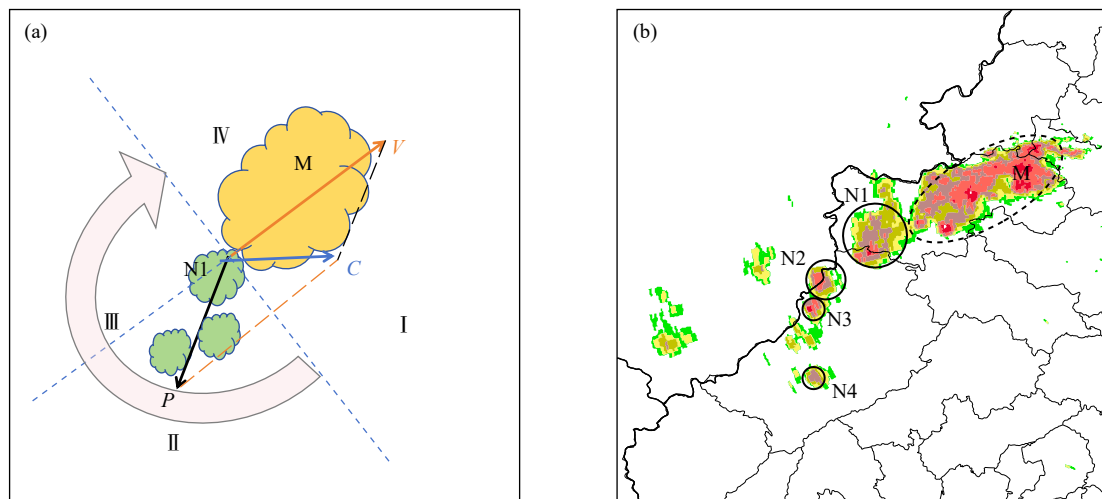


图 1 后向传播型 MCS 示意 (a) 及真实个例 (2019 年 8 月 28 日) 的雷达回波 (b) (图中  $V$  为平流方向,  $P$  为传播方向,  $C$  为系统未来移动方向;  $M$  代表主回波,  $N$  代表周期性触发的新单体, 阿拉伯数字代表单体触发顺序, 罗马数字表示象限)

Fig. 1 (a) Schematic diagram of back-building MCS, and (b) a radar image of a real-case scenario (28 August 2019) ( $P$  represents the direction of propagation,  $V$  is the direction of advection,  $C$  represents the direction of system movement;  $M$  indicates the main radar echo,  $N$  represents the periodically triggered new cells, the Arabic numerals indicate the sequence of cell triggering, and the Roman numerals represent quadrants)

到；再参考已有研究(胡启元等, 2020; 崔新艳等, 2021), 结合地面降水观测资料, 根据时空匹配进一步筛选出新回波或主回波区域出现小时雨量大于 30 mm 的短时强降水个例。

定义对流系统回波强度首次(最后)达 35 dBz 且面积超过 30 km×30 km 时刻作为 MCS 的起始(消亡)时刻(Zheng, et al, 2013)。对于上游移入的 MCS, 则以 35 dBz 回波区域首次移入(移出)浙江省时刻作为起始(消亡)时刻。将 MCS 起始至消亡的时长作为 MCS 持续时间。分别定义第一个和最后一个具有后向传播特征新单体的触发时间作为后向传播开始和结束时间, 两者之差作为 MCS 后

向传播持续时长。

对满足条件但为同一对流系统影响的个例进行合并, 剔除台风及其外围云系直接影响的个例, 本研究最终筛选出浙江省短时强降水后向传播型 MCS 共 47 例。

### 3 后向传播型 MCS 的总体特征

#### 3.1 后向传播型 MCS 的空间分布特征

由于 MCS 传播中产生不止 1 个单体, 将第 1 个新生单体出现的位置作为 MCS 发生的位置并进行标记, 其空间分布(图 2a)显示, 浙江省短时强降水后向传播型 MCS(下文简称后向传播型 MCS)的新

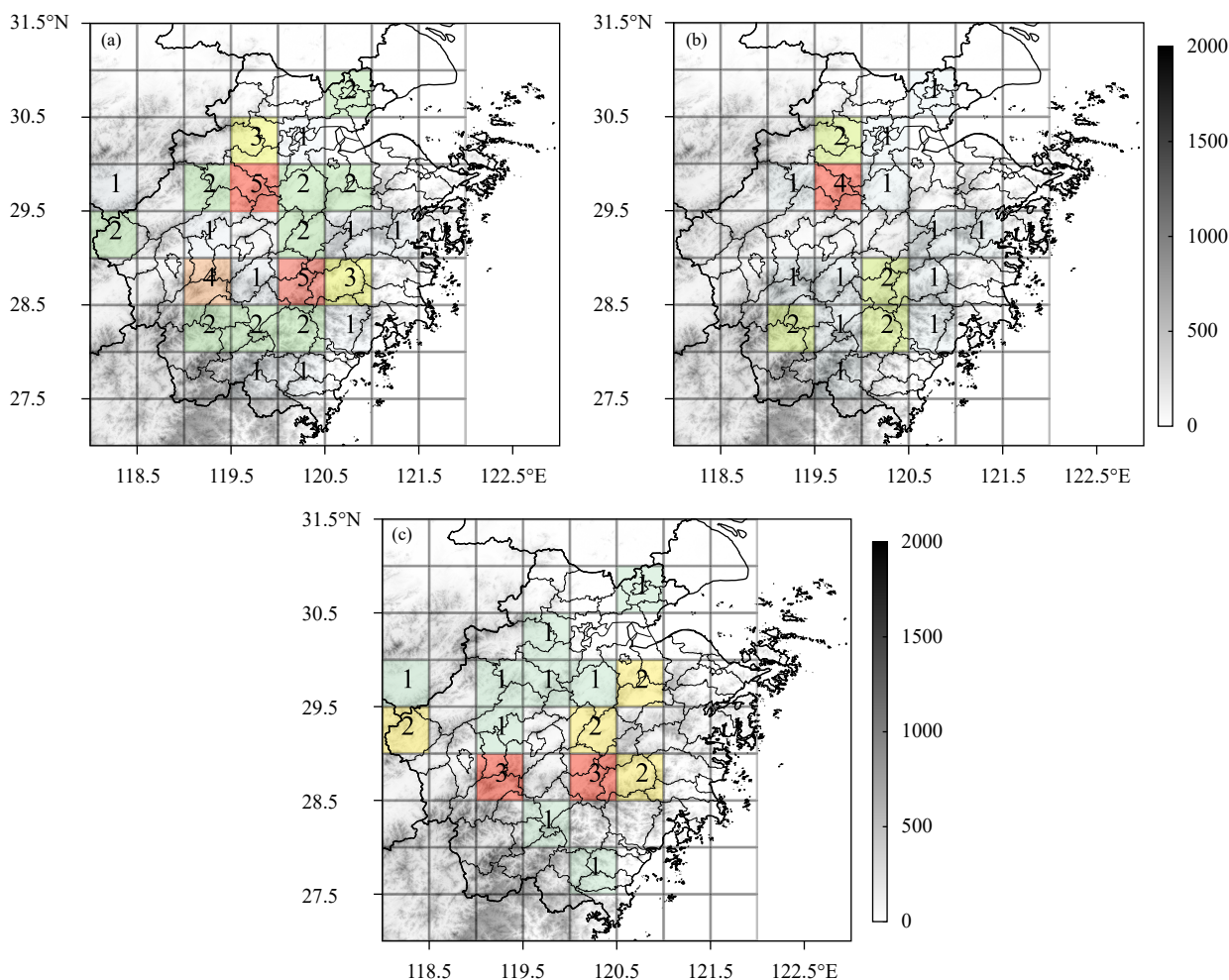


图 2 后向传播型 MCS 发生频数的空间分布 (a. 所有 MCS, b. 30 mm ≤ 小时雨量 < 50 mm 的 MCS, c. 小时雨量 ≥ 50 mm 的 MCS; 灰阶表示地形高度 (单位: m), 数字表示频数, 红色区表示频数较高的区域、橙色和黄色次之、绿色和无色表示频数较低区域)

Fig. 2 Spatial distribution of frequency of back-building MCSs causing short-term heavy rainfall in Zhejiang province (a. all MCSs, b. MCSs of 30 mm ≤ hourly rainfall < 50 mm, c. MCSs of hourly rainfall ≥ 50 mm; shaded represent terrain height (unit: m), numbers represent frequencies, and red area represents areas with higher frequency, orange and yellow represent medium frequency areas, green and colorless represent lower frequency areas)

生单体有南、北 2 个高频中心。北部中心位于杭州东南部至绍兴西部,是天目山东南部所在地,南部中心则为台州西部和丽水西北部,是括苍山所在地,显示出中尺度地形对后向传播型 MCS 发生的潜在影响。复杂地形除了成为对流触发的热、动力机制(崔新艳等, 2021)外,也影响系统的传播方向,尤其是在环境风较弱的情况下,地形附近的 MCS 更易出现后向传播(张家国等, 2015)。MCS 小时雨量的地域分布(图 2b、c)显示,北部和南部的高频中心分别主要由小时雨量大于 30 和 50 mm 的 MCS 导致。

### 3.2 后向传播型 MCS 的时间分布特征

2015—2021 年暖季,浙江省后向传播型 MCS 年平均发生 6.3 次,且 6、7 月最多,与浙江省该时段处于副热带高压(以下简称副高)脊线以北、多切变线活动、具备较好的水汽条件和上干下湿的大气层结不稳定有关,其次是 5 和 8 月,4 月最少。6 月 MCS 主要以最大小时雨量 30 mm 为主,7 月则达到 50 mm,且超过 50 mm 阈值的 MCS 数量大约是 30 mm 阈值 MCS 数量的 3 倍,表明浙江省 7 月最易受后向传播型 MCS 强降水的影响。

### 3.3 后向传播型 MCS 的日变化及持续时长特征

在日尺度上,浙江后向传播型 MCS 的形成时刻呈显著的单峰型特征(图 3a),主要形成在 11—14 时(北京时,下同),尤其 12—13 时形成的最多。绝大多数 MCS 的持续时长  $\leq 12$  h,其中持续 10 h 的数量最多,极少数可持续超过 14 h(图 4a)。

MCS 后向传播开始的时间呈准双峰型(图 3b),分别开始于 14 和 17 时,较 MCS 生成的主要时间晚 2—3 h。从持续时间(图 4b)来看,后向传播持续时长 0—8 h,约一半不超过 2 h,且传播时长短于 MCS

的持续时长,大多数占 MCS 持续时长的 30% 及以下(图 4c)。

利用地面降水分钟资料滑动计算最大小时雨量出现时间,结果表明,近 90% 的个例最大小时雨量出现在后向传播开始后 0—2.5 h 内,且呈双峰型(图 4d),主峰为后向传播开始后 2.5 h,接近后向传播的平均持续时长(2.48 h);另一个次峰则出现在 0.5 h,这与 0—1 h 内单体发展最强及降水效率最高的时段吻合(胡启元, 2020)。

## 4 后向传播型 MCS 的组织特征

研究发现,不同 MCS 的传播方向和环境场平流方向不同,它们共同影响  $\beta$ -MCS 演变,致使强降水特征不同(孙敏等, 2015)。为了探究后向传播型 MCS 的不同特征,依据平流和传播方向的矢量关系,将 MCS 的组织形态演变进行分类。其中,不同组织形态的背景环流形势以同类型环境场的合成分析表示,雷达反射率因子特征则以该类型中某典型个例进行描述。

### 4.1 平流型后向传播 MCS

平流型后向传播 MCS 发生时,浙江处在副高 588 dagpm 等高线西北侧的西南气流中,上游低槽引导冷空气南下;850 hPa 上游配合明显低槽东移,浙江处于槽前西南气流中(图 5a)。

图 6 是该组织形态环境引导气流及雷达组合反射率因子特征。10 日浙江上空为西南风。15 时 42 分, MCS 主回波 M 位于上海至浙江嘉兴,呈东北—西南线状。在引导气流作用下,对流系统及其内部  $\beta$  中尺度对流单体均向东北方向移动。15 时 20 分前后,新单体 N1 在主回波 M 西南方产生;15 时 42 分, N2 迅速发展,最大反射率增强至 55 dBz

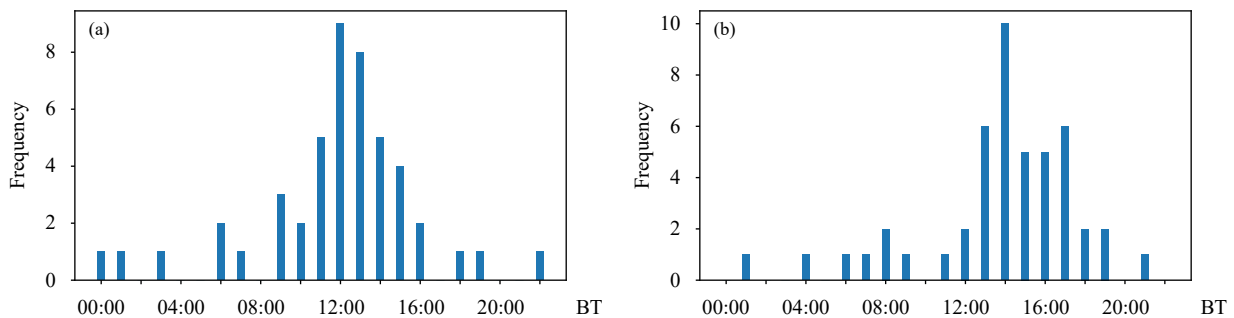


图 3 后向传播型 MCS 形成的频次 (a) 及后向传播发生的频次 (b) 逐时分布

Fig. 3 Hourly frequency distribution of back-building MCS formation (a) and occurrence times of backward propagation (b)

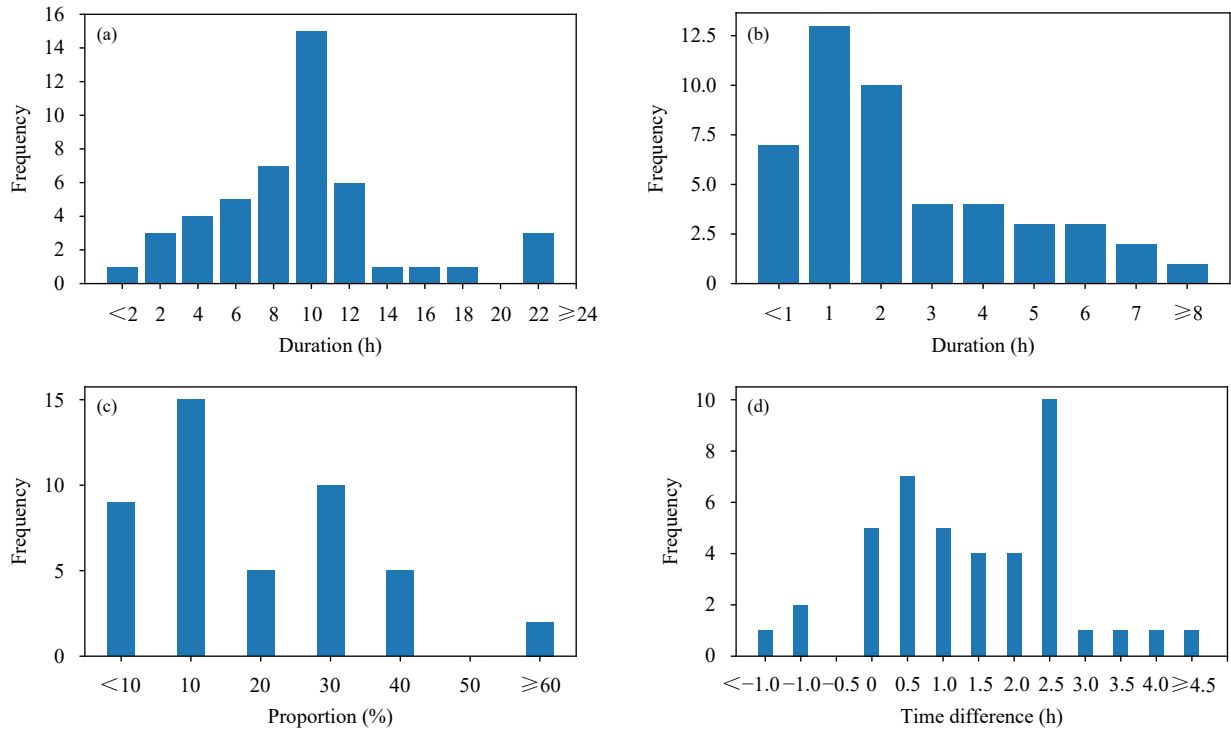


图4 后向传播型MCS不同持续时长的频数(a),MCS后向传播不同时长的频数(b),后向传播时长占MCS持续时长比例的频数(c),以及后向传播开始与最大小时雨量的时间差频数(d)

Fig. 4 Frequency of back-building MCS with different durations of short-term heavy rainfall in Zhejiang province (a), frequency of MCS with different backward propagation duration (b), frequency of the proportion of backward propagation duration to MCS duration (c), and time difference between the start of backward propagation and the maximum hourly rainfall intensity (d)

以上(图6a);16时10分,N1、N2随引导气流向东北移动并合并,同时N3单体被触发(图6b),对流单体持续向东北方向移动(图6c);17时N4触发(图6d)。2h内对流单体不断触发,形成传播效应。地面观测显示,短时强降水落区(黑色圆点,下同)主要位于新生回波触发及合并区域。此类MCS,传播即单体新生方向指向西南,但MCS及其内部 $\beta$ 中尺度对流单体在平流的主导作用下向东北移动。因此,将此类MCS的组织类型归类为平流型后向传播。

平流型后向传播在新生单体触发前,上游回波产生了阵风锋(图7a黑色箭头所指),窄带回波快速南移(图7a)。地面天气形势图上阵风锋后部配合冷池南压(图7b),其前部假相当位温大值区向北伸展形成暖湿舌。冷池出流和南部暖湿环境中的南风形成风向辐合,主回波后部不断触发对流并沿阵风锋侧向排列。可见,MCS后部阵风锋是伴随此类MCS的主要特征,冷池产生的强出流在近地面

与环境偏南风形成强辐合。

#### 4.2 转向型后向传播MCS

转向型后向传播MCS发生时,500 hPa上浙江处于588 dagpm等高线北侧、浅槽底部西风,850 hPa低槽东移出海,浙江受槽底部偏西风控制,槽后有弱冷空气入侵(图5b)。

图8是该类型环境引导气流及雷达组合反射率因子特征。29日午后,浙江沿海多单体雷暴群M在西风引导下向东移动。12时49分,主回波M西侧触发新生回波N1和N2(图8a),并于13时12分合并为N1-2,多个站点出现短时强降水,同时N3在南部触发(图8b);13时30分,N4、N5、N6等对流单体相继触发,N1-2则与N3合并增强为N1-3(图8c),产生后向传播效应。此后,N1-3继续与N4合并,新生回波在西南方向不断生成。14时41分,N7和N8触发,后向传播效应持续,对流单体不断合并增强(图8d)。单体的长时间停留造成沿传播路径移动的极端短时强降水。与平流型后向

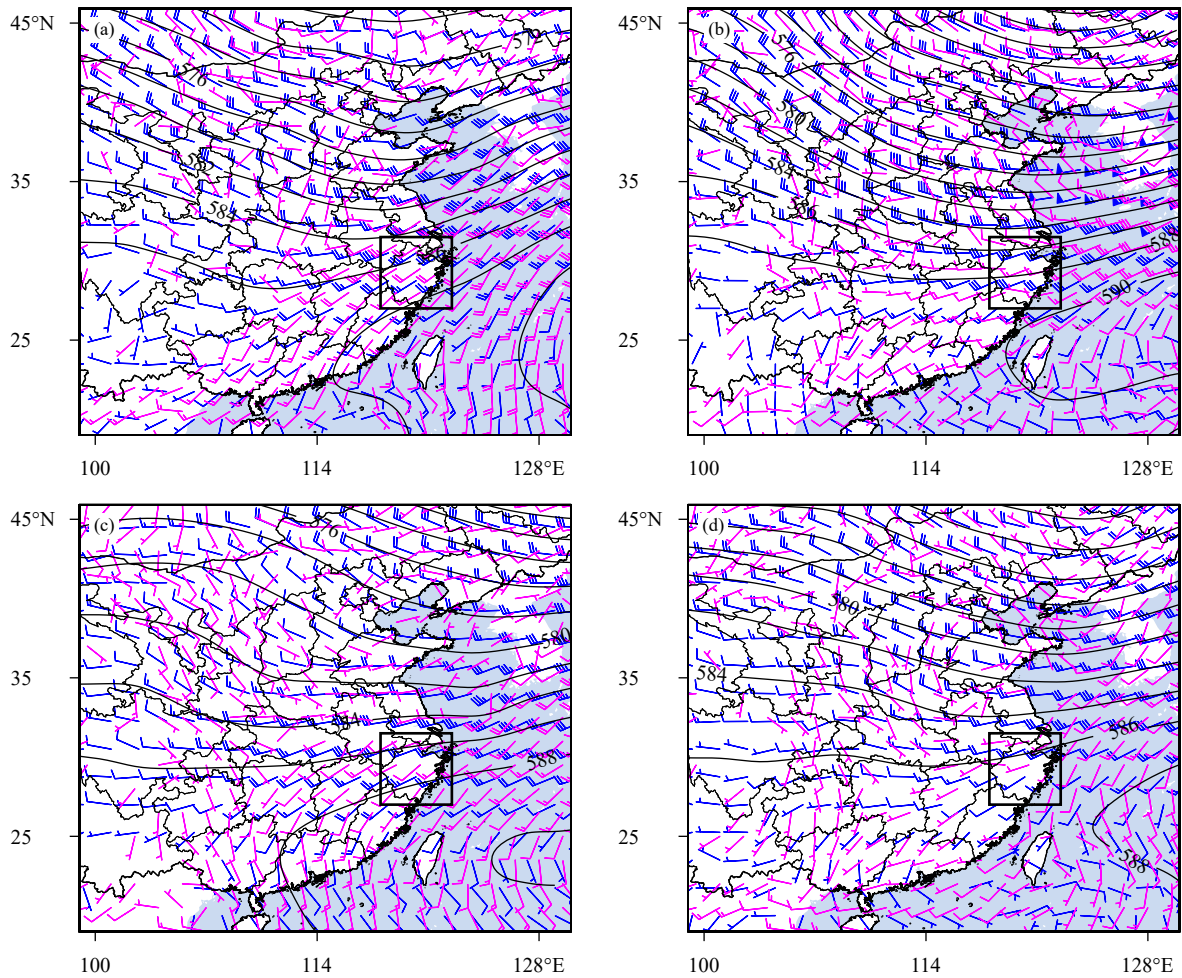


图5 浙江省(图中黑框区)4种类型MCS发生前500 hPa高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(蓝风羽)的合成,以及850 hPa风场(红风羽)的合成(a.平流型后向传播,b.转向型后向传播,c.准静止型后向传播,d.传播型后向传播)

Fig. 5 Geopotential height (contour, unit: dagpm), wind field (barb) at 500 hPa (blue) and 850 hPa (red) before the occurrence of MCS for typical cases of individual types in Zhejiang province (black rectangle) (a. advection type, b. turning type, c. quasi-static type, d. propagation type of backward propagation)

传播MCS不同的是,MCS内对流单体合并时沿传播方向移动而非沿引导气流方向,传播分量占优、向东南偏转。因此,将此类MCS的组织类型归为转向型后向传播。

转向型后向传播MCS发生前期,MCS主回波产生的冷池较强并伴有偏东出流;上游消散对流系统(如图8a—c黑色箭头所示)产生的冷池较弱且伴有弱偏北出流,二者形成辐合线,新生单体不断沿着辐合线生成。

#### 4.3 准静止型后向传播MCS

准静止型后向传播MCS发生时,500 hPa副高北侧盛行西风,850 hPa准静止切变线位于苏皖中部,浙江为切变线南部偏南风暖区,偏南或西南气

流自南海北上为浙江输送了水汽和能量(图5c)。

雷达反射率因子显示,21时12分,初始对流触发并向东北方向移动,发展形成主回波M(图9a)。21时29分,M西侧新单体N1触发并同样向东北移动,与M接近(图9b)。尔后,N2—N5相继触发,产生后向传播效应(图9c)。对流单体不断向主回波汇入使其加强并长时间停留。23时27分,MCS范围扩大、强度增强,形成团状回波且准静止维持(图9d)。地面雨量监测显示,主回波区短时强降水持续3 h以上,最大降水量站(祝园站)观测到89.1 mm/h的极端短时强降水,6 h累计雨量接近200 mm。由于对流系统呈准静止状态,强降水位置集中,因此将此类MCS称为准静止型后向传播MCS。

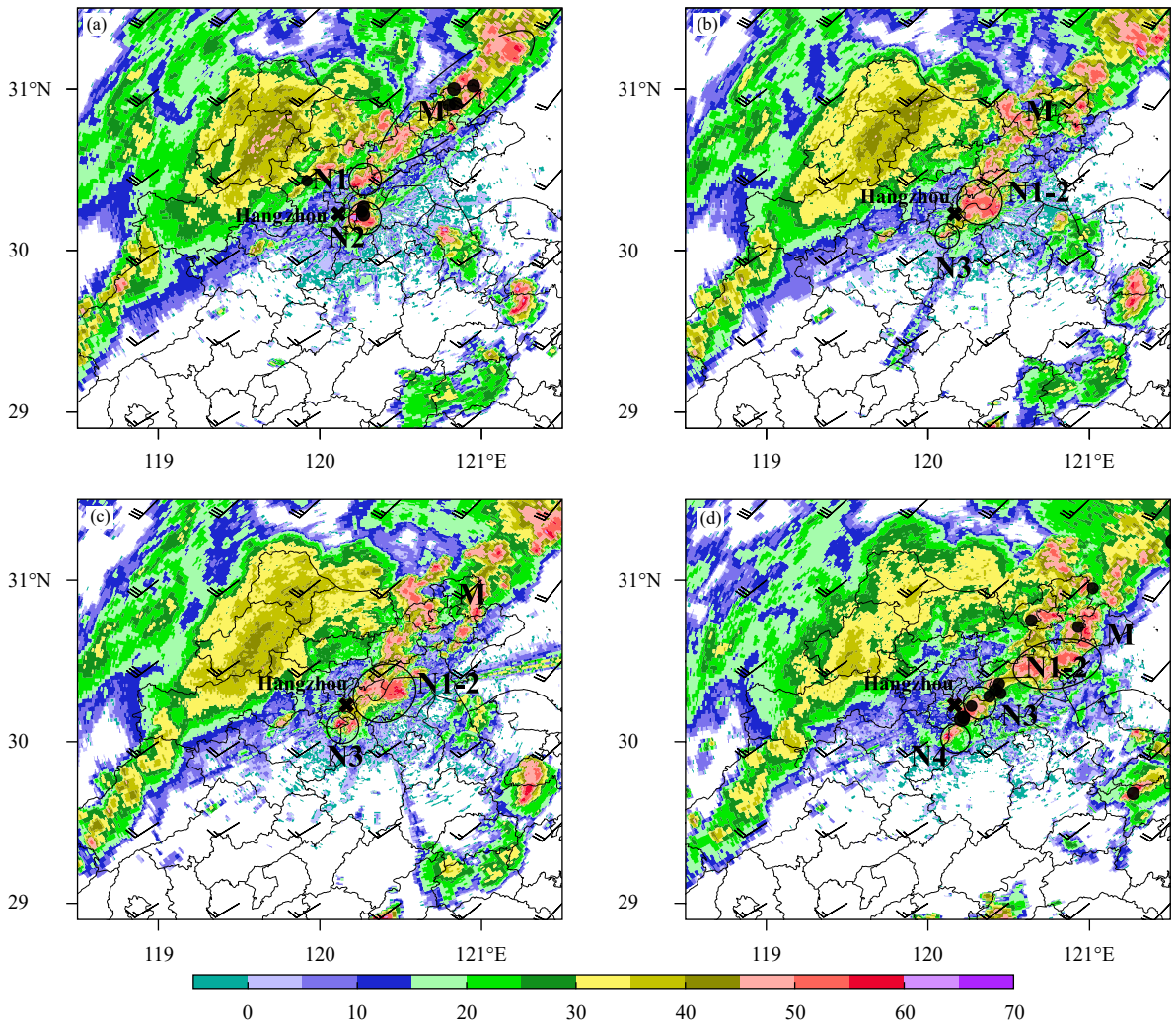


图 6 2020 年 8 月 10 日平流型后向传播典型个例引导气流 (风羽)、不同时刻雷达组合反射率因子 (色阶, 单位: dBz) 及短时强降水站点分布 (实心圆点)(a. 15 时 42 分, b. 16 时 10 分, c. 16 时 43 分, d. 17 时; × 表示发生站点, 黑色虚线圈代表主回波 M, 黑色实线圈代表新生单体 N, 下同)

Fig. 6 Radar composite reflectivity (shaded, unit: dBz) and distribution of stations with short-term heavy rainfall (solid dot) at different times of a typical case of advection type of backward propagation on 10 August 2020 at (a) 15:42 BT, (b) 16:10 BT, (c) 16:43 BT, and (d) 17:00 BT (symbol × represents occurrence station, black dashed circle represents main echo M, black solid circle represents newborn monomer N; the same hereafter)

地面观测显示无明显冷池和雷暴出流; 站点探空资料显示自由对流和抬升凝结高度较低(前者仅 1000—925 hPa), 且湿度(尤其是低层)接近饱和, 不利于蒸发形成强冷池。此外, 该类 MCS 另一个典型特点是, 低层暖湿气流常在中尺度地形迎风坡作用下冲破对流抑制触发对流, 在引导气流作用下在下游合并加强(图 10), 与王珏等(2019)的研究结论一致。

#### 4.4 传播型后向传播 MCS

传播型后向传播 MCS 发生时, 浙江处于 500 hPa

偏西风中, 850 hPa 风场弱, 显示该类型发生时无明显低槽和切变线, 天气尺度的动力强迫相对较弱(图 5d)。

雷达反射率因子显示, 18 日 16 时 30 分, 对流主系统 M 西南侧有新生单体 N1 触发(图 11a), 主体 M 随即与 N1 快速合并(图 11b), 与此同时 N2 触发, 随后再次合并至 MCS 中, 之后 N3 触发(图 11c), 传播效应产生。对流单体不断合并, MCS 西南侧不断触发出新单体并持续向西南方向移动(图 11d)。整个过程中, 系统传播方向处于主导地位, MCS 主

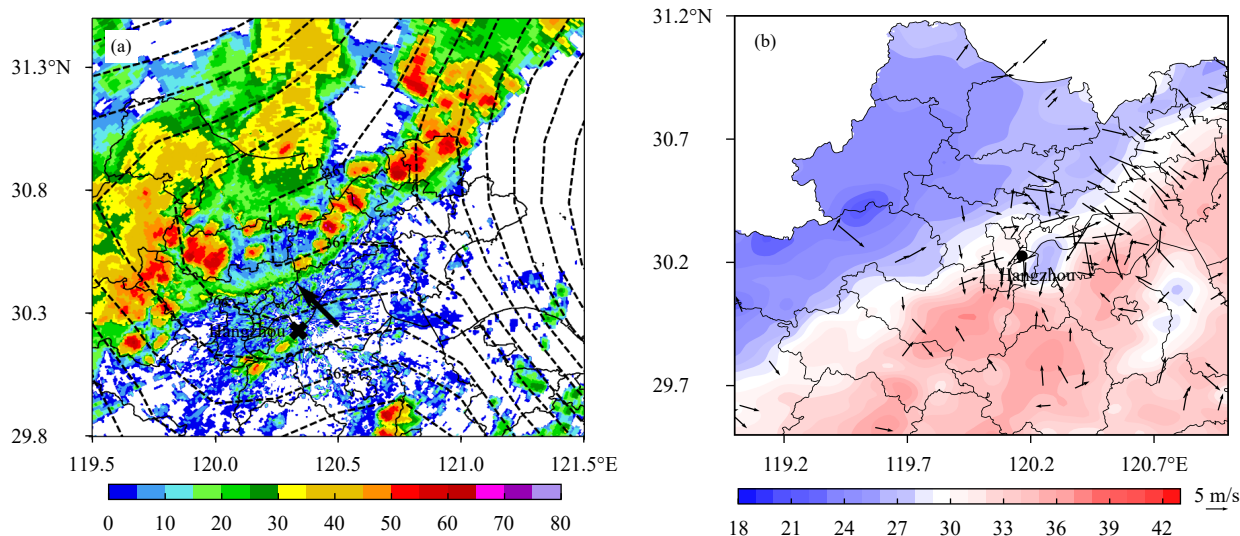


图7 平流型后向传播典型个例(2020年8月10日)的阵风锋及地面观测(a. 15时的雷达组合反射率因子(色阶,单位: dBZ)及1000 hPa假相当位温(虚等值线,单位: K), b. 16时的地面2 m气温(色阶,单位: °C)及冷池前缘10 m高度瞬时风(>5 m/s, 箭头)

Fig. 7 Gust front and ground observations of a typical case of advection type of backward propagation (10 August 2020): (a) radar composite reflectivity (shaded, unit: dBZ) and pseudo-equivalent potential temperature at 1000 hPa (dashed contour, unit: K) at 15:00 BT, (b) surface temperature at 2 m (shaded, unit: °C) at 16:00 BT and instantaneous 10 m wind at the front edge of the cold pool (>5 m/s, arrow)

体沿传播方向移动。因此,将此类MCS归类为传播型后向传播MCS。

如图12a, MCS东侧层状云形成了宽广向东延伸的云砧,这与对流发展至高空受高空西南气流影响有关;西侧反射率因子梯度较大,而西北侧,如图12a黑圈所示为一窄带回波,紧贴MCS向西南方向移动。反射率因子剖面显示,对流系统的前部强烈上升气流形成了有界弱回波区(图12c)。径向速度剖面显示,层状云下沉气流大值区(冷色调)从6 km一直延伸至地面, MCS前部观测到24 m/s以上的大风区(图12b),强烈出流呈契状向其前抬升暖湿空气,使得26 m/s左右的强上升气流(黄色调)冲破5 km高度(图12d)。地面要素观测显示强烈的出流不断向冷池西南方向扩展,风速辐合导致强烈的上升运动(图略)。MCS层状云下强烈的冷池出流抬升前部暖湿空气是此类传播型MCS的主要特征。

综上所述,浙江后向传播MCS易发生在副高边缘,其西南暖湿气流提供高温、高湿的大气环境,但不同类型对流层中下层环流形势有所不同。其中,平流型和转向型常伴有低槽东移,并引导冷空气南下;准静止型常发生在切变线南侧暖区急流中;传播型常处于弱天气尺度系统强迫中,引导气流

相对较弱。计算浙江省(27°—31°N, 118°—122°E)区域内850 hPa平均散度,并将平均散度大于0(即浙江区域无辐合)或平均散度小于0、大于 $-0.05 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,且天气图上中、低层为一致偏南风(即暖区,或偏南风风速弱辐合)定义为弱天气尺度强迫。结果表明,约42%后向传播型MCS发生在弱天气尺度系统强迫背景下。

#### 4.5 不同组织类型MCS的概念模型

突发性、局地性短时强降水的发生是大尺度环境和中小尺度系统共同作用的结果。基于以上分析,文中归纳出4种典型的MCS后向传播过程的组织形态,并结合传播机制及天气背景特征给出概念模型。

平流型后向传播MCS(图13a),其后部阵风锋出流与近地面偏南风辐合触发单体产生传播效应,传播方向 $P$ 指向平流方向 $V$ 的西南侧;MCS通常表现为线状,移动方向 $C$ 与平流方向 $V$ 基本一致,新生单体在引导气流作用下尾随MCS移动或合并,短时强降水主要发生在新生回波生成和沿着平流方向合并的区域。该类型占比约21.3%。

转向型后向传播MCS(图13b),其传播方向 $P$ 指向平流方向 $V$ 的西南侧,传播单体生成后沿边

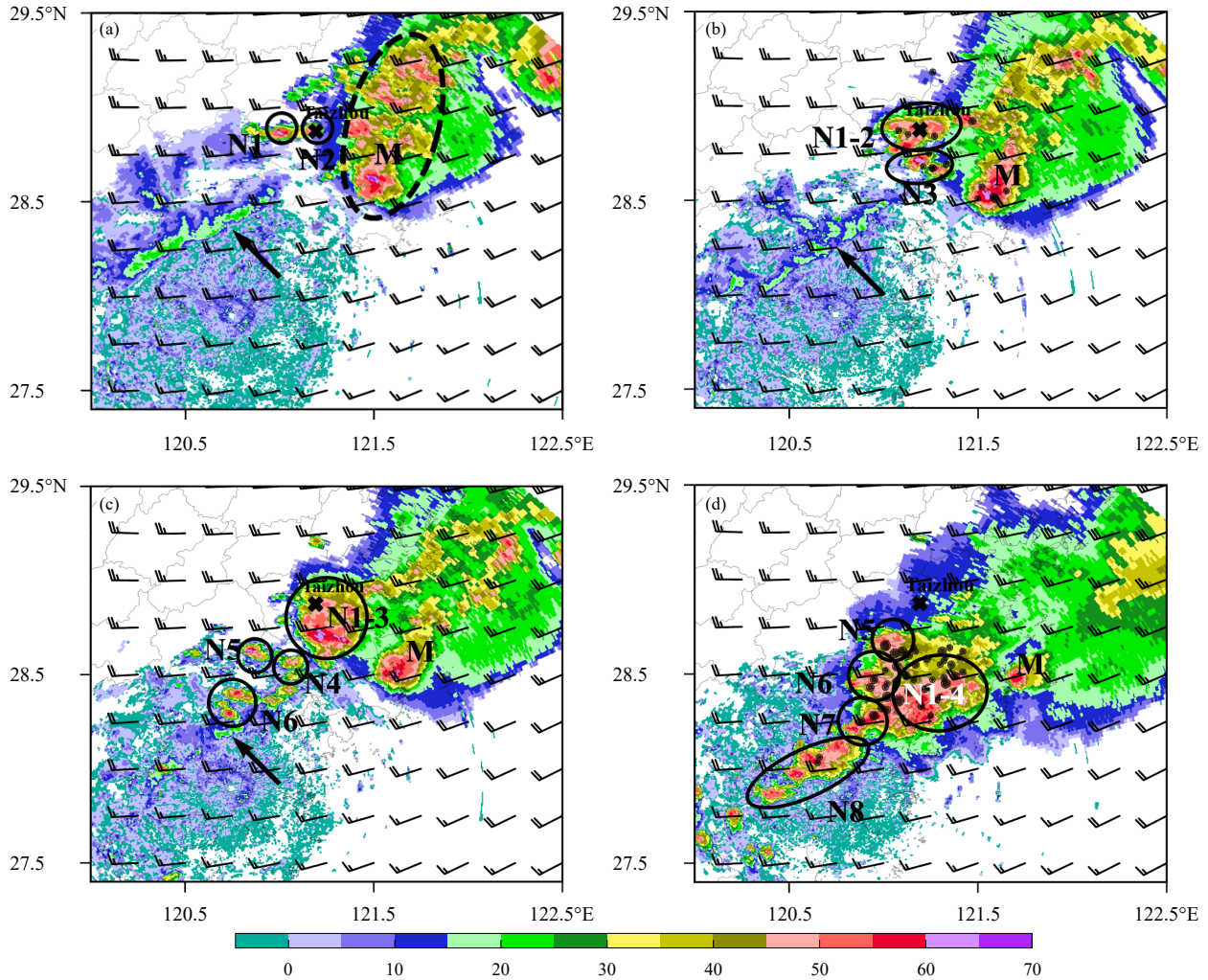


图 8 2018 年 6 月 29 日转向型后向传播 MCS 的典型个例引导气流 (风羽)、不同时刻的雷达组合反射率因子 (色阶, 单位: dBz) 及短时强降水站点分布 (圆点)(a. 12 时 49 分, b. 13 时 12 分, c. 13 时 30 分, d. 14 时 41 分)

Fig. 8 Radar composite reflectivity (shaded, unit: dBz) and distribution of stations with short-term heavy rainfall (dot) at different times of a typical case of turning type of backward propagation on 29 June 2018 at (a) 12:49 BT, (b) 13:12 BT, (c) 13:30 BT, and (d) 14:41 BT

界层辐合线(风、温度或水汽不连续面)方向产生合并,但 MCS 移动方向  $C$  受传播分量影响较大,移向较平流方向明显向南或东南转向, MCS 多表现为雷暴群;短时强降水主要发生在各对流单体沿着传播方向合并的区域。该类型占比约 12.8%。

准静止型后向传播 MCS(图 13c)常与迎风坡等中尺度地形抬升作用有关,传播方向  $P$  与平流方向  $V$  平行反向,新生单体触发后随引导气流移动,新旧回波更替, MCS 呈准静止状态,短时强降水主要发生于平流方向下游回波不断经过或合并处。该类型是所有类型中占比最高的一类(44.7%)。

传播型后向传播 MCS(图 13d), MCS 本身层

状云强下沉气流在近地面形成强出流,风速辐合导致强上升触发单体,传播效应显著,传播方向  $P$  与平流方向  $V$  平行反向,但 MCS 移向  $C$  指向传播方向, MCS 主体沿传播方向和新生单体快速合并产生短时强降水。该类型占比约 17%。

### 5 不同组织类型 MCS 的环境因子特征

对上述 4 类 MCS,以传播路径上第一个新生单体的触发时刻为基准,分析和比较其前 6 h 的环境因子,以揭示 MCS 环境特征及差异。

#### 5.1 热力因子特征

总体来看,后向传播型 MCS 发生的环境场对

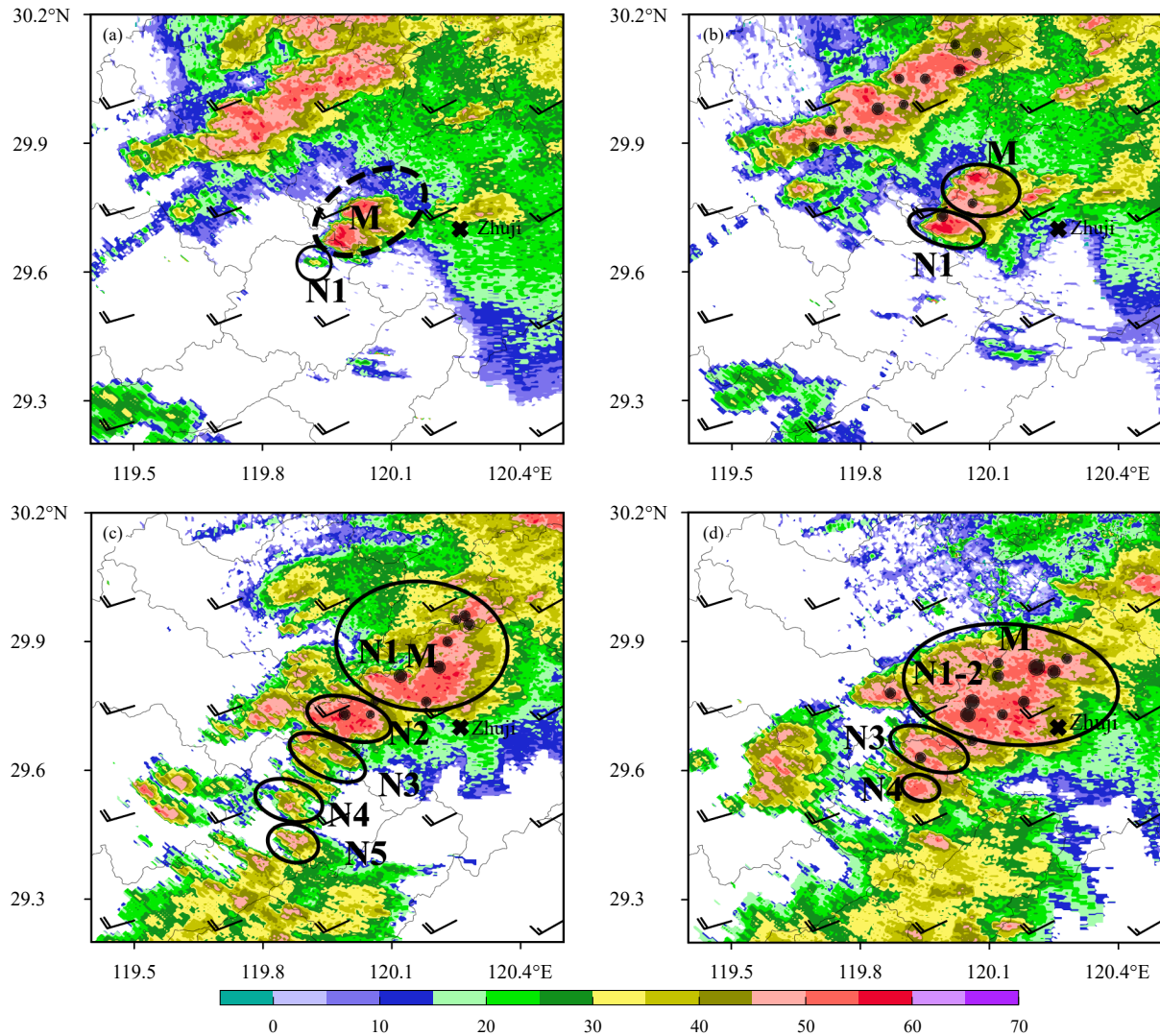


图9 2021年6月9日准静止型后向传播MCS引导气流(风羽)、不同时刻的雷达组合反射率因子(色阶,单位:dBz)及短时强降水站点分布(圆点)(a. 21时12分, b. 21时29分, c. 22时46分, d. 23时27分)

Fig. 9 Radar composite reflectivity (shaded, unit: dBz) and distribution of stations with short-term heavy rainfall (dot) at different times of a typical case of quasi-static type of backward propagation on 9 June 2021 at (a) 21:12 BT, (b) 21:29 BT, (c) 22:46 BT, and (d) 23:27 BT

流有效位能(CAPE)平均为990 J/kg。对于不同类型后向传播型MCS, 转向型MCS的CAPE值较低且变化不大, 中值在500 J/kg左右, 其他3种类型CAPE相对较大, 变化也较大, 中值在1000 J/kg左右, 平流型、准静止型和传播型MCS的CAPE分别呈左偏、正态和右偏分布, 而三者的中位数接近, 显示出CAPE的平均值为传播型>准静止型>平流型(图14a)。

总体来看, 后向传播MCS发生前环境K指数平均为37℃, 接近仇娟娟等(2013)统计的沪苏浙地区极端强降水(100 mm/(3 h))K指数平均值(37.2℃),

但文中筛选强降水的标准为30 mm/h, 也就表明浙江引发短时强降水后向传播型MCS发生的K指数接近极端强降水环境。分别来看, 准静止型MCS的K指数中值较大, 而平流型的较小, 其他两类居中(图14b)。

整层可降水量(PW)统计(图14c), 总体平均值为63 mm, 大于王晓芳(2012)给出的准静止后向建立MCS环境PW(56 mm); 另外, 本研究得到的PW分布的下限为49 mm, 均值和下限均分别大于Tian等(2015)统计中国短时强降水发生时整层可降水量的阈值(56 mm)及下限(28 mm)。一定程度

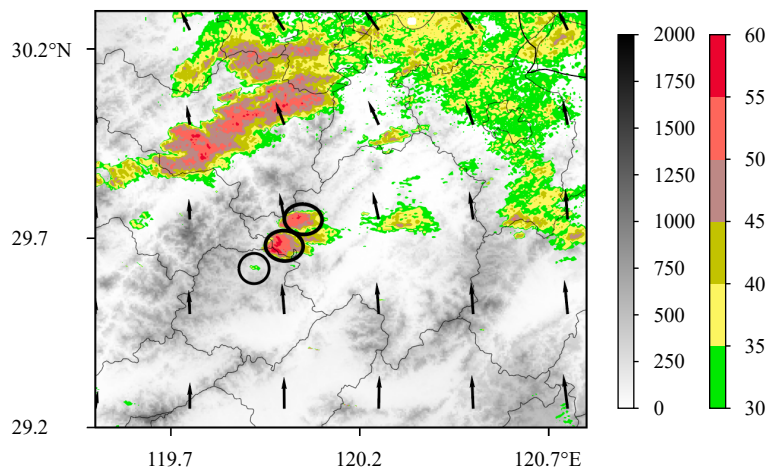


图 10 准静止型后向传播型典型个例发生时 850 hPa 风场(箭矢)及地形(灰阶,单位:m)(黑色圆圈表示迎风坡上不断触发的对流单体(色阶,组合反射率因子>30 dBz))

Fig. 10 Winds at 850 hPa (vector) and terrain height (shaded, unit: m) for a typical case of quasi-static type of backward propagation (black circles represent new cells on the windward slope (color shaded, reflectivity > 30 dBz))

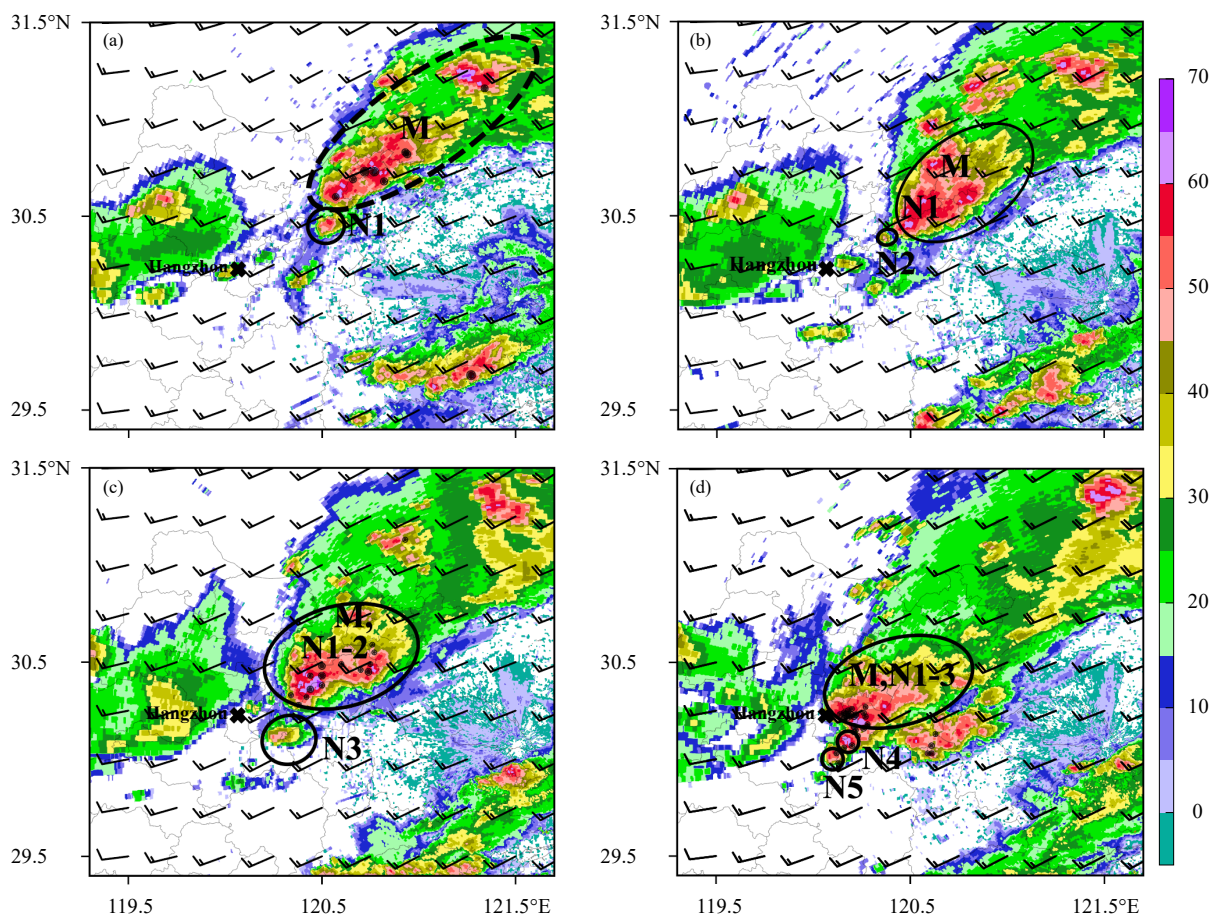


图 11 2019 年 8 月 18 日传播型后向传播 MCS 引导气流(风羽)、不同时刻的雷达组合反射率因子(色阶,单位: dBz)及短时强降水站点分布(圆点)(a. 16 时 30 分, b. 17 时, c. 17 时 30 分, d. 18 时)

Fig. 11 Radar composite reflectivity (shaded, unit: dBz) and distribution of stations with short-term heavy rainfall (dot) at different times of a typical case of propagation type of backward propagation on 18 August 2019 at (a) 16:30 BT, (b) 17:00 BT, (c) 17:30 BT, and (d) 18:00 BT

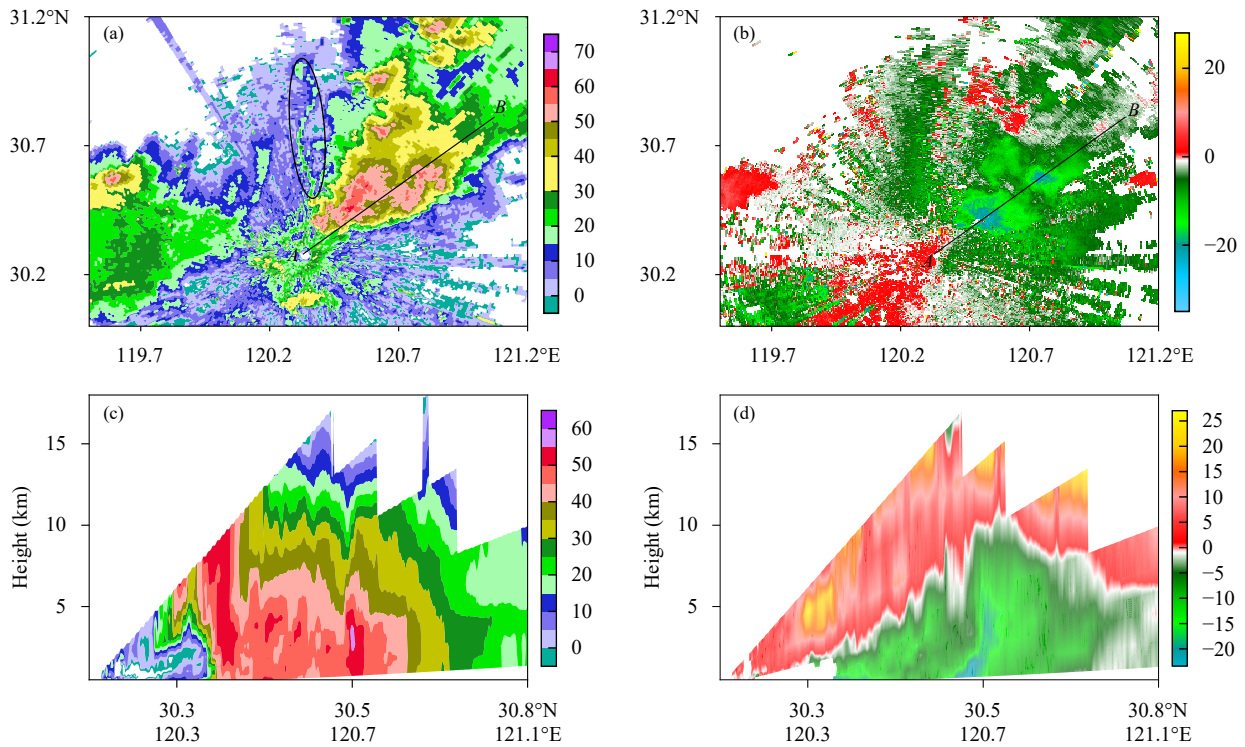


图 12 2019 年 8 月 18 日 17 时 05 分雷达组合反射率因子 (a, 单位: dBZ), 0.5° 仰角径向速度 (b, 单位: m/s) 的平面, 以及沿 AB 的基本反射率因子 (c) 和径向速度 (d) 的剖面

Fig. 12 Radar composite reflectivity (a, unit: dBZ), radial velocity at a 0.5° (b, unit: m/s), profile of basic reflectivity (c), and radial velocity (d) along AB from observations of Hangzhou radar on 18 August 2019 at 17:05 BT

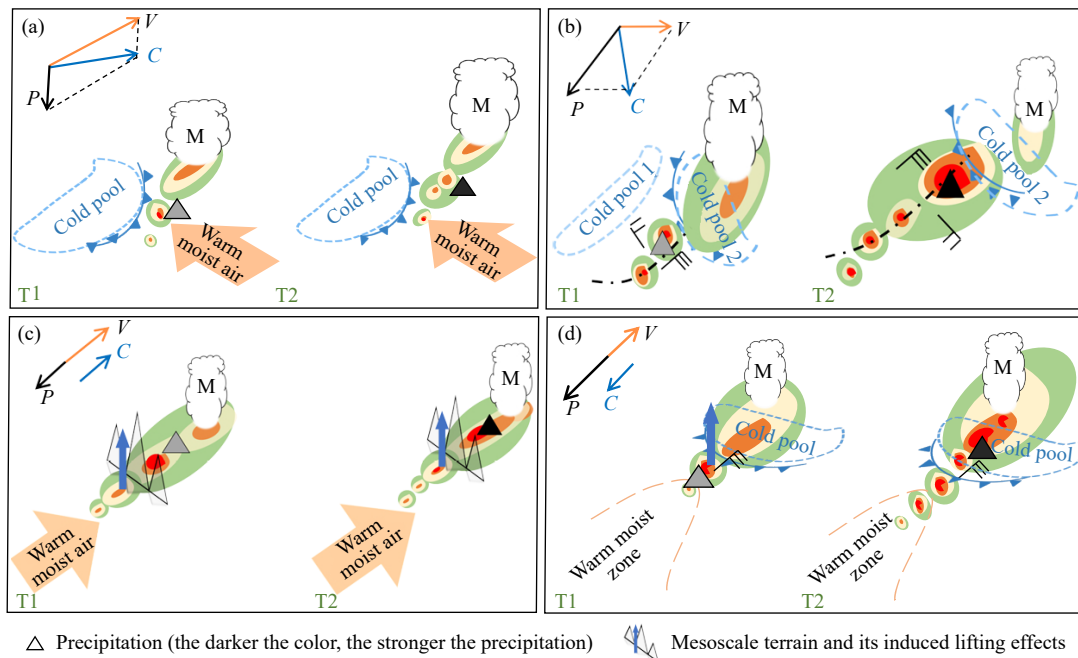


图 13 不同组织类型 MCS 的概念模型 (a. 平流型, b. 转向型, c. 准静止型, d. 传播型; P 代表传播方向、V 代表平流方向、C 代表系统移动方向)

Fig. 13 Conceptual models of MCS of different organizational types: (a) advection type, (b) turning type, (c) quasi-static type, and (d) propagation type (P represents the direction of propagation, V represents the direction of advection, and C represents the direction of system movement)

上反映浙江后向传播型 MCS 的发生环境相对其他地区具备更好的水汽条件。4 种类型的差异和 CAPE 类似,平流型和准静止型 MCS 的 PW 呈现明显的左偏分布,传播型则呈右偏分布,而三者的中位数接近,显示出传播型 MCS 的 PW 平均值大于准静止型和平流型。

抬升指数(LI)总体平均为-2.8℃,这也与仇娟娟等(2013)统计的沪苏浙地区极端强降水 LI 指数平均值(-2.9℃)接近。其中,准静止型 MCS 的 LI 中位数最小,表示大气层结最不稳定(图 14d)。

从以上分析可知,浙江省后向传播 MCS 具有更接近极端短时强降水发生的环境。考虑到再分析资料对于热力参数的刻画存在一定偏差,该结论还需要观测进一步验证,但不同组织类型之间热力因子的相对比较仍具有一定可信度。传播型 MCS 的 CAPE 和 PW 在 4 种类型中是最大的,表明该类型大气中储存的可转化为动能的潜在能量最大,转向型的最小;而准静止型 MCS 的大气层结最不稳定。

### 5.2 动力因子特征

传播型 MCS(紫色虚线)中低层(800—500 hPa)水平风速及其随高度增长的速率最小,其次是转向型,而平流型最大(图 15a)。图 15b 显示,传播型 MCS 的引导气流中值最小(5.5 m/s),其次是转向型(7.3 m/s)和平流型(8.8 m/s),最大的是准静止型(11 m/s)。转向型和传播型的引导气流不但强度较弱,而且变化较小,因此对单体的引导作用较小,传播作用的影响相对较大;而平流型和准静止型的引导气流不但强度较强,而且变化较大,对单体的引导作用相对明显,使得对流单体更容易随引导气流移动。

从 0—6、0—3 km 风垂直切变来看,准静止型和转向型 MCS 风垂直切变较强,其次是平流型,切变最弱的是传播型(图 15c—d),表明低层风垂直切变相对更有利于准静止型后向传播 MCS 的发展,而不利传播型后向传播 MCS 的发展。对准静止型后向传播 MCS,其大气层结是不稳定(图 15d),意味着高层冷、低层暖的热力差异较显著,此时一

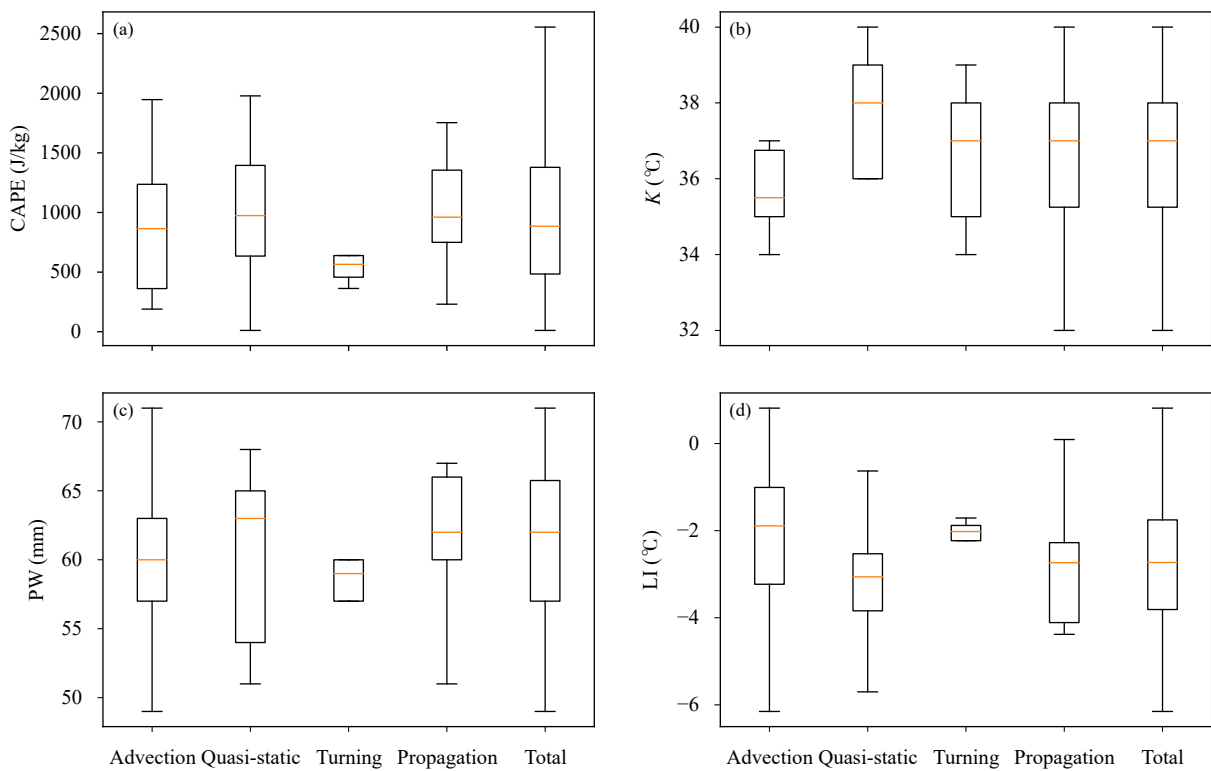


图 14 不同组织类型 MCS 的热力因子特征箱线图 (a. CAPE, b. K 指数, c. 整层可降水量, d. 抬升指数; 从下往上短横线分别代表最小值, 25%、50%、75% 分位线, 最大值, 下同)

Fig. 14 Box plots of thermal factors of MCS of different organizational types (a. CAPE, b. K index, c. PW, d. LI; from bottom to top, horizontal lines indicate the minimum, the 25%, 50%, 75% percentiles and the maximum; the same hereafter)

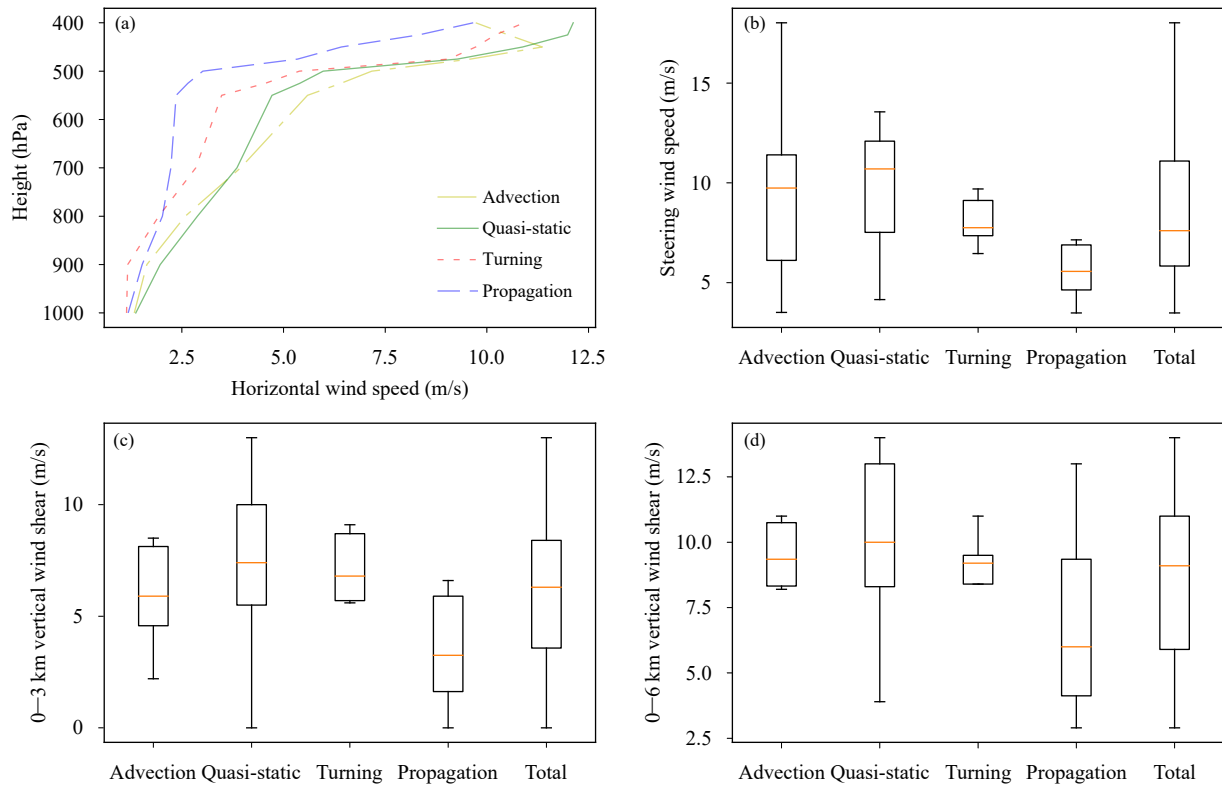


图 15 不同组织类型 MCS 的动力因子特征箱线图 (a. 水平风速的垂直变化, b. 引导风速, c. 0—3 km 风垂直切变, d. 0—6 km 风垂直切变)

Fig. 15 Box plots of dynamic factors of MCS of different organizational types: (a) vertical variation of horizontal wind speed, (b) steering wind speed, (c) 0—3 km vertical wind shear, (d) 0—6 km vertical wind shear

定的风垂直切变有利于维持这种配置。对转向型 MCS, 其引导气流较弱, 后向传播 MCS 单体在触发后不易随引导气流移动, 此时一定的风垂直切变有利于单体沿传播方向合并和组织。对传播型 MCS, 大气中储存的潜在能量较大(图 14a、b), 较强的风垂直切变不利于有限区域热量的维持和集中。

综上, 后向传播型 MCS 常发生在中等能量、高湿、具有一定风垂直切变的热、动力环境中, 但不同组织类型 MCS 的环境因子有一定差异。传播型 MCS 的环境热力特征较明显, 表现为较大的 CAPE 和 PW, 造成的平均最大小时雨强最强, 中位数达 70 mm/h。准静止型 MCS 的环境动力特征较显著, 具有较强的大气层结不稳定性, 较大的引导气流和中低层风垂直切变, 产生的平均最大小时雨强相对最弱, 中位数为 50 mm/h。

## 6 结 论

利用 2015—2021 年暖季的多普勒雷达、气象

站点观测和 ERA5 再分析资料, 对浙江省短时强降水后向传播型 MCS 的时空分布、不同类型组织形态演变及环境热、动力因子特征进行了系统研究, 得到以下主要结论:

(1) 浙江省短时强降水后向传播型 MCS 主要发生在 6、7 月, 且分别以最强小时雨量达 30 和 50 mm 为主。MCS 的形成时间呈显著的单峰型, 主要形成在 11—14 时, 尤其 12—13 时形成的最多; 绝大多数 MCS 的持续时长  $\leq 12$  h, 其中持续 10 h 的数量最多, 极少数 MCS 可持续超过 14 h。后向传播开始的时间呈准双峰型, 分别开始于 14 和 17 时, 较 MCS 生成的主要时间晚 2—3 h。近 90% 的个例最大小时雨量出现时间在后向传播开始后 0—2.5 h, 且呈双峰型分布。

(2) 后向传播型 MCS 的组织演变主要分为平流型、准静止型、转向型和传播型 4 种类型。平流型 MCS 移向由平流方向主导, 阵风锋出流与近地面偏南风辐合触发后向传播; 转向型 MCS 受传播

分量影响较大,移向较平流方向明显偏转,传播单  
体沿辐合线产生;准静止型 MCS 的传播与平流方  
向平行反向,移向指向平流方向,中尺度地形迎风  
坡抬升易触发后向传播;传播型 MCS 传播与平流  
方向平行反向,移向指向传播方向,MCS 层状云强  
下沉气流流出流形成风速辐合触发单体形成后向传  
播。后向传播 MCS 引发的短时强降水主要发生在  
新单体生成或回波合并区域,与传播效应密切相关。

(3)后向传播型 MCS 常发生在中等能量、高  
湿、具有一定风垂直切变的热、动力环境中。其中  
42% 发生在弱天气尺度系统强迫下,且不同组织类  
型 MCS 的环境因子存在一定差异。传播型 MCS  
(占比约 17%)的环境热力特征较明显,表现为较大  
的 CAPE 和 PW,造成的平均最大小时雨强较强,中  
位数达 70 mm/h。准静止型后向传播 MCS 占比最  
高(44.7%),其环境动力特征较显著,具有较强的大  
气层结不稳定、较强的引导气流和中、低层风垂直  
切变,产生的平均最大小时雨强相对较小,中位数  
为 50 mm/h。

未来,将进一步融合更多个例,发展不同类型  
尤其是弱天气尺度强迫下后向传播型 MCS 的潜势  
预报方法,为进一步提升短时强降水业务预报提供  
科学依据。

## 参考文献

- 陈明轩,王迎春. 2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次  
飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 70(3): 371-386. Chen M  
X, Wang Y C. 2012. Numerical simulation study of interactional effects  
of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line  
evolution in North China. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 371-386 (in  
Chinese)
- 陈明轩,王迎春,肖现等. 2013. 北京“7·21”暴雨雨团的发生和传播机理. *气  
象学报*, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013.  
Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy  
rainstorm clusters on 21 July 2012. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 569-592  
(in Chinese)
- 崔新艳,陈明轩,秦睿等. 2021. 对流初生机理的研究进展. *气象*, 47(11):  
1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al. 2021. Research advances  
in the convective initiation mechanisms. *Meteor Mon*, 47(11): 1297-  
1318 (in Chinese)
- 高帆,俞小鼎,尹承美等. 2022. 山东一次浅薄冷空气触发强降水过程的对  
流系统组织形态演变分析. *气象*, 48(8): 993-1006. Gao F, Yu X D,  
Yin C M, et al. 2022. Analysis on the evolution of convective system  
organization in a process of severe precipitation triggered by shallow cold  
air in Shandong. *Meteor Mon*, 48(8): 993-1006 (in Chinese)
- 傅佩玲,胡东明,张羽等. 2018. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征  
及其触发维持机制分析. *气象*, 44(4): 500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang  
Y, et al. 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance  
of record heavy rainfall over Guangzhou region on 7 May 2017. *Meteor  
Mon*, 44(4): 500-510 (in Chinese)
- 侯淑梅,俞小鼎,张少林等. 2015. 山东中西部后向发展雷暴初步研究. *气  
象学报*, 73(5): 819-836. Hou S M, Yu X D, Zhang S L, et al. 2015. A  
preliminary investigation into the back-development thunderstorms in  
midwestern Shandong Province. *Acta Meteor Sinica*, 73(5): 819-836 (in  
Chinese)
- 胡启元,王楠,李萍云等. 2020. 陕西后向传播雷暴统计特征与机理初步研  
究. *高原气象*, 39(5): 973-985. Hu Q Y, Wang N, Li P Y, et al. 2020. A  
preliminary study on statistical characteristics and mechanism of  
backward-propagating thunderstorms in Shaanxi. *Plateau Meteor*, 39(5):  
973-985 (in Chinese)
- 黄小彦,孙继松,刘文婷. 2020. 地形作用下低空急流的演变与强降水对流  
风暴系统的相互作用. *气象学报*, 78(4): 551-567. Huang X Y, Sun J S,  
Liu W T. 2020. The interaction between low-level jet evolution and  
severe convective rainstorms under topographic effect. *Acta Meteor  
Sinica*, 78(4): 551-567 (in Chinese)
- 柯文华,俞小鼎,林伟旺等. 2012. 一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析  
研究. *气象*, 38(5): 552-560. Ke W H, Yu X D, Lin W W, et al. 2012.  
The analysis of the heavy rainstorm caused by "train effect". *Meteor  
Mon*, 38(5): 552-560 (in Chinese)
- 李明娟,郭大梅,冯典等. 2023. 弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因  
分析. *高原气象*, 42(4): 934-948. Li M J, Guo D M, Feng D, et al. 2023.  
Mechanism analysis of an abrupt torrential rain event under weak  
synoptic forcing. *Plateau Meteor*, 42(4): 934-948 (in Chinese)
- 李琴,邓承之. 2021. 重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分  
析. *气象*, 47(9): 1073-1085. Li Q, Deng C Z. 2021. Analysis of a short-  
time extreme precipitation event in Chongqing under weak synoptic  
forcing. *Meteor Mon*, 47(9): 1073-1085 (in Chinese)
- 仇娟娟,何立富. 2013. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特  
征对比分析. *气象*, 39(5): 577-584. Qiu J J, He L F. 2013. Comparative  
analysis on weather characteristics and convective parameters of  
torrential rain and hail in Yangtze river delta. *Meteor Mon*, 39(5): 577-  
584 (in Chinese)
- 盛杰,郑永光,沈新勇. 2020. 华北两类产生极端强天气的线状对流系统分  
布特征与环境条件. *气象学报*, 78(6): 877-898. Sheng J, Zheng Y G,  
Shen X Y. 2020. Climatology and environmental conditions of two types  
of quasi-linear convective systems with extremely intense weather in  
North China. *Acta Meteor Sinica*, 78(6): 877-898 (in Chinese)
- 苏爱芳,席乐,吕晓娜等. 2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析.  
*气象*, 48(5): 556-570. Su A F, Xi L, Lü X N, et al. 2022. Analysis on  
characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern  
Henan. *Meteor Mon*, 48(5): 556-570 (in Chinese)

- 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. *大气科学*, 37(1): 137-148. Sun J S, He N, Guo R, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms. *Chinese J Atmos Sci*, 37(1): 137-148 (in Chinese)
- 孙密娜, 王秀明, 胡玲等. 2018. 华北一次暖区暴雨雷暴触发及传播机制研究. *气象*, 44(10): 1255-1266. Sun M N, Wang X M, Hu L, et al. 2018. Study on initiation and propagation mechanism of a warm-sector torrential rain in North China. *Meteor Mon*, 44(10): 1255-1266 (in Chinese)
- 孙敏, 戴建华, 袁招洪等. 2015. 双多普勒雷达风场反演对一次后向传播雷暴过程的分析. *气象学报*, 73(2): 247-262. Sun M, Dai J H, Yuan Z H, et al. 2015. An analysis of a back-propagating thunderstorm using the three-dimensional wind fields retrieved by the dual-Doppler radar data. *Acta Meteor Sinica*, 73(2): 247-262 (in Chinese)
- 田付友, 郑永光, 张小玲等. 2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制. *气象*, 44(4): 469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017. *Meteor Mon*, 44(4): 469-484 (in Chinese)
- 王珏, 张家国, 吴涛等. 2019. 湖北省极端短时强降水 MCS 类型及特征分析. *气象*, 45(7): 931-944. Wang J, Zhang J G, Wu T, et al. 2019. MCS classification and characteristic analyses of extreme short-time severe rainfall in Hubei province. *Meteor Mon*, 45(7): 931-944 (in Chinese)
- 王晓芳. 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 II: 环境特征. *气象学报*, 70(5): 924-935. Wang X F. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part II: Environmental characteristics. *Acta Meteor Sinica*, 70(5): 924-935 (in Chinese)
- 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. *气象学报*, 70(5): 909-923. Wang X F, Cui C G. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: Organization mode features. *Acta Meteor Sinica*, 70(5): 909-923 (in Chinese)
- 武威, 顾佳佳. 2021. 一次极端降水的中尺度雨团分析. *气象科学*, 41(1): 108-118. Wu W, Gu J J. 2021. Analysis of the mesoscale rain clusters in the extremely heavy precipitation. *J Meteor Sci*, 41(1): 108-118 (in Chinese)
- 徐珺, 杨舒楠, 孙军等. 2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨. *气象*, 40(12): 1455-1463. Xu J, Yang S N, Sun J, et al. 2014. Discussion on the formation of a warm sector torrential rain case in North China. *Meteor Mon*, 40(12): 1455-1463 (in Chinese)
- 俞小鼎. 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析. *气象*, 38(11): 1313-1329. Yu X D. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012. *Meteor Mon*, 38(11): 1313-1329 (in Chinese)
- 俞小鼎. 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法. *暴雨灾害*, 32(3): 202-209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain. *Torrential Rain Disaster*, 32(3): 202-209 (in Chinese)
- 张家国, 周金莲, 谌伟等. 2015. 大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征. *气象学报*, 73(2): 291-304. Zhang J G, Zhou J L, Chen W, et al. 2015. The structure and propagation characteristics of the extreme-rain-producing MCS on the west side of Dabie mountain. *Acta Meteor Sinica*, 73(2): 291-304 (in Chinese)
- 赵宇, 裴昌春, 杨成芳. 2017. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统触发和组织化的观测分析. *气象学报*, 75(5): 700-716. Zhao Y, Pei C C, Yang C F. 2017. Observational analysis of initiation and organization of meso-scale convective systems in a heavy rainfall event associated with Meiyu front. *Acta Meteor Sinica*, 75(5): 700-716 (in Chinese)
- Bluestein H B, Jain M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J Atmos Sci*, 42(16): 1711-1732
- Corfidi S F, Meritt J H, Fritsch J M. 1996. Predicting the movement of mesoscale convective complexes. *Wea Forecasting*, 11(1): 41-46
- Moore J T, Pappas C H, Glass F H. 1993. Propagation characteristics of mesoscale convective systems//17th Conference on Severe Local Storms. St. Louis. Amer Meteor Soc: 538-541
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3413-3436
- Schumacher R S, Johnson R H. 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 133(4): 961-976
- Schumacher R S, Johnson R H. 2006. Characteristics of U. S. extreme rain events during 1999-2003. *Wea Forecasting*, 21(1): 69-85
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. *J Meteor Res*, 29(3): 370-384
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China. *Wea Forecasting*, 28(5): 1081-1098