暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

华北夏季中尺度对流系统西行过程的特征分析

张立霞 王景灿 李江波 梁阔 焦鑫 李艳

Analysis of characteristics of mesoscale convective systems westward propagation process during summer in North China

ZHANG Lixia，WANG Jingcan，LI Jiangbo，LIANG Kuo，JIAO Xinzhe，LI Yan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-199

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

一次华北暖区暴雨的边界层环境条件分析

Analysis of boundary layer environment conditions during a warm-sector rainstorm in North China

暴雨灾害. 2025, 44(2): 156-166 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-014

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析

Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains

暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

2021年秋季华北降水异常偏多的成因分析

Possible causes for the more precipitation over North China in autumn 2021

暴雨灾害. 2025, 44(1): 52-59 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-101

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析

Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin

暴雨灾害. 2023, 42(1): 24-36 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024

干冷空气入侵台风“海棠”残余低压引发的华北地区大暴雨分析

Analysis of the heavy rain in North China for dry cold air intruding into typhoon "Begonia" depression

暴雨灾害. 2020, 39(3): 241-249 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.004

2020年7月4—10日长江流域极端强降雨过程MCS活动特征分析

Analysis of MCS activity characteristics during extreme heavy rainfall in the Yangtze River Basin from July 4 to 10, 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 593-602 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.007

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张立霞,王景灿,李江波,等.2025.华北夏季中尺度对流系统西行过程的特征分析[J].暴雨灾害,44(4):535−542. ZHANG Lixia, WANG Jingcan, LI Jiangbo, et al. 2025. Analysis of characteristics of mesoscale convective systems westward propagation process during summer in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):535−542 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−199

华北夏季中尺度对流系统西行过程的特征分析

张立霞[1], 王景灿[2], 李江波[3], 梁阔[1], 焦鑫喆[1], 李艳[2]

(1. 河北省石家庄市气象局, 石家庄 050081; 2. 南京信息工程大学, 南京 210044; 3. 河北省气象台, 石家庄 050021)

摘　要: 华北地区中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS) 西行过程常伴随暴雨等强对流天气, 往往给当地带来严重气象灾害。为了解 MCS 西行的基本特征, 利用卫星红外亮温数据和逐小时融合降水产品 (combined precipitation, COMB), 统计分析了华北地区 2008—2018 年夏季 222 个 MCS 西行过程的时空演变特征。结果表明: (1) MCS 西行过程按降水强度可以分为一般强度降水 MCS 过程和短时强降水 MCS 过程, 所有 MCS 西行的主要移动方向为西—西南向, 频数从午后开始显著增长, 峰值出现在 17—18 时 (北京时, 下同), 08 时最低。(2) 短时强降水 MCS 过程的活跃区域主要集中在河北南部、河南北部以及山东的中西部地区, 而一般强度降水 MCS 过程的活跃区域较为分散。(3) 短时强降水 MCS 过程的云顶亮温较低, 云顶面积较大, 降水率平均值为 34 mm·h^{-1}, 累积降水量的大值区位于太行山山脉东部的陡峭迎风坡、泰山山脉, 以及山脉与平原的过渡地带; 一般强度降水过程的云顶亮温较高, 云顶面积较小, 平均降水强度为 8.7 mm·h^{-1}, 大值中心位于华北西部吕梁山附近。本文针对 MCS 西行过程的研究是对 MCS 理论的补充, 能够为华北暴雨的预警预报和防灾减灾提供理论参考。

关键词: 华北地区; 中尺度对流系统; 西行过程; 降水

中图法分类号: P458.2　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−199

Analysis of characteristics of mesoscale convective systems westward propagation process during summer in North China

ZHANG Lixia[1], WANG Jingcan[2], LI Jiangbo[3], LIANG Kuo[1], JIAO Xinzhe[1], LI Yan[2]

(1. *Shijiazhuang Meteorological Bureau of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050081; 2. *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044; 3. *Hebei Meteorological Observatory*, *Shijiazhuang* 050081)

Abstract: In North China, the westward movement of summer mesoscale convective systems (MCS) is often accompanied by severe convective weather such as heavy rainfall, frequently causing significant meteorological disasters. To understand the basic characteristics of the westward-moving MCS, the infrared brightness temperature data and the hourly combined precipitation products (COMB) were used to analyze the statistical characteristics of the westward-moving MCS during the summer season from June to August during 2008-2018 in North China. The results are as follows. (1) The westward-moving MCSs are classified into moderate-intensity precipitation and short-duration heavy precipitation according to precipitation intensity. The main moving direction of MCS is west-southwest. The frequency begins to increase significantly in the afternoon, peaks around 17:00-18:00 (BT) in the evening, and has the lowest occurrence probability at 08:00 BT. (2) A comparative analysis reveals that the active areas of short-duration heavy precipitation MCS processes are mainly concentrated in southern Hebei, northern Henan, and the central and western regions of Shandong; while the active areas of moderate-intensity precipitation MCS processes are relatively scattered. (3) The cloud-top brightness temperature of short-duration heavy precipitation MCS processes is relatively low, with a large cloud-top area and an average precipitation rate of 34 mm·h^{-1}. The areas with large cumulative precipitation are located in the steep windward slopes on the eastern side of the Taihang Mountains, the Taishan Mountains, and the transition zones between mountains and plains. The cloud-top brightness temperature of moderate-intensity precipitation processes is relatively high, with a small cloud-top area, and an average precipitation intensity is 8.7 mm·h^{-1}. The large-value center is located near the Lvliang Mountains in western North China, due to the relatively high frequency of MCS moving westward. This is a specialized study on westward-moving MCS, which serves as a valuable supplement to MCS theory and provides a theoretical

收稿日期: 2024−11−05; **定稿日期**: 2025−04−30

资助项目: 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-012); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J025)

第一作者: 张立霞, 主要从事中短期、短临天气预报技术研究。E-mail: 258703457@qq.com

通信作者: 李江波, 主要从事灾害性天气预报预警技术研究。E-mail: ljbwave@aliyun.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

reference for early warning, forecasting, and disaster prevention related to heavy rainfall in North China.

Key words: North China; mesoscale convective system; westward propagation; precipitation

引　言

华北地区是我国政治、经济、文化中心和主要粮食生产基地，拥有京津冀城市群，是北方经济发展较好、人口密度最大的地区。华北地处中纬度西风带，东临渤海、黄海，南靠秦岭淮河，西邻黄土高原，北至蒙古高原，区域内地形复杂多变，受多尺度环流系统影响，强降水等灾害性天气多发，而中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS) 是造成灾害性天气的重要系统 (郭建平等, 2023; 罗菊英等, 2023; 竹利等, 2024)，常对当地人民生产、生活带来严重影响。因此研究 MCS 在华北地区的活动特征，分析其发生发展机制，对于提高灾害性天气预报准确率，减轻自然灾害对社会经济的影响具有重要的理论价值和现实意义。

MCS 泛指水平尺度为 10~2 000 km 左右的具有旺盛对流运动的天气系统 (吴雨飞, 2023)。伴随气象数据分析水平的提高以及相关领域的发展，学者们对于 MCS 在时间和空间尺度上的分布特征以及活动变化更加关注 (Long et al., 2023)。Feng 等 (2019) 对美国落基山脉东部 MCS 及其大尺度环境的时空变化特征进行分析，发现生命周期长的强 MCS 所引起降水占大平原夏季降水 50% 以上，且具有季节周期性，在 5—6 月达到峰值。春季和秋季 MCS 通常在强斜压性的天气强迫以及有利的热力学环境条件情况下发生，其降水具有对流性强、对流面积大、层状云的降水量大等特点。夏季 MCS 通常在弱斜压性的天气强迫情况下发生，主要与低空急流所带来的暖湿气流有关，夏季的 MCS 降水对流性最强，对流面积最大，层状云的降水量较小。

我国独特的地理环境和季风气候决定了 MCS 及其降水的特殊分布。我国及周边地区存在三个 MCS 高频区，呈现出三个东西向的带状分布 (郑永光等, 2008)。普查 2008—2010 年夏季我国中东部地区 (110°—124°E, 27°—40°N) MCS 时空变化特征表明，大部分 MCS 移动路径为自西向东，少数为自南向北或自北向南的移动路径，自东向西的路径极少 (曾波等, 2013)。对青藏高原地区的 MCS 进行统计发现，65% 的 MCS 生成后向东传播、23% 向南传播、12% 向西传播，夏季 MCS 云顶高度最高，降水最强 (Hu et al., 2016)。分析西南山区 MCS 发现，强扰动经向环流、显著正异常的水汽通量辐合和水汽条件以及对流层低层强风垂直切变是 MCS 发生的有利环境条件，大部分 MCS 向东、东北、南传播，约 15% MCS 向西传播 (王婧羽等, 2022; 王敏等, 2024)。对 2005—2010 年华南地区夏季中尺度对流进行统计分析表明，MCS 主要受低涡、西风槽和低空急流等系统影响，以向东移动为主，占总数 40%，向西和向南分别占 25% 和 22% (李佳颖, 2011)。分析夏季我国江淮地区 MCS 特征发现，影响江淮地区的 MCS 多生成在陆地上，海上个例很少，东、东北和东南 3 个主要移向共占 73.1%，移动 1~5 个经纬距的 MCS 所占比例最大，为 64.6% (刘瑞翔等, 2015)。南海地区 MCS 在华南后汛期 (7—9 月)，受东风带影响，以西移为主 (王东海等, 2022)。

华北地区受复杂地形和多尺度环流系统的影响，降水和对流系统特征呈现较大的时空差异。初夏 (5—6 月) 受中纬度西风带冷涡和冷气团影响，常在太行山脉西北区域产生对流，在夏季冷涡背景下，冷锋东移导致在河北触发较强的 MCS 发展 (陈涛等, 2013)；盛夏 (7—8 月)，在东亚季风环流北进和西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 北抬背景下，大量暖湿气流进入华北地区，华北东南平原区域对流增多，且多伴随强降水过程 (郑永光等, 2007)。2021 年 7 月 18—22 日受 MCS 西行影响，华北出现区域性大暴雨 (苏爱芳等, 2021)。前人研究指出 MCS 西行过程是我国 MCS 演变的重要特征之一，并且西行过程中 MCS 可能伴随有暴雨等湿对流过程，但由于西行过程系统演变复杂，强降水的落区和量级等预报难度较大 (郭建平等, 2023)。例如，2021 年 7 月 21 日郑州极端暴雨天气过程中，MCS 在郑州经历了长达 6 h 的“停滞和西行”最终导致郑州出现 201.9 mm·s^{-1} 的破纪录降水强度 (Wei et al., 2023)。目前我国华北 MCS 研究主要关注 MCS 整个过程发展以及大致向东移动的对流及降水的时空演变，对于向西移动过程对流和降水特征未进行系统的研究。因此，本文以 2008—2018 年夏季 (6—8 月) 华北地区 MCS 西行过程为研究对象，统计华北 MCS 西行过程中的显著性特征，以期为华北的降水预报、防灾减灾等提供理论依据。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文使用的资料包括：(1) 2008—2018 年 6—8 月中国东部 (95°—135°E, 15°—45°N) 的 MCS 红外亮温

数据。该数据由 Cheng 等 (2022) 利用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的红外亮温数据, 结合混合跟踪等算法加工而成, 时间分辨率 30 min, 水平分辨率 4 km。(2) 2008—2018 年 6—8 月全国融合降水产品 (combined precipitation, COMB) 来自国家气象信息中心, COMB 降水产品由中国 3 万多个自动站观测资料与 CMORPH 卫星降水数据融合而成, 水平分辨率 0.1°×0.1°, 时间分辨率 1 h。

1.2 研究方法

1.2.1 MCS 西行过程的识别与定义

为确保研究区域 (110°—120°E, 35°—43°N) MCS 的信息完整性, MCS 西行的识别范围较研究区域扩大 5°, 即识别区域为 (105°—125°E, 30°—48°N)。本文利用 MCS 重心的经度变化来定义向西移动, MCS 西行也包含部分西部异常增强的 MCS 过程。识别规则为: (1) 研究区域内云顶红外亮温低于−44 ℃ 的最大覆盖范围达到区域总面积的至少 0.3% (即 182 个格点); (2) MCS 重心连续西行的持续时间需要大于等于 1.5 h。利用以上规则识别获得 222 个 MCS 西行过程, 共分布在 158 个 MCS 的演变过程中 (图 1)。本文定义 1 个 MCS 西行过程为 1 个 MCS 事件。

MCS 的重心位置 ($X_{CG}(i)$, $Y_{CG}(i)$)、亮温面积 (A)、持续时间 (T) 的计算公式 (Meng et al., 2020) 为

$$X_{CG}(i)=\sum_{j=1}^{N}X_jT_b(j)\Big/\sum_{j=1}^{N}T_b(j) \tag{1}$$

$$Y_{CG}(i)=\sum_{j=1}^{N}Y_jT_b(j)\Big/\sum_{j=1}^{N}T_b(j) \tag{2}$$

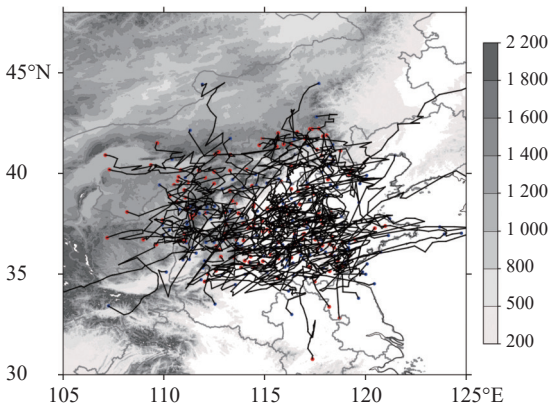


图 1 2008—2018 年 6—8 月华北 158 个具有西行特征的 MCS 移动路径分布和海拔高度 (阴影, 单位: m) (红点为生成位置, 蓝点为消亡位置, 下同)

Fig. 1 Distribution of the movement paths of 158 MCSs with westward-moving characteristics in North China from June to August during 2008-2018 and terrain elevation (shading, unit: m) (Red dots indicate genesis locations, blue dots indicate dissipation locations)

$$A=N\times 4^2 \tag{3}$$

$$T=n\times 0.5 \tag{4}$$

式中, $X_{CG}(i)$ 和 $Y_{CG}(i)$ 分别表示第 i 个 MCS 重心的经纬度, N 为 MCS 识别区域内云顶亮温 (T_b) ≤ −44 ℃ 的格点数, X_j, Y_j, $T_b(j)$分别表示第j个格点的经度值、纬度值和 T_b 值, n为识别的 MCS 个数,

1.2.2 MCS 西行过程降水量

根据 MCS 云顶覆盖范围, 选取该区域的降水量作为 MCS 的降水量分布, 此方法在 MCS 的研究被普遍应用 (Chen et al., 2012; Meng et al., 2020)。用线性插值方法将 COMB 降水数据插值到 4 km × 4 km 网格上, 将$t-\frac{1}{2}$时的 MCS 识别区域近似为$t-1$至t时降水量范围, 此区域内$t-1$至t时的降水分布即为该时段此次 MCS 对应的降水分布。由此得到 222 个具有西行特征的 MCS 过程对应的降水量分布。

为了深入分析 MCS 西行过程的降水强度差异, 参照短时强降水的定义标准 (Zhang and Zhai, 2011; Zhang et al., 2020), 将 222 个 MCS 西行过程依据降水强度分为两类: 降水强度<20 mm·h^{-1} 的过程定义为一般强度降水 MCS 过程, 共有 112 个; ≥20 mm·h^{-1} 过程定义为短时强降水 MCS 过程, 共有 110 个。

2 华北夏季 MCS 西行过程概述

2008—2018 年夏季, 华北 MCS 的西行方向主要是西南向, 西北向移动较少 (图 2a), 并且 MCS 向西过程主要集中在太行山东部平原地区, 少数分布在西北山区以及山坡上。MCS 向西过程所引起降水在山区主要分布在华北西部吕梁山附近, 呈现出降水量较少、降水频数 (即能够产生降水的 MCS 个数) 较低、MCS 频数较少的特征; 而在太行山东坡、太行山与平原过渡地带, 以及泰山地区呈现出降水总量较大的特征 (图 2b)。其中, 3 个降水量大值中心分别位于石家庄附近的喇叭口地形、太行山南部地形陡峭的东坡以及泰山山顶附近。降水量的大值分别对应 MCS 的高频区以及降水频数的大值区 (图 2c、d)。可见, MCS 西行过程的活跃区及引起的降水增强区域与地形的关系非常密切 (吴雨飞, 2023)。

3 两类 MCS 西行过程特征分析

3.1 移动特征

图 3 和图 4 分别是两类 MCS 西行过程的频数和路径分布图, 可以看出一般强度降水 MCS 过程与短时强降水 MCS 过程存在较大差异。一般强度降水的 MCS 主要分布在河北、河南和山西的部分地区,

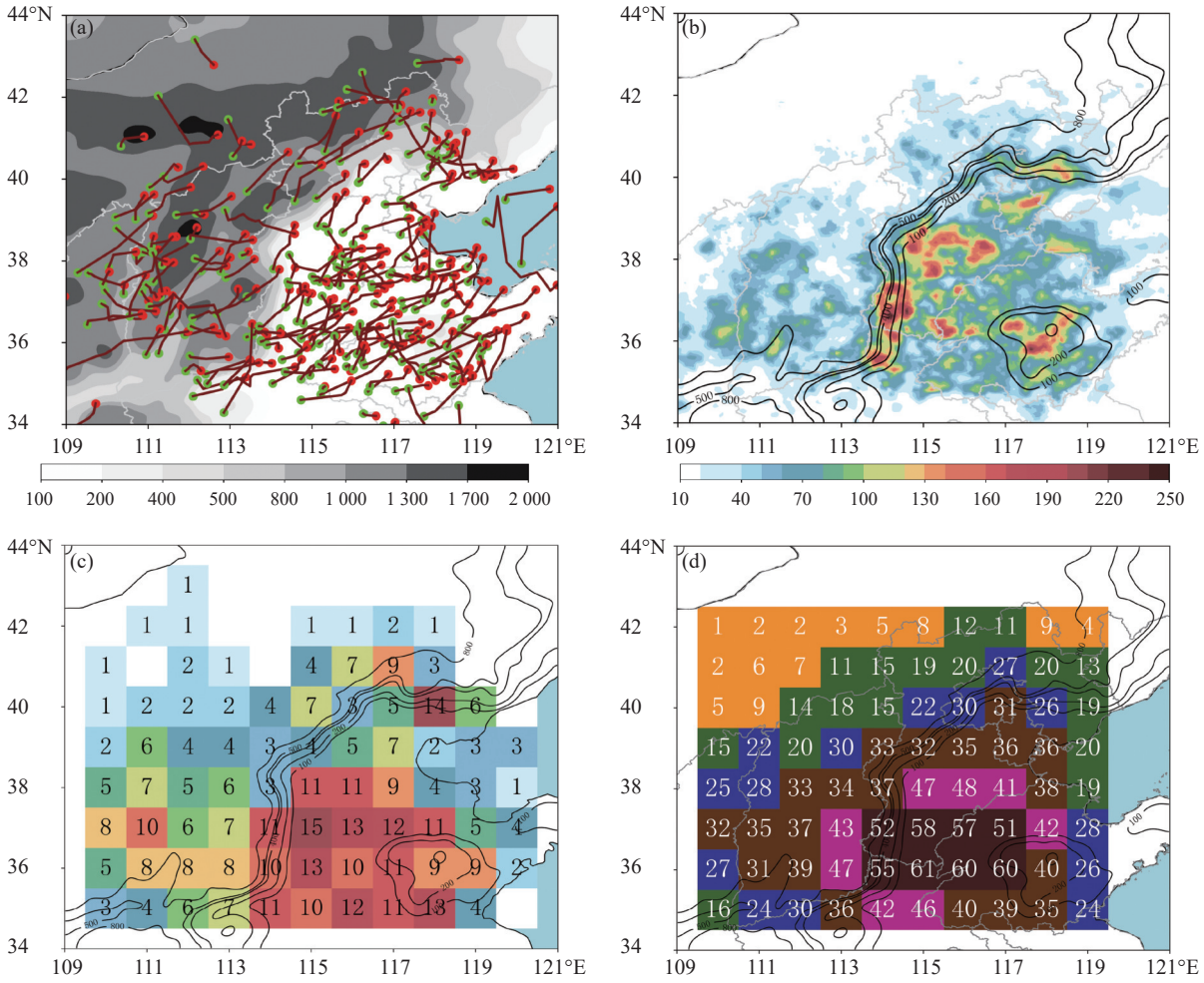


图 2 2008—2018 年 6—8 月华北地区 222 个 MCS 西行过程移动路径和海拔高度 (阴影, 单位: m) (a, 红色圆点表示开始位置, 绿色圆点表示结束位置, 红色实线表示移动路径, 下同)、222 个 MCS 西行过程累积降水量 (b, 填色, 单位: mm, 等值线表示海拔高度, 下同)、MCS 频数 (c, 彩色方格和数字为 1°×1°经纬格距内数量, 下同) 和降水频数 (d) 分布

Fig. 2 Distribution of (a) movement paths and elevation (shading, unit: m) (red dots indicate initiation locations, green dots indicate termination locations, red solid lines represent movement paths,), (b) accumulated precipitation (shading, unit: mm; contours indicate elevation), (c) MCS frequency (colored grids and numbers denote counts within 1°×1° latitude-longitude grids, the same hereinafter), and (d) precipitation frequency of 222 westward-moving MCS processes from June to August during 2008-2018 in North China

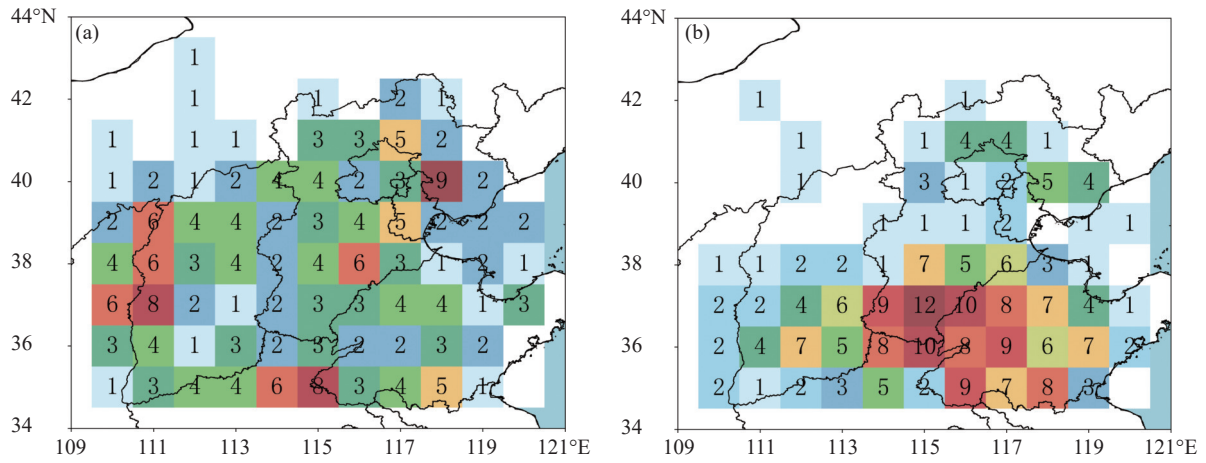


图 3 2008—2018 年 6—8 月华北地区一般强度降水 (a) 和短时强降水 (b) MCS 西行过程频数分布

Fig. 3 Frequency distribution of westward-moving MCS processes associated with (a) moderate-intensity precipitation and (b) short-duration heavy precipitation from June to August during 2008-2018 in North China

其中河北承德南部、山西中西部和河南开封东北部发生相对较多。相比之下, 短时强降水类西行过程则呈现出更为明显的集中分布特征, 主要集中在河北南部、河南北部和山东的中西部地区, 呈东—西向分布于华北南部, 与郑永光等 (2008) 的研究结果一致。其中, 石家庄南部、郑州北部是发生频率最高的地区, 最高可达 10~12 次, 表明这一地区是华北地区短时强降水事件的高发区。

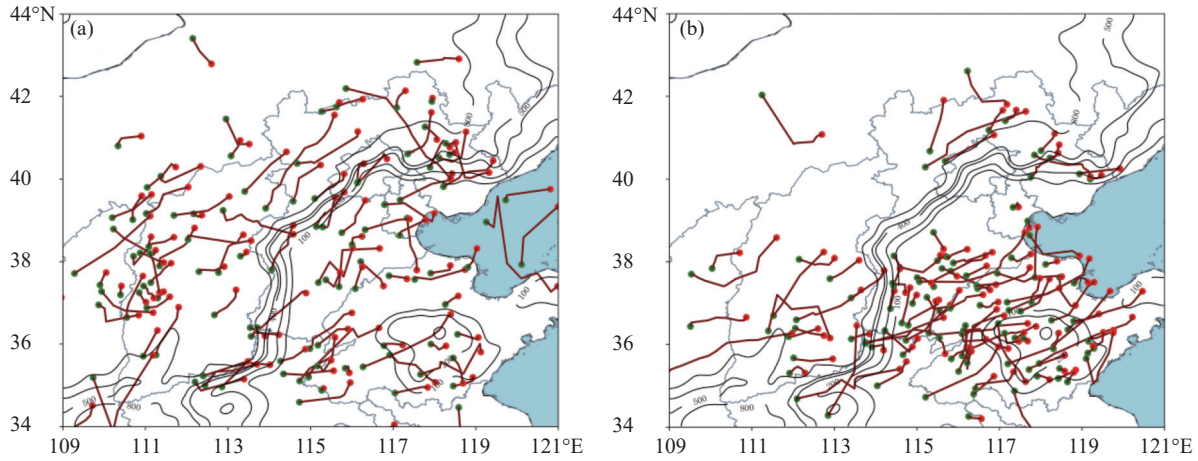


图 4 2008—2018 年 6—8 月华北地区一般强度降水 (a) 和短时强降水 (b) MCS 西行过程的路径分布

Fig. 4 Track distribution of westward-moving MCSs associated with (a) moderate-intensity precipitation and (b) short-duration heavy precipitation in North China from June to August during 2008-2018

图 5 是华北地区两类 MCS 西行过程的西行移动速度分布图。一般强度降水过程移动普遍比较缓慢, 平均速度为 47.3 km·h^{-1}。短时强降水过程虽然大多移动也较为缓慢, 但存在一部分移动速度十分迅速的情况, 最高速度达到了 141 km·h^{-1}。这种快速移动可能与强降水过程中大气层结的不稳定性增强、对流活动更加旺盛有关。

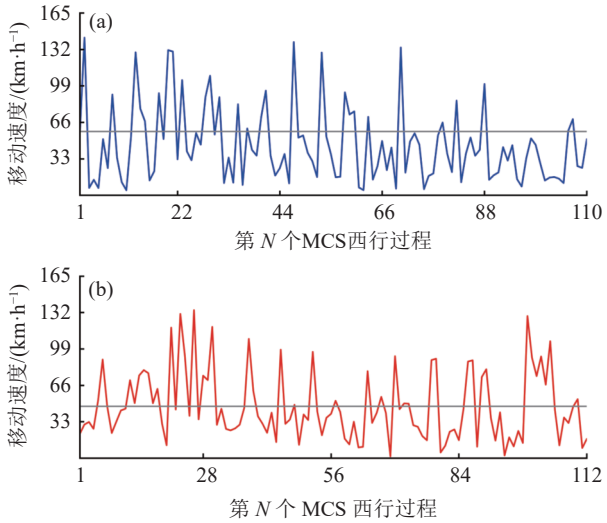


图 5 2008—2018 年 6—8 月华北地区短时强降水 (a) 和一般强度降水 (b) MCS 西行过程的移动速度 (横线表示平均移动速度, N 为西行 MCS 序号, 下同)

Fig. 5 Movement speeds of westward-moving MCSs associated with (a) short-duration heavy precipitation and (b) moderate-intensity precipitation from June to August during 2008-2018 in North China (Horizontal lines in the plot indicate average speeds, N indicates the number of MCS)

3.2 云团参数特征

最低亮温和亮温面积能够反映出对流云团的发生发展状况, 两类过程的最低亮温和亮温面积如图 6 所示。短时强降水过程平均最低亮温为−66 ℃, 最低亮温值为−81 ℃, 对流发展最旺盛时期出现在 2010 年 8 月初和 2017 年 7 月末, 意味着这段时间内对流发展较强, 云顶高度较高; 一般强度降水过程的平均最低亮温为−58 ℃, 最低亮温值为−78 ℃, 对流发展最旺盛时期出现在 2011 年 8 月中旬。

短时强降水过程的亮温平均面积为 2.5×10^5 km^2, 亮温面积最大值为 12.6×10^5 km^2, 出现在 2012 年 7 月 21 日; 最小值为 0.1×10^5 km^2, 出现在 2017 年 8 月初, 这可能是由于处于 MCS 发展初期或消散阶段导致的较小影响范围。一般强度降水过程亮温平均面积为 1.5×10^5 km^2, 亮温面积最大值为 8.1×10^5 km^2, 出现在 2008 年 6 月中旬; 最小值为 0.06×10^5 km^2, 出现在 2018 年 8 月中旬。

3.3 降水特征

图 7 给出 2008—2018 年夏季两类 MCS 西行过程的累积降水空间分布。一般强度降水过程大值中心位于华北西部吕梁山附近, 约 70 mm 左右。该地区累积降水量较大是因为受到 MCS 西行影响的频次较多, 降水过程较多所致 (图 3a)。短时强降水过程降水分布情况与 MCS 西行总累积降水量的分布特征一致 (图 2b), 大值区均表现为太行山山脉东部的陡峭迎风坡、泰山山脉, 以及山脉与平原的过渡地带, 累积降水量在 220 mm 左右。

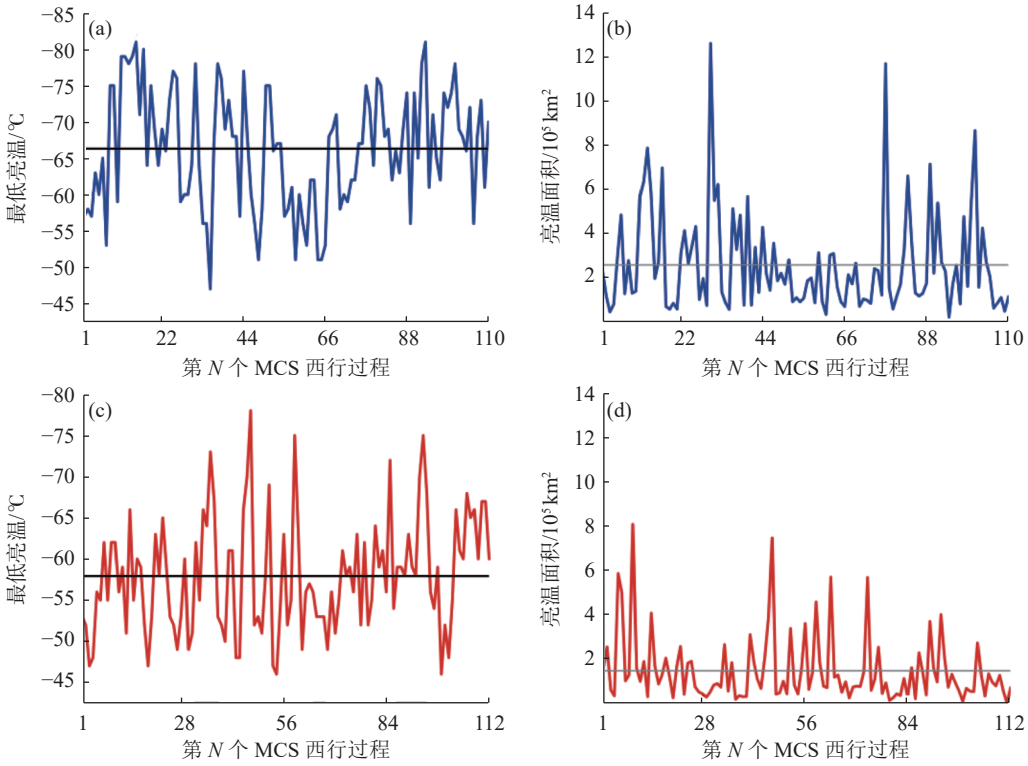


图 6 2008—2018 年 6—8 月华北地区短时强降水 (a, b) 和一般强度降水 (c, d) 过程最低亮温和亮温面积 (横线表示平均值)

Fig. 6 Minimum brightness temperature and cold cloud shield area of westward-moving MCSs associated with (a, b) short-duration heavy precipitation and (c, d) moderate-intensity precipitation from June to August during 2008-2018 (Horizontal lines in the plot indicate average values)

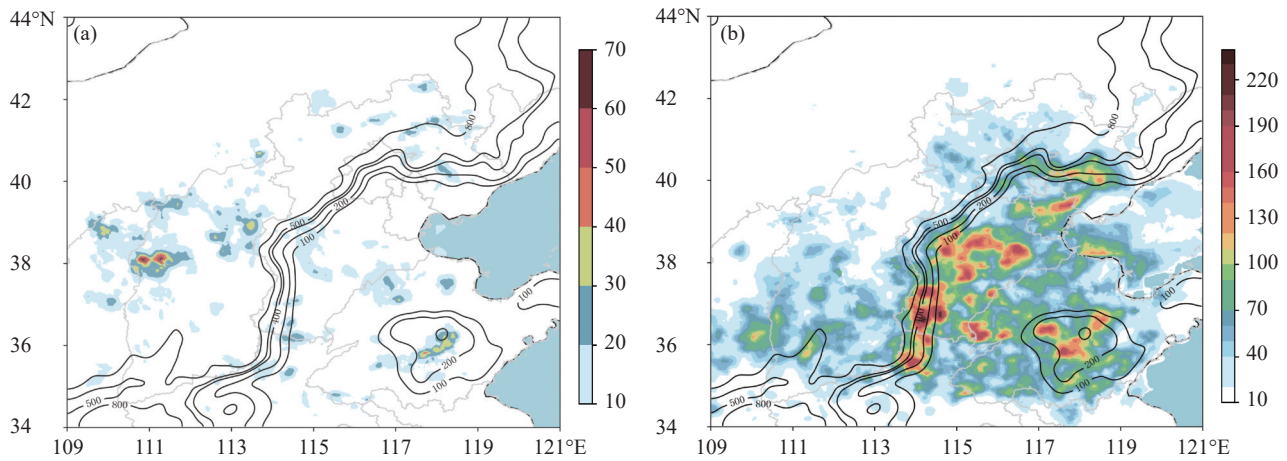


图 7 2008—2018 年 6—8 月一般强度降水 (a) 和短时强降水 (b) MCS 西行过程的累积降水量 (阴影, 单位: mm)

Fig. 7 Accumulated precipitation (shaded, unit: mm) from westward-propagating MCSs associated with (a) moderate-intensity and (b) short-duration heavy precipitation from June to August during 2008-2018

3.4 降水特征

为分析西行过程的降水强度, 图 8 给出华北地区夏季两类 MCS 西行过程最大降水率分布。国家气象局将短时强降水分为四个等级: 较弱短时强降水 (20~30 mm·h^{-1})、中等强度短时强降水 (30~50 mm·h^{-1})、较强短时强降水 (50~80 mm·h^{-1})、强短时强降水 (≥80 mm·h^{-1})。根据统计结果, 短时强降水过程的最大降水率平均值为 34 mm·h^{-1}, 1 次强短时强降水事件, 最大降水率达到 83.5 mm·h^{-1}, 出现在 2012 年 7 月 22 日, 13 次较强短时强降水事件, 51 次中等强度短时强降水事件。一般强度降水过程的最大降水率平均值为 8.7 mm·h^{-1}。总的来说, 华北地区夏季 MCS 西行过程中强短时强降水和较强短时强降水事件频发, 这与夏季风、地形抬升以及水汽条件等多种因素的综合作用有关 (梁巧倩等, 2012)。

3.5 日变化特征

对西行过程 MCS 频数日变化分析发现, 西行 MCS 频数在 08 时 (北京时, 下同) 最低, 从午后开始

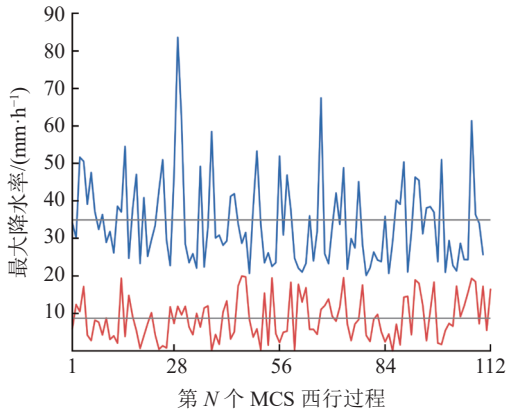


图 8 2008—2018 年 6—8 月一般强度降水 (红色) 和短时强降水 (蓝色) MCS 西行过程的最大降水率
(灰色直线分别表示平均值)

Fig. 8 Maximum precipitation rates from westward-moving MCSs for (a) moderate-intensity (red) and (b) short-duration heavy (blue) precipitation events from June to August during 2008—2018 (Gray solid lines indicate their respective mean values)

显著增加, 峰值出现在 17—18 时, 然后逐渐减少 (图略)。进一步对比两类过程的变化特征, 发现二者与整体趋势基本一致, 一般强度降水过程峰值出现在 17 时, 而短时强降水过程峰值则出现在 18 时。此外, 在 04 时和 13 时, 这两类过程的发生次数存在明显差异。这种差异可能与华北地区 MCS 的两个典型生命周期有关。一类 MCS 通常在下午形成, 傍晚成熟, 清晨消散; 而另一类 MCS 则在傍晚形成, 清晨成熟, 早晨或中午消散。这种不同的生命周期模式可能导致了不同降水类别 MCS 在西行过程中出现时间上的差异 (Long et al., 2023)。

4 结论与讨论

本文利用红外亮温数据和逐小时融合降水 (COMB) 产品资料, 筛选出华北地区 2008—2018 年夏季 222 个 MCS 西行过程, 并进一步分析一般强度降水和短时强降水两类 MCS西行过程演变特征。得到如下主要结论:

(1) 华北夏季 MCS 西行的移动方向为西—西南向, 西行过程主要分布在太行山东侧平原区域, 且频数从午后开始显著增长, 峰值出现在 17—18 时, 08 时出现的频次最低。

(2) 短时强降水 MCS 西行过程的活跃区域主要集中在河北南部、河南北部以及山东的中西部地区。而一般强度降水 MCS 西行过程的活跃区域较为分散。

(3) 一般强度降水 MCS 过程的平均最低亮温为 −58 ℃, 平均亮温面积为 1.5×10^5 km^2, 最大降水率平均值为 8.7 mm·h^{-1}, 大值中心位于华北西部吕梁山附近, 是因为受到 MCS 西行影响较多的缘故。短时强降水 MCS 过程的平均最低亮温为−66 ℃, 平均亮温面积为 2.5×10^5 km^2, 最大降水率平均值为 34 mm·h^{-1}, 累积降水量与 MCS 西行过程总累积降水量的分布特征一致, 大值区均表现为太行山山脉东部的陡峭迎风坡、泰山山脉, 以及山脉与平原的过渡地带, 累积降水量最高达 220 mm。

本研究针对华北地区 MCS 西行特征的研究是对 MCS 理论的补充, 能够为华北暴雨的预警预报和防灾减灾提供理论参考。在分析华北地区夏季 MCS 西行过程特征方面取得了一定成果, 但仍存在一些不足之处。首先, 研究主要关注了 MCS 的宏观特征, 对 MCS 内部结构和演变过程的分析不够深入。其次, 由于数据分辨率的限制, 对 MCS 更精细尺度的降水特征和地形影响的详细研究仍有局限。针对 MCS 日变化的区域差异以及日变化形成机制也有待进一步分析。MCS 西行阶段是天气背景下中尺度系统的影响结果, 这类 MCS 的后向传播过程在气象研究和预报中均是重点和难点, 是未来继续深入研究的重要方向。

参考文献 (References):

陈涛,代刊,张芳华.2013.一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J].气象,39(8):945−954. Chen T, Dai K, Zhang F H. 2013. Study on ambient condition and initialization mechanism of convection in a severe squall line storm event in North China [J]. Meteorological Monthly,39(8):945−954 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.08.001

郭建平,陈田萌,程小平,等.2023.中尺度天气系统适应性观测研究进展及其在大城市短临预报中的应用构思[J].暴雨灾害,42(6):313−627. Guo J P, Chen T M, Cheng X P, et al. 2023. Progress in targeted observation for meso-scale convective system and some thoughts on its applications to convection nowcasting in large cities [J]. Torrential Rain and Disaters,42(6):313−627 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−035

李佳颖.2011.华南地区暖季中尺度对流系统活动特征分析[D].南京:南京信息工程大学. Li J Y. 2011. Characteristics of the mesoscale convective systems over South China during warm seasons [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

梁巧倩,项颂翔,林良根等.2012.华南前汛期 MCS 的活动特征及组织发展形式[J].热带气象学报,28(4):541−551. Liang Q Q, Xiang S X, Lin L G, et al. 2012. MCS characteristics over South China during the annually first rainy season and their organization type [J]. Journal of Tropical Meteorologys,28(4):541−551(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4965.2012.04.013

刘瑞翔,丁治英,孙凌光,等.2015.夏季江淮地区中尺度对流系统的统计特征分析[J].暴雨灾害,34(3):215−222. Liu R X, Ding Z Y, Sun L G,

et al. 2015. Statistical analysis of mesoscale convective systems over Yangtze-Huaihe basin in summer [J]. Torrential Rain and Disaters, 34(3):215−222 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2015.03.003

罗菊英,张家国,许冠宇,等.2023. 2020 年夏季鄂西南一次极端暴雨过程成因分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):26−35. Luo J Y, Zhang J G, Xu G Y, et al. 2023. Causal analysis of an extreme rainstorm event in southwestern Hubei during summer 2020 [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):26−35 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.004

苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等.2021.郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445−454. Su A F, Lyu X N, Cui L M, et al. 2021. The basic observational analysis of “7.20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Torrential Rain and Disaters,40(5):445−454 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.001

王东海,曾智琳,杨帅,等.2022.南海暖季天气系统与中尺度对流过程研究进展[J].大气科学,46(2):419−439. Wang D H, Zeng Z L, Yang S, et al. 2022. Advances in synoptic systems and mesoscale convective processes during the warm season over the South China Sea [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(2):419−439 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2106.21041

王婧羽,崔春光,陈杨瑞雪,等.2022.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[J].气象学报,80(1):21−38. Wang J Y, Cui C G, Chen Y R X, et al. 2022. Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May-August [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(1):21−38 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.006

王敏,孙树峻,刘成刚,等.2024.川西高原一次强对流天气过程的中尺度特征分析[J].高原山地气象研究,44(S1):29. Wang M, Sun S J, Liu C G, et al. 2024. Analysis on the mesoscale characteristics of a severe convection process over Western Sichuan Plateau [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(S1):29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.Z1.004

吴雨飞.2023.华北中尺度对流系统降水特征分析与预报评估[D].北京:中国气象科学研究院. Wu Y F. 2023. The characteristics and the forecast evalution of mesoscale system precipitation over North China [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

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 B, Chen Y, Xiao T G. 2013. Statistical analysis of MCS in summer in Central-Eastern China [J]. Meteorological Monthly,39(2):180−185 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.02.006

郑永光,张春喜,陈炯,等.2007.用 NCEP 资料分析华北暖季对流性天气的气候背景[J].北京大学学报:自然科学版,(5):600−608. Zheng Y G, Zhang C X, Chen J, et al. 2007. Climatic background of warm-season convective weather in North China based on the NCEP Analysis [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,(5):600−608 (in Chinese). doi:10.13209/j.0479−8023.2007.096

郑永光,陈炯,朱佩君.2008.中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J].科学通报,53(4):471−481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J. 2008. Distribution of mesoscale convective systems and their daily characteristics in summer in China and surrounding areas [J]. Science Bulletin,53(4):471−481 (in Chinese). doi:10.136./csb2008−53−4−471

竹利,康岚,陈永仁,等.2024.青藏高原东坡两次暴雨的 MCS 演变及机理对比分析[J].暴雨灾害,43(5):509−520. Zhu L, Kang L, Chen Y R, et al. 2024. MCS evolution and mechanism comparison in the two rainstorm events on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disaters,43(5):509−520 (in Chinese). doi:10.10406/byzh.2023−225

Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,117:D20115. doi:10.1029/2012JD018124

Cheng T F, Dong Q, Dai L, et al. 2022. A dual regime of mesoscale convective systems in the East Asian monsoon annual cycle [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,127:13. doi:10.1029/2022JD036523

Feng Z, Houze R A, Leung L R, et al. 2019. Spatiotemporal characteristics and large-scale environments of mesoscale convective systems east of the Rocky Mountains [J]. Journal of Climate,32(21):7303−7328. doi:10.1175/JCLI−D−19−0137.1

Hu L, Deng D, Gao S, et al. 2016. The seasonal variation of Tibetan Convective Systems: Satellite observation [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,121(10):5512−5525. doi:10.1002/2015JD024390

Long L, He L, Li J, et al. 2023. Climatic characteristics of mesoscale convective systems in the warm season in North China [J]. Meteorol and Atmosphyric Physics,135:21. doi:10.1007/s00703−023−00958−1

Meng Y, Sun J, Zhang Y, Fu S. 2020. A 10-year climatology of mesoscale convective systems and their synoptic circulations in the southwest mountain area of China [J]. Journal of Hydrometeorology,22:23−41. doi:10.1175/JHM−D−20−0167.1

Wei P, Xu X, Xue M, et al. 2023. On the key dynamical processes supporting the 21.7 Zhengzhou record-breaking hourly rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,40(3):337−349. doi:10.1007/s00376−022−2061−y

Zhang C, Huang X, Fei J, et al. 2020. Spatiotemporal characteristics and associated synoptic patterns of extremely persistent heavy rainfall in Southern China [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 126(1). doi:10.1029/2020JD033253

Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(5):7. doi:10.1007/s00376−011−0020−0

(责任编辑 杨 浩)