



东北地区不同类型极端短时强降水的时空分布及环境参数特征

平凡 杨文艳 白志娜 杨磊 袁亮 张金柏 陈红磊 王嘉源 雷居翰

Spatio-temporal distributions and environmental characteristics of extreme short-time heavy rainfall associated with different patterns over Northeast China

PING Fan, YANG Wenyan, BAI Zhina, YANG Lei, YUAN Liang, ZHANG Jinbai, CHEN Honglei, WANG Jiayuan, LEI Juhan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-212>

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

湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征

Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province

暴雨灾害. 2022, 41(1): 66–75 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.008>

广西汛期极端短时强降水特征分析

Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season

暴雨灾害. 2022, 41(3): 308–314 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007>

近10 a浙江省极端短时强降水时空特征分析

Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 599–607 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.004>

贵州省短时强降水时空分布特征分析

Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Guizhou Province

暴雨灾害. 2021, 40(4): 383–392 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.006>

昆明市夏季夜间冰雹天气分型及其环境参数特征

Characteristics of environment parameters and weather type of nighttime hail weather in Kunming City from June to August

暴雨灾害. 2026, 45(4): 513–522 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-046>

基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析

Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data

暴雨灾害. 2021, 40(1): 61–68 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

平凡,杨文艳,白志娜,等.2026.东北地区不同类型极端短时强降水的时空分布及环境参数特征[J].暴雨灾害,45(5):692–701. PING Fan, YANG Wenyan, BAI Zhina, et al. 2026. Spatio-temporal distributions and environmental characteristics of extreme short-time heavy rainfall associated with different patterns over Northeast China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(5):692–701 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–212

东北地区不同类型极端短时强降水的时空分布及环境参数特征

平凡^{1, 2, 3}, 杨文艳³, 白志娜³, 杨磊^{2, 4}, 袁亮¹, 张金柏³,
陈红磊³, 王嘉源³, 雷居翰³

(1. 成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 成都信息工程大学, 成都 610225; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3. 辽宁省盘锦市气象局, 盘锦 124010; 4. 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166)

摘要: 为了解东北地区 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的极端短时强降水 (extreme short-time heavy rainfall, EHR) 的天气特征, 基于 2017—2024 年气象观测站和 ERA5 再分析资料, 将东北地区 EHR 分为冷涡型、西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 型、西风槽型、台风型和弱天气尺度强迫型 5 类, 对比分析不同类型 EHR 的时空分布和环境参数特征, 结果表明: 不同类型 EHR 出现次数由多到少依次为冷涡型、副高型、西风槽型、台风型和弱天气尺度强迫型。冷涡型 EHR 的雨强比其他类型 EHR 更强, 持续时间更长, 范围也更大。东北地区各省份均为冷涡型 EHR 占比最高, 副高型与台风型 EHR 占比东高西低、南高北低, 而弱天气尺度强迫型 EHR 则相反。副高型和台风型 EHR 8 月发生频次最高, 并具有夜间峰值的日变化特征; 其他天气型 EHR 7 月发生频次最高, 且常发生在午后。冷涡型、西风槽型和弱天气尺度强迫型 EHR 发生在水汽含量相对较低的环境, 但静力不稳定更强、中层干空气更明显。台风型、副高型 EHR 发生在更暖湿、近地面相对湿度更高、强低空急流和强垂直风切变的环境中。相比于 $20\sim 50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水, 各天气型 EHR 均发生在对流有效位能更高和近地面相对湿度更高的环境中。东北地区不同天气系统影响下 EHR 的时空分布和环境参数特征分析可为深入认识东北地区 EHR 的物理机制提供参考。

关键词: 极端短时强降水; 时空分布; 环境参数; 天气系统

中图法分类号: P425.4⁺7

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–212

Spatio-temporal distributions and environmental characteristics of extreme short-time heavy rainfall associated with different patterns over Northeast China

PING Fan^{1, 2, 3}, YANG Wenyan³, BAI Zhina³, YANG Lei^{2, 4}, YUAN Liang¹, ZHANG Jinbai³,
CHEN Honglei³, WANG Jiayuan³, LEI Juhan³

(1. *Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225*; 2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*; 3. *Panjin Meteorological Bureau of Liaoning Province, Panjin 124010*; 4. *Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Centre, Shenyang 110166*)

Abstract: To understand the weather characteristics of extreme short-duration heavy rainfall (EHR, defined as hourly rainfall $\geq 50\text{ mm}$) in Northeast China, this study utilizes meteorological observation station observations and ERA5 reanalysis data from 2017 to 2024. EHR events are classified into cold vortex, Western Pacific Subtropical High (WPSH) periphery, westerly trough, typhoon, and weak-synoptic

收稿日期: 2025–10–16; 定稿日期: 2026–08–24

资助项目: 辽宁省气象局指导计划项目 (ZD202447); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024M03); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J059); 中国气象局青年创新团队项目 (CMA2024QN05); 中国气象局东北冷涡实验室开放基金项目 (2024SYIAEFZD02); 辽宁省科技计划联合计划项目 (2024-MSLH-232, 2025-MSLH-378); 中国气象科学研究院基本科研业务费项目 (2023Z019); 辽宁省气象局核心攻关项目 (HXGGZ202402)。

第一作者: 平凡, 主要从事暴雨、强对流预报技术研究。E-mail: pingfan_nuist@163.com

通信作者: 杨文艳, 主要从事天气预报预警技术研究。E-mail: ywy_7508@163.com

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

forcing type five categories to comparatively analyze their spatiotemporal distributions and environmental characteristics under different synoptic patterns. The results are as follows. The frequency of EHR occurrences in Northeast China decreases in the following order: cold vortex, WPSH periphery, westerly trough, typhoon, and weak-synoptic forcing type. Compared to other EHR types, the cold vortex-type EHR exhibits stronger rainfall intensity, longer duration, and broader spatial coverage. In all provinces of Northeast China, the cold vortex-type EHR accounts for the highest proportion. The proportions of the WPSH and typhoon types exhibit clear spatial gradients, with higher frequencies in the east and south than in the west and north, whereas the weak synoptic forcing type shows the opposite pattern. The WPSH and typhoon types occur most frequently in August, and at night, while other types occur most frequently in July and in the afternoon. The cold vortex, westerly trough, and weak synoptic forcing types occur in conditions with relatively lower moisture, but are characterized by stronger static instability and more pronounced mid-level dry air. In contrast, the typhoon and WPSH types occur in warmer, moister environments with higher near-surface relative humidity, stronger low-level jets, and vertical wind shear. Compared to short-duration heavy rainfall (20~50 mm·h⁻¹), all EHR types occur in environments with higher convective available potential energy (CAPE) and higher near-surface relative humidity. These results provide a preliminary characterization of the spatiotemporal distributions and environmental parameters of EHR in Northeast China under the influence of different synoptic systems, providing reference for understanding EHR physical mechanism in the region.

Key words: Extreme short-time heavy rainfall; observation characteristics; environmental conditions; weather system

引言

小时雨强大于等于 50 mm·h⁻¹ 的降水被称为极端短时强降水 (Extreme Short-time Heavy Rainfall, EHR), 相比于小时雨强 20~50 mm·h⁻¹ 的短时强降水 (Short-time Heavy Rainfall, HR), EHR 的致灾性更强 (Doswell III et al., 1996; Yu and Zheng, 2020)。尽管东北地区的年降水量低于南方, 但近年来也出现了多次由 EHR 导致的致灾事件, 如 2017 年 7 月 13 日吉林省永吉县 (祁璇等, 2021)、2024 年 8 月 20 日辽宁省葫芦岛 (李潇濛等, 2024) 出现的 EHR, 造成了严重的人员伤亡和经济损失, 引起社会广泛关注。

学者们利用长序列观测资料研究了中国不同地区短时强降水的特征。Chen 等 (2013) 利用 1999—2009 年国家气象观测站 (以下简称国家站) 资料, 统计了中国 ≥ 20 、30、40、50 mm·h⁻¹ 的 HR 的分布特征, 发现中国 HR 频次的南北差异极为显著, EHR 的分布较 HR 更为分散, 在 HR 发生频次较低的东北地区, 也会发生 EHR, 但由于其使用的国家站观测资料分辨率较低, 并未进一步探讨东北地区 EHR 空间分布的精细特征。近年来, 学者利用空间分辨率更高的区域气象观测站 (以下简称区域站) 资料对东北地区冷涡背景下 HR 的气候特征进行了研究, 表明东北地区约 39.4% 的 HR 发生在冷涡背景下, 主要出现在 7—8 月, 呈现明显的午后多发特征, 且其空间分布受长白山脉、辽东丘陵等地形作用影响显著 (Yang and Zheng, 2024; 曹世腾等, 2025)。然而, 由于东北地区 EHR 发生概率极低、局地性极强 (Luo et al., 2016; Yang and Zheng, 2024), 需要进一步利用区域站观测资料统计分析该地区 EHR 的精细化特征。

HR 和 EHR 的发生往往依赖于水汽、不稳定、抬

升和垂直风切变等多种有利环境条件的协同配置。不同天气系统影响时, 表征 EHR 发生的环境参数存在不同 (Luo et al., 2016; 孙继松, 2017)。聂绩等 (2026) 将华北地区 157 个 EHR 分类为冷涡深槽型和纬向型, 并归纳了不同天气型 EHR 的天气系统配置和热力、动力、水汽条件。Lyu 等 (2025) 分析发现 2021 年 7 月 20 日河南郑州 EHR 发生于典型的副热带高压 (以下简称副高) 北抬与台风活动协同作用的天气型背景下, 在对比了 203 个相似环流型的降水事件后发现整层可降水量 (PW) 是表征此次 EHR 发生的关键环境参数。东北地区 EHR 个例研究发现, EHR 发生时需要大气具有大的 850 hPa 与 500 hPa 温度差 ($T_{850-500}$)、850 hPa 假相当位温 ($\theta_{se, 850}$)、850 hPa 与 500 hPa 的假相当位温差 ($\theta_{se, 850-500}$) 和较低的 500—400 hPa 最低相对湿度 (RH_{midmin}) (杨磊等, 2020a, 2023)。另外, 由于东北地区下垫面空气较南方更为干燥, 云底以下的蒸发过程对 EHR 的削弱作用更为重要, 抬升凝结高度 (LCL)、LCL 到近地面的最低相对湿度 (RH_{LCLmin}) 也是衡量近地面水汽条件的重要环境参数 (孙继松, 2017; 杨磊等, 2020a), 也需分析其对东北地区 HR 和 EHR 强天气的影响。以上研究表明, 虽然东北地区 EHR 个例的环境参数研究取得一定成果, 但仍缺少关于不同天气系统影响时 EHR 形成条件的统计研究。

影响东北地区 EHR 的天气系统主要包括冷涡、台风、副高、西风槽和弱天气尺度系统 (Luo et al., 2016; Yang and Zheng, 2024; 任丽等, 2023)。本文利用 2017—2024 年高密度气象观测站和 ERA5 再分析资料, 首先统计东北地区不同类型 EHR 站数, 分析不同类型 EHR 的时空分布及环境参数特征, 以期提升东北地区 EHR 的精细化预报能力。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

2017 年以后,东北地区(辽宁、吉林、黑龙江三省和内蒙古 115°E 以东区域)建成了更为稠密的自动气象站,本文使用质控后的 2017—2024 年的东北地区 3 196 个国家站和区域站小时降水量观测资料,资料来源于国家气象信息中心。气象观测站分布如图 1,总体上南密北疏,最近相邻站的平均距离约为 6.4 km,远高于国家站平均距离(约 100 km),因此能够获得 EHR 的精细特征。

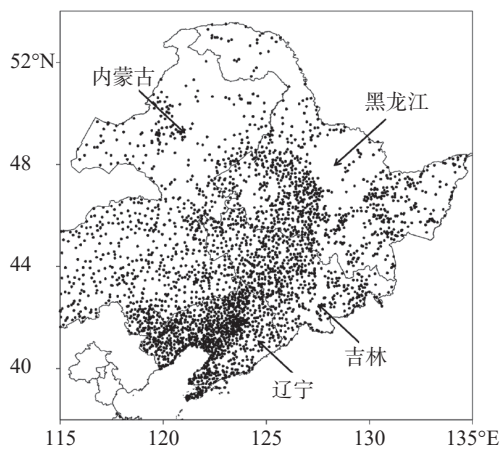


图 1 东北地区气象观测站(黑点)分布

Fig. 1 Distribution of meteorological observation stations (black dot) in Northeast China

使用欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料分析 EHR 发生时的天气系统和环境参数。该资料来源于 <https://cds.climate.copernicus.eu>, 空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率 1 h (Hersbach et al., 2019)。

1.2 EHR 的分类和定义

本文在研究小时尺度 EHR 的时空分布及环境参数特征时,采用小时尺度降水的研究方法,以每个站次作为一个样本进行统计(田付友等, 2017; Yang and Zheng, 2024)。

根据 EHR 发生时刻的 ERA5 再分析资料分析每个 EHR 出现时的主要影响天气系统,将 EHR 分为台风型、冷涡型、副高型、西风槽型和弱天气尺度强迫型(简称弱强迫型)5 类(Luo et al., 2016)。每类 EHR 的分类标准具体如下:将出现在冷涡闭合环流内以及其所伴随低槽影响区域的 EHR 称为冷涡型(Yang and Zheng, 2024)。根据台风北上影响东北地区的时段,将受台风系统直接影响的 EHR 称为台风型(任丽等, 2023)。西风槽型 EHR 要求 500 hPa 不存在冷涡系统影响,但 500 hPa 存在西风槽,该类型 EHR 要发生在与西风槽相关联的正涡度区内。副高

型 EHR 是指发生在 588 dagpm 等位势高度线北边界的 EHR (Luo et al., 2016)。最后,将不满足以上类型 EHR 的判识标准,发生在风场上无明显切变线特征(例如发生在高压脊附近)的 EHR 归类为弱强迫型(Luo et al., 2016)。当 EHR 受多个天气尺度系统共同影响时,需要从环流场判断影响 EHR 最主要的天气系统,并将 EHR 归类相应天气系统对应的类型,无法清晰判断影响系统的 EHR 不在本文研究范围内。

1.3 环境参数介绍

本文分析的环境参数为田付友等(2017)采用的 PW、对流有效位能 CAPE、925 hPa 散度 (Div_{925}) 和 0—6 km 风矢量差 (SHR6)。同时也包括东北地区 EHR 个例研究分析中使用的环境参数(杨磊等, 2020a, 2023)。对这些环境参数进行分类,水汽参数 PW 和 $\text{RH}_{\text{midmin}}$, 热力参数 CAPE、 $T_{850-500}$ 、 $\theta_{\text{se } 850}$ 和 $\theta_{\text{se } 850-500}$, 动力参数 Div_{925} 和 SHR6, 近地面气象条件 LCL 和 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 。

本文提取每个 EHR 发生前 1 h、最临近网格点的 ERA5 再分析资料绘制探空曲线,计算 EHR 发生时的环境参数,统计东北地区不同类型 EHR 发生时的平均探空曲线和环境参数。另外,本文也筛选 EHR 发生当日小时雨强 $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 HR, 对比两类短时强降水的环境条件。

2 EHR 时空分布特征

2.1 统计特征

2.1.1 发生站次

本文共统计东北地区 2 327 站次 EHR, 发生在 989 个降水日中,均出现在 6—9 月。不同类型 EHR 站次由大到小分别为(图 2):冷涡型、副高型、西风槽型、台风型、弱强迫型。其中冷涡型 EHR 站次占比最高,达 39.5%。

2.1.2 雨强分布

东北地区 EHR 的小时雨强在 $50 \sim 149.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内。 $50 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 EHR 占 93%, 仅 1% 的 EHR 雨强超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在雨强超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 EHR 中, 45% 的 EHR 是冷涡型(表 1)。最大雨强 $149.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 发生在 2021 年 9 月 10 日 03—04 时(北京时,下同)辽宁省庄河市栗子房镇(Yang and Zheng, 2024), 此次也是冷涡型 EHR。弱强迫型 EHR 雨强均未超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.1.3 1 h 内 EHR 的发生站次

本文收集的 2 327 站次 EHR 共发生在 1 223 个小时内。1 h 内同时出现 EHR 的站次可以衡量此类

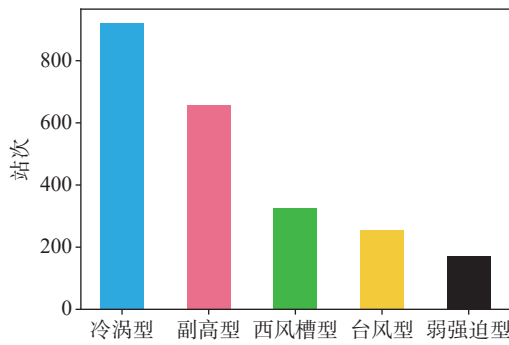


图2 2017—2024年东北地区不同类型EHR发生站次

Fig. 2 Stations number of different types EHR in Northeast China during 2017—2024

表1 2017—2024年东北地区不同类型EHR不同雨强的站次

Table 1 Station numbers of different types EHR with different rainfall intensity in Northeast China during 2017—2024

雨强(R)/(mm·h ⁻¹)	冷涡型	副高型	西风槽型	台风型	弱强迫型
$50 \leq R < 80$	839	639	310	233	139
$80 \leq R < 100$	48	47	21	20	8
$100 \leq R$	10	7	3	2	0

强降雨天气的空间尺度,即如果1 h内EHR出现的站次越多,那说明该类EHR的范围越大(Yang and Zheng, 2024)。因此,计算每个小时内EHR出现的站次(S_E),并统计 S_E 不同范围内,EHR出现的小时数(H_E)(表2),可分析EHR的尺度。由表2可见,随着 S_E 增加, H_E 迅速减小,其中 S_E 小于5站次的 H_E 为1 140 h,占所有时次的93.2%,即1 h内EHR出现的站次通常会小于5站次,影响范围较小,因此EHR具有尺度小、局地性强的特征。

表2 2017—2024年东北地区不同类型EHR不同 S_E 范围的小时数(H_E)Table 2 Number of hours E_h in different E_s ranges for different synoptic types EHR in Northeast China during 2017—2024

站次(S_E)范围	冷涡型	副高型	西风槽型	台风型	弱强迫型
$1 \leq E_s < 5$	510	272	162	81	115
$5 \leq E_s < 10$	23	23	6	10	1
$10 \leq E_s < 15$	2	7	0	4	0
$15 \leq E_s$	4	1	1	1	0

东北地区也会出现大范围的EHR, S_E 达到10站次以上的 H_E 为20 h,仅占所有时次的1.64%。对于不同类型EHR,均存在随着 S_E 增加, H_E 迅速减小的特征。弱强迫型 S_E 均小于10站次,说明弱强迫型EHR的降水系统尺度更小。在 S_E 超过15站次的样

本中,约57.1%的样本是由冷涡系统产生的。 S_E 最多的时次为2019年8月16日19—20时,共有21站出现了EHR,本次过程也是发生在冷涡背景下。

2.1.4 持续时间分布

各类EHR均表现为发生频次随着持续时间增加而迅速减小(表3),表明EHR具有持续时间短的特征,这可能与产生EHR的降水系统尺度较小有关(Chen et al., 2013)。EHR的平均持续时间为1.2 h,92%的EHR仅持续1 h,其中弱强迫型EHR全部仅持续1 h。

表3 2017—2024年东北地区不同类型EHR不同持续时间的站次

Table 3 Station numbers of different types EHR with different durations in Northeast China during 2017—2024

持续时间/h	冷涡型	副高型	西风槽型	台风型	弱强迫型
1	810	643	308	194	147
2	38	25	7	18	0
3	1	0	4	4	0
4	2	0	0	2	0
5	0	0	0	1	0

持续时间超过4 h以上的样本共5次,60%的样本为台风型,其余40%的样本为冷涡型。东北地区EHR的持续时间最长为5 h,出现在2017年8月4日01—06时,受台风“海棠”影响,辽宁省鞍山市岫岩县石灰窑镇在5 h内累计降水量达到401.3 mm(杨磊等, 2020b)。冷涡型EHR的持续时间最长为4 h,发生过2次,均出现在2024年8月20日葫芦岛。

综上,相比于其他类型EHR,冷涡型EHR的雨强更强,范围更大,持续时间更长。

2.2 空间分布

从地域分布(图3a)可见,东北地区EHR的分布较为零散。EHR的总次数出现2次以上的站点最集中分布在辽东半岛,另外在辽宁中西部、吉林中部、黑龙江西部以及内蒙古东部也有出现。东北地区EHR总体上具有南部比北部多发,东部比西部多发,平原较相邻山地多发的特点。

东北地区不同省份EHR的出现站次从大到小依次为辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古东部,辽宁EHR的站次明显高于其他省份。以上EHR的空间分布特征可能与各省自动站密度差异有关,但以往研究通过统计长序列、高密度的闪电定位仪、卫星资料发现,辽宁(内蒙古东部)是闪电和中尺度对流系统出现次数较多(较少)的省份(Ma et al., 2005; Zheng et al., 2008)。而EHR常伴随闪电和中尺度对流系统发生

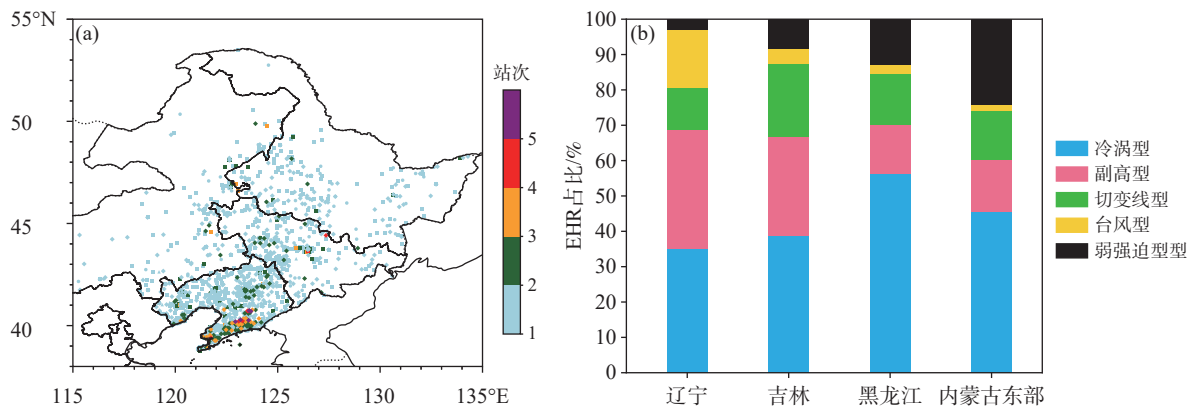


图 3 2017—2024 年东北地区 EHR 出现站次的空间分布 (a) 及各省份不同类型 EHR 占比 (b)

Fig. 3 The (a) spatial distribution and (b) proportions of different EHR types in each province in Northeast China during 2017—2024

(Chen et al., 2013), 因此加密站统计的 EHR 和闪电定位仪及卫星观测的结果较为一致。

对比各省份不同类型 EHR 占该省份所有 EHR 的百分比 (图 3b) 可见, 各省份均为冷涡型 EHR 占比最高, 其中黑龙江的冷涡型 EHR 占比最高, 达到 56%。而副高型与台风型 EHR 的占比呈现东高西低、南高北低的特点; 副高型 EHR 在辽宁占比最高, 仅比冷涡型 EHR 低 1%。而弱强迫型 EHR 的占比与上述两种类型相反, 内蒙古东部弱强迫型 EHR 比例最高, 黑龙江次之, 弱强迫型 EHR 的地理分布特征和中国 (Chen et al., 2013)、东北地区 EHR 的总体特征存在不同。

2.3 时间变化

2.3.1 月变化

2017—2024 年东北地区 EHR 仅在 6—9 月出现, 其月变化呈现单峰分布特征 (图 4a)。主要集中在 7—8 月 (占比达到 87.2%), 6 月开始迅速增加, 盛夏 7—8 月出现峰值, 9 月迅速减少。不同类型 EHR 同样具有单峰分布的月变化 (图 4c), 但是峰值比例及其出现月份、持续时间有所差异。冷涡、西风槽和弱强迫型 EHR 的月际分布特征较为一致, 峰值出现在 7 月。而副高和台风型 EHR 的峰值出现在 8 月, 峰值比例分别为 62% 和 89%, 明显高于其他月

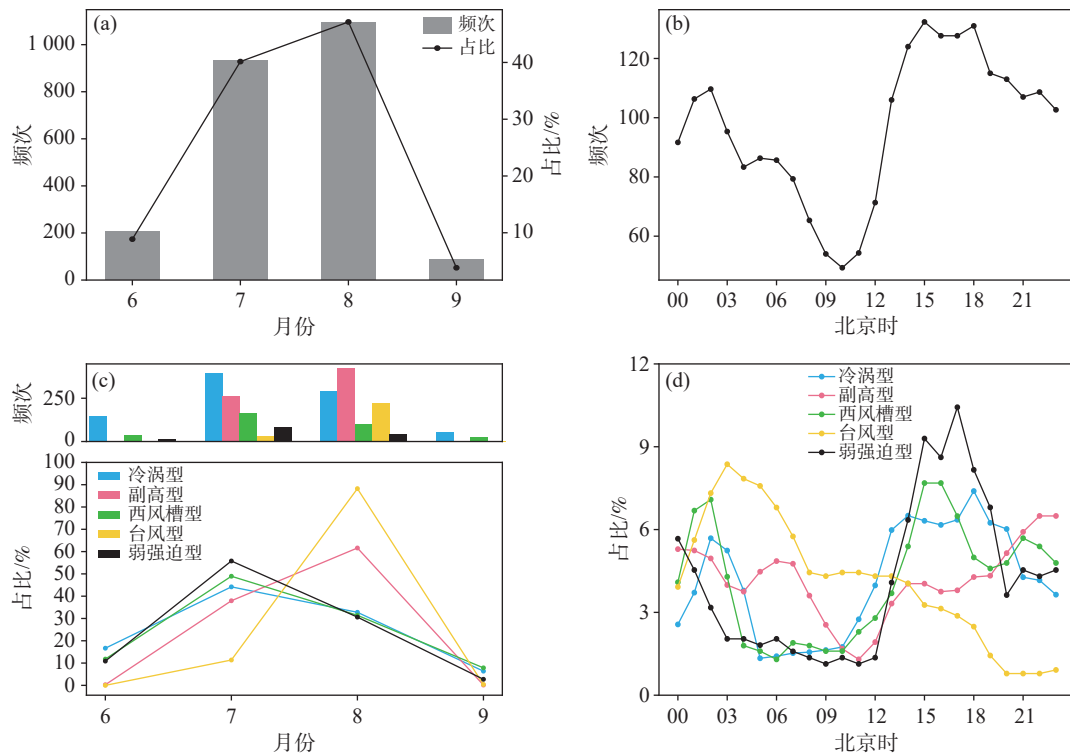


图 4 2017—2024 年东北地区 EHR 频次和占比的月变化 (a)、EHR 频次日变化 (b) 及不同类型 EHR 频次和占比的月变化 (c) 及日变化 (d)

Fig. 4 The (a) monthly variations of the frequency and proportion of total EHR, (b) diurnal variations of the total EHR frequency, (c) monthly variations in the frequency and proportion, and (d) diurnal variations in the proportions of different EHR types in Northeast China during 2017—2024

份,这是由于副高在8月份北抬至最北位置,东北地区在此月份常位于副高北缘,另外8月份也是台风影响东北地区最多的月份(任素玲等,2007)。不同类型EHR的月变化特征与各天气系统活跃程度及位置的月变化有关。

2.3.2 日变化

从日变化特征(图4b)可见,东北地区EHR呈现双峰型,主峰位于午后至傍晚,在00—03时有一个明显的次峰,而上午时段为波谷。不同类型EHR的日变化特征也存在不同(图4d)。冷涡、西风槽和弱强迫型EHR的日分布特征表现为午后主峰、夜间次峰,弱强迫型EHR的午后峰值最高(10.4%),西风槽型的主峰出现时间最早(15时),冷涡型EHR的主峰出现时间最晚(18时)。而副高和台风型EHR的主峰均出现在夜间,分别为22时和03时。以上分析发现,不同类型EHR均有一定的夜发性特征。

3 EHR 发生的环境条件

本节通过对比 T - $\ln p$ 合成图和环境参量的箱线图,分析不同类型EHR发生的环境条件异同点。

3.1 探空曲线特征

探空曲线可直观展示EHR发生时环境条件的总体特征。由图5可见,不同类型EHR发生时均具有狭长型的CAPE,温度和露点廓线较为接近,整层相对湿度较高,LCL均低于1 km。

冷涡型(图5a)、西风槽型(图5c)和弱强迫型(图5e)EHR的温湿廓线较为接近,各层温度相对另外两类低,中层还存在更为明显的干层,最低相对湿度分别为59.1%、54.7%和58.1%。 RH_{LCLmin} 也更低,在77.6%~80.9%范围内,云底以下蒸发作用对降水的削弱更强,这类探空环境下产生的强烈天气除了EHR外,时常还伴随冰雹或雷暴大风天气(俞小鼎,2013)。

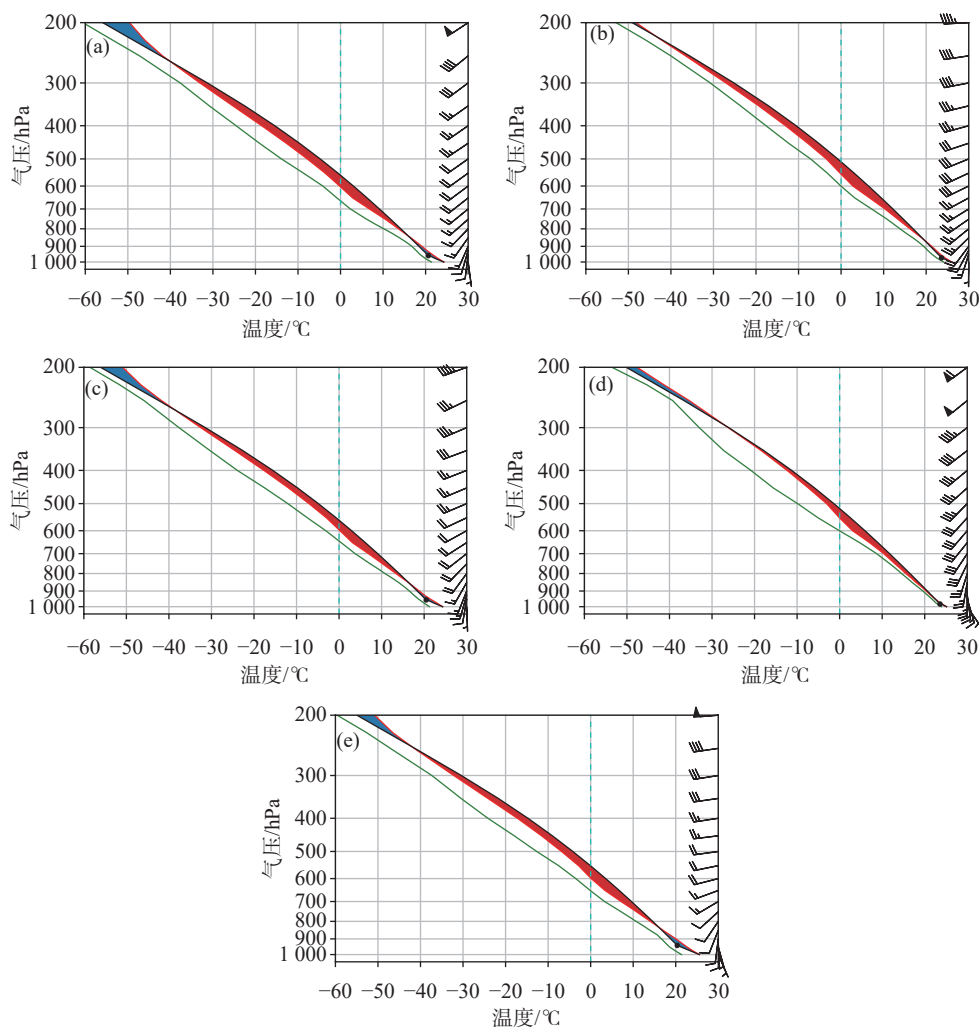


图5 2017—2024年东北地区冷涡型(a)、副高型(b)、西风槽型(c)、台风型(d)、弱强迫型(e)EHR发生时的 T - $\ln p$ 合成图

Fig. 5 Averaged T - $\ln p$ diagrams of EHR in (a) the cold vortex, (b) the edge of the western Pacific subtropical high, (c) westerly trough, (d) typhoon and (e) weak forcing type in Northeast China during 2017—2024

副高型 EHR (图 5b) 发生在更为暖湿的环境中, θ_{se850} 高达 351.1 K, 明显高于冷涡型。另外整层相对湿度较大, 温度直减率接近湿绝热直减率, 中低层均存在饱和层, 导致 LCL 较低。在这种探空环境下, 几乎只出现 EHR (俞小鼎, 2013; 杨磊等, 2020a)。

而台风型 EHR (图 5d) 发生时的探空环境场介于以上两种之间, 一方面具有和副高型 EHR 同样高的暖湿环境, θ_{se850} 也达到 350 K; 另一方面要求 500—400 hPa 存在明显的干区, RH_{midmin} 为 49.1%, 而低层近乎饱和, 相对湿度高达 95.4%, 这种上干下湿的层结不稳定特征配合 500 hPa 以下深厚的饱和层更有利于产生 EHR。另外, 副高型和台风型 EHR 发生时, 整层风以偏南风为主, 925—850 hPa 风速达到 $10\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 强于其他系统影响时的边界层风速, 一方面可将暖湿空气输送到东北, 另一方面也会增强该区域垂直风切变强度, 其中台风型 EHR 的垂直风切变最强。

3.2 环境参数统计特征

3.2.1 水汽参数

东北地区 EHR 发生时 PW 的平均值为 52.3 mm, 低于我国中东部地区 EHR 发生时 PW (60.0 mm) 的统计结果 (田付友等, 2017), 说明相较于我国中东部

地区, 东北地区 EHR 常发生在水汽条件较干的环境下。不同类型 EHR 发生时的 PW 具有明显差异 (图 6a), 台风型和副高型 EHR 发生时 PW 平均值分别为 63.2 mm 和 62.8 mm, 大于其他类型 EHR 发生时的 PW, 也高于我国中东部地区 EHR 的 PW 统计结果 (田付友等, 2017), 这可能是因为这两种系统影响时, 会将南方更充沛的水汽输送到东北地区进而引发 EHR (孙继松, 2017; 杨磊, 2020b)。冷涡型、西风槽型和弱强迫型 EHR 的 PW 平均值较低, 其中冷涡型 PW 平均值最低, 这与杨磊 (2020a) 关于冷涡型和副高型 EHR 个例对比分析的结果一致。

不同类型 EHR 的 RH_{midmin} 也存在差异 (图 6b), 台风型 EHR 的 RH_{midmin} 平均值最低, 仅 53.3%, 说明台风北上到东北地区后, 干空气侵入其上空, 是东北地区台风型 EHR 形成的关键因素。冷涡型 EHR 的 RH_{midmin} 平均值次之, 与冷涡型 HR 的平均值相当 (Yang and Zheng, 2024), 这与冷涡系统自身携带的干空气有关。

3.2.2 热力参数

当 $T_{850-500}$ 大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时认为存在不稳定层结 (孙继松和陶祖钰, 2012), 东北地区 EHR 发生时 $T_{850-500}$ 的 25% 分位点均超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足不稳定层结的标准,

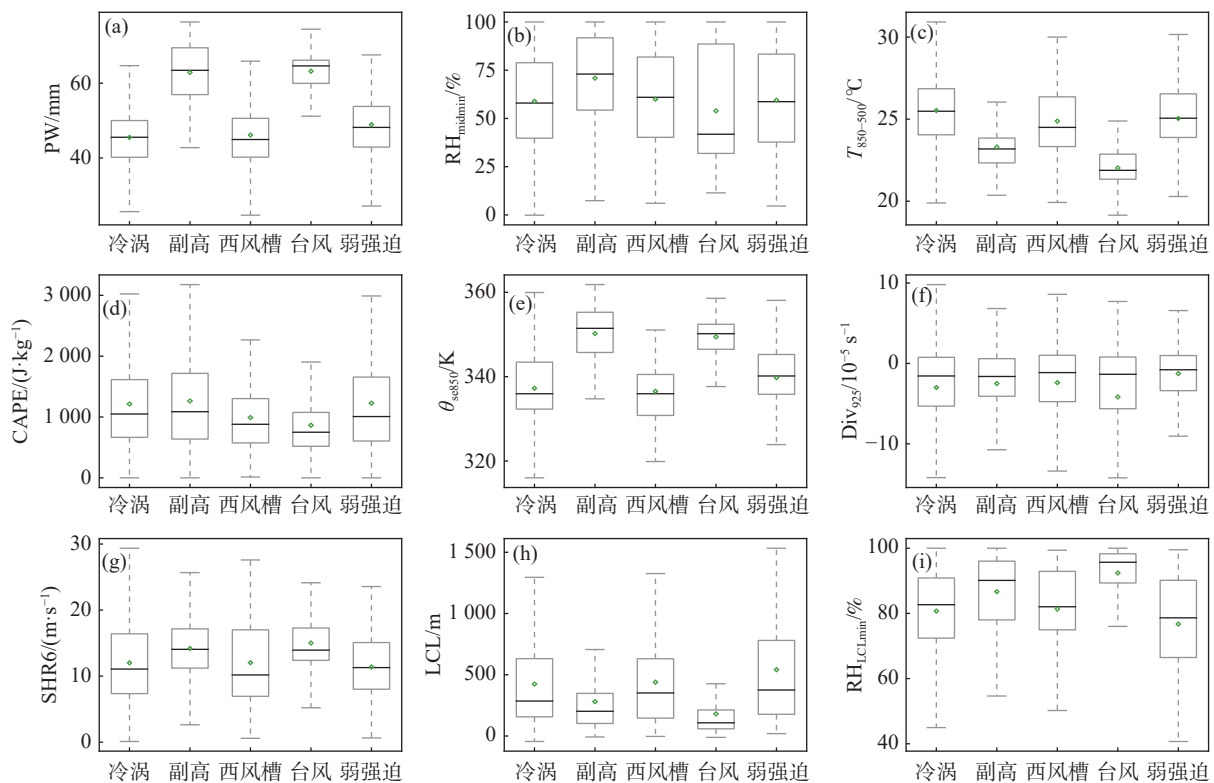


图 6 2017—2024 年东北地区不同类型 EHR 发生时 PW (a)、 RH_{midmin} (b)、 $T_{850-500}$ (c)、CAPE (d)、 θ_{se850} (e)、 Div_{925} (f)、SHR6 (g)、LCL (h)、 RH_{LCLmin} (i) 箱线图

Fig. 6 Boxplots of (a) PW, (b) RH_{midmin} , (c) $T_{850-500}$, (d) CAPE, (e) θ_{se850} , (f) Div_{925} , (g) SHR6, (h) LCL, (i) RH_{LCLmin} for different EHR types in Northeast China during 2017–2024

$T_{850-500}$ 平均值甚至达到 24~25 °C (图 6c), 这归因于造成 EHR 的天气系统常为小尺度系统 (Chen et al., 2013)。冷涡、西风槽和弱强迫型 EHR 的 $T_{850-500}$ 的平均值更高, 其中冷涡型 EHR 的平均值最高, 静力不稳定条件更强, 可能是冷涡系统下水汽条件较差, 但仍然高发 EHR 的原因之一。

从图 6d 可见, 东北地区 EHR 的 CAPE 平均值和中位数都要在 $500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上, 略高于我国中东部地区 EHR 发生时 CAPE 的特征值 (田付友等, 2017), 理论最大垂直速度可达到 $10^1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级。弱强迫型 EHR 发生时 CAPE 的平均值和中位数最大, 这也是此类 EHR 午后更频发的原因 (图 4d)。

不同类型 EHR 发生时的 $\theta_{se 850}$ 的平均值具有与 PW 的平均值相似的差异, 台风型和副高型 EHR 的 $\theta_{se 850}$ 的平均值大于其他类型 EHR 的 $\theta_{se 850}$ 平均值, 两类 EHR 的 $\theta_{se 850}$ 平均值均大于 350 K (图 6e), 说明这两类 EHR 受低层偏南暖湿气流影响, 低层常具有更强的暖湿空气 (杨波等, 2016; 杨磊等, 2020b)。另外, 不同类型 EHR 发生时 $\theta_{se 850-500}$ 的平均值均大于 0 (图略)。其中台风型 EHR 的 $\theta_{se 850-500}$ 的平均值最大, 位势不稳定状态最强, 当受地形或大尺度锋面抬升作用时得以释放, 进而造成 EHR (王秀明等, 2014; 杨磊等, 2020b)。

3.2.3 动力参数

本文选取的 EHR 样本中, 约 67% 的 EHR 出现时 $\text{Div}_{925} < 0$, 该比例高于我国中东部地区 EHR 统计结果 (田付友等, 2017), 这说明东北地区 EHR 常发生在大尺度辐合抬升环境中。对比不同天气型 EHR 发现, 冷涡型和台风型 EHR 的 Div_{925} 平均值分别为 $-2.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 不仅低于其他天气型 EHR (图 6f), 也低于我国中东部地区 EHR 发生时的平均值 ($-1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) (田付友等, 2017), 这说明这两类 EHR 发生在大尺度辐合抬升更强的环境中。

东北地区 54% 的 EHR 发生在中等 ($12\sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 及以上强度的垂直风切变环境中, 平均值为 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 高于我国中低海拔地区 EHR 发生时 SHR6 的平均值 ($9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (田付友等, 2017)。较强的垂直风切变有利于形成长生命史的降水系统, 内部存在更强的上升运动, 会将低空暖湿空气输送到风暴中, 进而产生持续时间更长、雨强更强的 EHR (Weisman and Klemp, 1982), 2019 年 8 月 16 日沈阳 EHR 就是发生在这种环境条件下 (杨磊等, 2023)。对比不同类型 EHR (图 6g), 副高型、台风型 EHR 的 SHR6 的平均值均大于或等于 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 达到中等垂直风切变标

准, 其中台风型 SHR6 的平均值达到 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著高于其他类型 EHR 的 SHR6 平均值。

3.2.4 近地面环境参数

东北地区 EHR 发生时, LCL 的 75% 分位点均低于 800 m (图 6h), 而 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 的 25% 分位点均高于 65% (图 6i)。低的 LCL 和高的 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 能确保雨滴不至于过多蒸发进而产生 EHR。

不同天气型 EHR 发生时的 LCL 和 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 存在差异。较其他类型 EHR, 台风型 EHR 的 LCL 最低, 平均值低于 300 m, 同时 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 更高, 50% 的台风型 EHR 的 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 高于 90%。而冷涡型、弱强迫型和西风槽型 EHR 发生时 LCL 更高, 同时 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 更低, 这些天气型 EHR 云底以下蒸发作用对降水的削弱更明显, 更有利于同时出现雷暴大风、冰雹等多种强对流天气 (孙继松, 2017; 郑永光和宋敏敏, 2021)。

3.2.5 与 HR 环境参数比较

表 4 比较了东北地区 EHR 与同样数据集 HR 存在明显差异的环境参数平均值。相比于 HR, 各类 EHR 发生时均需更高的 CAPE、较低的 LCL 和更高的 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 。存在这种差异的原因可能是: 一是东北地区 EHR 常发生在水汽条件较干的环境 (图 6a), 该地区更大比例的 EHR 与中尺度对流系统有关, 更高的 CAPE 有利于产生更强的上升气流, 使得对流发展进而形成 EHR (Chen et al., 2013)。二是东北地区近地面相对湿度通常较低, 仅当 LCL 较低和 $\text{RH}_{\text{LCLmin}}$ 较高时, 东北地区才会发生 EHR。另外, 台风型、副高型 EHR 还需要水汽条件更充沛 (PW 更高), 而冷涡型、西风槽型 EHR 需要静力不稳定条件更强 ($T_{850-500}$ 更高)。

表 4 2017—2024 年东北地区不同类型 HR 和 EHR 环境参数均值比较

Table 4 Average values of environmental parameter for HR and EHR in different types in Northeast China during 2017—2024

类型	PW/mm		$T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$		CAPE/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)		LCL/m		$\text{RH}_{\text{LCLmin}}/\%$	
	HR	EHR	HR	EHR	HR	EHR	HR	EHR	HR	EHR
冷涡型	44	45	24	26	1 000	1 214	434	424	79	80
副高型	59	63	22	23	781	1 263	286	281	87	87
西风槽型	50	46	22	25	341	990	449	439	81	81
台风型	60	63	21	22	577	864	224	181	89	92
弱强迫型	49	49	24	25	943	1 227	567	542	76	77

4 结论与讨论

了解东北地区不同天气系统背景下 EHR 的特征, 本文基于 2017—2024 年东北地区气象站观测资

料和 ERA5 再分析资料,采用主观天气分型方法将东北地区 EHR 分为 5 类,并统计了不同天气型下 EHR 的时空分布特征及环境参数,得到以下结论:

(1) 东北地区 EHR 出现频次由多到少依次为冷涡型、副高边缘型、西风槽型、台风型和弱强迫型。冷涡型 EHR 雨强比其他类型 EHR 更强,持续时间更长,范围也更大。

(2) 东北地区 EHR 高发区位于辽东半岛。各省份均为冷涡型 EHR 占比最高,黑龙江的冷涡型 EHR 占比最高。副高型与台风型 EHR 的占比呈现东高西低、南高北低的特点,而弱强迫型则相反。

(3) 不同天气型 EHR 均具有盛夏峰值的月分布特征,冷涡型、西风槽型和弱强迫型 EHR 的峰值出现在 7 月,而副高型和台风型 EHR 出现在 8 月。冷涡、西风槽和弱强迫型 EHR 的日变化具有午后主峰、夜间次峰的特征,而副高型和台风型 EHR 的主峰却出现在夜间。

(4) 尽管冷涡型、西风槽型和弱强迫型 EHR 发生在水汽含量相对较低的环境条件,但是静力不稳定更强、中层干空气更为明显,此种环境特征有利于 EHR 发生时常伴随冰雹或雷暴大风。

(5) 台风型、副高型 EHR 发生在更暖湿、近地面相对湿度更高、强低空急流和强垂直风切变的环境中,台风型 EHR 发生时还需要中层存在干空气。

(6) 相比于 HR,各类 EHR 发生时,均需要更高的 CAPE、较低的 LCL 和高的 RH_{LCLmin} 。台风型、副高型 EHR 发生时还需要水汽含量更充沛,而冷涡型、西风槽型 EHR 需要静力不稳定条件更强。

本文初步归纳了东北地区不同类型 EHR 的时空分布及环境参数特征,可为提升东北地区 EHR 的预报能力提供依据。但是存在以下不足:一是类型划分主要依赖主观判识主要影响的天气系统,未来可引入倾斜旋转 T 模态主成分分析等客观天气分型技术,实现 EHR 的客观分型;二是仅是对比了不同天气型 EHR 环境参量的异同点,未来可利用机器学习算法(如随机森林、深度学习等)构建适用于东北地区 EHR 的客观预报模型;三是本文未发现 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上与 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上 EHR 的环境条件差异,未来需要加强 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上 EHR 样本的收集,并结合个例进行机理研究,以提升 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上 EHR 的预报和分析能力。

参考文献 (References):

曹世腾,杨磊,孙丽,等.2025.2017—2021 年冷涡背景下辽宁短时强降水时空分布及环境参数特征[J].*气象与环境学报*,41(4):28–38. Cao S

- T, Yang L, Sun L, et al. 2025. The spatiotemporal distribution and environmental parameter characteristics of short-duration heavy rain in Liaoning under the background of Cold Vortex from 2017 to 2021 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,41(4):28–38 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2025.04.004
- 李潇濛,宋巧云,杨寅.2024.2024 年 8 月大气环流和天气分析[J].*气象*,50(11):1409–1416. Li X M, Song Q Y, Yang Y. 2024. Analysis of August 2024 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly*,50(11):1409–1416 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2024.102301
- 聂绩,林中曦,吕楠,等.2026.华北黄淮极端雨强多尺度过程和物理模型[J].*气象学报*,84(3):385–403. Nie J, Lin Z X, Lv N, et al. 2026. Multi-scale process and physical model of extreme rainfall intensity in North China and Huang-Huai region [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,84(3):385–403 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2026.20250128
- 祁璇,平凡,沈新勇.2021.云微物理对一次吉林暖区降水过程的影响[J].*大气科学*,45(5):943–964. Qi X, Ping F, Shen X Y. 2021. Impact of cloud microphysics on a process of warm-sector precipitation over Jilin, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45(5):943–964 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2007.20128
- 任丽,王晓雪,张桂华.2023.黑龙江省台风暴雨统计及环流特征分析[J].*热带气象学报*,39(2):159–170. Ren L, Wang X X, Zhang G H. 2023. Statistical analysis of typhoon rainstorm and circulation characteristics in Heilongjiang Province in recent 60 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,39(2):159–170 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2023.015
- 任素玲,刘屹岷,吴国雄.2007.西太平洋副热带高压和台风相互作用的数值试验研究[J].*气象学报*,65(3):329–340. Ren S L, Liu Y M, Wu G X. 2007. Interactions between typhoon and subtropical anticyclone over western Pacific revealed by numerical experiments [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,65(3):329–340 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2007.032
- 孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].*暴雨灾害*,36(6):498–506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 36(6):498–506 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.002
- 孙继松,陶祖钰.2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].*气象*,38(2):164–173. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast [J]. *Meteorological Monthly*,38(2):164–173 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2012.02.004
- 田付友,郑永光,张涛,等.2017.我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].*暴雨灾害*,36(6):518–526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,36(6):518–526 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.004
- 王秀明,俞小鼎,周小刚.2014.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].*气象*,40(4):389–399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G. 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting [J]. *Meteorological Monthly*,40(4):389–399 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2014.04.001

- 杨波,孙继松,毛旭,等.2016.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J].*气象学报*,74(6):919–934. Yang B, Sun J S, Mao X, et al. 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,74(6):919–934 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.072
- 杨磊,才奎志,孙丽,等.2020a.基于葵花8号卫星资料的沈阳两次暴雨过程中对流云特征对比分析[J].*暴雨灾害*,38(2):1–6. Yang L, Cai K Z, Sun L, et al. 2020a. Comparison of convective cloud characteristics during two torrential rain events in Shenyang based on Himawari-8 satellite data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(2):1–6 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.003
- 杨磊,孙丽,王东东,等.2020b.2017年“海棠”台风影响辽宁不同区域极端暴雨成因分析[J].*气象与环境学报*,36(1):1–10. Yang L, Sun L, Wang D D, et al. 2020b. Formation of an extreme rainstorm in different regions of Liaoning Province affected by Typhoon “Haitang” in 2017 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,36(1):1–10 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2020.01.001
- 杨磊,郑永光,袁子鹏,等.2023.2019年8月16日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J].*气象学报*,81(1):19–39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al. 2023. The low-level meso- γ -scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: formation, merging, and rain-producing mechanisms [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,81(1):19–39 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220023
- 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 X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. *Torrential Rain and Disasters*,32(3):202–209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03.002
- 郑永光,宋敏敏.2021.冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J].*热带气象学报*,37(5-6):710–720. Zheng Y G, Song M M. 2021. Analysis of influence of cold vortexes on distribution of convective highwinds and hail in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,37(5-6):710–720 doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2021.066.
- Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2013. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,27:868–888. doi:10.1007/s13351-013-0605-x
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology [J]. *Weather and Forecasting*,11:560–581. doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2019. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5 [J]. *ECMWF Newsletter*,159:17–24. doi:10.21957/vf291hehd7
- Luo Y, Wu M, Ren F, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. *Journal of Climate*,29:8703–8719. doi:10.1175/JCLI-D-16-0057.1
- Lyu N, Lin Z, Nie J, et al. 2025. Environmental features of heavy precipitation under favorable synoptic patterns: a lesson from the 2021 Henan extreme precipitation event [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. doi:10.1007/s00376-025-4328-6
- Ma M, Tao S C, Zhu B Y, et al. 2005. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*,48:219–229. doi:10.1360/03yd0204
- Weisman M L, Klemp J B. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. *Monthly Weather Review*,110(6):504–520 doi:10.1175/1520-0493(1982)110
- Yang L, Zheng Y G. 2024. The short-duration heavy rainfall in different quadrants of Northeast China cold vortices [J]. *Journal of Meteorological Research*,38(2):321–338. doi:10.1007/s13351-024-3055-8
- Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convection research and operation in China [J]. *Journal of Meteorological Research*,34:189–217. doi:10.1007/s13351-020-9875-2
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J. 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer [J]. *Chinese Science Bulletin*,53:1574–1586. doi:10.1007/s11434-008-0116-9

(责任编辑 张文)