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

天津一次极端强降水过程的观测特征及成因分析

廖云琛 陈宏 张嘉霖 李明聪 孙树鹏 吴洋 尹紫薇

Observational characteristics and causes analysis of an extreme heavy rainfall event in Tianjin

LIAO Yunchen，CHEN Hong，ZHANG Jialin，LI Mingcong，SUN Shupeng，WU Yang，YIN Ziwei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-205

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

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比
Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain
暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

4次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征对比分析
Comparison analysis of raindrop spectrum characteristics of four typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai
暴雨灾害. 2025, 44(5): 621-631 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-170

青海高原一次极端降水天气特征及环境条件分析
Analysis of the characteristics and environmental conditions of an extreme rainfall event on Qinghai Plateau
暴雨灾害. 2025, 44(6): 733-743 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-202

“海葵”台风(1211号)暴雨雨滴谱特征分析
Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by typhoon Haikui (No.1211) in Anhui
暴雨灾害. 2020, 39(2): 167-175 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.007

华南前汛期强降水过程雨滴谱特征研究
Research on raindrop size distributions of strong precipitation events during the South China pre-flood season
暴雨灾害. 2024, 43(6): 637-647 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-119

商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析
Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo
暴雨灾害. 2023, 42(6): 659-669 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-256

关注微信公众号，获得更多资讯信息

廖云琛,陈宏,张嘉霖,等.2026.天津一次极端强降水过程的观测特征及成因分析[J].暴雨灾害,45(1):68−79. LIAO Yunchen, CHEN Hong, ZHANG Jialin, et al. 2026. Observational characteristics and causes analysis of an extreme heavy rainfall event in Tianjin [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):68−79 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−205

天津一次极端强降水过程的观测特征及成因分析

廖云琛[1], 陈宏[2, 3], 张嘉霖[1], 李明聪[4], 孙树鹏[1], 吴洋[1], 尹紫薇[1]

(1. 天津市津南区气象局, 天津 300350; 2. 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074; 3. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081; 4. 天津市东丽区气象局, 天津 300300)

摘　要: 2022 年 7 月 3 日, 天津津南发生一次超历史极值的极端强降水过程。利用常规观测、天气雷达和再分析等资料从大尺度环流形势、中尺度对流系统的发生与发展、云微物理尺度等三个方面分析此次过程的观测特征及成因。结果表明: 此次过程具有持续时间长、雨强大的特点。降水前高温、高湿、高能环境配合 500 hPa 高空槽前西南暖湿气流和台风“暹芭”北侧东南气流形成的偏南气流为此次降水过程提供了有利的环流背景和水汽条件。此次强降水过程由上游降水产生的冷池外流、边界层中东风扰动以及地面辐合线共同触发。中尺度辐合及其与槽前较强风速的相互作用在经向上形成中尺度次级环流, 促使津南地区垂直运动发展和维持, 进而导致此次强降水过程发生与发展。此次强降水过程具有持续且稳定的大雨滴直径和高数浓度的特征, 主要表现为“大陆性”对流降水的特征。以上因素的共同作用是此次局地极端短时强降水过程形成的重要原因。

关键词: 极端降水; 暖区; 冷池; 雨滴谱

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−205

Observational characteristics and causes analysis of an extreme heavy rainfall event in Tianjin

LIAO Yunchen[1], CHEN Hong[2, 3], ZHANG Jialin[1], LI Mingcong[4], SUN Shupeng[1], WU Yang[1], YIN Ziwei[1]

(1. *Meteorological Service at Jinnan District of Tianjin*, *Tianjin* 300350; 2. *Tianjin Weather Modification Office*, *Tianjin* 300074; 3. *China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory*, *Beijing* 100081; 4. *Meteorological Service at Dongli District of Tianjin*, *Tianjin* 300300)

Abstract: An extreme heavy rainfall event occurred in Tianjin Jinnan on July 3, 2022. Based on conventional observational data, weather radar, and reanalysis datasets, this study analyzes the observational characteristics and mechanisms of this event from three perspectives: large-scale circulation patterns, the initiation and development of meso-scale convective systems, and cloud microphysical scales. The results are as follows. This event is characterized by its long duration and high rainfall intensity. The pre-precipitation environment was characterized by high temperature, high humidity, and high energy features. These conditions, combined with a southerly airflow—formed by the confluence of southwesterly warm and moist flow preceding the 500 hPa upper-level trough and southeasterly flow north of Typhoon Chaba, provided favorable moisture and warm, moist environmental conditions for the event. The rainfall event was jointly triggered by the cold pool outflow from upstream precipitation, an easterly disturbance within the boundary layer, and a surface convergence line. Meso-scale convergence, and its interaction with the strong pre-trough wind speeds, generated a meridional mesoscale secondary circulation. This circulation further promoted the development and maintenance of vertical motion over the Jinnan area, consequently leading to the initiation and intensification of the heavy rainfall event. This event was characterized by sustained and stable large raindrop diameters and high number concentrations, exhibiting features typical of "continental" convective precipitation. The synergy of these multi-scale factors is a key driver behind the formation of this extreme short-duration heavy rainfall event.

Key words: extreme rainfall; warm zone; cold pool; raindrop spectrum

收稿日期: 2024−11−25; **定稿日期**: 2025−12−19

资助项目: 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题 (23SWQXM005); 环渤海区域海洋气象科技协同创新项目 (QYXM202314)

第一作者: 廖云琛, 主要从事灾害性天气预报研究。E-mail: liaoyunchen0502@163.com

通信作者: 陈宏, 主要从事人工影响天气和暴雨预报研究。E-mail: chenhongfengye@163.com

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

引　言

暴雨是我国最主要的气象灾害之一, 其所引发的流域洪灾、城市内涝及滑坡、泥石流等衍生灾害会严重影响我国经济社会发展 (杨舒楠等, 2023)。研究表明, 受全球变暖影响, 大气不稳定性增加, 更多地区出现极端降水事件 (Li et al., 2018; Qin et al., 2021)。近年来, 华北极端暴雨事件频发, 无论是小时雨强还是过程降水量常突破历史极值 (陈双等, 2026)。2012 年 7 月 21 日北京“7.21”暴雨, 最大累计降水量达到 460 mm (孙继松等, 2012); 2021 年 7 月 17—22 日, 河南“7.20”暴雨郑州市雨量计观测日累计降水量高达 624.1 mm (张哲等, 2022)。

暴雨产生的三个必要条件为充足的水汽供应、有利的动力抬升条件以及较长时间的降水过程 (Doswell et al., 1996)。在充足水汽供应方面, 低空急流的作用不可忽视, 因为它在大气中建立了一条长距离的水汽输送通道, 将充足的水汽从低纬度的海洋区域输送到中高纬度地区, 为暴雨的发生提供了不可或缺的条件 (廖晓农等, 2013)。一般来说, 暴雨通常与 α 中尺度或天气尺度系统的变化密切相关 (Lau et al., 2008), 例如西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 的西伸北抬 (陶诗言, 1980)、台风北上 (孙建华等, 2006) 以及天气尺度涡旋和气旋的发展等 (雷蕾等, 2017)。此外, 暴雨期间 β 中尺度或 γ 中尺度对流系统的发展往往导致短时强降水 (Luo et al., 2014, 2016), 因此, 暴雨通常是多尺度相互作用的结果 (Pu et al., 2022), 特别是大多数极端暴雨过程都伴随着短时强降水。

黄士松 (1986) 根据华南地区汛期的历次暴雨过程引入了“暖区暴雨”的概念。这种类型的暴雨具有强度大、降水时间相对集中、范围小、突发性强的特点。此类降水类型, 斜压强迫并不显著, 降水通常与副高和急流密切相关, 并伴有丰富的水汽输送。此外, 此类降水类型的触发机制复杂, 往往受地形影响。强降水通常发生在 850 hPa 的暖湿舌区域, 环境条件包括高温高湿、较高的对流有效位能、较低的对流抑制能量以及强烈的高层辐散等, 并且通常与暖湿气流的不稳定性有关 (陈静, 2003; 何立富等, 2016; 赵玉春等, 2008)。虽然“暖区暴雨”这一概念是针对华南地区的降水提出的, 但实际上华北地区也存在暖区暴雨 (谌芸等, 2018; 雷蕾等, 2020; 刘瑞鑫等, 2021)。天津地处华北平原东北部, 东临渤海, 时常受到东风和海风锋的影响, 从而导致强降水等强对流天气的发生 (张楠等, 2018; 尉英华等, 2019; 王艳春等, 2023)。由于东风带来的暖湿气流输送, 天津地区的暖区暴雨也可能引发局地强降水, 甚至造成严重损失。2022 年 7 月 3 日天津发生的一次超历史极值的极端强降水过程 (以下简称“7.3”极端强降水过程) 正是这类明显的槽前暖区暴雨过程。在此次降水过程中, 上层冷空气的影响不明显, 大气斜压性较弱, 预报难度较大。

本文基于常规观测、天气雷达和再分析等资料, 从大尺度环流形势、中尺度对流系统的发生与发展、云微物理尺度三个方面, 对天津“7.3”极端强降水过程的基本观测特征及成因进行了分析, 以期为天津地区暴雨灾害性天气预报提供技术支持。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文所用资料包括: (1) 欧洲中期天气预报中心提供的第五代再分析资料 (ERA5), 水平分辨率为 0.25°×0.25°, 用于大尺度环流形势和天气系统分析; (2) 天津市 303 个气象观测站风向、风速、露点温度、1 min 降雨量资料, 天津津南地基全球卫星导航系统气象 (Global Navigation Satellite System/Meteorology, GNSS/MET) 水汽观测逐小时整层可降水量资料, 塘沽 SA 波段多普勒天气雷达 6 min 资料, 变分多普勒雷达分析系统 (Variational Doppler Radar Analysis System, VDRAS) 18 min 资料 (空间分辨率为 5 km×5 km), 用于中尺度实况分析; (3) 天津津南气象观测站雨滴谱 1 min 资料, 用于云微物理尺度分析。以上资料时间段为 2022 年 7 月 2 日 20:00—3 日 20:00 (北京时, 下同)。

1.2　研究方法

本文利用张哲等 (2022)的分类方法, 基于雨滴谱数据的降水率和降水率的时间变化区分对流云降水和层状云降水, 即对于 1 min的雨滴谱仪观测降水率, 如果其大于 5 mm·h^{-1}, 或者从 $t-\Delta t$到$t+\Delta t$ 的降水率标准差大于 1.5 mm·h^{-1}, 则认为该分钟数据为对流云降水, 否则为层状云降水。本文中 Δt 为 5 min。

2　降水实况

2022 年 7 月 3 日凌晨天津地区出现一次超历史极值的极端强降水过程。图 1 给出 2022 年 7 月 2 日 20:00—7 月 3 日 20:00 天津市区域气象观测站 (以下简称区域站) 累计降水量分布。从中可见, 有 68 个站点累积降水量达到 50 mm以上, 12 个站点累计降水量达到 100 mm 以上。此次过程出现两个强降水中心, 分别位于天津南部的津南区和北部的宝

坻区，其中津南的降水强度更大，最大降水出现在津南农业园区站，为 171.8 mm。

图 2 为 7 月 3 日 04:00—08:00 津南站和津南农业园区站逐小时和逐分钟降水量时间序列。可见，津南农业园区站 7 月 3 日 04:00—10:00 的 6 h 降水量为165.1 mm，05:00—08:00 的 3 h 降水量为 150.9 mm，最大小时雨强为 76.6 mm·h^{-1}，同时段津南站 6 h 降水量为 135.4 mm，3 h 降水量为 125.0 mm，最大小时雨强为 96.3 mm·h^{-1} (图 2a)。津南站小时雨强、3 h 降水量、6 h 降水量均突破其建站以来最大值。图 2b 给出 2022 年 7 月 3 日 04:00—08:00 津南站和津南农业园区站的逐分钟降水量。从中看到，本次过程集中降水时段在 04:30—07:30。7 月 3 日 04:30—05:15，降雨首先出现在津南西部的农业园区站，峰值出现在 05:11，为 4.2 mm·min^{-1}，05:04—05:13 的 10 min 累计降雨为 30.7 mm，05:15 之后农业园区站的降水趋于平稳，05:50—06:00、06:50—07:10 存在降水间歇期，07:20 之后农业园区站降雨趋于结束。津南站降水开始时间略晚于农业园区站，降水量峰值出现在 3 日 05:27 和 05:28，为 4.6 mm·min^{-1}，05:24—05:33 的 10 min 累计降水量达 32.6 mm，其中 05:26、05:27 和 05:28 津南站的分钟雨强分别为 3.9 mm·min^{-1}、4.6 mm·min^{-1} 和 4.6 mm·min^{-1}，分钟降水效率逼近 2021 年郑州罕见的“7.20”暴雨的 4.7 mm·min^{-1} (齐道日娜等, 2022)。可见，2022 年 7 月 3 日凌晨这次降雨过程具有持续时间长、雨强大的特点。

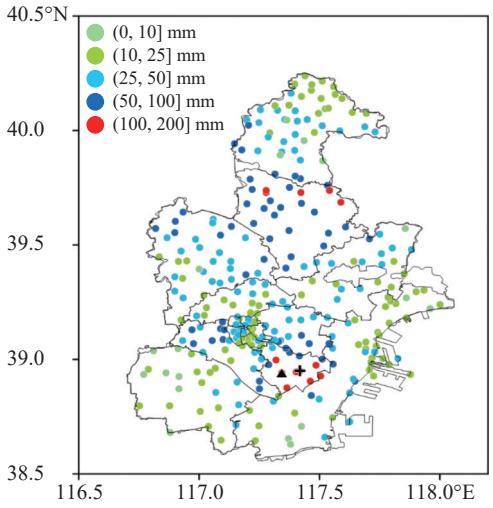


图 1 2022 年 7 月 2 日 20:00—3 日 20:00(北京时，下同)天津地区累计降水量空间分布图 (╋表示津南站所在位置；▲表示津南农业园区站所在位置)

Fig. 1 Spatial distribution of accumulated precipitation in the Tianjin region from 20:00 BT on July 2, 2022, to 20:00 BT on July 3, 2022 (The black plus represents the location of Jinnan Station, the black triangle represents the location of Jinnan Agricultural Park Station)

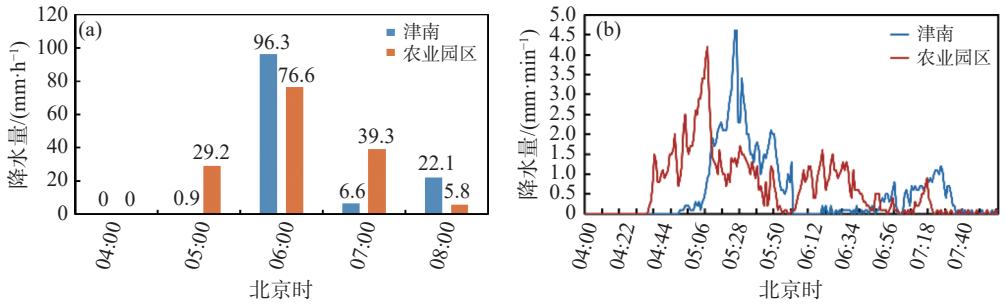


图 2 2022 年 7 月 3 日 04:00—08:00 津南站和津南农业园区站逐小时 (a) 和逐分钟 (b) 降水量时间序列

Fig. 2 Time series of (a) hourly and (b) minute precipitation at the Jinnan Station and Jinnan Agricultural Park Station from 04:00 BT to 08:00 BT on July 3, 2022

3 大尺度环流形势

每年 7 月上旬至中旬，副高开始西伸北抬，华北雨季逐渐开始 (陶诗言, 1980)。2022 年 7 月 2 日 14:00，京津冀地区在 200 hPa 上处于高空急流入口区右侧，500 hPa 上稳定地处于西风槽前暖湿气流中，西风槽位于山西西部 (38º—45ºN) 且逐渐东移，700 hPa 以下均为偏南气流 (图略)。地面处于“东高西低”形势下，受东南风的影响，天津东南部露点温度高达 27~28 ℃，且当日天津最高气温达 31~32 ℃，为显著的高温、高湿环境 (图略)。2 日 20:00，天津已处于 200 hPa 高空急流入口区右侧。图 3 为 2022 年 7 月 2 日 20:00 不同等压面位势高度场和风场，由图 3 可知，随着 500 hPa 高空槽东移 (图 3a)，850 hPa (图 3c) 和 925 hPa (图 3d) 的低空急流加强建立，并且 850 hPa 和 925 hPa 偏南气流中均存在台风“暹芭”东北侧的东南气流输送，进一步为天津地区提供了有利的水汽和暖湿环境条件。同时，地面气压场也呈现出“东高西低”分布 (图 3b)。

天津无本地探空，根据上游北京站探空图 (图 4a、c) 可见，7 月 2 日 14:00 的对流有效位能 (CAPE) 高达 1 565 J·kg^{-1}，对流抑制能量低。受到低空急流的影响，

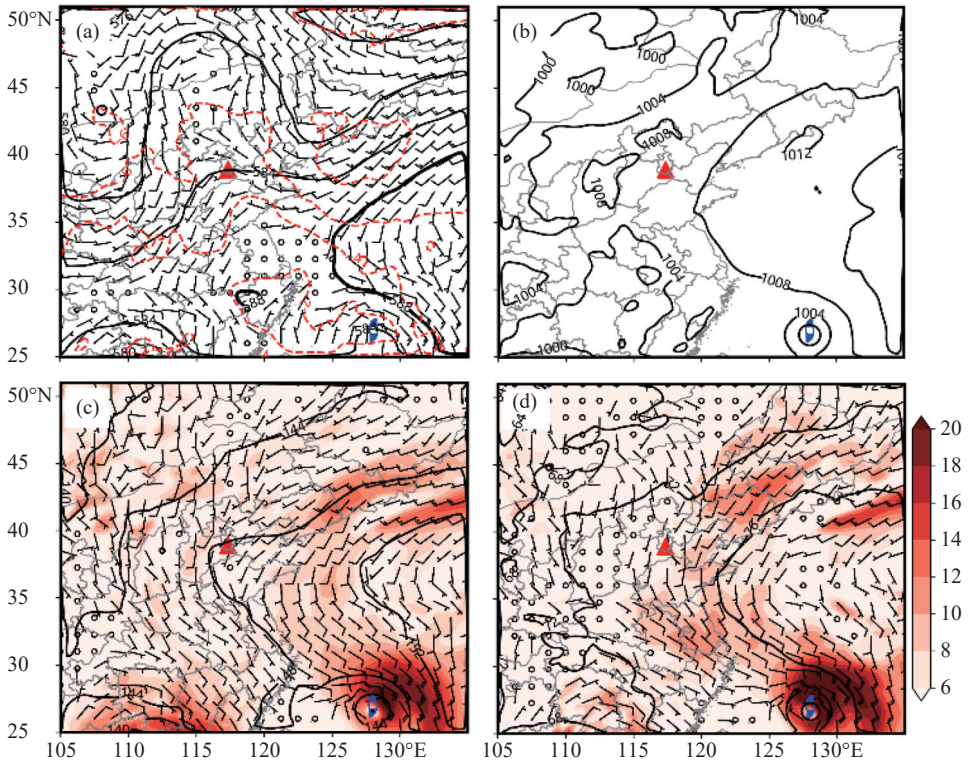


图 3 2022 年 7 月 2 日 20:00 500 hPa 位势高度 (黑色实线, 单位: dagpm)、温度 (红色虚线, 单位: ℃) 与风场 (风向杆) 合成图 (a)、海平面气压场 (b, 黑色实线, 单位: hPa) 以及 850 hPa (c) 和 925 hPa (d) 位势高度 (黑色实线, 单位: dagpm) 与风场 (风向杆及填色, 单位: m·s^{-1}) 合成图 (红色三角形和蓝色台风符号分别表示津南区和台风的位置)

Fig. 3 Composite maps of (a) 500 hPa geopotential height (black solid lines, unit: dagpm), isotherms (red dashed lines, unit: °C), and wind field (wind barbs), (b) sea level pressure field (black solid lines, unit: hPa), (c) 850 hPa and (d) 925 hPa geopotential height (black solid lines,unit: dagpm) and wind field (wind barbs and shaded, unit: m·s^{-1}) at 20:00 BT on July 2, 2022 (The red triangle and blue typhoon symbol indicate the locations of the Jinnan district and the typhoon, respectively)

强降水出现前北京地区的 CAPE 不断增大, 自由对流高度降低, 到 2 日 20:00 CAPE 达到 1 949 J·kg^{-1}。在低空急流的影响下, 14:00 抬升凝结高度 (LCL) 低至 810 m, 20:00 的 *K* 指数达 30 ℃, 850 hPa 比湿由 14:00 的 12 g·kg^{-1} 增至 14 g·kg^{-1}。抬升凝结高度较低, 有利于强降水的发生发展 (蒋亚平等, 2025)。14:00 和 20:00 北京站深层垂直风切变相对较小, 0—6 km 风矢量差仅为 5.4 m·s^{-1}, 20 时为 5.1 m·s^{-1}, 但北京站探空速度矢端图 (图 4b、d) 在 1 000—850 hPa 上表现为基本单一方向的风切变, 即风切变矢量随高度顺转, 有利于超级单体的发生 (俞小鼎, 2006)。

由上述环流形势可见, 高空槽前暖区中斜压强迫不明显, 在低空急流加强并配合显著的高温、高湿、高能环境条件, 为“7.3”极端强降水过程提供了有利的环流背景。

4 中尺度特征分析

4.1 中尺度对流系统的发生发展

这次天津南部地区暖区暴雨的中尺度对流系统有 2 个发展演变过程: (1) 静海对流建立和局地强降水云团影响 (3 日 04:00—05:00); (2) 津南上空回波的“列车效应”, 西北部冷池出流造成对流加强和移动 (3 日 05:00—06:00)。图 5 为 2022 年 7 月 3 日 04:00—05:30 45 dBz 以上的回波单体示意图, 可见, 45 dBz 以上的回波单体的移动呈现出合并-东北移动-发展的趋势。

4.2 局地强降水云团的发生发展

图 6 为 2022 年 7 月 3 日 03:48—05: 12 塘沽站天气雷达组合反射率因子分布图, 由图 6 可见, 7 月 3 日 03:48, 在静海和西青交界地区首先触发对流单体 1 (图 6a), 随后该对流单体的东南侧有多个局地新生对流系统 (图 6b), 最大的单体为对流单体 2, 04:12 前后单体 1 和 2 合并为对流单体 3 (图 6c), 且在其西南侧不断有新生的对流单体生成。值得注意的是随着对流单体 3 不断发展, 天津西南部的西青和静海交界地区对流系统后侧不断有新生单体, 受中层西南风引导, 新生对流系统向东北方向移动并入对流系统 3 中, 导致单体 3 增大, 且对流系统稳定少动, 表现为后向传播和“列车效应”(图 6d—f)。由塘沽站雷达基本反射率因子剖面 (图 7) 可以看出, 津南

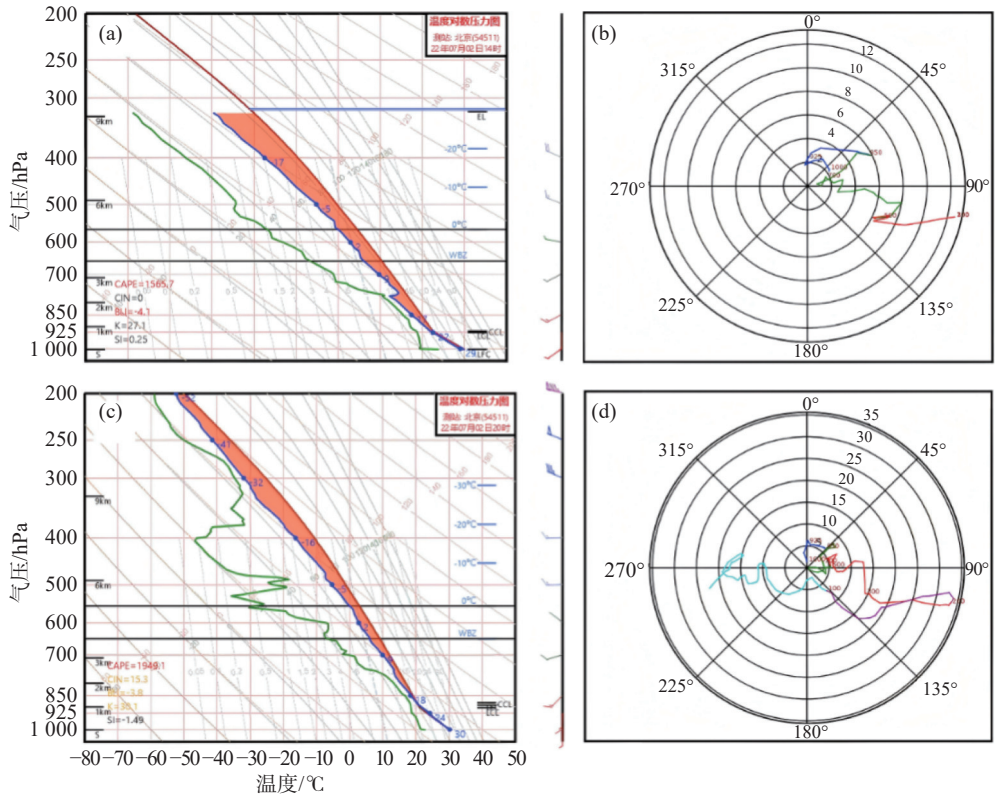


图 4 2022 年 7 月 2 日 14:00 (a、b)、20:00 (c、d) 北京站探空图 (a、c) 和速度矢端图 (b、d)

Fig. 4 (a, c) *T*-ln*p* chart and (b, d) hodographs at (a, b) 14:00 BT and (c, d) 20:00 BT on July 2, 2022

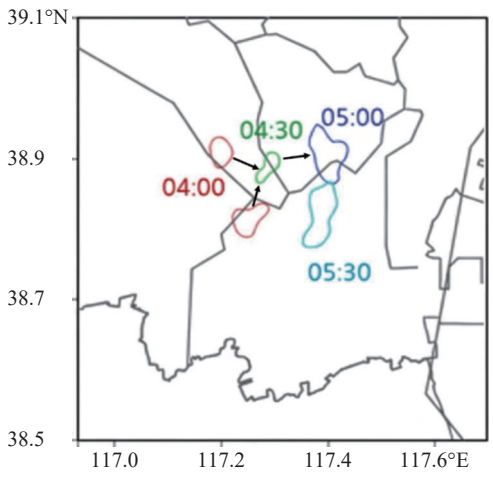


图 5 2022 年 7 月 3 日 04:00—05:30 45 dBz 以上强回波单体移动示意图 (红色代表 04:00, 绿色代表 04:30, 深蓝色代表 05:00, 浅蓝色代表 05:30, 黑色箭头代表单体移动、合并方向)

Fig. 5 Distribution of radar echo cells greater than 45 dBz from 04:00 BT to 05:30 BT on July 3, 2022 (The red, green, dark blue, and light blue colors represent 04:00 BT, 04:30 BT, 05:00 BT, and 05:30 BT on July 3, 2022, respectively, with black arrows indicating the directions of cell movement and merger)

上空强降水单体呈立柱状, 该单体中 50 dBz 以上回波的高度基本处于 10 km 高度以下, 最高接近−20 ℃环境温度所在高度 (2 日 20:00 的北京站探空资料判断该高度在 8.1 km 左右), 质心较高, 属于高质心大陆性强对流型 (俞小鼎, 2013; 王丛梅和俞小鼎, 2015), 可伴随效率较高的强降水。

由于对流不断发展, 津南上空对流系统组织化不断加强, 强降水位置集中, 局地性强 (图 6e—h)。图 8 为 2022 年 7 月 3 日 04:00—05:00、05:00—06:00 的小时降水量和 10 m 风场合成图, 从中可见, 短时强降水开始于 04:00—05:00 (图 8a), 并且在 3 日 05:00—06:00 时天津南部的降水云团造成了一定范围 50 mm以上的强降水 (图 8b)。

4.3 对流系统发展的机制

3 日 3:00 之后, 北京西南部的对流系统显著加强, 50 dBz 以上的强回波中心高度伸展至 0℃ 层高度以上 (图略), 呈现高质心典型大陆型强对流的回波形态。图 9 为 2022 年 7 月 3 日 200 m 风矢量和扰动温度分布图, 由图 9 可见, 03:30 北京的对流系统东移发展并在近地面产生冷池, 前侧出现冷池出流 (图 9a), 与东南气流在静海和西青交界产生对流辐合中心, 首先触发了对流单体 1 (图 6a)。03:42 北京西南部冷池出流维持 (图 9b), 偏西气流造成该地区的对流系统向东发展, 逐渐向津南地区移动; 同时静海地区的对流系统由于受到 200 m 西南气流的引导作用不断向东北移动, 并演变成辐合线。冷池出流造成两个对流系统逐渐靠近, 04:00 东移的对流系统和东北移

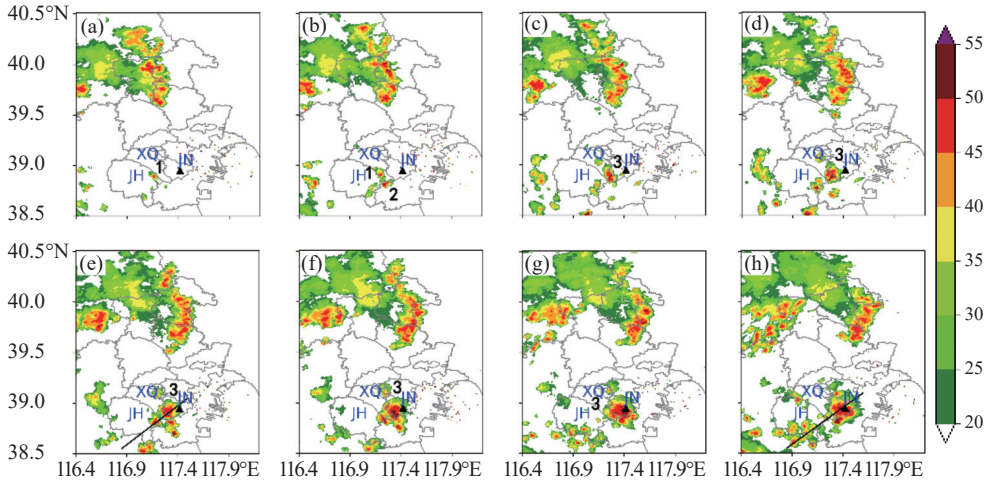


图 6 2022 年 7 月 3 日 03:48 (a)、04:00 (b)、04:12 (c)、04:24 (d)、04:36 (e)、04:48 (f)、05:00 (g)、05: 12 (h) 塘沽雷达组合反射率因子分布图 (“XQ”、“JN”和“JH”分别表示西青、津南、静海, 下同。图 e、h 中的黑线对应于图 7a 和 7b 中的剖面位置, 黑色三角形和数字分别表示津南以及对流单体)

Fig. 6 Distribution of composite radar reflectivity factor from Tanggu radar at (a) 03:48 BT, (b) 04:00 BT, (c) 04:12 BT, (d) 04:24 BT, (e) 04:36 BT, (f) 04:48 BT, (g) 05:00 BT, and (h) 05:12 BT on July 3, 2022. ("XQ," "JN," and "JH" denote Xiqing, Jinnan, and Jinghai, respectively. The black lines in panels (e) and (h) correspond to the cross-section locations in Fig. 7a and Fig. 7b, and the black triangle and numbers represent the location of Jinnan and the convective cells, respectively)

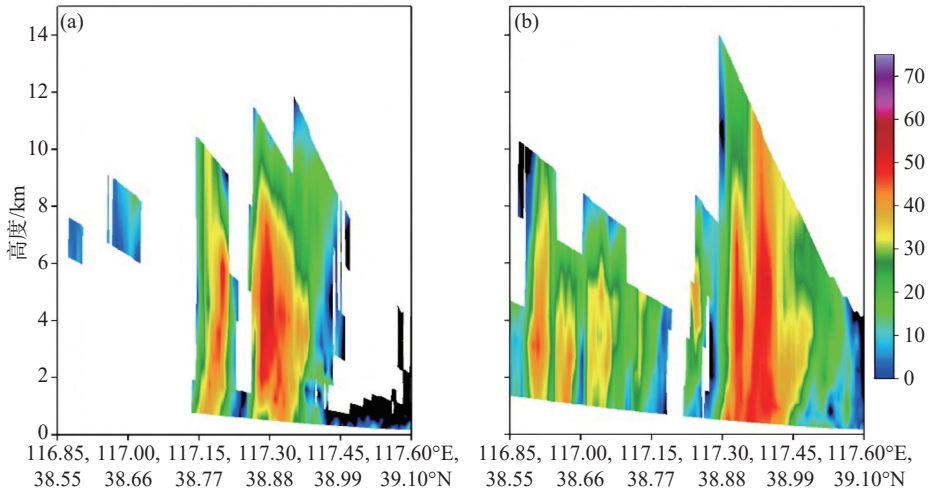


图 7 2022 年 7 月 3 日 4:36 (a)、5:12 (b) 塘沽雷达基本反射率因子垂直剖面

Fig. 7 Vertical cross sections of the Tanggu radar's base reflectivity factor at (a) 04:36 BT and (b) 05:12 BT on July 3, 2022

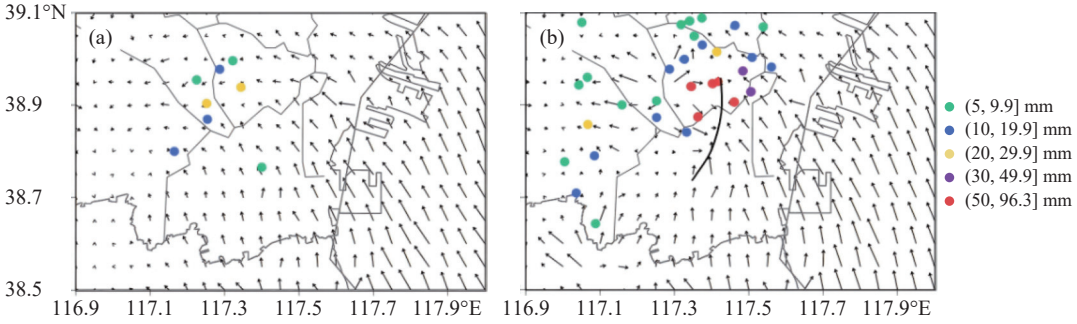


图 8 2022 年 7 月 3 日 04:00—05:00 (a)、05:00—06:00 (b) 的小时降水量和 10 m 风场 (矢量) 合成图 (黑色粗实线表示地面辐合线)

Fig. 8 Composite map of hourly precipitation and 10-meter wind field (vectors) from (a) 04:00 BT to 05:00 BT on July 3, 2022 and from (b) 05:00 BT to 06:00 BT on July 3, 2022 (The black solid lines indicate the surface convergence)

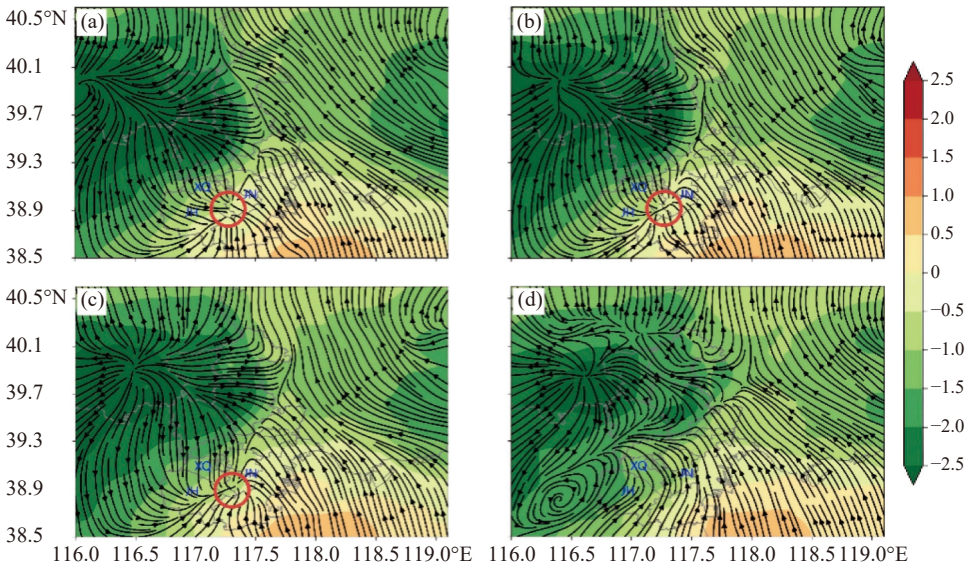


图 9 2022 年 7 月 3 日 03:30 (a)、03:42 (b)、04:00 (c) 和 04:54 (d) 的 VDRAS 的 200 m 风场 (流线) 和扰动温度 (填色, 单位: ℃) 的合成图 (红圈表示辐合中心)

Fig. 9 Composite map of the VDRAS 200 m wind field (streamlines) and perturbation temperature (shaded, unit: °C) at (a) 03:30 BT, (b) 03:42 BT, (c) 04:00 BT, and (d) 04:54 BT on July 3, 2022 (The red circles denote the convergence centers, respectively)

的辐合线在津南地区合并为对流单体 3 (图 6c), 来自边界层的冷池出流和来自渤海的东南气流共同造成了对流系统稳定少动, 因而多站出现了 70 mm 以上的小时强降水。此外, 从 04:24—05:12, 在西青和市区之间持续存在弱回波系统 (图 6d—h), 其对津南地区对流系统的发展也至关重要。如图 8b 所示, 由西青和市区之间持续存在的弱回波系统产生了一个非常清晰的辐散风场 (类似于下击暴流), 该辐散风场的出流与津南地区近地面的东南风之间形成了强烈的辐合, 造成津南地区的对流单体 3 快速发展。

图 10 为 2022 年 7 月 3 日 04:00、05:00 的 10 m 风场和露点温度合成图。从中可见, 3 日 04:00 在天津西青-津南-滨海新区南部形成东南—西北走向的露点高值带 (图 10a), 近地面偏东风将高温高湿的气流不断输送至西青和津南交界, 为对流系统东移后进入该地区后的加强和发展提供了有利条件。3 日 05:00, 最大露点温度达到 27.0 ℃ (图 10b), 此时津南的降水已经开始, 来自渤海的低层东南风也将高温高湿的水汽输送至该地区, 使中尺度对流系统继续维持。

图 11 为 2022 年 7 月 3 日的 200 m 风场、塘沽雷达组合反射率因子的合成图和沿 38.95ºN 方向上的风场、散度和垂直速度的合成剖面图。从中可见, 04:00, 西青、静海、滨海新区南部交界存在两个对流系统 (图 11a), 津南东侧低层开始出现偏东风 (图 11b), 并伴随弱的上升气流。04:36, 对流系统发展, 津南西侧的偏西气流加强, 进一步促进了对流系统的发展。此时两个对流单体发生合并加强 (图 11c)。偏东气流加强的同时, 其整层厚度约为 500 m (200—700 m)。偏西和偏东气流在津南东部交汇产生上升运动 (图 11d)。

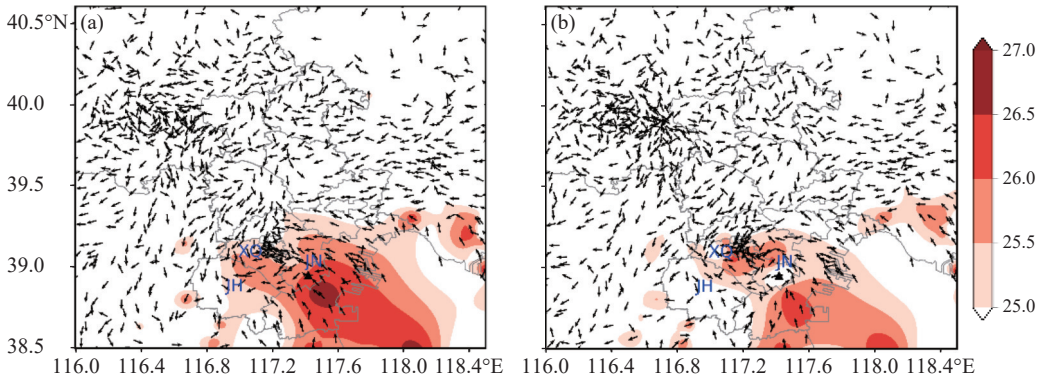


图 10 2022 年 7 月 3 日 04:00 (a)、05:00 (b) 的 10 m 风场 (风向杆) 和露点温度 (填色, 单位: ℃) 的合成图 (黑色三角形表示津南站位置)

Fig. 10 Composite map of the 10-m wind field (wind barbs) and dew point temperature (shaded, unit: °C) at (a) 04:00 BT and (b) 05:00 BT on July 3, 2022 (The black triangle indicates the location of the Jinnan Station)

这支上升气流在高度 1 700 m 冲出云体, 并形成沿对流单体传播方向的顺时针垂直环流 C1, 其水平尺度为 20 km, 环流中心位于 400~800 m。前侧中层入流进入云体, 在高层分为前侧和后侧两支出流, 前侧出流与偏东暖湿气流在对流系统移动前方形成强辐合, 在津南上空存在明显的垂直上升运动, 垂直速度约为 0.2 Pa·s^{-1}。同时津南西侧的农业园区站降水增强, 小时雨强达到 76.6 mm·h^{-1}。05:06, 对流系统的东侧 (图 11e) 的垂直环流 C1 上升东移 (图 11f), 厚度和强度均增强, 东西两侧的出流在津南东部造成抬升运动的加强。垂直方向上表现为在对流系统前侧两支上升气流合并, 西侧冷池出流与前侧入流在 1 200 m 以下辐合, 造成 800~2 700 m 高度上更强烈的上升运动, 垂直速度达到 0.4 Pa·s^{-1}。05:42, 对流系统逐渐向东移动 (图 11g) 并使垂直环流继续东移上升 (图 11h), 此时津南地区的辐合强度达到最大, 为−64×10^{-5}·s^{-1}, 为该站的强降水持续提供有利的上升条件。

4.4 水汽特征

任何一次强降水过程均离不开丰沛的水汽。此次降水过程中, 津南站在 975 hPa、925 hPa 和 850 hPa 三层最大比湿分别达到 19 g·kg^{-1}、16 g·kg^{-1} 和 14 g·kg^{-1} (图略)。图 12 为 2022 年 7 月 2 日 20:00—7 月 3 日

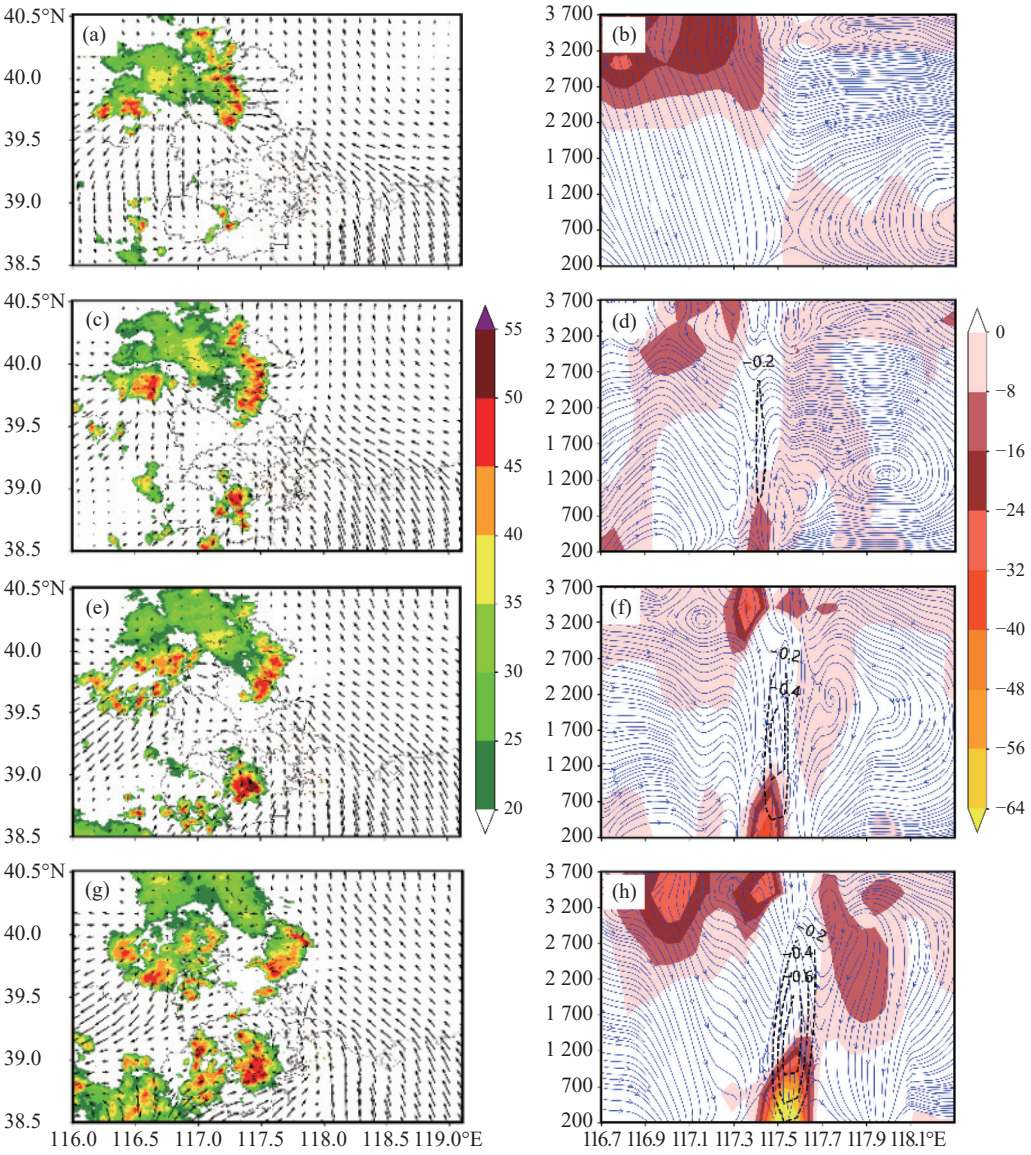


图 11 2022 年 7 月 3 日 04:00 (a, b)、04:36 (c, d)、05:06 (e, f) 和 05:42 (g, h) 的 200 m 风场 (矢量)、塘沽雷达组合反射率因子 (单位: dBz) 合成图 (a, c, e, g) 以及沿 38.95ºN 方向上的风场 (流线)、散度 (填色, 单位: 10^{-5}·s^{-1}) 和垂直速度 (蓝色线条, 单位: Pa·s^{-1}) 的合成剖面图 (b、d、f、h) (黑色三角形表示津南位置)

Fig. 11 (a, c, e, g) Composite maps for 200 m wind field (vectors) and Tanggu radar composite reflectivity factor (unit: dBz) and (b, d, f, h) composite cross-sections of the wind field (streamlines), divergence (shaded, unit: 10^{-5}·s^{-1}), and vertical velocity (blue lines, unit: Pa·s^{-1}) along 38.95°N at (a, b) 04:00 BT, (c, d) 04:36 BT, (e, f) 05:06 BT, and (g, h) 05:42 BT on July 3, 2022 (The black triangle indicates the location of Jinnan)

18:00 津南站逐小时降水量和整层可降水量的时间序列，可见，7 月 2 日夜间—7 月 3 日凌晨津南站上空的整层可降水量一直维持在 40 mm 以上，伴随着 7 月 3 日 05:00 强降水开始，并在 06:00 达到最大小时降水量的过程中，整层可降水量持续上升，持续维持在近 60 mm 的数值。综合比湿和整层可降水量来看，此次过程拥有充沛的水汽。

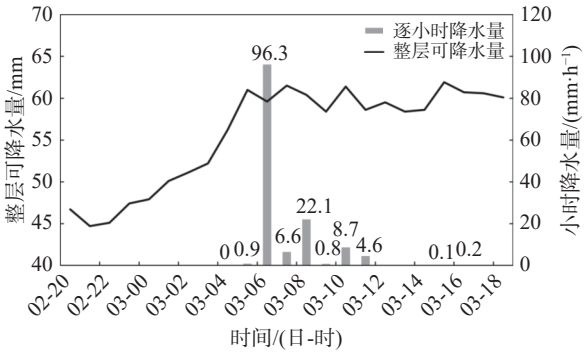


图 12 2022 年 7 月 2 日 20:00—7 月 3 日 18:00 津南站逐小时降水量 (灰色柱状) 和整层可降水量 (黑实线) 时间序列

Fig. 12 Time series of hourly precipitation and column-integrated precipitable water at the Jinnan Station from 20:00 BT on July 2 to 18:00 BT on July 3, 2022

5 云微物理特征

5.1 雨滴谱微物理参量总体特征

利用质控后的雨滴谱数据，对 04:00—08:00 时逐分钟雨滴谱微物理参量的频率分布进行统计，由于降水率 (R)、粒子数浓度 (N_t) 和归一化截距参数 (N_w) 数值变化范围较大，数值跨越了多个数量级，为了直观地体现以上物理参量的频率分布，对其取以 10 为底的对数从而将数值压缩到一个显著的区间，得到的数值为无量纲量，只表现对应物理参量的频率分布的特征。图 13 为 2022 年 7 月 3 日 04:00—08:00 津南雨滴谱仪观测的雨滴谱特征量的频率分布图，从中可见，此次强降水过程的雨滴谱质量加权平均直径 D_m、R、N_t 和 N_w 均表现为单峰型。

总体来看，本次降水过程中，津南站雨滴谱微物理参量分布体现为较大的 D_m，较高的 R、N_t 和 N_w，表现为持续且稳定的大雨滴直径和高数浓度的特征，因此才使得在本次降水过程能在短时间内产生超过历史极值的降水量。

进一步基于雨滴谱数据判别此次强降水过程的降水特征。图 14 为此次强降水过程对流云和层状云降水的 D_m 和 lg(N_w) 的散点分布图。图中黑色方框分别是 Bringi 等 (2003) 针对雨滴谱特征提出的“海洋性”和“大陆性”对流降水的 D_m-lg(N_w) 的分布区域；黑色实线为 Bringi 等 (2009) 给出的对流云、层状云降水分离线。Bringi 等 (2003) 定义“海洋性”对流降水的特征是较小的 D_m 和较高的 N_w，而“大陆性”则相反。由图 14 可见，此次降水过程中对流性降水和层状云降水的样本分别为 148 和 46 个，主要以对流云降水为主。此次强降水过程的对流云降水雨滴谱特征较为特殊，其数据大部分分布在分离线上方，

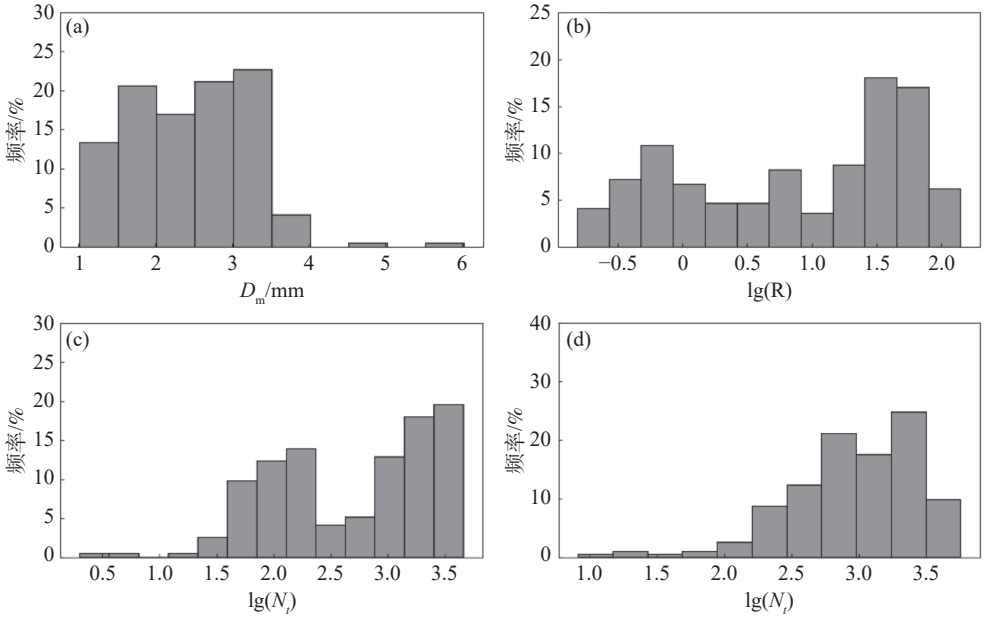


图 13 2022 年 7 月 3 日 04:00—08:00 津南雨滴谱仪质量加权平均直径 D_m (a, 单位: mm)、降水率以 10 为底的对数 lg(R) (b)、粒子数浓度以 10 为底的对数 lg(N_t) (c)、归一化截距参数以 10 为底的对数 lg(N_t) (d) 的频率分布图

Fig. 13 Frequency distribution of (a) mass-weighted mean diameter D_m (unit: mm), (b) logarithm of precipitation rate (lg(R)), (c) logarithm of particle number concentration (lg(N_t)), and (d) logarithm of the normalized intercept parameter (lg(N_t)), observed by the Jinnan disdrometer from 04:00 BT to 08:00 BT on July 3, 2022

但仍有些许样本散布在分离线下方, 所有层状云降水雨滴谱数据均分布在分离线下方。总体来看, 分离线基本能够分隔开对流云、层状云降水。此外, 对流云降水雨滴谱数据分布在“大陆性”对流分布方框内以及附近, 不存在于“海洋性”对流区域内, 因此此次过程中对流云降水的雨滴谱主要表现为“大陆性”对流降水的特征。综合以上分析, 说明此次强降水过程主要以对流云降水为主, 并且从雷达基本反射率因子垂直剖面图 (图 7) 和雨滴谱特征 (图 14) 的分析结论来看, 二者的结果相一致, 此次强降水过程为大陆性强对流型。

5.2 雨滴谱微物理参量时间演变特征

图 15 为强降水时段内津南站雨滴谱特征量的时间变化。为了筛除分钟样本的扰动, 对特征量进行了三点平滑。雨滴谱微物理参量的特征较好地反映了雨强的变化特征, 且粒子数浓度 (N_t)、降水率 (R) 和质量加权平均直径 (D_m) 的变化情况基本一致。如 2 所述, 津南站降雨过程的集中时段是在 05:00—07:30, 且存在一段降水间歇期。分析图 15 可知, 强降水发生前, N_t 较低, 随着 N_t 的显著增加, R 也明显迅速增长。在 05:25—05:29, R 甚至达到 100 mm·h^{-1} 以上, 其中 05:28 达到最大降水率 (128 mm·h^{-1}), 同一时刻, N_t 达到了最高, 为 4 320 m^{-3}, 并导致该时段的平均分钟雨强达到 3.7 mm。从 D_m 的变化曲线上来看, 其增大的趋势早于粒子数浓度和降水率, D_m 在 05:12 达到最大, 为 3.8 mm, 此时 R 并没有超过 100 mm·h^{-1}, 在 R 超过 100 mm·h^{-1} 的时段, D_m 略有下降, 但仍在保持在 3 mm 左右。随后伴随着 N_t 和 D_m 的下降, R 也迅速减小。之后在 07:00, D_m 和 N_t 再一次迅速升高, R 也同时增强。

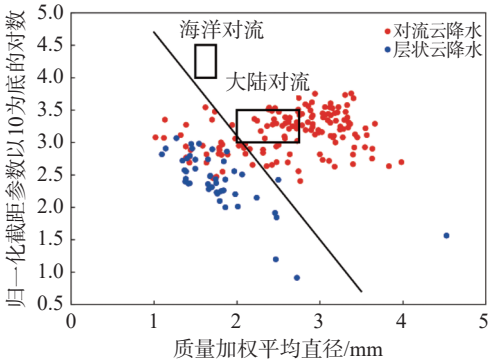


图 14 2022 年 7 月 3 日雨滴谱仪观测 D_m-$lg(N_w)$ 的散点分布图 (红点为对流云降水, 蓝点为层状云降水, 黑色方框分别是 Bringi 等 (2003) 提出的海洋性和大陆性对流降水的 D_m-$lg(N_w)$ 的分布区域; 黑色实线为 Bringi 等 (2009) 给出的对流云、层状云降水分离线)

Fig. 14 Scatter plot of D_m-$lg(N_w)$ of convective and stratiform rain types from the Jinnan Station on July 3, 2022 (The black line indicates the precipitation separation line for convective and stratiform rain types given by Bringi et al., (2009), two rectangles are maritime and continental convective clusters in Bringi et al., (2003))

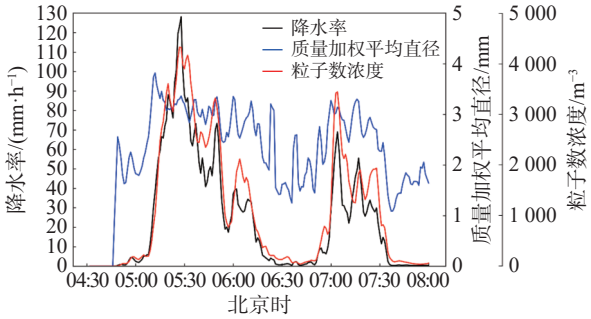


图 15 2022 年 7 月 3 日 04:30—08:00 雨滴谱特征量的时序图

Fig. 15 Time series of drop size distribution parameters from 04:30 BT to 08:00 BT on July 3, 2022

通过分析雨滴谱微物理参量的时间变化可知, 在强降水发生前, 雨滴谱特征发生了突变, 首先是 D_m 和 N_t 迅速增长, 两者的共同作用导致了在 05:00—06:00 前后发生的极端降水。此次过程中雨滴谱微物理参量的突变与环境极其丰沛的水汽有着密切的联系, 水汽在津南强烈辐合, 大气湿度已经达到饱和甚至过饱和, 水汽可以迅速凝结成大量的雨滴, 使得 D_m 和 N_t 都迅速上升。

6 结论与讨论

2022 年 7 月 3 日天津津南出现超历史极值的大暴雨过程。本文利用多源观测资料, 从大尺度环流形势、中尺度对流系统的发生与发展、云微物理尺度三个方面, 详细分析了此次过程的观测特征及成因。主要结论如下:

(1) 从大尺度环流形势场上来看, 极端降水过程发生前, 高空槽前暖区中斜压强迫不明显, 近地面存在显著的高温、高湿、高能环境条件。伴随 500 hPa 高空槽东移, 850 hPa 和 925 hPa 的低空急流加强建立, 槽前的西南暖湿气流和台风“暹芭”北侧的东南气流形成的偏南气流控制天津地区, 台风“暹芭”也为该地区提供水汽的远距离输送。以上大尺度环流形势为为 2 日夜间—3 日上午“7.3”极端强降水过程提供了有利的环流背景。

(2) 中尺度特征分析表明, 此次强降水过程是在上游降水的冷池出流、边界层偏东风扰动以及地面辐合线共同作用下发生的。地面辐合线由冷池外流的北风和来自海洋的暖湿南风形成, 对中尺度对流的触发有着重要影响。γ 中尺度辐合及其与槽前强风速带的共同作用下, 在经向形成了中尺度次级环

流，导致天津津南地区强垂直运动的发展和维持，从而造成了本次极端降雨过程发生发展。同时，此次过程整层可降水量稳定维持在近 60 mm 左右，表明拥有充沛的水汽。

(3) 从云微物理尺度上来看，此次强降水过程具有持续且稳定的大雨滴直径和高数浓度的特征，主要以对流云降水为主，并且此次过程中对流云降水大部分表现为“大陆性”对流降水的特征。同时，此次过程中雨滴谱微物理参量的突变与环境极其丰沛的水汽有着密切的联系，表示近地面水汽在津南强烈辐合，大气湿度已经达到饱和甚至过饱和。

本文仅对单次极端短时强降水过程的观测特征、成因作了初步分析，更深入的微物理尺度及各因子的综合作用机理还有待进一步研究。例如，此次过程的雨滴谱特征与双偏振参量有怎样的对应关系？是否可以借助垂廓系统获得的更加精细的观测数据探究强降水过程的中小尺度机理？后续可基于此次个例利用新的观测数据结合数值模式模拟开展更加深入的研究。

参考文献 (References):

陈静,薛纪善,颜宏.2003.物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J].气象学报,61(2):203−218. Chen J, Xue J S, Yan H. 2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation [J]. Acta Meteorological Sinica,61(2):203−218 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2003.019

陈双,张芳华,刘倍峣,等.2026. 2025 年 7 月下旬华北特大暴雨基本特征及成因初探[J].暴雨灾害,45(1):1−14. Chen S, Zhang F H, Liu B Y, et al. 2026. Basic characteristics and preliminary causes of the extreme rainstorm over North China in late July 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):1−14 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−196

谌芸,吕伟绮,于超,等.2018.北方一次暖区大暴雨降水预报失败案例剖析[J].气象,44(1):15−25. Chen Y, Lv W Q, Yu C, et al. 2018. Analysis of a forecast failure case of warm sector torrential rainfall in North China [J]. Meteorological Monthly,44(1):15−25 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.01.002

何立富,陈涛,孔期.2016.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559−569. He L F, Chen T, Kong Q. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,27(5):559−569 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20160505

黄士松.1986.华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社:1-7 Huang S S. 1986. Rainstorms of the First Rainy Season in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press:1-7 (in Chinese)

蒋亚平,覃皓,黄妮,等.2025.广西西南部一次极端暴雨过程成因分析[J].高原山地气象研究,45(1):113−121. Jiang Y P, Qin H, Huang N, et al. 2025. Cause analysis of an extreme rainstorm in Southwest Guangxi [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(1):113−121 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.01.013

雷蕾,孙继松,何娜,等.2017. “7.20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,75(5):685−699. Lei L, Sun J S, He N, et al. 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016 [J]. Acta Meteorological Sinica,75(5):685−699 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.054

雷蕾,邢楠,周璇,等.2020. 2018 年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J].气象学报,78(1):1−17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al. 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing area [J]. Acta Meteorological Sinica,78(1):1−17 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.001

廖晓农,倪允琪,何娜,等.2013.导致“7.21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J].气象学报,71(6):997−1011. Liao X N, Ni Y Q, He N, et al. 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the "7.21" heavy rain case [J]. Acta Meteorological Sinica,71(6):997−1011 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.081

刘瑞鑫,孙建华,傅慎明.2021.不同类型华南暖区暴雨过程的环流特征[J].气候与环境研究,26(4):359−373. Liu R X, Sun J H, Fu S M. 2021. Comparison of synoptic circulation characteristics in different types of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. Climatic and Environmental Research,26(4):359−373 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2021.20105

齐道日娜,何立富,王秀明,等.2022. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J].应用气象学报,33(1):1−15. Chyi D R N, He L F, Wang X M, et al. 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(1):1−15 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20220101

孙继松,何娜,王国荣,等.2012.“7.2”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,31(3):218−225. Sun J S, He N, Wang G R, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters,31(3):218−225 (in Chinese)

孙建华,齐琳琳,赵思雄.2006. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报,64(1):57-71. Sun J H, Qi L L, Zhao S X. 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in north China by "9608" typhoon [J]. Acta Meteorological Sinica,64(1):57-71 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2006.006

陶诗言.1980.中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社:1-71. Tao S Y. 1980. The Rainstorm of China [M]. Beijing:Science Press:1-71 (in Chinese)

王丛梅,俞小鼎.2015. 2013 年 7 月 1 日河北宁晋极端短时强降水成因研究[J].暴雨灾害,34(2):105−116. Wang C M, Yu X D. 2015. Investigation of the cause of an extreme flash-rain event in Ningjin county on 1 July 2013 [J]. Torrential Rain and Disasters,34(2):105−116 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2015.02.002

王艳春,陈宏,尉英华,等.2023.天津雷暴大风天气的环流场及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(6):119−126. Wang Y C, Chen H, Wei Y H, et al. 2023. Circulation field and radar characteristics of thunderstorm gales in Tianjin [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(6):119−126 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.06.

016

尉英华,陈宏,何群英,等.2019.渤海西岸偏东风对天津局地大暴雨的影响分析[J].气象,45(1):61−72. Wei Y H, Chen H, He Q Y, et al. 2019. Influence of easterly winds from west coast of Bohai Sea on local heavy rainfall in Tianjin [J]. Meteorological Monthly,45(1):61−72 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.01.006

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:97-98. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006.PrinciplesandOperationalApplicationsofDopplerWeatherRadar[M]. Beijing:China Meteorological Press:97-98 (in Chinese)

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

张楠,何群英,刘彬贤,等.2018.非典型环流形势下天津一次局地暴雨过程中尺度特征分析[J].暴雨灾害,37(3):230−237. Zhang N, He Q Y, Liu B X, et al. 2018. Analysis on the mesoscale characteristics of a local rainstorm event under atypical circulation situation in Tianjin [J]. Torrential Rain and Disasters,37(3):230−237 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.03.005

张哲,戚友存,李东欢,等.2022. 2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J].大气科学,46(4):1002−1016. Zhang Z, Qi Y C, Li D H, et al. 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(4):1002−1016 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2201.21237

赵玉春,李泽椿,肖子牛.2009.华南锋面与暖区暴雨个例对比分析[J].气象科技,36(1):47−54. Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N. 2009. Comparison analysis of South China front and warm area heavy rain systems in June 2006 [J]. Meteorological Science and Technology,36(1):47−54 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−6345.2008.01.009

Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,60(2):354−365. doi:10.1175/1520−0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2

Bringi V N, Williams C R, Thurai M, et al. 2009. Using dual-polarized radar and dual-frequency profiler for DSD characterization: a case study from Darwin, Australia [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,26(10):2107−2122. doi:10.1175/2009JTECHA1258.1

Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology [J]. Weather and Forecasting,11(4):560−581. doi:10.1175/1520−0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2

Lau K M, Zhou Y P, Wu H T. 2008. Have tropical cyclones been feeding more extreme rainfall? [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D23). doi:10.1029/2008JD009963

Li W, Jiang Z, Zhang X, et al. 2018. Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5 °C to 2.0 °C global warming levels [J]. Science Bulletin,63(4):228−234. doi:10.1016/j.scib.2017.12.021

Luo Y, Gong Y, Zhang D L. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in east China [J]. Monthly Weather Review,142(1):203−221. doi:10.1175/MWR−D−13−00111.1

Luo Y, Wu M, Ren F, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. Journal of Climate,29(24):8703−8719. doi:10.1175/JCLI−D−16−0057.1

Pu Y, Hu S, Luo Y, et al. 2022. Multiscale perspectives on an extreme warm-sector rainfall event over coastal south China [J]. Remote Sensing,14(13):3110. doi:10.3390/rs14133110

Qin P, Xie Z, Zou J, et al. 2021. Future precipitation extremes in China under climate change and their physical quantification based on a regional climate model and CMIP5 model simulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38(3):460−479. doi:10.1007/s00376−020−0141−4

(责任编辑　闵爱荣)