

尉英华,陈宏,王艳春,等,2024. 弱天气背景下天津三次局地突发暴雨中尺度特征及触发机制[J]. 气象,50(9):1093-1104. Wei Y H, Chen H, Wang Y C, et al, 2024. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of three sudden rainstorms under weak synoptic scale background in Tianjin[J]. Meteor Mon, 50(9):1093-1104 (in Chinese).

弱天气背景下天津三次局地突发暴雨中尺度 特征及触发机制*

尉英华^{1,2} 陈 宏² 王艳春² 林晓萌² 杨 洋² 傅 宁³

1 天津市海洋气象重点实验室,天津 300074

2 天津市气象台,天津 300074

3 中国民航大学,天津 300300

提 要: 利用 ERA5 再分析($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)、加密自动气象站、多普勒天气雷达和变分多普勒天气雷达分析系统等高时空分辨率资料,对比分析了 2018 年 7 月 22 日、2019 年 7 月 18 日、2021 年 8 月 23 日天津中心城区三次局地突发性暴雨过程的中尺度特征及其触发机制。结果表明:三次局地突发性强降雨均无明显天气尺度系统主导,但环境大气具备较高的对流不稳定能量和较小的对流抑制能量,抬升凝结高度仅 0.2~0.4 km,且低层均存在一定的湿层。局地突发性暴雨的发生与城市热岛及海陆下垫面特征差异造成的中小尺度系统有关,暴雨发生前天津中心城区与沿海地区之间的温差和气压差增大,中心城区附近温压场具有明显的非均匀分布特性,中尺度暖低压及其东侧的高温度梯度为局地对流发生提供了有利的中尺度环境条件。此外,暴雨发生前沿海地区均出现了明显的海风加强,城市热岛暖低压辐合与海风风速辐合共同作用使得中尺度辐合强度明显加强,是局地突发性暴雨发生的主要原因,初生的 γ 中尺度对流单体均位于地面强辐合中心边缘上空。

关键词: 弱天气背景,海风,城市热岛,中尺度辐合中心

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.051601

Mesoscale Characteristics and Triggering Mechanism of Three Sudden Rainstorms Under Weak Synoptic Scale Background in Tianjin

WEI Yinghua^{1,2} CHEN Hong² WANG Yanchun² LIN Xiaomeng² YANG Yang² FU Ning³

1 Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074

2 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

3 Civil Aviation University of China, Tianjin 300300

Abstract: Based on the high spatio-temporal resolution data such as ERA5 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ reanalysis data, automatic weather stations data, Doppler weather radar data and the retrieval data from Variational Doppler Radar Analysis System, we comparatively analyze the mesoscale characteristics and triggering mechanism of three local sudden rainstorms in the urban area of Tianjin on 22 July 2018, 18 July 2019 and 23 August 2021. The results show that there was no obvious synoptic scale system dominating the three local sudden heavy rainstorms, but the ambient atmosphere had high convective available potential energy and low convective inhibition energy. The lifting condensation height was only 0.2–0.4 km, with a certain

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(42205166)、环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202207)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-008)共同资助

2023 年 12 月 4 日收稿; 2024 年 3 月 25 日收修定稿

第一作者:尉英华,主要从事强对流预报技术研究. E-mail: weiyinghua1980@163.com

通讯作者:傅宁,主要从事气象预报技术研究. E-mail: nfu@cauc.edu.cn

wet layer in the lower level. Generally, the occurrence of local sudden rainstorm is mainly related to the mesoscale system caused by urban heat island and different underlying surface characteristics. Before the three local sudden rainstorms, the differences in temperature and pressure between the urban area and the coastal area increased, and the temperature and pressure near the urban area had obvious nonuniform distribution characteristics. The mesoscale thermal low pressure and the high temperature gradient provided favorable environmental conditions for the occurrence of the local convection. In addition, before the occurrence of the local sudden rainstorm, the sea breeze in the coastal area was obviously strengthened. The converged thermal low pressure of the urban heat island and the converged sea breeze jointly made the mesoscale convergence intensity significantly strengthened, which was the main cause for the occurrence of local sudden rainstorm. The meso- γ scale convective cells were triggered at the edge of the strong convergence center.

Key words: weak synoptic scale background, sea breeze, urban heat island, mesoscale convergence center

引 言

暴雨容易引发城市内涝、山体滑坡和泥石流,是影响我国的主要灾害性天气之一,常给社会经济和人民生命财产安全带来严重危害,其分析和预报一直是气象工作者关注的重点。目前国内外对于典型天气形势或多尺度天气系统相互作用下的暴雨研究较多,如 2012 年“7·21”(俞小鼎,2012;孙军等,2012;Zhang et al,2013)和 2016 年“7·20”(赵思雄等,2018;Xia and Zhang,2019),但局地突发性暴雨的发生往往没有明显的天气尺度系统发展,属于弱天气尺度强迫背景或非典型天气形势。由于大气斜压性弱,大尺度预报信号不明显,数值模式表现出极大的局限性,此类局地突发性暴雨预报难度很大(Weckwerth et al,2019)。国内对弱天气尺度强迫背景下的局地暴雨已进行了较多的理论研究。潘留杰等(2015)通过多个个例分析了夏季弱天气系统强迫下黄土高原强对流云的初生及演变,指出弱天气系统强迫下对流云的触发可分为地形、干线、冷池、暖堆、辐合线等五种机制;Wang et al(2014)、Wu and Luo(2016)、傅佩玲等(2018)、叶朗明等(2019)、唐佳等(2021)、李琴和邓承之(2021)指出在弱天气尺度背景下暴雨触发与中尺度过程和有利的下垫面特征有关,如山脉抬升作用、地面中尺度边界等;徐珺等(2018)、田付友等(2018)、伍志方等(2018)对 2017 年 5 月 7 日无明显天气尺度系统配合的广州局地突发性特大暴雨进行分析,指出小尺度地形辐射降温和城市热岛导致的高温梯度区有助于触发对流。这些研究揭示了弱天气尺度强迫背景下中小

尺度天气系统与强降水落区、强度的关系。

目前针对华北地区弱天气尺度强迫背景下的局地突发性暴雨研究较少。张楠等(2018)对 2014 年 8 月 16 日天津地区非典型环流形势下局地暴雨过程的中尺度特征进行分析,指出露点锋、边界层辐合线的相互作用是触发局地强降水的主要机制;湛芸等(2018)、孙密娜等(2018)、雷蕾等(2020)、杨晓亮等(2021)则分别针对不同的槽前暖区暴雨案例进行分析,指出边界层中尺度辐合线等中尺度系统是强降水发生的关键因子。上述过程虽非经典流型配置,但亦存在低空急流或低空暖切变线等天气尺度系统影响,而对于无天气尺度强迫背景下的局地突发性暴雨鲜有研究,仅陈双等(2016)、王莹等(2021)、杨晓亮等(2022)对副热带高压控制区内无任何天气尺度系统影响的局地突发性暴雨触发和维持机制进行分析,指出对流系统受边界层中尺度系统支配,尤其是海陆风、山谷风、城市热岛环流等的耦合效应。上述研究虽然提高了预报员对华北地区弱天气尺度强迫背景下局地突发性暴雨的认识,但是这种非典型环流形势下的局地突发性暴雨的发生发展机制非常复杂,尚需进一步深入探讨。

天津地处渤海西岸,受海风与热岛耦合影响,每年夏季中心城区及环城四区局地突发性暴雨频繁发生,由于历时短、范围小、雨强大,且突发性特征明显,此类暴雨是当前气象预报预警业务中的难点,在城市内涝承载力弱的情况下往往给人民生命财产安全带来极大隐患。2018 年 7 月 22 日 12:00—14:00(北京时,下同)、2019 年 7 月 18 日 13:00—15:00,以及 2021 年 8 月 23 日 14:00—16:00(以下分别简称“7·22”“7·18”“8·23”过程)天津中心城区附近均

出现 γ 中尺度突发性暴雨,其中“7·18”和“8·23”分别伴有1个站和4个站7级以上雷暴大风,“7·22”则未出现雷暴大风,上述过程均属于无天气尺度系统影响或弱天气尺度强迫的非典型天气形势。从短期预报来看,由于大尺度预报信号不明显,数值模式表现出极大的局限性,业务预报中基本漏报;从短时临近预警来看,局地对流何时、何地触发,对流触发后原地减弱消亡或快速发展加强,也给预警服务增加了很大的不确定性。由于三次过程均以突发性暴雨天气为主,本文重点针对弱(无)天气系统影响下为何出现强降水、为何仅在中心城区附近出现强降水、对流是如何被触发等业务难点,探讨弱(无)天气尺度强迫背景下的中小尺度对流系统演变特征和发生发展机理,为局地突发性暴雨提供预警着眼点,以提升预警服务能力。

1 资料数据

本文采用的资料包括欧洲中期数值预报中心ERA5再分析($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)、加密自动气象站、多普勒天气雷达和变分多普勒天气雷达分析系统(VDRAS)等高时空分辨率资料。其中,ERA5再分析资料用于大尺度环流背景分析;加密自动气象站资料用于地面气温、气压、风场及散度场的中尺度特征分析,地面散度场由加密自动气象站风向风速计算得到;多普勒天气雷达资料来源于天津塘沽站CINRAD/SA雷达,海拔高度为69.8 m;VDRAS

反演资料由北京城市气象研究院提供(陈明轩等,2011),时间分辨率为18 min,空间分辨率为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 。

2 过程概况

2018年7月22日12:00—14:00、2019年7月18日13:00—15:00、2021年8月23日14:00—16:00天津中心城区附近不足20 km区域内均出现局地突发性暴雨天气。图1分别为“7·22”“7·18”“8·23”天津地区加密自动气象站累计降水量分布。其中,2018年7月22日12:00—14:00加密自动气象站3个站累计降水量超过50 mm,最大降水量为64 mm,最大雨强为 $62.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;2019年7月18日13:00—15:00 3个站累计降水量超过30 mm,最大降水量为52.9 mm;2021年8月23日14:00—16:00 7个站累计降水量超过30 mm,最大降水量为44.6 mm,其累计降水量虽未超过50 mm,但已达到天津地区暴雨蓝色预警信号发布标准(1 h降水量达到30 mm以上)。三次强降雨均具有历时短、雨强大、局地性强、突发性明显等特点,10 min最大降水量分别达21.1、19.5、23.4 mm,具有显著的中小尺度对流性降水特征。强降雨导致中心城区部分路段积水严重,虽未造成人民生命财产安全损失,但突发性强降雨造成的社会反响给气象部门预警服务工作带来了不小压力。

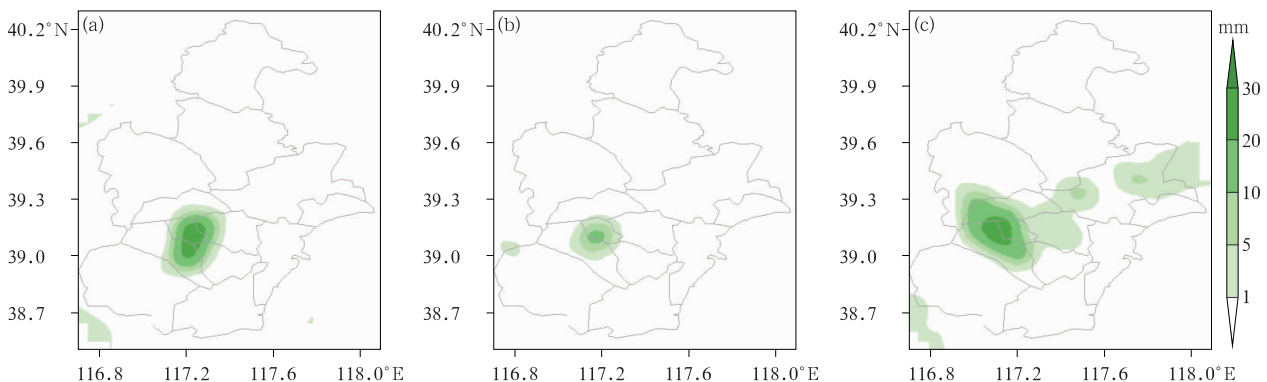


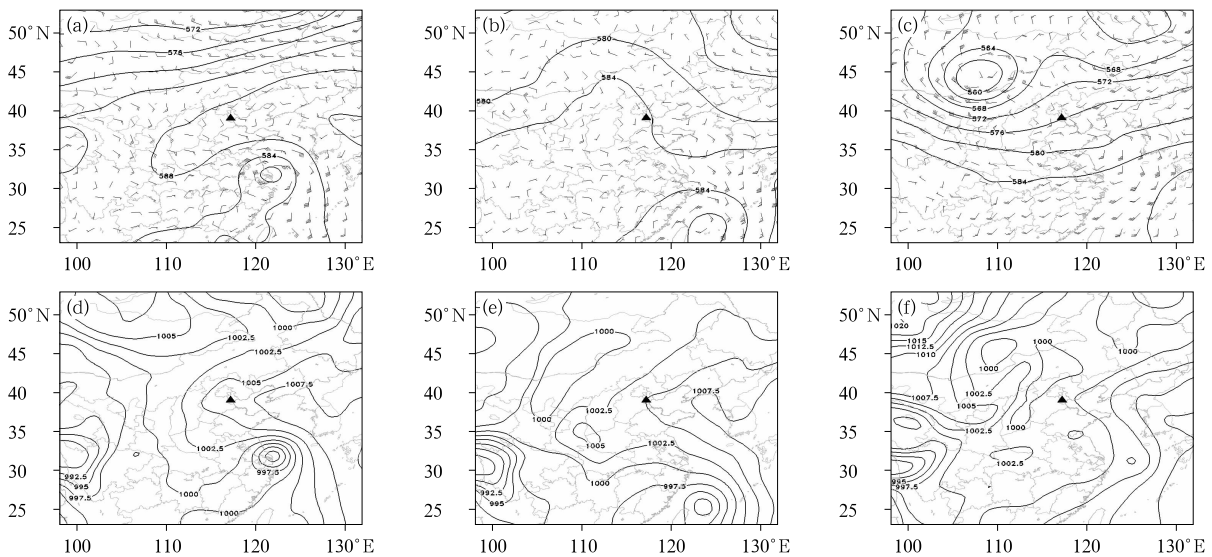
图1 (a)2018年7月22日12:00—14:00,(b)2019年7月18日13:00—15:00,(c)2021年8月23日14:00—16:00天津地区累计降水量分布

Fig. 1 Distribution of accumulated precipitation in Tianjin from (a) 12:00 BT to 14:00 BT 22 July 2018, (b) 13:00 BT to 15:00 BT 18 July 2019 and (c) 14:00 BT to 16:00 BT 23 August 2021

3 环流背景与环境条件分析

2018年7月22日14:00(图2a,2d),500 hPa西太平洋副热带高压(以下简称副高)强盛,形成东西带状的高压坝,588 dagpm等高线北界位置超过了 40°N ,台风安比位于副高南侧苏沪沿海一带,天津局地突发性暴雨发生在副高内部,850 hPa均受反气旋性环流控制,地面亦位于入海高压后部。2019年7月18日14:00(图2b,2e),500 hPa欧亚中高纬为“两槽一脊”,天津受脊前的弱西北气流控制,850 hPa虽受偏南气流控制,但其与台风丹娜丝外围偏东气流在华北东部形成反气旋性环流形势,地面图上同样处于高压后部。2021年8月23日14:00(图2c,2f),500 hPa蒙古冷涡位于 44°N 、 108°E ,其底部低槽位于河套地区,冷涡和低槽位置均明显偏西,天津受槽前西南气流控制,850 hPa则在蒙古中部、山东中部和东北地区分别存在一个低涡中心,天津亦受三者之间的反气旋性环流控制,地面则处于大尺度低压带前部。三次局地突发性强降雨分别发生在副高内部、大陆高压脊前、高空槽前暖区,由于无明显天气尺度系统主导,预报预警难度很大。

因天津未设探空站,本文采用距离天津中心城区局地暴雨位置约100 km的北京探空资料分析暴雨发生前的环境大气层结状况(图3)。从图中可以看出,三次局地暴雨发生前925~850 hPa以西南暖湿气流为主,“8·23”西南风风速 $8.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,”7·22”和“7·18”西南风风速 $2\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,未出现低空急流,但对流层中下层垂直方向“上干下湿”特征显著,环境大气呈条件不稳定层结状态。其中,“7·22”和“8·23”对流有效位能(CAPE)分别达到 $1035\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2018\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,而“7·18”CAPE仅 $147\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。值得注意的是,三次局地突发性暴雨均发生在中午前后,仅采用当日08:00北京站探空资料不能完全代表天津下垫面特征,因此利用暴雨发生前天津中心城区地面观测资料对北京探空进行订正,“7·18”“7·22”“8·23”订正后CAPE分别达到 1476 、 2192 、 $2310\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时对流抑制(CIN)均低于 $20\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,环境大气具备较高的对流不稳定能量和较小的对流抑制能量。此外,局地暴雨发生前0~6 km风矢量差分别为 16.4 、 5.1 、 $10.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,14:00局地暴雨发生期间分别减弱至 8.3 、 3.2 、 $5.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风切变较弱,但三次过程发生前抬升凝结高度均较低,仅 $0.2\sim 0.4\text{ km}$, 0°C 层高度分



注:▲代表局地暴雨位置。

图2 (a,d)2018年7月22日14:00,(b,e)2019年7月18日14:00,(c,f)2021年8月23日14:00
(a~c)500 hPa高度场(等值线,单位:dagpm),850 hPa风场(风羽)及(d~f)海平面气压场(等值线,单位:hPa)

Fig. 2 (a-c) Geopotential height (contour, unit: dagpm) at 500 hPa, wind field (barb) at 850 hPa and (d-f) sea level pressure (contour, unit: hPa) at (a, d) 14:00 BT 22 July 2018,

(b, e) 14:00 BT 18 July 2019 and (c, f) 14:00 BT 23 August 2021

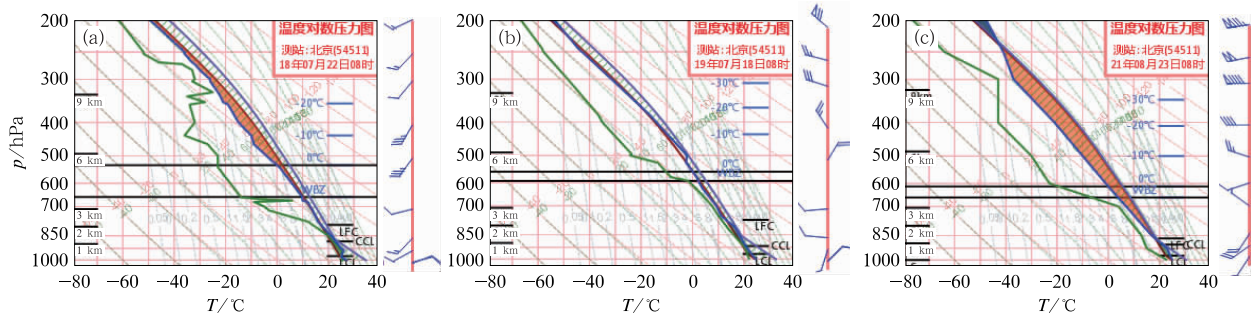


图 3 (a)2018 年 7 月 22 日 08:00,(b)2019 年 7 月 18 日 08:00,
(c)2021 年 8 月 23 日 08:00 北京站订正后 $T-\ln p$ 图

Fig. 3 Revised $T-\ln p$ diagram of Beijing Station at (a) 08:00 BT 22 July 2018,
(b) 08:00 BT 18 July 2019 and (c) 08:00 BT 23 August 2021

别为 5.2、5.3、4.3 km,暖云层较深厚,且低层均存在一定的湿层,有利于水汽凝结并形成强降水。

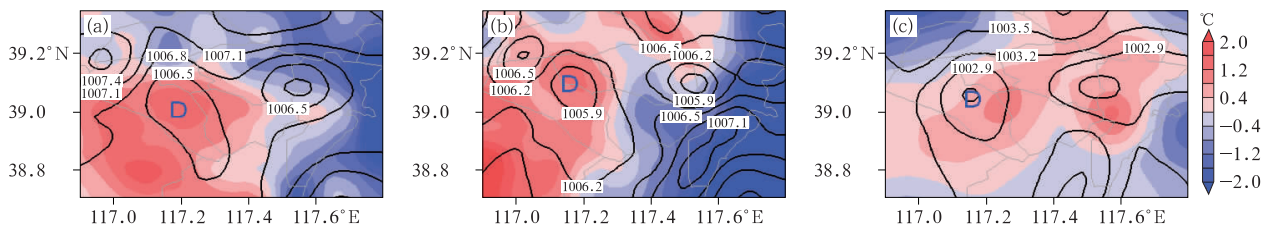
综上所述,三次局地突发性暴雨过程虽没有明显天气尺度系统提供动力强迫背景,但水汽条件和不稳定条件均较好,具有一定的对流潜势。在大气热力条件有利于对流发生发展的情形下,局地突发性暴雨发生时间和地点应该与中小尺度系统有关,因此有必要通过高时空分辨率的观测资料对其中小尺度特征进行分析。

4 地面自动站温压场和风场特征

边界层是地表与大气之间水汽和能量交换的重要场所,其内部的温度、气压、风场等条件变化往往对局地暴雨的产生发挥重要作用(孙继松等,2006)。图 4 分别给出了天津地区三次局地突发性暴雨发生前的地面扰动温度和海平面气压分布情况。从加密自动气象站温度分布来看,天津中心城区附近

均存在孤立的扰动温度正值中心,尤其“7·22”和“7·18”扰动温度中心值达到 1.2°C 以上,形成了较明显的城市热岛。此外,由于海陆下垫面吸收太阳辐射差异导致的非均匀加热特性,天津东部沿海温度明显低于内陆地区,沿海温度低值区与城市热岛暖中心之间形成明显的水平温度梯度,其中“7·22”和“7·18”中心城区东侧温度梯度更为显著。从海平面气压场来看,与热岛相应的中心城区南部均存在中尺度暖低压。城市热岛以及海陆下垫面热力差异使得中心城区附近温压场具有明显的非均匀分布特性,中尺度暖低压及其东侧的高温度梯度为对流发生发展提供了有利的环境条件。

从降水前近 1 h 的加密自动气象站风场和散度场分布(图 5a~5c)来看,在城市热岛暖低压作用下,天津中心城区附近(39.0°~39.2°N,117.1°~117.3°E)地面风场表现为风向辐合特征,其中,“7·22”暖低压辐合强度为 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,”7·18”和“8·23”暖低压辐合强度较弱;而中心城区以东则表



注:字母 D 代表低压中心。

图 4 (a)2018 年 7 月 22 日 11:10,(b)2019 年 7 月 18 日 12:40,(c)2021 年 8 月 23 日 13:20
加密自动气象站扰动温度(填色)和海平面气压(等值线,单位:hPa)分布

Fig. 4 Distribution of perturbation temperature (colored) and sea level pressure (contour, unit: hPa)
from automatic weather stations at (a) 11:10 BT 22 July 2018, (b) 12:40 BT 18 July 2019
and (c) 13:20 BT 23 August 2021

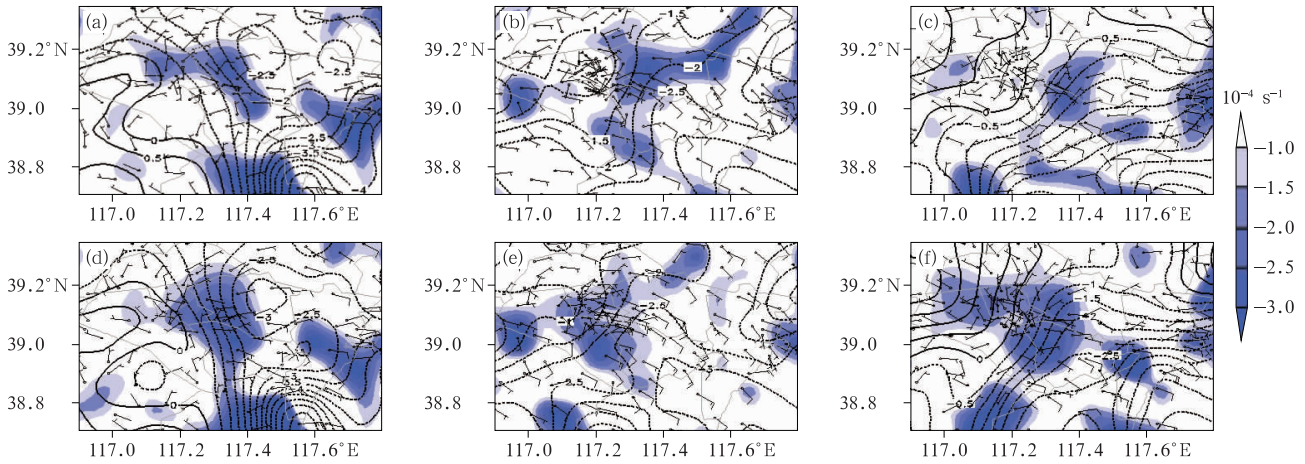


图 5 2018 年 7 月 22 日(a)11:10 和(d)11:40,2019 年 7 月 18 日(b)12:40 和(e)13:20, 2021 年 8 月 23 日(c)13:20 和(f)13:50 加密自动气象站地面风场(风羽)、
纬向风速(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度(填色)分布

Fig. 5 Distribution of surface wind field (barb), zonal wind speed (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (colored) from automatic weather stations at (a) 11:10 BT and (d) 11:40 BT 22 July 2018, (b) 12:40 BT and (e) 13:20 BT 18 July 2019, (c) 13:20 BT and (f) 13:50 BT 23 August 2021

现为与等风速线密集带相对应的偏东风风速辐合特征,三次过程偏东风风速辐合中心强度均达到 $-2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。此后,天津沿海偏东风进一步向中心城区推进,当城市热岛暖低压辐合与偏东风风速辐合相遇时,两者共同作用使得中尺度辐合明显加强,辐合中心值均达到 $-3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (图 5d~5f)。城市热岛暖低压与偏东风风速扰动共同作用形成的中尺度辐合系统,为局地突发性暴雨的发生发展提供了有利的动力抬升条件,这与张赟程等(2017)研究城市热岛与海风环流相互作用得到的结论基本一致。

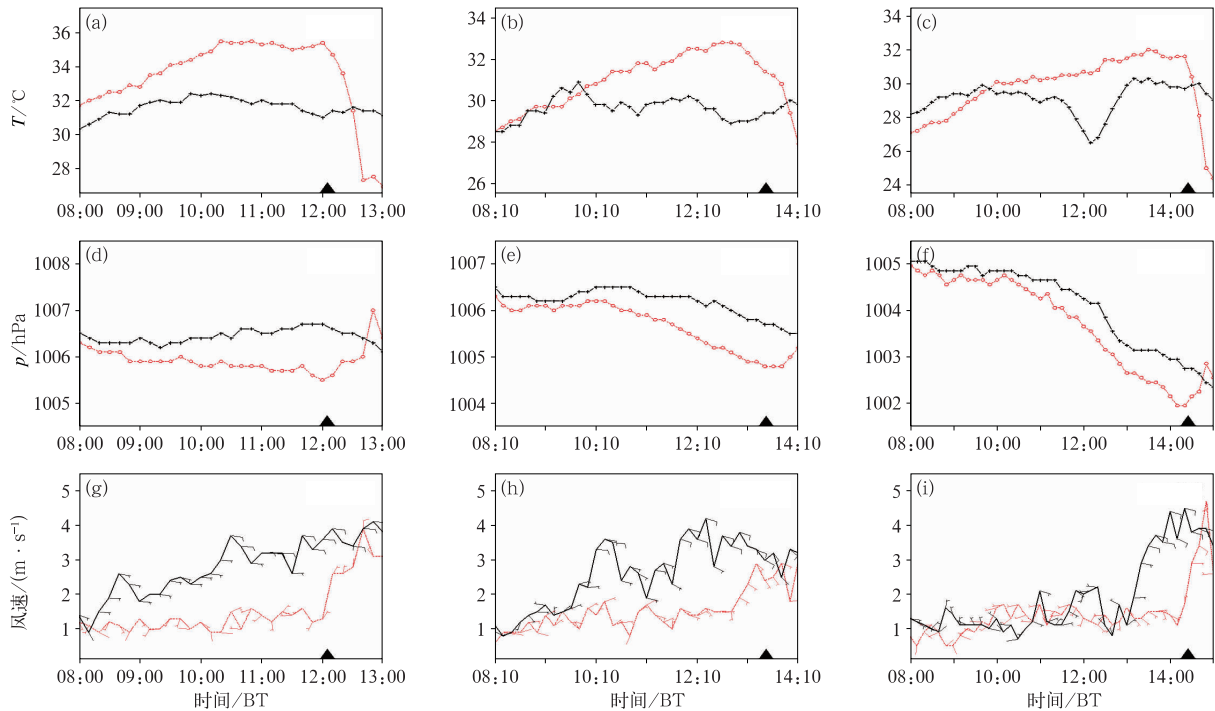
为了进一步探讨天津中心城区和沿海地区下垫面气象要素特征差异及其与中小尺度辐合系统的关系,选取位于中心城区的天津城市气候监测站和东部沿海的塘沽国家级气象观测站,对比分析两个站气温、气压、风向、风速时间演变(图 6)。从图中可以看出,三次局地突发性暴雨发生前天津城市气候监测站气温均呈明显上升趋势,而塘沽站气温均上升缓慢或稳定少变,两者气温差异逐渐增大,有利于形成高温度梯度,其中“7·22”和“7·18”两个站温差分别达 4.4°C 、 3.9°C ，“8·23”因塘沽站降雨温差短暂加大,但中心城区局地突发性暴雨发生前温差约 1.9°C 。随着温差增大,天津城市气候监测站气压明显低于塘沽站,两个站气压差达 $1.0 \sim 1.2 \text{ hPa}$,有

利于中心城区附近暖低压系统的发展。从风场演变来看,塘沽站“7·22”和“7·18”长时间受来自渤海的偏东风控制,且中午时段均出现了明显的海风加强,“8·23”在降水发生前 1 h 转受偏东风控制,同样出现了明显的海风加强,偏东风风速均增强至 $3.0 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而天津城市气候监测站三次过程均表现为风速较小、风向多变的特点,两个站之间风向和风速的差异也有利于地面中小尺度辐合系统的形成。

5 中尺度对流系统演变特征和触发机制

5.1 中尺度对流系统演变特征

2018 年 7 月 22 日 11:42—11:54、2019 年 7 月 18 日 13:24—13:36、2021 年 8 月 23 日 13:48—14:00 天津中心城区附近雷达组合反射率图中分别有孤立的 γ 中尺度对流单体新生(图略),初生单体均在两个体扫的时间内迅速发展为不小于 50 dBz 的强对流单体,水平尺度不足 10 km ,此时对应的 0.5° 仰角基本反射率图中尚未出现强回波,强降水尚未接地。图 7 分别给出了“7·22”“7·18”“8·23”突发性暴雨过程中三个典型时刻的 0.5° 仰角基



注:▲代表局地暴雨开始时间。

图 6 (a,d,g)2018 年 7 月 22 日 08:00—13:00,(b,e,h)2019 年 7 月 18 日 08:10—14:10, (c,f,i)2021 年 8 月 23 日 08:00—15:00 天津城市气候监测站(红线)和塘沽站(黑线) (a~c)地面气温,(d~f)海平面气压,(g~i)地面风的变化

Fig. 6 Variation of (a-c) surface temperature, (d-f) sea level pressure, (g-i) surface wind at Tianjin Station (red line) and Tanggu Station (black line) from (a, d, g) 08:00 BT to 13:00 BT 22 July 2018, (b, e, h) 08:10 BT to 14:10 BT 18 July 2019 and (c, f, i) 08:00 BT to 15:00 BT 23 August 2021

本反射率分布,从图中可以看出,“7·22”初生对流于 12:00—12:06 接地,初始对流单体移动非常缓慢,准静止地维持在天津站附近,持续产生降水,12:30 其东南侧再次有 γ 中尺度对流单体新生,两者迅速合并发展,强回波范围有所扩大,水平尺度接近 20 km,12:54 回波结构略松散,随后对流快速减弱消亡;“7·18”强回波于 13:36—13:42 接地并在东风里站附近稳定维持,14:18—14:48 初始对流逐渐减弱消亡,同时其西南侧又有对流单体新生,缓慢向南偏西方向移动后减弱消亡;“8·23”强降水回波于 14:06—14:12 接地,14:54 快速发展并向西北方向移动至华苑小区附近,超过 40 dBz 的区域明显扩大,随后向西北方向移出中心城区。三次突发性暴雨过程初生对流均位于地面中尺度辐合线附近,且对流发展维持期间雷达径向速度图中均嵌有 γ 中尺度涡旋与强回波对应(图略),旋转速度仅 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,维持时间较短且较浅薄,在中尺度辐合线和中

尺度涡旋的共同作用下,天津站、东风里站、华苑小区站在较短时间内降水量分别达到 64.0、52.9、44.6 mm。三次过程均属于典型的由本地新生对流导致的 γ 中尺度暴雨过程,初始对流基本在中心城区及其附近生成,发生发展突然且生命史短,强降水突发性和局地性特征明显。

以局地暴雨中心观测站为代表,对塘沽多普勒雷达反射率因子和加密自动气象站逐 6 min 降水量演变(图 8)分析表明,三次局地暴雨过程均表现为明显的积状云对流回波特征,最大反射率因子超过 50 dBz,持续时间仅 1 h。不同的是,“7·22”对流初生阶段强反射率因子出现在 5~8 km,回波顶高超过 14 km,具有高质心对流结构特征,“7·18”和“8·23”对流初生阶段回波顶高和强回波质心明显低于“7·22”,对流伸展高度均不足 8 km,成熟阶段“7·18”和“8·23”大于 30 dBz 回波主体的伸展高度同样低于“7·22”。虽然三次过程反射率因子垂

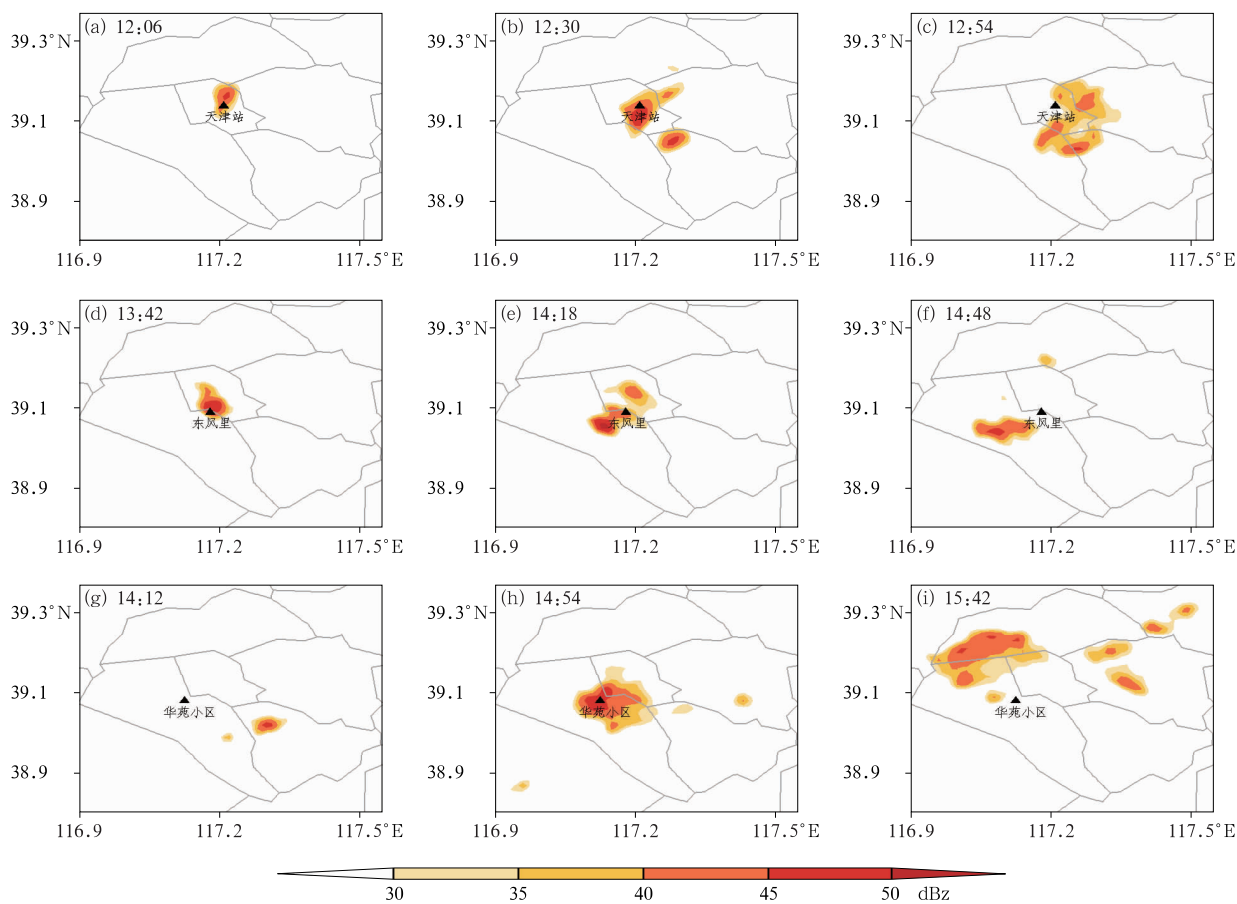


图 7 (a~c)2018 年 7 月 22 日,(d~f)2019 年 7 月 18 日,(g~i)2021 年 8 月 23 日
塘沽多普勒雷达 0.5°仰角基本反射率

Fig. 7 Base reflectivity at 0.5° elevation of Doppler radar in Tanggu on (a~c) 22 July 2018,
(d~f) 18 July 2019 and (g~i) 23 August 2021

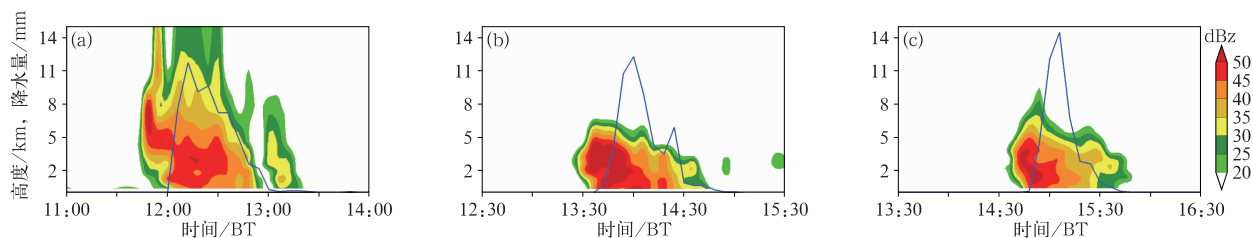


图 8 (a)2018 年 7 月 22 日 11:00—14:00 天津站,(b)2019 年 7 月 18 日 12:30—15:30 东风里站,
(c)2021 年 8 月 23 日 13:30—16:30 华苑小区站逐 6 min 雷达反射率因子(填色)
时间-高度演变和降水量变化(蓝线)

Fig. 8 Time-height variation of 6 min radar reflectivity factor (colored) and variation of
precipitation (blue line) at (a) Tianjin Station from 11:00 BT to 14:00 BT 22 July 2018,
(b) Dongfengli Station from 12:30 BT to 15:30 BT 18 July 2019 and (c) Huayuan Station
from 13:30 BT to 16:30 BT 23 August 2021

直分布特征存在较大差异,但成熟阶段超过 45 dBz 的强回波均集中在 5 km 以下,具有高效的低质心暖云降雨特点,加密自动气象站对应 6 min 降水量

分别达 11.7、12.2、14.4 mm,这也是三次过程均产生强降水的主要原因。

5.2 中尺度对流系统触发机制

在没有明显天气尺度系统提供动力强迫背景下,地面中尺度辐合系统在局地突发性强降水中往往起着主导作用,预报难点在于局地突发性对流何时、何地触发,因此深入分析中小尺度辐合系统与初生对流之间的关系尤为必要。图 9 给出了“7·22”“7·18”“8·23”三次局地突发性暴雨过程 γ 中尺度对流单体初生时刻,雷达组合反射率与地面风场、散度场的分布情况。从图中可以看出,中心城区附近地面风场和散度场均表现为强的中尺度辐合特征,初生对流与中尺度辐合区存在明显的对应关系,散度中心值均达到 $-3.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,与对流触发前(图 5a~5c)相比辐合中心强度显著增强,初生的 γ 中尺度对流单体位于地面辐合上升区内,但并未在

地面最强辐合中心正上空,而是对应辐合中心边缘。可见地面中尺度辐合系统在对流初生阶段起着重要的动力触发作用,是局地突发性暴雨发生的重要原因,而辐合强度达到 $-3.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 是初生对流得以触发的关键阈值。

为了进一步探讨局地突发性暴雨的初生对流与地面中小尺度辐合强度的关系,图 10 给出了三次局地突发性暴雨过程中心城区附近最小散度与最大降水量时间演变。从图中可以看出,降水开始前 2~3 h 中心城区附近已表现为辐合特征,但散度中心值仅为 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右;此后辐合中心强度虽有波动,但总体呈现逐渐增强趋势,降水发生前地面中尺度辐合强度均已达到 $-3.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,随后地面加密自动气象站开始出现降水。可见,地面中尺度辐合系统强度与初生对流触发存在很好的对应关系。

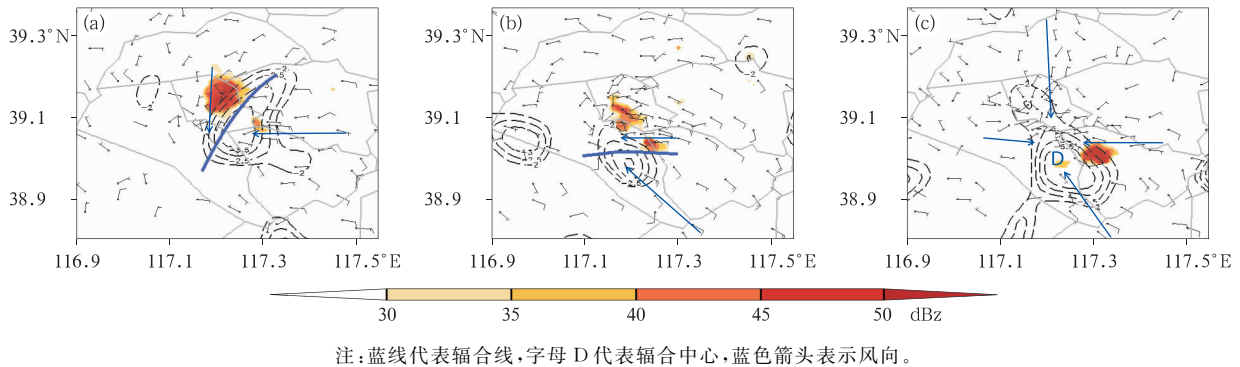


图 9 (a)2018 年 7 月 22 日 12:00,(b)2019 年 7 月 18 日 13:30,(c)2021 年 8 月 23 日 14:00 加密自动气象站地面风场(风羽)、散度(虚线,单位: 10^{-4} s^{-1}) 和雷达组合反射率(填色)分布

Fig. 9 Distribution of surface wind field (barb) and divergence (dashed line, unit: 10^{-4} s^{-1}) from automatic weather stations and radar composite reflectivity (colored) at (a) 12:00 BT 22 July 2018, (b) 13:30 BT 18 July 2019 and (c) 14:00 BT 23 August 2021

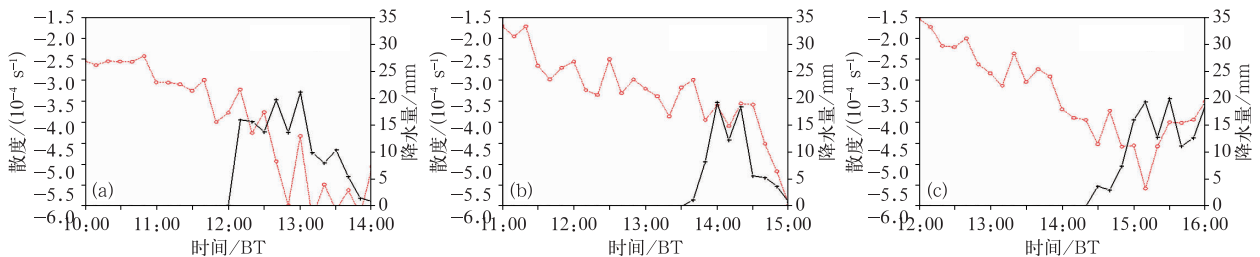


图 10 (a)2018 年 7 月 22 日 10:00—14:00,(b)2019 年 7 月 18 日 11:00—15:00,(c)2021 年 8 月 23 日 12:00—16:00 逐 10 min 最小散度(红线)和最大降水量(黑线)

Fig. 10 10 min minimum divergence (red line) and maximum precipitation (black line) from (a) 10:00 BT to 14:00 BT 22 July 2018, (b) 11:00 BT to 15:00 BT 18 July 2019 and (c) 12:00 BT to 16:00 BT 23 August 2021

为了深入探讨三次局地突发性暴雨过程中尺度对流系统的触发机制,通过北京城市气象研究院提供的 VDRAS 反演风场资料进一步分析中尺度流场垂直结构特征。图 11 给出了三次局地突发性暴雨过程的 $u-20w$ 合成风场垂直剖面。从图中可以看出,三次过程天津中心城区附近均呈现低层辐合、高层辐散配置特征,强烈的辐合上升运动为暴雨发生提供了有利的抬升触发条件,辐合上升气流水平尺度约 20~30 km,最强辐合中心均位于 0.5 km 以下的近地层,且 1.5 km 以下均存在来自渤海的偏东气流。但在不同的大尺度环流背景制约下,三次过程的中尺度辐合系统垂直结构呈现明显的差异性。其中,“7·22”处于强盛的副高控制下,深厚的西南暖湿气流与来自渤海的偏东气流在天津中心城区东侧 117.4°E 附近交汇,形成伸展至 3 km 的深厚且近乎垂直的中尺度辐合层;“7·18”中高层受冷涡后部西北或偏西气流控制,低层则为风向一致的偏东气流,中尺度辐合系统仅由浅薄的偏东风风速辐合造成,且风速辐合随高度向西倾斜,位于中心城区附近 117.0°E 的辐合层伸展高度不足 1 km;“8·23”反气旋性环流的中心位于天津北部,其南侧偏北或东北气流与渤海偏东气流形成中尺度辐合系统并随高度向东倾斜,位于中心城区东侧 117.4°E 的辐合层伸展高度接近 2 km。结合雷达反射率因子(图 8)分析发现,边界层中尺度辐合系统的垂直结构差异是造成回波垂直分布差异的主要原因,“7·22”在伸展至 3 km 深厚且近乎垂直的中尺度辐合系统作用下,初生对流伸展高度较高,对流发展更为旺盛,“7·18”和“8·23”中尺度辐合系统在垂直方向呈倾斜结

构,且位于暴雨区附近的辐合层较浅薄,因而回波伸展高度明显低于“7·22”,但由于“7·18”和“8·23”近地层辐合强度明显强于“7·22”,散度中心值均超过 $-3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,亦造成了突发性强降雨。此外,初生的 γ 中尺度对流单体位于地面强辐合中心边缘(图 9),亦与边界层辐合系统的垂直结构配置以及环境垂直风切变作用下强辐合上升气流并非完全直立等有关,“7·18”和“8·23”边界层辐合上升气流明显倾斜,“7·22”地面伸展至 3 km 的中尺度辐合系统虽近乎直立,但在环境垂直风切变作用下,3 km 以上高度的上升气流亦逐渐倾斜。可见,边界层中尺度辐合系统是局地突发性暴雨初生对流触发的关键,辐合强度、辐合层垂直结构配置及辐合层厚度对其发生发展具有一定作用,同时来自渤海的偏东风是形成中心城区附近中尺度辐合系统的重要因素。

综上所述,三次局地突发性暴雨分别发生在 500 hPa 副高内部、大陆高压脊前、高空槽前暖区,850 hPa 均为反气旋性环流控制,地面位于入海高压后部,在没有天气尺度系统提供动力强迫背景下,天津中心城区附近局地突发性暴雨的发生取决于边界层中尺度系统,并将其归结为图 12 所示的概念模型。受城市热岛及海陆下垫面热力差异作用,局地突发性暴雨发生前天津中心城区附近均存在中尺度暖低压,同时入海高压后部来自渤海的偏东或东南气流逐渐加强,城市热岛暖低压辐合与偏东风风速辐合共同作用在中心城区附近,形成明显的中尺度辐合线或中尺度辐合中心,辐合强度达到 $-3.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,为局地暴雨的发生提供了有利的触发机制,

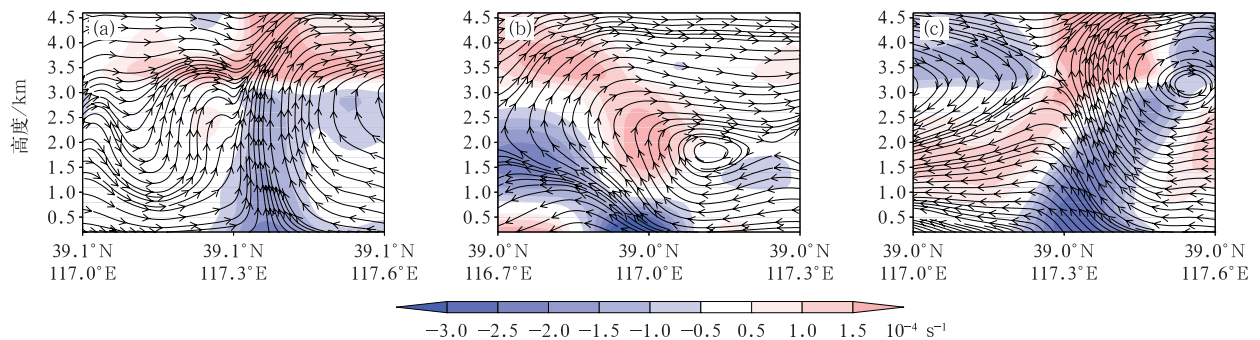


图 11 (a)2018 年 7 月 22 日 12:12, (b)2019 年 7 月 18 日 13:24, (c)2021 年 8 月 23 日 14:24

VDRAS 散度(填色)和 $u-20w$ 合成风场(流线)垂直剖面

Fig. 11 Cross-section of divergence (colored) and $u-20w$ wind field (streamline)

of VDRAS at (a) 12:12 BT 22 July 2018, (b) 13:24 BT 18 July 2019, and (c) 14:24 BT 23 August 2021

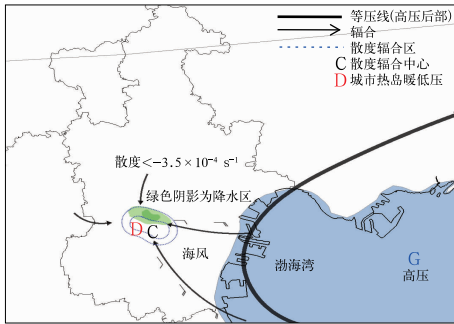


图12 弱天气背景下天津中心城区附近局地突发暴雨的触发机理概念模型

Fig.12 Conceptual model of triggering mechanism for the sudden rainstorm under the weak synoptic scale background near urban area of Tianjin

初生对流在强辐合区触发并位于地面辐合中心边缘上空。

6 结 论

本文综合使用多种资料对比分析了2018年7月22日、2019年7月18日、2021年8月23日三次天津中心城区局地突发性暴雨过程发生发展机理,得到以下主要结论:

(1)三次局地突发性强降雨均没有明显天气尺度系统提供动力强迫背景,500 hPa分别处于副高内部、大陆高压脊前、高空槽前暖区背景下,低层850 hPa均受反气旋性环流控制。虽无明显天气尺度系统主导,但环境大气具备较高的对流不稳定能量和较小的对流抑制能量,抬升凝结高度仅为0.2~0.4 km,且对流层“上干下湿”特征显著,低层均存在一定的湿层。

(2)由于城市热岛及海陆下垫面特征差异,局地突发性暴雨发生前天津城市气候监测站气温明显升高,而沿海地区气温上升缓慢或稳定少变,两地之间温差和气压差增大,使得中心城区附近温压场具有明显的非均匀分布特性,中尺度暖低压及其东侧的高温度梯度为局地突发性暴雨的发生提供了有利的中尺度环境条件。

(3)三次局地突发性暴雨发生前沿海地区均出现了明显的海风加强,当城市热岛暖低压辐合与偏东风风速辐合相遇,两者共同作用使得中尺度辐合明显加强,初生 γ 中尺度对流单体均位于地面强辐

合中心边缘上空。城市热岛暖低压与海风相互作用形成的中尺度辐合系统是局地突发性暴雨发生的主要原因。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,高峰,等,2011.基于雷达资料4DVar的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J].气象学报,69(1):64-78. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2011. A low-level thermo-dynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 64-78 (in Chinese).
- 陈双,王迎春,张文龙,2016.北京香山“7·29” γ 中尺度短时局地大暴雨过程综合分析[J].暴雨灾害,35(2):148-157. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, 2016. A comprehensive analysis of the meso- γ scale local heavy rain event around Xiangshan in Beijing on 29 July 2009[J]. Torr Rain Dis, 35(2): 148-157 (in Chinese).
- 湛芸,吕伟琦,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, Lü W Q, Yu C, et al, 2018. Analysis of a forecast failure case of warm sector torrential rainfall in North China[J]. Meteor Mon, 44(1): 15-25 (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[J].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[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510 (in Chinese).
- 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 Meteor Sin, 78(1): 1-17 (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雨事件分析[J].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[J]. Meteor Mon, 47(9): 1073-1085 (in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,侯建忠,等,2015.弱天气系统强迫下黄土高原强对流云的初生及演变[J].高原气象,34(4):982-990. Pan L J, Zhang H F, Hou J Z, et al, 2015. Initiation and evolution of storm over loess plateau for weak synoptic forcing situations [J]. Plateau Meteor, 34(4): 982-990 (in Chinese).
- 孙继松,王华,王令,等,2006.城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用[J].大气科学,30(2):221-234. Sun J S, Wang H, Wang L, et al, 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2): 221-234 (in Chinese).
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等,2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考

- (二) 极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10): 1267-1277.
- Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteor Mon, 38(10): 1267-1277 (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[J]. 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[J]. Meteor Mon, 44(10): 1255-1266 (in Chinese).
- 唐佳, 叶成志, 唐明晖, 等, 2021. 弱天气尺度背景下湖南两次暖区暴雨对比分析[J]. 高原气象, 40(4): 815-828. Tang J, Ye C Z, Tang M H, et al, 2021. Contrast analysis of two warm-sector heavy rainfall processes under weak synoptic scale background in Hunan[J]. Plateau Meteor, 40(4): 815-828 (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[J]. 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[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484 (in Chinese).
- 王莹, 董畅, 易笑园, 等, 2021. 天津城区一次 γ 中尺度短时暴雨的热动力环境分析[J]. 气象, 47(4): 398-411. Wang Y, Dong C, Yi X Y, et al, 2021. The thermal and dynamic environmental field analysis of a meso- γ scale short-time rainstorm in Tianjin[J]. Meteor Mon, 47(4): 398-411 (in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4): 485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 485-499 (in Chinese).
- 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等, 2018. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4): 511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 511-524 (in Chinese).
- 杨晓亮, 王秀明, 杨敏, 等, 2022. 副热带高压控制下河北局地强降水触发与维持机制分析[J]. 气象, 48(6): 677-690. Yang X L, Wang X M, Yang M, et al, 2022. The trigger and maintenance mechanism of local flash heavy rain under the control of subtropical high in Hebei[J]. Meteor Mon, 48(6): 677-690 (in Chinese).
- 杨晓亮, 杨敏, 段宇辉, 等, 2021. 京津冀一次暖区大暴雨的成因分析[J]. 暴雨灾害, 40(5): 455-465. Yang X L, Yang M, Duan Y H, et al, 2021. Analysis on causes of a warm-sector torrential rain event in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Torr Rain Dis, 40(5): 455-465 (in Chinese).
- 叶朗明, 吴乃庚, 张华龙, 等, 2019. 海陆风和地形对一次弱天气背景下暖区特大暴雨的影响分析[J]. 暴雨灾害, 38(6): 597-605. Ye L M, Wu N G, Zhang H L, et al, 2019. Analysis of the influence of sea-land breeze and topography on the extraordinary heavy rain in warm sector under a weak weather background[J]. Torr Rain Dis, 38(6): 597-605 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11): 1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329 (in Chinese).
- 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 a typical circulation situation in Tianjin[J]. Torr Rain Dis, 37(3): 230-237 (in Chinese).
- 张贻程, 王晓峰, 张蕾, 等, 2017. 海风与热岛耦合对上海强对流天气影响的数值模拟[J]. 高原气象, 36(3): 705-717. Zhang Y C, Wang X F, Zhang L, et al, 2017. Numerical simulation of the impacts of the sea-breeze and the urban heat island on the severe convective event in Shanghai[J]. Plateau Meteor, 36(3): 705-717 (in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3): 351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3): 351-360 (in Chinese).
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D, 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMRX: observational analysis[J]. JGR Atmos, 119(23): 13206-13232.
- Weckwerth T M, Hanesiak J, Wilson J W, et al, 2019. Nocturnal convection initiation during PECAN 2015[J]. Bull Amer Meteor Soc, 100(11): 2223-2239.
- Wu M W, Luo Y L, 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015[J]. J Meteor Res, 30(5): 719-736.
- Xia R D, Zhang D L, 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19-20 July 2016 along the Taihang Mountains in North China[J]. Mon Wea Rev, 147(11): 4199-4220.
- Zhang D L, Lin Y H, Zhao P, et al, 2013. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “right results” but for wrong reasons[J]. Geophys Res Lett, 40(7): 1426-1431.

(本文责编: 侯翠梅)