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

一次华北暖区暴雨的边界层环境条件分析

段宇辉 孙云 刘昊野 杨 金晓青

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

DUAN Yuhui，SUN Yun，LIU Haoye，YANG Yue，JIN Xiaoqing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-014

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

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

一次由边界层冷空气引发的豫南对流性暴雨成因分析

Analysis of a convective rainstorm in southern Henan caused by the cold air from the boundary layer

暴雨灾害. 2023, 42(2): 134-143 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-246

豫东北一次春季大暴雨的环境条件与中尺度特征分析

Analysis of environmental condition and mesoscale characteristics for a heavy rainstorm event in Spring in northeast Henan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 76-85 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.009

2023年4月18日厦门暖区特大暴雨中尺度特征及低空急流的作用

Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023

暴雨灾害. 2024, 43(5): 521-531 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-107

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

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu

暴雨灾害. 2023, 42(5): 532-540 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-128

关注微信公众号，获得更多资讯信息

段宇辉,孙云,刘昊野,等.2025.一次华北暖区暴雨的边界层环境条件分析[J].暴雨灾害,44(2):156−166. DUAN Yuhui, SUN Yun, LIU Haoye, et al. 2025. Analysis of boundary layer environment conditions during a warm-sector rainstorm in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):156−166 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−014

一次华北暖区暴雨的边界层环境条件分析

段宇辉[1, 2, 3], 孙云[1, 3], 刘昊野[4], 杨玥[5], 金晓青[1, 3]

(1. 中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地, 邢台 054000; 2. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021;
3. 河北省气象台, 石家庄 050021; 4. 河北省秦皇岛市气象局, 秦皇岛 066000;
5. 河北省石家庄市气象局, 石家庄 050081)

摘　要: 2020 年 8 月 12—13 日华北地区出现了一次区域性暴雨天气过程, 分为暖区降水和锋面降水 2 个阶段, 其中暖区降水阶段出现了低涡切变线、地形抬升和海陆低空急流 3 种边界层环境条件。为了解不同边界层环境条件下华北暖区强降水的发生机制, 利用常规气象观测、FY-4A 红外卫星云图、多普勒天气雷达、ERA5 再分析、风廓线雷达等多源分析和观测资料, 对本次过程的强降水演变特征、环流背景、暖区暴雨阶段 3 种边界层环境条件进行对比分析。结果表明: (1) 本次强降水天气过程发生在副热带高压外围偏南暖湿气流背景条件下, 3 种不同边界层环境条件下的中尺度对流系统造成了暖区强降水。(2) 3 个中尺度强降水区分别为华北中部偏南地区的螺旋雨区 (Ⅰ区)、沿太行山燕山山脉西南-东北走向的带状雨区 (Ⅱ区) 和渤海西海岸的块状雨区 (Ⅲ区)。(3) Ⅰ区边界层的低涡切变和风场辐合是诱发强降水的主要原因, 强降水区位于低涡移动方向的右前侧, 持续时间超过 16 h, 降水强度最强; Ⅱ区地形强迫抬升、地形辐合是产生强降水区的重要机制, 强降水位于太行山前平原和浅山区, 强降水维持 6 h; Ⅲ区边界层急流配合弱的海风锋辐合是强降水发生的原因, 强降水位于偏东风急流前侧的辐合区, 急流维持时间较短, 降水仅持续 4 h。

关键词: 暖区暴雨; 边界层; 环境条件; 中尺度对流系统
中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−014

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

DUAN Yuhui[1, 2, 3], SUN Yun[1, 3], LIU Haoye[4], YANG Yue[5], JIN Xiaoqing[1, 3]

(1. *Xingtai Atmospheric Environment Field Scientific Test Base of CMA*, *Xingtai* 054000; 2. *Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021; 3. *Hebei Meteorological Observatory*, *Shijiazhuang* 050021; 4. *Qinhuangdao Meteorological Office of Hebei Province*, *Qinhuangdao* 066000; 5. *Shijiazhuang Meteorological Office of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050081)

Abstract: A regional rainstorm occurred in North China from August 12 to 13 2020. This process can be divided into two stages, warm-sector rainfall and frontal rainfall. In the warm-sector rainfall stage, there were three types of boundary layer conditions, including the low-vortex shear, topographic uplift, and sea-land low-level jet. To understand the mechanism of this warm-sector rainstorm in North China, the evolution characteristics, circulation background, and the three different boundary layer conditions in the warm-sector rainfall stage during this rainstorm were analyzed, using multi-source data including the meteorological observation data, the infrared cloud image of FY-4A satellite, doppler weather radar data, ERA5 reanalysis data, and wind profile radar data. The results are as follows. (1) This rainstorm occurred in the southerly warm and humid airflow along the periphery of the subtropical high. The warm-sector rainstorm was caused by mesoscale convective systems under three different kinds of boundary layer conditions. (2) Three mesoscale rainfall centers were identified, which were the spiral rain band in central and southern North China (region Ⅰ), the band-shaped rain band along the

收稿日期: 2024−01−16; **定稿日期**: 2024−07−12
资助项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J025); 国家自然科学基金项目 (42205007); 中国气象局暴雨精细化分析和预报青年创新团队项目 (CMA2023QN05)
第一作者: 段宇辉, 主要从事灾害性天气机理研究。E-mail: luoricangbai@163.com
通信作者: 孙云, 主要从事短期天气预报技术研究。E-mail: sunyun288@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Taihang to Yanshan Mountains lying in the southwest-northeast direction (region Ⅱ), and the block-shaped rain band along the west coast of the Bohai Sea (region Ⅲ). (3) For region Ⅰ, the low-vortex shear system and wind convergence were the key causes triggering the heavy rainfall. The heavy rainfall was located on the right front of the moving direction of the vortex, causeing a 16-hours long-persisting and intense precipitation. For region Ⅱ, the topographic lifting and convergence motions were the major causes of the heavy rain band. The intense rainfall occurred in the piedmont plains and lower areas of the Tainhang Mountain and lasted 6 hours. For region Ⅲ, the boundary layer jet combined with the convergence effects of the sea breeze front were the major causes of the heavy rainfall. Heavy rainfall was observed in the convergence zone in front of the easterly jet, which lasted for a short duration, with the rainfall only lasting 4 hours.

Key words: warm-sector heavy rainfall; boundary layer; environment conditions; mesoscale convective system

引　言

锋前暖区暴雨的概念和成果多来自华南暖区暴雨研究, 通常是指距地面锋面系统前 200~300 km 位置, 发生锋前暖湿气流影响或气流辐合区里、甚至是无风切变的西南气流里的暴雨 (赵玉春等, 2008), 近 20 a 已有许多气象工作者对其做了较为全面的分析研究。例如, 苗春生等 (2017)、杨晓亮等 (2021)、张芹等 (2023)、沈晓玲等 (2024) 分别开展了暖区对流特征、环境参量、超低空急流的维持和湿过程相关联的水汽输送等暖区暴雨机理方面的研究。赵玉春等 (2008) 研究指出, 锋前暖区暴雨与梅雨锋暴雨在中尺度雨团、系统动力结构、大气不稳定机制等存在明显差异。近年来, 华北地区多次出现以小时雨强大、累计雨量大、持续时间长为特征的极端降水事件, 多伴随暖区降水、锋面降水或两者兼而有之。许多学者也开展了华北暖区暴雨降水特征、对流发展机制和可预报性等方面的深入研究。孙军等 (2012)、陈明轩等 (2013) 对 2012 年“7.21”影响北京及华北地区典型的暖区大暴雨过程开展了水汽、中尺度对流系统 (MCS) 的环境条件和低层三维动力、热力特征的模拟和分析, 指出低涡切变线及华北地形共同触发了暖区对流系统的生成发展, 低层动力场和地形强迫对暖区 MCS 的触发、增强和维持起到了关键作用。华北地区暖区暴雨一般发生在低层 850 hPa 的高温、高湿、高能的相似大环境背景条件下, 但是不同边界层环境条件影响暴雨发展的特征表现不够精细, 加上短期预报指示信号较弱, 经常会出现暖区暴雨的漏报 (谌芸等, 2018; 杨晓亮等, 2022)。因此, 需要加强边界层环境条件的研究以提升对华北暖区暴雨机理的认识。

暖区暴雨的发生发展与边界层急流、抬升条件等边界层环境条件密切相关, 边界层过程能够影响温度、湿度和风场, 通过水汽通量散度、湿位涡、低空急流等影响暴雨强度 (赵鸣, 2008)。王淑莉等 (2015) 对北京“7·21”暴雨暖区中尺度对流系统进行数值模拟, 结果能够很好地反映出河北中西部及北京西南部的低层山前急流使风速辐合产生暖式切变、太行山地形对气流的抬升等边界层环境条件共同影响暖区对流系统的发展。孔凡超 (2016) 通过分析 2013 年 7 月冀中四芝兰镇暖区特大暴雨的中尺度环境特征, 讨论了地面风场及散度分布对暖区暴雨发展的可能影响, 指出对流凝结加热强迫出的辐合上升运动在暖区强降雨中至关重要。孙密娜 (2018)、Xia 和 Zhang (2019) 对 2016 年 7 月华北一次暖区暴雨发生及传播机制进行分析, 指出暖区暴雨应重点关注边界层辐合线等中尺度系统演变及太行山地形对华北暴雨增幅的作用。何丽华 (2020) 对 2017 年 7 月华北一次弱天气强迫下的暖区局地暴雨进行研究, 指出近地层弱冷空气侵入、边界层中尺度辐合系统及太行山地形为局地暴雨触发的关键因素。上述研究加强了对华北地区暖区暴雨边界层气象要素演变特征的认识, 但在预报业务中, 由于边界层探测资料不精细, 中小尺度系统描述不准确, 使得不同位置的边界层急流、辐合线、地形等环境条件对对流系统发展的垂直高度、持续时间、组织结构等影响较大, 中小尺度强降水的预报仍存在较大的难度。

2020 年 8 月 12—13 日华北地区出现了一次由地面气旋、太行山东麓地形抬升、海陆热动力特征差异等 3 种中小尺度系统先后影响下的局地强降水过程, 本文基于精细的边界层多源观测资料, 对此次强降雨分布特征、环流背景、暖区降水演变、边界层环境条件等方面内容进行研究, 以提升预报和科研人员对中小尺度系统导致不同边界层环境条件下华北暖区强降水发展机理的认知, 提高华北地区暖区暴雨的预报预警能力。

1　资料与方法

1.1　资料说明

分析所采用的资料主要包括: (1) 河北省气象信息中心天擎系统提供的 2020 年 8 月 11—13 日京津冀地区常规气象地面观测资料, 时间分辨率为

5 min, 地面要素包括天气现象、气温、降水量、风向风速、相对湿度等; (2) 河北省气象信息中心提供的华北地区多普勒天气雷达拼图资料, 时空分辨率为 6 min 和 1 km; (3) 河北省气象信息中心提供的冀州、保定和宝坻的风廓线雷达资料, 时间分辨率为 6 min, 垂直探测间隔为 120 m; (4) 河北省气象信息中心天擎系统提供的 FY-4A 红外云图, 时间分辨率为 1 h; (5) 欧洲中期天气预报中心发布的 1 h 间隔、空间分辨率为 0.25°×0.25°的第五代全球再分析资料 (ERA5), 要素包括不同高度位势高度、温度、风场、相对湿度、垂直速度等。

1.2 研究方法

首先, 使用逐 1 h 地面降水观测资料、FY-4A 红外云图和 ERA5 的高空形势场, 分析本次强降雨过程的雨强、累计降水分布和天气系统演变特征; 其次, 使用多普勒天气雷达、风廓线雷达资料和常规气象观测资料探讨边界层气象要素和环境条件演变。

2 降水实况、环流背景及降水演变

2.1 降水实况

2020 年 8 月 12 日凌晨到 13 日白天, 华北出现了区域性强降雨过程, 12 日 08 时 (北京时, 下同) 至 13 日 08 时暴雨落区主要出现在华北中南部地区和燕山山区, 144 站达到了大暴雨量级, 其中, 雄安新区雄县王家房的最大过程降水量为 241.4 mm。1 h 最大雨量有 4 站≧100 mm, 分别为邢台清河 (134.2 mm)、雄安新区雄县 (125.9 mm)、衡水故城 (111.2 mm) 和廊坊文安 (102.2 mm), 雄县 1 min 的最大雨量达到了 3.9 mm, 强降水集中在 12 日 16—19 时, 暴雨区表现为分散式块状分布。强降水由南向北推进: 12 日早晨强降水在邢台、邯郸发展加强, 强降水云团在缓慢北抬过程中强度有所减弱; 12 日午后, 雷达回波向偏北方向移动过程中在保定、雄安新区再次加强 (图 1a)。通过对此阶段的降水特征统计分析可知, 由邢台中部、邯郸中东部、衡水向北发展到保定东部、雄安新区的强降水区持续了近 16 h, 降水强度最强; 位于太行山东麓山前的平原和浅山区的强降水维持了 6 h; 而位于华北偏东地区偏东风急流前侧辐合区的强降雨仅持续 4 h, 维持时间最短。12 日傍晚到夜间, 块状雨带向华北的中北部移动, 强降雨区位于沧州西部、廊坊南部、北京中部、承德、唐山西部和北部等地, 暴雨区呈现明显的带状 (图 1b)。可见, 本次强降雨区表现出明显的阶段性。

因此, 本次过程的强降水特征表现为小时雨强大、暴雨到大暴雨区呈分散式块状分布、强降水持续时间差异大、阶段性降水特征清晰。

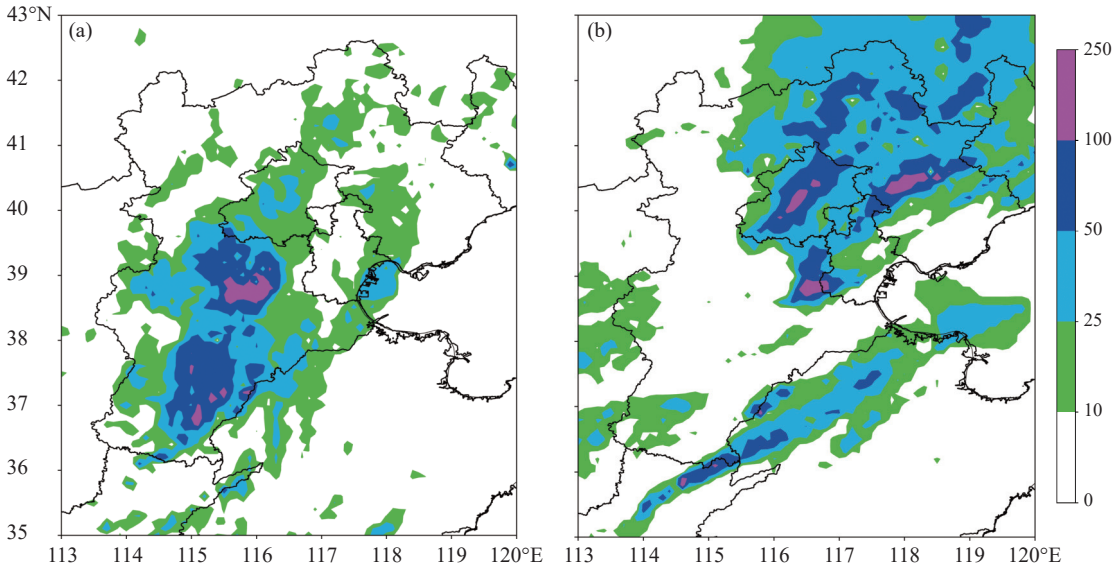


图 1 2020 年 8 月 12 日 08—20 时 (a)、12 日 20 时—13 日 08 时 (b) 华北地区累积降雨量 (单位: mm) 分布

Fig. 1 Accumulated precipitation (unit: mm) in North China from (a) 08:00 BT to 20:00 BT on August 12, and (b) 20:00 BT 12 to 08:00 BT on August 13, 2020

2.2 环流背景

华北暖区暴雨多与西太平洋副热带高压(以下简称副高)、边界层急流、低层切变线等天气系统密切相关 (谌芸等, 2019; 雷蕾等, 2020), 本次天气过程同样发生在副高边缘的高温、高湿环境条件下。2020 年 8 月 12 日 14 时 (图 2a), 500 hPa 副高发展异常强盛, 形成了南北向分布的高压坝阻挡形势, 高空槽及对应的低层低涡系统位于蒙古国中部偏东地区, 华北

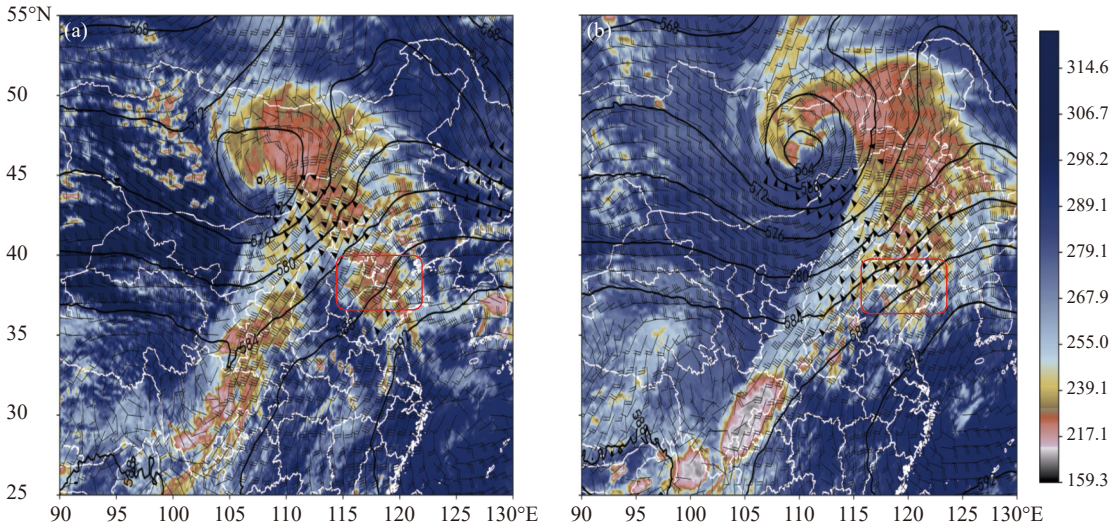


图 2 2020 年 8 月 12 日 14 时 (a) 和 13 日 02 时 (b) 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$)、FY-4A 卫星红外云图 (色斑, 单位: K) 综合图 (红色方框为暴雨区)

Fig. 2 The 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), wind (barb, unit: $m \cdot s^{-1}$), and infrared cloud image of FY-4A satellite (color, unit: K) at (a) 14:00 BT on August 12 and (b) 02:00 BT on August 13, 2020 (The red boxes indicate the areas of heavy rainfall)

地区受到 500 hPa 副高外围的东南风暖湿气流控制。从 12 日 14 时的红外云图 (图 2a) 可见, 随着副高北侧偏东南气流加强, 其外围出现了大片的盾状强云团发展, 暖区降水在华北南部地区开始, 并向北发展加强。12 日下午到前夜(图略), 500 hPa 高空低涡系统发展加深、位置稳定少动, 位于 850 hPa 的偏南风低空急流向东发展, 此阶段的强降水区主要位于低空急流左侧、暖式切变线的风速辐合附近。由于此阶段的强降水中心距高空低涡系统的直接影响超过 200 km, 且华北地区为一致的东南、偏南气流控制, 低层无明显的冷平流, 因此具有明显的副高外围暖区的降水性质和特征。由 13 日 02 时的红外云图和高空形势场 (图 2b) 可见, 华北北部地区位于 200 hPa 高空分流区, 受高空引导气流影响, 500 hPa 高空锋区东移南压, 此时强降水位于高空低涡的东南象限, 对应的红外云图上出现了清晰的云带后边界和中层风场急流影响下的层状云系, 此阶段的强降水位于华北中北部地区, 表征暖区降水已全部转为锋面降水。

2.3 暖区强降水演变及地面要素特征

从 8 月 12 日 14 时的地面观测资料、过去 1 h 的降水量落区和由地面风场差值成格点后计算的水平散度 (图 3a) 可见, 在副高外围暖湿气流控制的背景条件下, 先后生成 3 个强降水中心, 分别为华北中部偏南地区的螺旋雨区 (Ⅰ区)、沿太行山燕山山脉西南-东北走向的带状雨区 (Ⅱ区) 和渤海西海岸的块状雨区 (Ⅲ区)。由 8 月 12 日 10 时华北中南部地区的雷达组合反射率图 (图 3b) 可见, 华北南部地区首先出现降水, 形成大片的螺旋状回波向北发展; 12 日 12 时 (图 3c), 降水主雨带在北移过程中发生断裂, 北部强回波移动速度快, 分裂成 2 部分, 其中Ⅱ区的回波向西北移动过程中与山区的回波合并加强, 从而形成了 40 dBz 以上的强回波区域, 分别对应 3 条不同的雨区。

强大的边界层动力抬升作用是暖区暴雨发生和加强的重要条件, 本文探讨了 3 块区域的对流初生与地面中小尺度辐合系统的关系, 图 3a 给出了暖区暴雨过程中地面散度与降水落区的对应位置。此过程中暖区的 3 类强降水落区的发生发展的动力抬升机制存在明显的不同。从 8 月 12 日 14 时地面风场和由风场计算的散度分布 (图 3a) 可见, Ⅰ区的块状强降水雨区位于地面风场辐合区的东北象限, 受地面气旋北部的偏东气流控制, 地面散度中心达到了 -6.0×10^{-5} s^{-1}, 表明边界层风场辐合形成强烈的上升运动, 为 3 块区域中最强, 地面中尺度气旋在Ⅰ区强降水中的动力抬升起主导作用; 其次, Ⅱ区为太行山燕山山前区域, 地面风场的辐合和散度相对较弱, 主要表现为东南暖湿气流受山区地形阻挡, 在山前的浅山区辐合抬升, 形成一条窄带状、西南-东北走向的强降雨带, 此区域的降水与地形的强迫抬升、地形辐合密切相关, 降水持续时间受东南风的持续时间、强度影响较大; Ⅲ区降水以偏东风急流脉动和风速的辐合机制为主要诱因, 强降水区位于地面风场大风速核下方或者其前方, 地面散度中心为 -4.0×10^{-5} s^{-1}, 表征风速辐合同样可以为降雨区提供边界层动力强迫抬升条件, 但此类降水的强度为 3 块区域最弱, 持续时间也最短。可见, 地面中尺度对流辐合系统与强降水的初生有很好的对应关系。

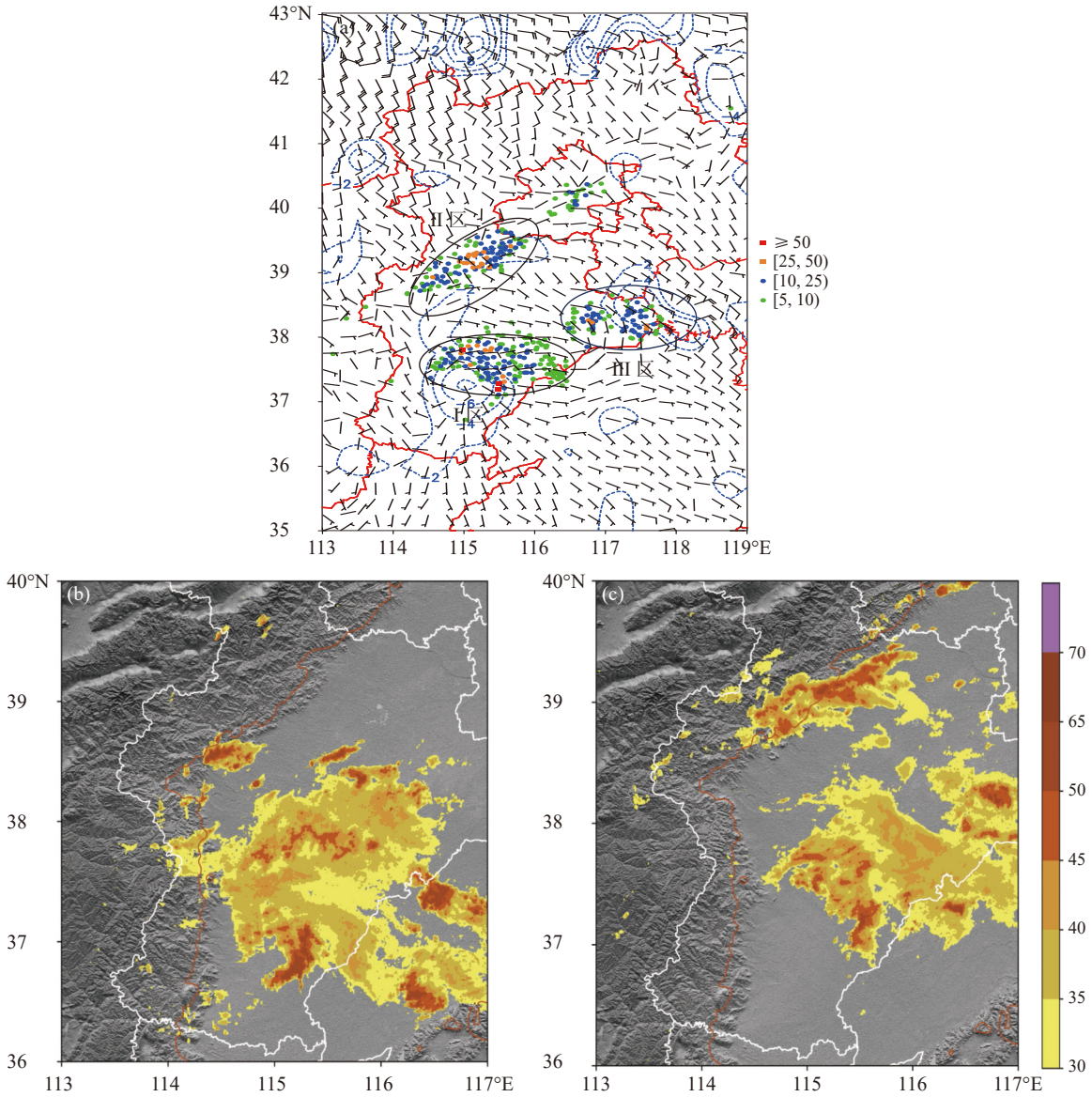


图 3 2020 年 8 月 12 日 14 时地面风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1})、散度 (虚线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和过去 1 h 分级降水量 (彩色圆点, 单位: mm) 综合图 (a) 及 12 日 10 时 (b)、12 时 (c) 雷达组合反射率 (填色, 单位: dBz) 分布图

Fig. 3 Distribution of (a) surface wind (barb, unit: m·s^{-1}), surface divergence field (dashed line, unit:10^{-5} s^{-1}), and graded precipitation regions (unit: mm) in the past 1 hour at 14:00 BT August 12, 2020, radar combination reflectance (colored dot, unit: dBz) in North China at (b) 10:00 BT and (c) 12:00 BT August 12, 2020

3 边界层环境条件分析

作为地面和自由大气之间的过渡带, 边界层是下垫面和大气之间发生热力和动力相互作用的关键区域, 存在剧烈的物质和能量交换。雷蕾等 (2020) 基于“7.16”暖区特大暴雨的概念模型, 提出预报中需要高度关注在高温、高湿、高能的不稳定天气背景下, 地面风场对强降雨的影响作用、地面辐合线的位置和方向及低空急流建立对雨带移向的影响。尉英华等 (2024) 等通过对 3 次弱天气背景下天津局地突发暴雨中尺度特征研究发现, 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加强, 是局地暴雨发生的主要原因。因此, 边界层气象要素条件的变化和相互作用往往对局地暴雨的形成发挥十分重要的作用。

3.1 地面风场对降水的影响

首先从地面降水与边界层影响系统的时空演变特征分析, 12 日 10 时 (图 4a) 的主降水中心位于华北南部的邯郸、邢台和衡水以及太行山东麓山区的迎风坡, 降水区呈现随地面风场的逆时针旋转, 强降水自华北南部向北推进, 此时的强降水完全与华北南部的地面风场辐合中心相对应, 降水区位于风场低值中心前进方向的北部和西部象限。随着影响系统的进一步发展, 12 日 11 时 (图 4b), 降水区开始出现跳跃; 但受到东北气流影响, 太行山东麓的中尺度

雨区与保定南部的弱雨区趋于合并, 沧州东部雨带与主雨带断裂、但强度有所增强。12 时后 (图 4c、d), 太行山东麓山前的 2 地降水雨带呈带状合并、增强, 沧州地区的海岸带降水受偏东风急流影响下维持, 至此呈现出Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的不同边界层环境条件下的 3 块降水区, 分别对应边界层风场辐合、太行山东麓山前地形辐合和海陆边界的东北风急流脉动辐合等三类系统影响。

其次对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的降水强度、持续时间和发展变化对比分析可见: (1) Ⅰ、Ⅱ区的降水强于Ⅲ区, 与边界层系统有较强的契合度, Ⅲ区的中尺度风场的辐合不明显。Ⅰ、Ⅱ区的强降水中心相距 150~200 km, 小时降水强度的区别较小, 以 10~25 mm 的小时雨强为主, 存在局地小区域 25~50 mm 的降水区, 最大小时雨强 50 mm 以上; Ⅲ区的小时雨强要明显偏弱于Ⅰ、Ⅱ区, 以中雨量级为主, 降水落区集中。(2) Ⅰ区强降水向低涡暖切变前侧的东北方向移动, 主雨带位于地面风场辐合中心的右前侧, 移速较慢, 影响区域自华北南部到廊坊、北京、承德, 南北贯穿整个河北省, Ⅰ区雨带的移动方向与地面辐合中心的移动方向趋于一致。地面辐合中心造成的强烈辐合上升运动是Ⅰ区暖切变附近暴雨的重要维持机制。其中, 抬升条件以边界层的东南风与东北风辐合为主的强降水, 多位于地面辐合中心移动的前侧带状对流附近, 中尺度辐合线引发不稳定能量释放对短临降水落区预报有较强的指示意义。

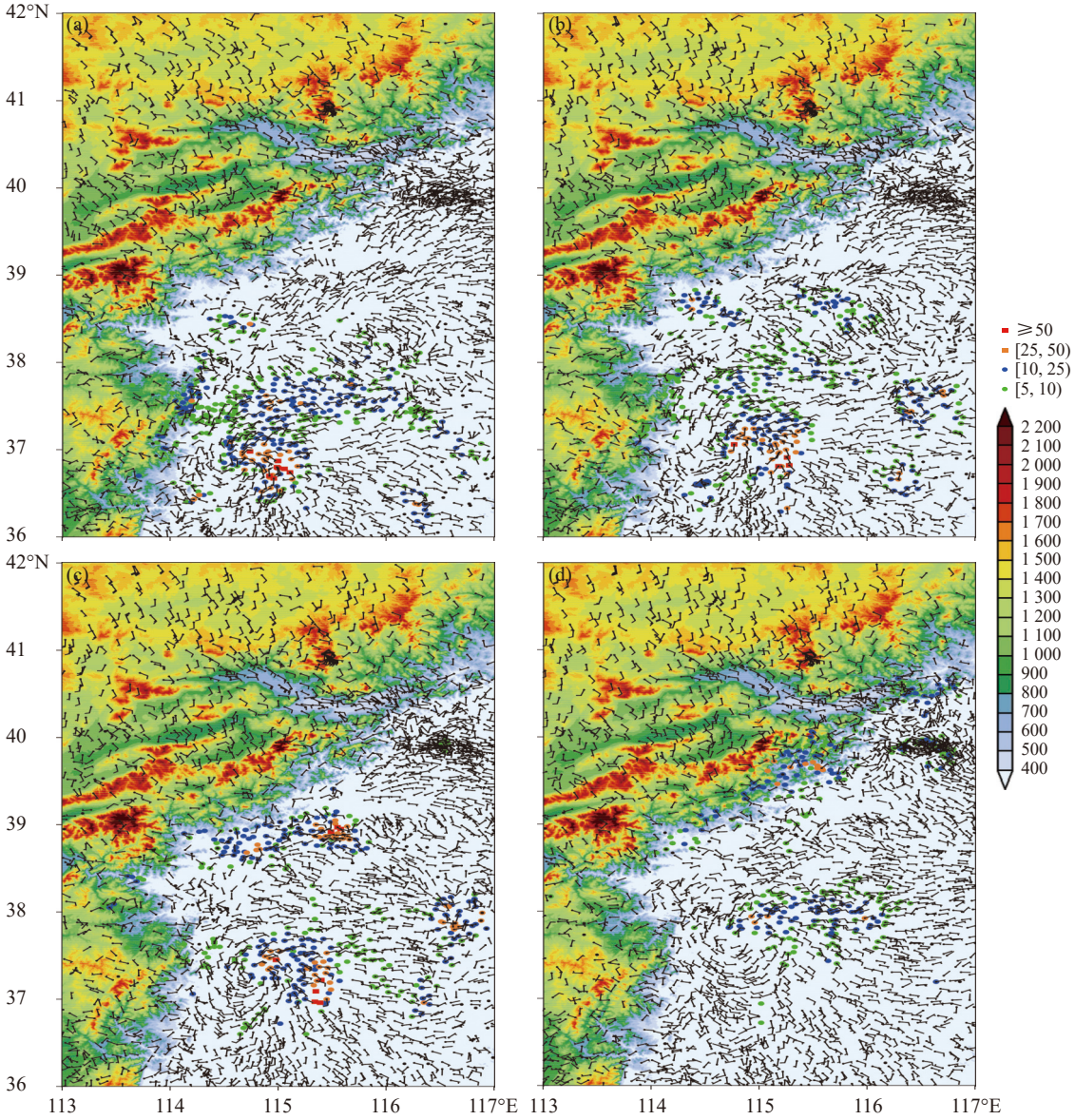


图 4 2020 年 8 月 12 日 10 时 (a)、11 时 (b)、12 时 (c)、14 时 (d) 华北地面站点风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$)、地形高度 (填色, 单位: m) 和过去 1 h 分级降水落区 (彩色圆点, 单位: mm) 分布图

Fig. 4 Distribution of surface wind (barb, unit: $m \cdot s^{-1}$), topographic elevation (shaded, unit: m) and graded precipitation (colored dot, unit: mm) in North China in the past 1 hour at (a) 10:00 BT, (b) 11:00 BT, (c) 12:00 BT and (d) 14:00 BT August 12, 2020

(3)Ⅱ区强降水向西北的沿山移动，移速相对较快，主降水雨带位于沿山的浅山区，雨带宽度较窄，自 12 日 11 时雨带生成，到 17 时雨带消散，仅维持了 6 h；地形的强迫抬升、地形辐合是产生Ⅱ区强降水雨带的重要机制。

(4)Ⅲ区强降水在局地的短时间发展后，迅速减弱，降水范围小，持续时间短，边界层偏东风的抬升作用和低空急流的脉动仅使局地降水维持 4 h。

3.2 风廓线演变

强的低空急流有利于中尺度对流系统的持续发展，与暴雨的形成密切相关。本文分别以冀州站代表Ⅰ区、保定站代表Ⅱ区、天津宝坻站代表Ⅲ区，基于高时空分辨率的垂直风场对其演变特征进行对比分析，研究 3 地强降雨发生发展机制的差异性和对短临预报的可参考性。

从Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的风廓线垂直风场的演变对比分析，异同点分析如下：

(1) 相同点：3 地强降雨的演变特征受天气尺度、中小尺度系统影响明显。12 日 06 时，3.3 km 高度先后出现≥12 m·s^{-1} 的西南风低空急流；随着影响系统自南向北推进，低空急流向下延展到 0.5 km 高度，最大降水出现时刻与低空急流发展、脉动相对应。Ⅰ区(图 5a) 与Ⅲ区 (图 5c) 在 0.6 km 以下边界层风场的演变一致。自低向高由东南风转为偏东或东北风，

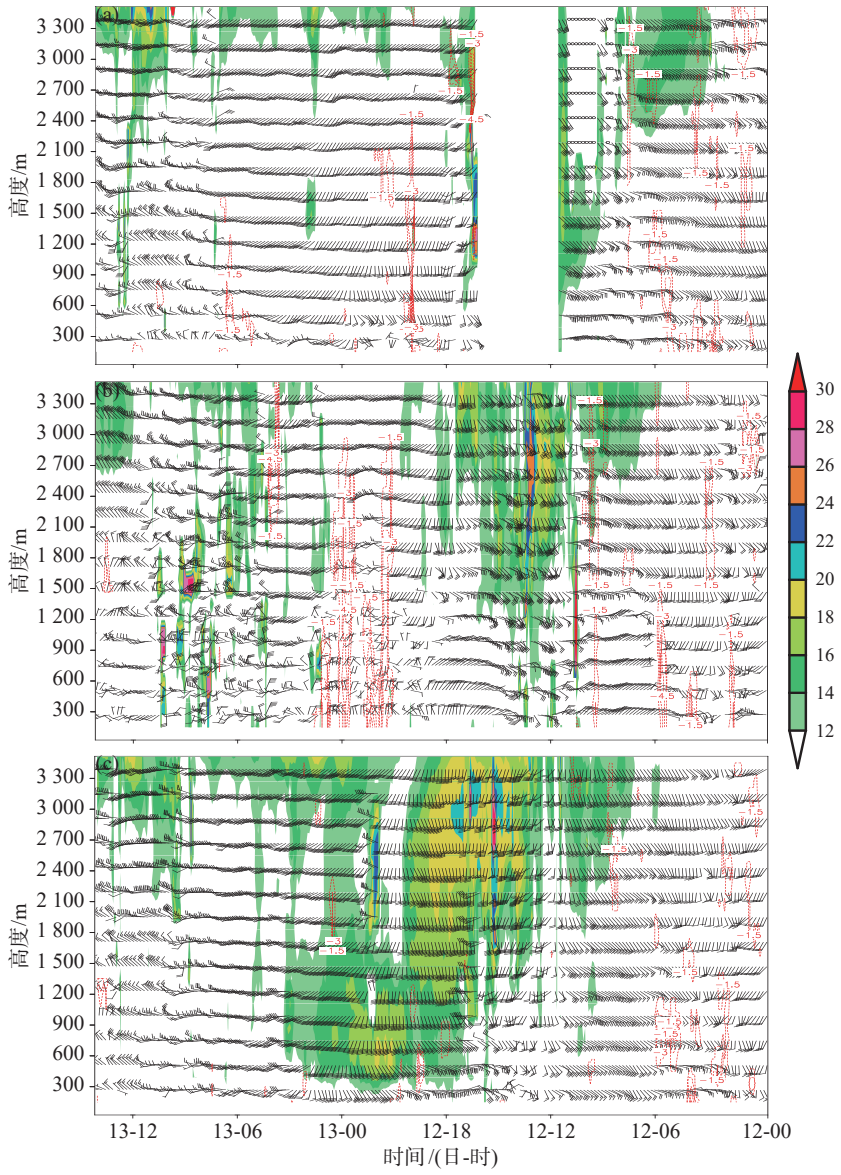


图 5 风廓线雷达资料反演 2020 年 8 月 8 月 12 日 00 时—13 日 14 时冀州 (a, 空白处为风场缺测)、保定 (b)、宝坻 (c) 0—3.3 km 水平风场 (填色，单位：m·s^{-1}) 和上升速度 (红色虚线，单位：10^{-1} m·s^{-1}) 随时间演变

Fig. 5 Temporal evolution of horizontal wind field (shaded, unit: m·s^{-1}) and vertical velocity (red dash line, unit: 10^{-1}m·s^{-1}) retrieved from wind profile radar data of (a) Jizhou (The blank indicates that the wind field is not measured), (b) Baoding and (c) Baodi station at 0-3.3 km from 00:00 BT August 12 to 14:00 BT August 13, 2020

持续时间长达 8~12 h 以上, 降水在 12 时左右开始明显加强, 表现为两者边界层风速的骤增和风向的转变, 出现了 12 m·s^{-1} 以上的低空急流。13 日 00 时后, 3 地的中低层风场转为一致的西北、偏西气流, 降水趋于减弱、结束。

(2) 差异点: Ⅰ区 (图 5a) 和Ⅲ区 (图 5c) 在 1 km 高度以下的风场为顺时针演变, Ⅱ区 (图 5b) 受地形影响明显, 表现为 1.5 km 高度以下的风场为逆时针旋转。Ⅰ、Ⅱ区低空急流主要位于 1 km 高度以上, 为单一急流中心, Ⅲ区的低空急流中心偏低, 在 0.6 km 和 2.4 km 各有一个南风急流大值中心, 且 1 km 高度以下的≥12m·s^{-1} 急流持续时间最长, 达到了 12 h; Ⅱ区以 1.5 km 高度为界, 以下为北到东北风, 以上为东南风, 垂直风切变较强, Ⅰ、Ⅲ区自低向高层为较为一致的东南风, 垂直风切变明显弱于Ⅱ区。Ⅲ区降水的持续时间明显短于Ⅰ、Ⅱ区。

同为天气尺度系统影响下的暖区降水, Ⅰ区边界层的低涡切变系统是诱发强降水的主要原因, 中高层急流的抽吸作用利于地面气旋的发展, 大尺度高温高湿的环境特征维持强降水系统的移动和加强。Ⅱ区长时间维持的东北风与太行山东麓地形的强迫抬升作用表现的更为明显。Ⅲ区边界层偏南急流的发展和维持, 是强降水增强的主要原因。

暖区降水和锋面降水在风廓线风场上也有很清晰的体现。位于相对偏西北的保定站最先由西南-偏南风转为西北风 (图 5a), 由近地层向高层转换的持续时间为 2~4 h, 表征低层锋区已侵入华北北部地区, 此时强降水由暖区降水向锋面降水转变。

3.3 地形及垂直运动

有关复杂地形对强降水增幅作用, 很多学者都做了深入的研究, 特别是太行山东麓的强降水与地形增幅作用密切相关 (孙健等, 2002; 赵思雄等, 2018)。其中, 杨晓亮等 (2024) 对 23.7 河北罕见特大暴雨的研究中发现, 太行山东麓累计雨量明显超过地势较低的东部平原地区, 偏东风与太行山地形的相互作用是上升运动中心形成的重要原因。此次强降水过程的Ⅱ区块状暴雨明显受到地形辐合、偏东气流沿山的强迫抬升作用的影响, 与Ⅰ、Ⅲ区的降水在垂直环境特征上存在显著性差异。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区在 8 月 12 日 12 时的降水都十分显著, 以此时间点为重点研究对象, 分别沿Ⅰ区降水中心 37°N、Ⅱ区和Ⅲ区降水中心 39°N 的纬向进行剖面分析, 图 6 较为清晰、直观的对比 3 个区域垂直运动的发展演变和地形在动力抬升中的作用。从Ⅰ区风场、涡度和垂直速度的纬向剖面 (图 6a) 可见, 低涡辐合系统存在 2 个大值中心, 分别位于 600~700 hPa 和向东发展的 400 hPa 高度, 低层系统所对应的垂直上升速度仅为−0.3~−0.4 Pa·s^{-1}, 边界层维持一致的偏南气流, 倾斜发展的辐合系统向北移动、发展过程中表现为移速慢、强降水影响范围大、强度偏强, 维持时间长。对比沿着Ⅱ区降水中心 39°N 风场、涡度和垂直速度的纬向剖面 (图 6b) 可见, 长时间维持的偏东气流沿地形坡度在太行山东麓的浅山区形成了强烈的辐合抬升, −2.0 Pa·s^{-1} 的上升气流发展到了 300 hPa 高度, 明显强于Ⅰ、Ⅲ区; 同时, 在倾斜上升气流的后部对应的是 10 x 10^{-6} s^{-1} 的正涡度中心区, 高度位于 800 hPa, 沿山伸展到 850 hPa; 在山前的偏东气流控制区, 850 hPa 及以下区域为正涡度平流, 形成了明显的地形强迫抬升。Ⅲ区 (图 6c) 在垂直环境特征发展上相对特殊, 垂直上升中心有 2 个, 分别位于 900 hPa 和 500 hPa, 且呈倾斜对称分布; 低层的偏东南气流风速达到 14 m·s^{-1} 以上, 700 hPa 高度受副高外围引导气流影响, 西南风在东南气流上辐合抬升, 形成了−0.6 Pa·s^{-1} 的垂直上升中心, 但浅薄的东南气流维持时间较短, 低层上升气流中心造成的降水持续时间较短。

由此可见, Ⅰ区倾斜发展的辐合系统, 垂直上升气流深厚, 动力维持时间最长。Ⅱ区偏东气流与太行山地形的强迫抬升作用形成的垂直上升运动最为强盛, 由此形成的正涡度中心、垂直上升中心要明显高于、强于Ⅰ、Ⅲ区, 地形对降水增幅作用在此次强降水过程中表现的更为显著。Ⅲ区的倾斜对称结构与低层的东南气流发展有密切关系, 但持续时间短, 降水强度相对较小。

3.4 水汽和能量条件

天气尺度形势下, 副高外围维持一致的高温、高湿的背景条件, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的湿度、能量条件具有较高的相似性, 地面露点温度 (T_d) 维持在 24~26 ℃ (图 7), 假相当位温在 352~361 K (图略)。分析发现, 不同区域的降雨强度、发展移动方向和持续时间仍存在中小尺度系统影响的差异性。

(1) 8 月 12 日 12 时 (图 7a), Ⅰ、Ⅲ区分别位于偏南、偏东气流的控制, 能量锋区影响控制之下, 边界层有源源不断的水汽、能量沿着偏东气流输送到强降水区; 但在Ⅱ区, 偏南气流被Ⅰ、Ⅲ区的边界层辐合区阻断, 因此强降水的持续时间相对较短。

(2) 8 月 12 日 14 时 (图 7b), Ⅰ、Ⅱ区位于能量舌的顶端, 在中层引导气流影响下, 沿着偏东北路径移动, 但Ⅰ区的边界层存在明显的辐合中心, 辐合上升运动促使系统在发展过程中加强; Ⅲ区主导影响系统为渤海西海岸的边界层偏东气流, 在偏东急流和弱的海风锋动力强迫抬升作用下, 促进了降水的加强和发展。

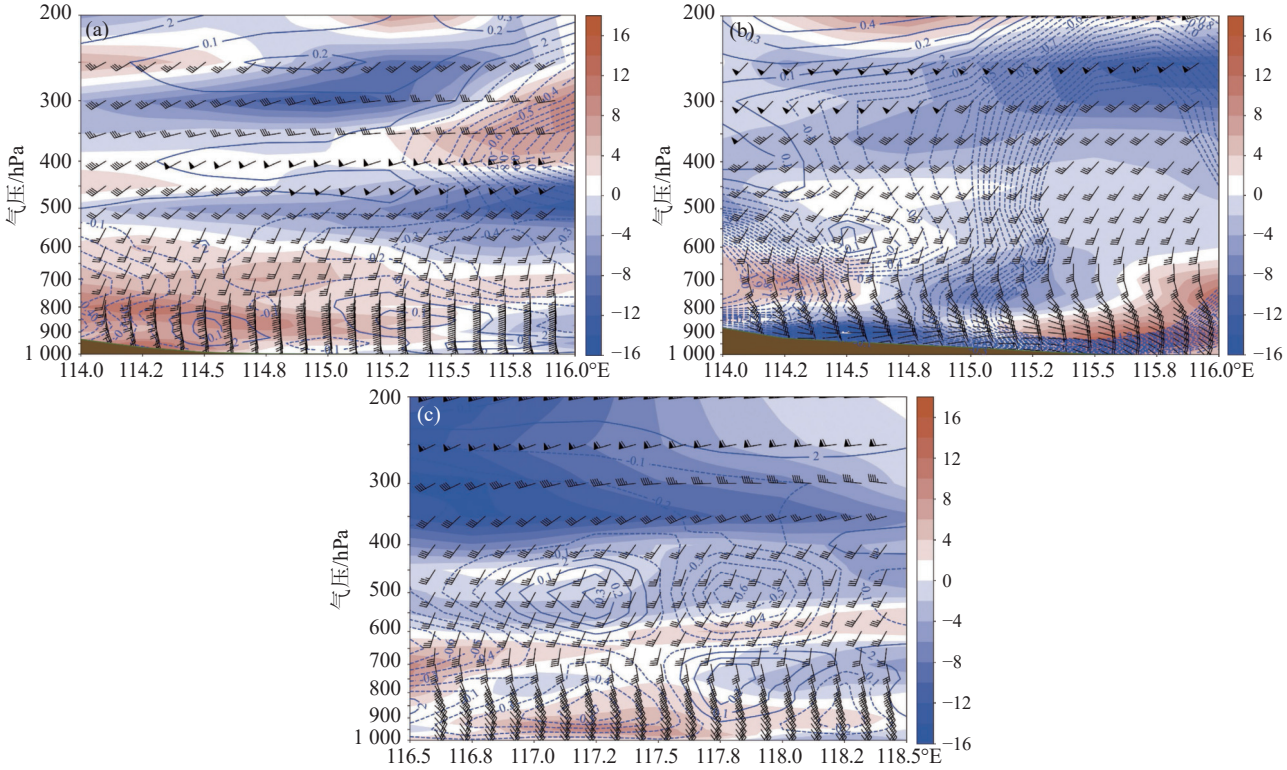


图 6 2020 年 8 月 12 日 12 时沿 37°N (a)、39°N (b、c) 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1})、涡度 (填色, 单位: 10^{-6} s^{-1}) 和垂直速度 (蓝色等值线, 单位: Pa·s^{-1}) 纬向剖面图 (褐色区域为地形)

Fig. 6 Altitude profile of wind (barb, unit: m·s^{-1}), vorticity (shaded, unit: 10^{-6}s^{-1}), and vertical velocity (blue line, unit: Pa·s^{-1}) along (a) 37°N and (b, c) 39°N at 12:00 BT August 12, 2020 (The brown area is terrain)

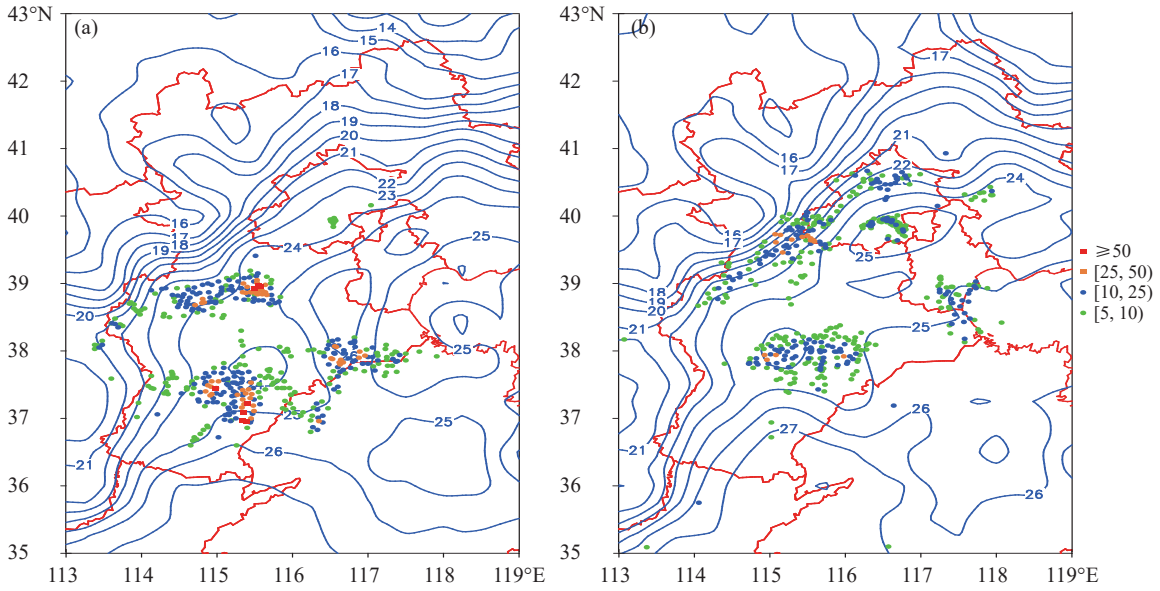


图 7 2020 年 8 月 12 日 12 时 (a)、14 时 (b) 地面露点温度 (等值线, 单位: ℃) 与过去 1 h 分级降水量 (彩色圆点, 单位: mm) 分布图

Fig. 7 The distribution of surface dew point temperature (contour, unit: ℃) and graded precipitation (colored dot, unit: mm) over the past 1 hour at (a) 12:00 BT and (b) 14:00 BT August 12, 2020

4 结论与讨论

本文利用气象常规地面观测资料、多普勒天气雷达、风廓线雷达资料、FY-4A 云图和 ERA5 等多源观测和分析资料, 对 2020 年 8 月 12 日至 13 日华北地区一次副高外围的暖区暴雨天气过程的边界层环境条件分析。得到如下结论:

(1) 2020 年 8 月 12 日至 13 日, 华北地区出现了一次自南向北发展的区域性强降雨过程, 暴雨落区主要位于华北中南部地区和燕山山区。强降水特征

表现为小时雨强大、暴雨落区有跳跃、强降水持续时间差异大、降水阶段性特征清晰。

(2) 天气尺度系统影响下的暖区降水分为 3 个雨区: 华北中部偏南地区的螺旋雨区为Ⅰ区, 沿太行山燕山山脉西南-东北走向的带状雨区为Ⅱ区, 渤海西海岸的块状雨区为Ⅲ区。3 个雨区的降雨机制不同, Ⅰ区边界层的低涡切变系统是诱发强降水的主因, 中高层急流的抽吸作用利于地面气旋的发展, 天气尺度形势条件下高温高湿的环境条件使强降水系统得以维持和加强, 并沿着低涡系统的移动方向向北发展; Ⅱ区地形的强迫抬升、地形辐合是产生Ⅱ区强降水雨带的重要机制, 最大的小时雨强位于太行山东麓沿山的浅山区, 沿着地形的走势移动和发展, 并在山前减弱; Ⅲ区的降水与偏东风的维持加强、边界层急流的发展密切相关, 同时配合有弱的海风锋辐合作用, 是局地影响强降水的主因。

(3) 风廓线风场演变特征很好地体现了边界层急流对中尺度对流系统生消发展的影响, 与强降水的形成有密切的关系。Ⅰ区为系统性低涡的环流风场影响, 系统深厚; Ⅱ区的降水受地形影响明显, 东到东南风促使降水加强, 风向转变后, 降水随即减弱; Ⅲ区的偏东风和双层低空急流结构直接影响局地强降水的发展。Ⅰ、Ⅲ区垂直高度 1 km 以下的风场为顺时针演变, Ⅱ区受地形影响表现为 1.5 km 以下的风场为逆时针发展; Ⅲ区降水的持续时间和降水强度明显短于Ⅰ、Ⅱ区。

由于本次强降水过程的发生演变机制复杂、影响因素多, 受到中小尺度对流系统影响下的 3 种强降水的初生、发展和消亡的物理过程各不相同, 结合多尺度观测资料可对其生消过程进行跟踪, 但对于天气尺度形势下地形对降水的增幅作用、渤海西海岸偏东急流的发展作用, 进行定量研究和实际业务中进行客观预报订正还存在一定的难度, 需要利用快速更新同化系统和数值模拟进行捕捉并进一步开展研究。

参考文献 (References):

陈明轩,王迎春,肖现,等.2013.北京"7·21"暴雨雨团的发生和传播机理[J].气象学报,71(4):569−592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012 [J]. Acta Meteorological Sinica,71(4):569−592 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.053

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, Lǚ 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

谌芸,陈涛,汪玲瑶,等.2019.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):483−493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al. 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):483−493 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.010

何丽华,王咏青,隆璘雪,等.2020.弱天气强迫下一次暖区 MCSs 发生发展研究[J].大气科学学报,43(5):810−823. He L H, Wang Y Q, Long L X, et al. 2020. Study of the occurrence and development of warm-sector MCSs for weak synoptic forcing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,43(5):810−823 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191104002

孔凡超,赵庆海,李江波.2016. 2013 年 7 月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J].气象,42(5):578−588. Kong F C, Zhao Q H, Li J B. 2016. Diagnostic analysis of mesoscale system and environmental conditions during Hebei severe rainstorm [J]. Meteorological Monthly,42(5):578−588 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.05.007

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

苗春生,杨艺亚,王坚红,等.2017.两类华南沿海暖区暴雨特征及热力发展机制对比研究[J].热带气象学报,33(1):53-63. Miao C S, Yang Y Y, Wang J H, et al, 2017. Comparative study of characteristics and thermodynamical development mechanism on two types of warm-sector heavy rainfall in South China coast [J]. Journal of Tropical Meteorology,33(1):53-63 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.01.006

孙军,谌芸,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]. Meteorological Monthly,38(10):1267−1277 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.013

孙健,赵平,周秀骥.2002.一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响[J].气象学报,60(3):333−342. Sun J, Zhao P, Zhou X J. 2002. The mesoscale structure of a South China rainstorm and the influence of complex topography [J]. Acta Meteorological Sinica,60(3):333−342 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2002.040

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]. Meteorological Monthly,44(10):1255−1266 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.10.002

沈晓玲,冯博,李峰,等.2024.一次弱天气背景下浙江局地暖区暴雨成因分析[J].气象,50(2):170−180. Shen X L, Feng B, Li F, et al. 2024. Cause analysis of rainstorm in local warm sector under a weak weather background in Zhengjiang Province [J]. Meteorological Monthly,50(2):170−180 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.051901

王淑莉,康红文,谷湘潜,等.2015.北京 7·21 暴雨暖区中尺度对流系统的

数值模拟[J].气象,41(5):544−553. Wang S L, Kang H W, Gu X Q, et al. 2015. Numerical simulation of mesoscale convective system in the warm sector of Beijing “7·21” severe rainstorm [J]. Meteorological Monthly,41(5):544−553 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2015.05.003

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]. Meteorological Monthly,50(9):1093−1104 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.051601

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-Tian-jin-Hebei region [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(5):455−465 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.002

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]. Meteorological Monthly,48(6):677−690 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.040101

杨晓亮,杨敏,金晓青,等.2024. “23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,43(1):1−12. Yang X L, Yang M, Jin X Q, et al. 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−191

赵鸣.2008.边界层和陆面过程对中国暴雨影响研究的进展[J].暴雨灾害,27(2):92−96. Zhao M. 2008. A review of the research on the effects of boundary layer and land surface process on heavy rain in China [J]. Torrential Rain and Disasters,27(2):92−96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2008.02.016

张芹,赵海军,朱翠红.2023.山东暖区暴雨对流特征和环境参量的统计分析[J].沙漠与绿洲气象,17(3):71−77. Zhang Q, Zhao H J, Zhu C H. 2023. Statistical analysis of the convection characteristics and environment parameters of warm-sector heavy rain in Shandong [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):71−77 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.010

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(4):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]. Meteorological Monthly,44(4):351−360 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.03.002

赵玉春,李泽春,肖子牛.2008.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. 2008. 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:10.19517/j.1671−6345.2008.01.011

Xia R, Zhang D. 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19-20 July 2016 along the Taihang Mountains in North China [J]. Monthly Weather Review,147:4199−4220. doi:10.1175/MWR−D−18−0402.1

(责任编辑 张 文)