

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.006

北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析

于超^{1,2},贺靛³,张恒德^{1,2},张夕迪¹,杨舒楠¹,陈双¹,权婉晴¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081;
3. 国家海洋环境预报中心,北京 100081)

摘要: 基于地面自动站、雷达及 NCEP 数据,采用标准化异常度方法,对北京市 2018 年 7 月 15—16 日出现的极端暴雨过程进行分析,结果表明:极端降雨发生在副热带高压和高空槽之间,低层有明显的西南急流,水汽充沛;暴雨发生时,环境条件标准化异常度均超过 3σ ,为此次极端降雨创造了极其有利的动力、水汽和不稳定条件;中尺度对流系统活动可分为对流系统触发和局地强降雨、对流系统组织化加强和强降雨区北移两个阶段,均伴有明显的“列车效应”,且降雨效率极高;低空西南急流利于大气不稳定层结的建立、水汽持续输送,地面辐合线方向与 850 hPa 低空急流方向、对流云团的移动方向均一致,是导致对流系统触发后增强的主要原因。

关键词: 极端暴雨;低空急流;列车效应;地面辐合线;北京市

中图分类号:P458 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)04-0042-08

Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on
16 July 2018 in Beijing City

YU Chao^{1,2}, HE Liang³, ZHANG Hengde^{1,2}, ZHANG Xidi¹, YANG Shunan¹, CHEN Shuang¹, QUAN Wanqing¹

(1. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China;
2. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081, China;
3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The extreme rainstorm process in Beijing from July 15 to 16, 2018 was analyzed by using the data of automatic ground stations, radar and NCEP and the standardized anomaly method. The results show that: the extreme precipitation occurs between the subtropical high and the high trough, with obvious southwest jet in the lower layer and abundant water vapor; when the rainstorm occurs, the standardized anomaly of environmental conditions exceeds 3σ , which created the favorable dynamic, water vapor and unstable conditions for this extreme precipitation; meso-scale convective system activities can be divided into two stages, the convective system triggering and local heavy rainfall, and the convective system organization strengthening and northward movement of heavy rainfall area, both of which are accompanied by obvious train effect with very high precipitation efficiency; the low-level southwest jet is conducive to the establishment of atmospheric unstable stratification and the continuous transportation of water vapor. Meanwhile, the direction of the ground convergence line is consistent with the direction of the 850 hPa low-level jet and the movement direction of convective system, which is the main reason for the enhancement after the triggering of the convective system.

Key words: extreme rainstorm; low-level jet; train effect; ground surface convergence line; Beijing City

北京市地形复杂、背山面海,位于山地与平原的过渡地带,年平均降水量为 $420 \sim 660 \text{ mm}^{[1]}$ 。1951—2012 年 8 时至次日 8 时 200 mm 以上的大暴雨及特大暴雨出现过两次,100 mm 以上的暴雨发生过 22 次,强降雨过程大多发生在 7 和 8 月,与年降水量分布主要集中在夏季^[2]相对应。北京市自 2012 年以来局地大暴雨、特大暴雨事件时有发生,如 2012 年 7 月 21 日(“7·21”暴雨)、2016 年 7 月 20 日(“7·20”暴雨)的特大

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510400,2018YFC1508102,2017YFC150210);国家自然科学基金(41775111,41875131);中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-138)

作者简介: 于超(1981—),男,高级工程师,硕士,主要从事短期暴雨(雪)预报研究。E-mail:yc_rainy@126.com

通信作者: 贺靛(1983—),女,工程师,硕士,主要从事气象学研究。E-mail:18810811226@126.com

引用本文: 于超,贺靛,张恒德,等.北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):42-49.
YU Chao, HE Liang, ZHANG Hengde, et al. Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 42-49.

暴雨事件均呈现小时降水量大、降雨时间集中、局部降水量超过历史极端值的特点,其中“7·21”暴雨北京市最大累计降水量 460 mm,“7·20”暴雨河北省和北京市最大累计降水量分别为 783.5 mm 和 453.7 mm^[3]。

华北地区暴雨的发生通常与 500 hPa 西北太平洋副热带高压的活动有关,周鸣盛^[4]将 500 hPa 环流分成 4 种形态,其中副热带高压与 500 hPa 低槽东进型是其中之一。丁一汇等^[5]也提出 3 种有利于华北暴雨产生的基本环流形势,其中之一为华北位于长波槽前,下游有高压脊或阻塞高压,可使上游槽移动缓慢或停滞,并指出这种西低东高的环流形势是华北暴雨的最基本环流形势。此外,华北暴雨除了有利的天气尺度环流背景外,往往伴有中小尺度天气系统的活动。吕艳彬等^[6]对华北平原上 3 个典型个例和 MCC 发生前的环境场进行了分析,指出华北平原的 MCC 是发生在移动性冷锋前的暖区中。王迎春等^[7]对 2002 年 8 月 1 日夜間北京市密云区的局地特大暴雨进行分析指出,中尺度低压和辐合线是对流的触发系统,北京市北部处于中尺度低压东部暖湿气流的辐合区内,在有利的地形条件下中尺度低压和辐合线使密云西部山区出现特大暴雨。

研究表明,在气候变暖的大背景下,有些地区在降水总量增加的同时,极端降水量也显著增加^[8-9],而且极端降水量增加的趋势显著大于平均降水量增加的趋势^[10]。极端降雨造成的城市内涝积水现象时常发生,社会关注度也越来越高^[11],王辉等^[12]研究表明,昆明市 1960—2017 年极端降水量和严重程度均呈增加趋势。精细化的暴雨预报特别是极端暴雨的预报在我国实际天气预报业务中难度较大,但是社会经济的发展对精细化的预报服务要求和需求越来越高,研究极端暴雨的成因并提高防灾减灾能力十分必要。此外,已有专家学者研究了暴雨洪涝灾害对城市的危害^[13],并进行了风险评估^[14-16],旨在通过相关的统计工作查找气候规律,提高城市对暴雨洪涝灾害的防灾减灾能力。

2018 年 7 月 15 日夜間至 16 日,北京市出现 2018 年最强降雨过程(以下简称“7·16”极端暴雨)。降雨过程中的小时降水量、最大累计雨量及持续时间在 2012—2018 年北京市降雨过程中均位居前三位,降雨的极端性非常明显。受强降雨影响,北京市多地出现严重的地质灾害和中小河流洪水等次生灾害。此外,极端暴雨过程中最强降雨发生在副热带高压边缘暖区中,没有冷空气参与,属于典型的华北夏季暖区暴雨,大尺度天气系统强迫非常弱,预报难度大,数值预报模式对强降雨中心位置强度和极端性均估计不足。基于此,本文利用地面自动站、雷达及 NCEP 再分析和最终分析资料对“7·16”极端暴雨过程的降雨特征、环境场极端性、中尺度对流系统及地面辐合线演变进行分析,总结造成极端降雨的天气学概念模型,以进一步提高极端暴雨的预报能力和防灾减灾能力。

1 研究数据和方法

1.1 研究数据

研究数据主要包括:①质量控制后的逐 1 h 北京市加密区域自动气象站(437 个)资料,用于分析降水量的分布和小时降水量的站次分布;②质量控制后的华北区域逐 1 h 加密地面气象观测资料,用于地面辐合线分析;③逐 6 min 多普勒天气雷达华北区域组合反射率拼图和双偏振雷达雨滴谱拼图资料,用于分析中尺度对流系统演变;④北京市观象台 L 波段风廓线雷达 0.5 h 和 1 h 平均采样的水平风场资料,用于分析风速垂直变化;⑤一天 4 次 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center for Atmospheric Research) 2.5°×2.5°再分析资料和 NCEP FNL(Final Operational Global Analysis)1°×1°最终分析资料,用于大尺度环流及环境条件分析。

1.2 标准化异常度方法

杜钧等^[17]将某一天气要素与气候平均值的差来表示其异常程度,标准化异常程度的气候标准差定义为标准化异常度。标准化异常度可用来分析天气要素的极端性,通常认为 3 σ 即表示异常的天气事件,即极端性突出。

标准化异常度 S_D 的表达式为

$$S_D = (F - M) / \sigma \tag{1}$$

式中: F 为某一个时刻的某一变量值(如 500 hPa 高度); M 为变量场 30 a 的气候平均值; σ 为变量场 30 a 的气候标准差。气候场用 1986—2015 年的 NCEP/NCAR 2.5°×2.5°再分析数据进行计算,并进行了 21 d 的滑动平均。

2 降雨特征和预报情况

2.1 降雨特征

2018 年 7 月 15—17 日的北京市强降雨过程分为多个时段,最强降雨时段出现在 15 日夜至 16 日凌晨。此次暴雨天气过程呈现以下特点:①累计降水量大(图 1(a)),全市平均降水量 103 mm,城区平均 127.2 mm;最大累计降水量出现在密云区张家坟,达 386 mm;②降雨效率高,短时雨强大,密云、怀柔、顺义、房山、门头沟 16 日凌晨均监测到小时降水量 50 mm 以上的短时强降雨,密云区白莲峪 1 h 降水量达 117.0 mm(16 日 2—3 时);③降雨持续时间长,从 15 日 20 时开始,至 18 日 6 时结束,持续 58 h。

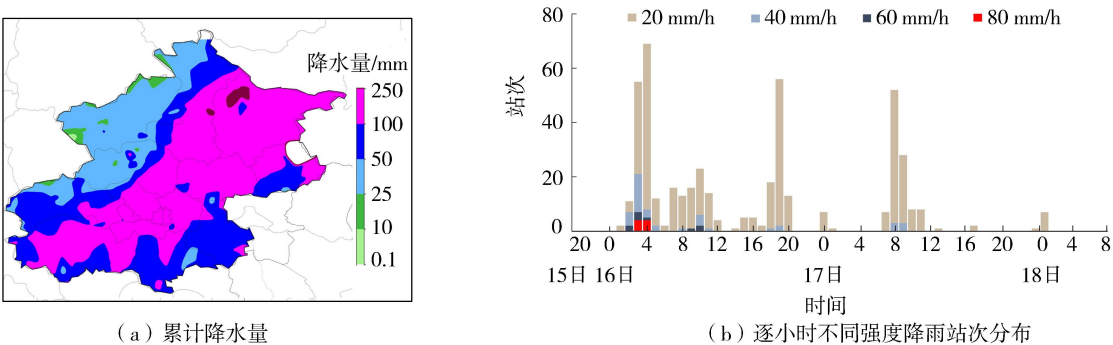


图 1 7 月 15 日 20 时至 18 日 8 时累计降水量和逐小时不同强度降雨站次分布
Fig.1 Accumulated rainfall and station distribution of hourly precipitation of different intensity from 20 BT 15 July to 08 BT 18 July

从不同强度降雨站次分布(图 1(b))可以看出,有 3 个降雨集中时段,分别为 16 日 1—5 时、16 日 14—20 时及 17 日 8—20 时,其中 16 日 1—5 时的小时降水量超过 40 mm 的站次最多,而超过 60 mm 和 80 mm 的站次也显著高于其他两个时段,特别是密云区西白莲峪村 16 日 2—3 时降水量达 117.0 mm。本文针对 15 日夜间至 16 日凌晨的强降雨进行重点分析。

2.2 灾情及降雨预报能力分析

受强降雨影响,怀柔、密云、房山、昌平、延庆、平谷多地出现地质灾害、小河流洪水和城市积水,其中怀柔区 G111 京加路、密云区琉辛路塌方严重;回龙观、西二旗等地出现严重积水,部分车辆被淹。水情方面,白河上游及支流蛇鱼川河、牯牛沟河及支流、白马关河及支流、安达木河及 6 条小流域损毁严重;护村坝、护地坝损毁 25.24 万 m³;密云白河出现 1998 年以来最大洪水,密云水库近 20 年来蓄水量再次突破 22 亿 m³,其下游潮河、潮白河两座漫水桥及个别堤防受损。此次强降雨以单峰型降雨为主,雨强大,持续时间长,最大径流量超过 60 m³/s,是造成小流域洪水的主要原因;同时强降雨造成土壤湿度增加,而短时强降雨的冲击,造成在地质物质条件、能量条件具备的区域土体失稳,这也是地质灾害的主要原因之一。

国家气象中心现有预报业务中使用的数值预报模式(全球尺度和中尺度两类,共 11 个模式)对中小尺度天气系统引发的突发性短时强降雨预报能力普遍较低^[18]。从数值模式预报结果来看,对 15 日 8 时至 16 日 8 时降雨预报,全球尺度数值预报模式包括欧洲中心天气预报、中国气象局全球预报系统的 36 h 时效预报量级均明显偏弱,预报的量级均为小到中雨;中尺度数值预报模式包括北京新一代快速更新多尺度资料分析和预报系统(RMAPS)、中国气象局区域数值预报业务系统和华东区域数值预报业务系统预报量级也均偏弱。欧洲中心集合预报概率匹配产品预报 15 日 8 时至 16 日 8 时北京市为小雨,52 个集合成员中对该时段的预报仅有一个成员预报北京市为大雨,较实况也明显偏弱;对海淀站的预报仅有两个成员预报累计降水量超过 10 mm,概率不到 4%,也明显弱于实况(海淀站实况累计降水量为 56 mm)。对于此次强降雨过程,所有数值预报模式预报的量级均明显偏弱,显示对于局地性和突发性的中尺度强降雨,特别是极端强降雨的预报能力还有待提升。对于 7 月 16 日北京市 6 个区站的地质灾害气象风险预警,命中 4 个站,空报 1 站,漏报 1 站,且 15 日并未预报出 16 日的地质灾害,预报区域相对于灾情点位置偏西。16 日早晨发布的中小河流洪水气象风险黄色预警,基本准确预报了潮白河流域部分断面出现的洪水。

3 环流形势和环境条件分析

陶诗言^[19]将华北夏季高空槽(相伴有冷锋)暴雨的环流形势分为 3 种类型,其中之一为强低槽冷锋的情况,即低槽位于河套地区,并有锋面气旋发展。在冷锋前有西南急流向北伸展,主要暴雨区在高低空急流之间、锋前暖区中。此次暴雨过程的环流形势符合强低槽冷锋型。在 15 日夜间至 16 日白天,华北地区位于 500 hPa 副热带高压和高空槽之间,低层存在西南急流,地面锋面位置位于内蒙古西部,北京市没有明显的冷空气影响。15 日 20 时,500 hPa 上在蒙古人民共和国至甘肃南部有一个深厚的高空槽(图 2(a),图中位势高度单位为 dagpm),北京市处于高空槽前和副热带高压西北侧西南气流中,风速为 14 m/s;700 hPa 具有和 500 hPa 同样的环流形势;850 hPa 上空(图 2(b)),北京市为西南风,风速为 8 m/s;地面冷锋位于蒙古人民共和国至宁夏北部,北京市处于锋前暖区,其中南部和中部地区为东南风,北部为东北风,存在明显的切变辐合。16 日 8 时,500 hPa 高空槽东移加深,副热带高压略有东退,北京市仍然位于高空槽前和 588 位势 10 m 等高线西北侧,此时风速加大至 16 m/s;850 hPa 北京市东部西南风加大至 12 m/s,达到急流强度。北京市大部分地区处于低空 850 hPa 急流左侧出口区域,辐合抬升条件较好。总之,15 日 20 时至 16 日 8 时,大尺度环流形势对于北京市的动力辐合抬升非常有利。

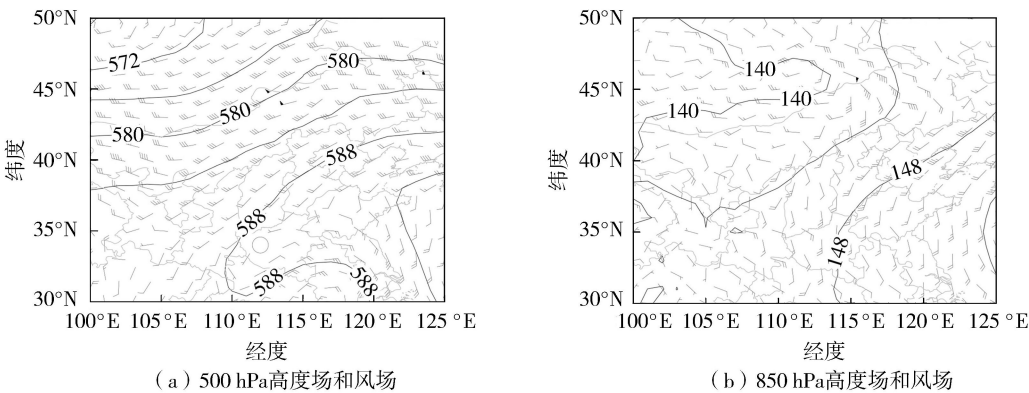


图 2 7 月 15 日 20 时高度场和风场
Fig. 2 Height field and wind field at 20 BT 15 July

此次暴雨过程发生在盛夏时节,水汽和热力条件均有利于暴雨的产生。15 日 20 时,河北石家庄至保定存在整层水汽含量高值中心,达 65 mm,北京市中部地区和南部地区整层水汽含量也达到 60 mm, K 指数(K 指数是反映垂直温度递减率和低层水汽含量的热力综合参数) $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的区域也由北京市中部地区和南部地区扩大至整个北京市;16 日 8 时,石家庄至保定一带整层水汽含量降至 60 mm,但北京市中部地区的整层水汽含量增至 65 mm,北部地区由 55 mm 增至 60 mm,16 日 8 时 K 指数高值中心出现在昌平,达 40°C 。在强降雨发生的主要时段(15 日 20 时至 16 日 8 时),保定和北京市大部地区的水汽和层结不稳定条件均维持在较高水平,且高值中心由南向北发展。

由上述分析可知,低层西南风除了为北京市提供有利的动力辐合抬升外,还将北京市以南地区的水汽和层结不稳定性持续向北输送,为北京市产生强降雨提供了十分有利的条件。

4 极端降雨成因分析

4.1 环境条件极端性

高度场的标准化异常度分析显示,北京市 15 日夜间至 16 日白天受 200 hPa 高空脊控制,其高度场为大于 3σ 的正异常,高空台风残余环流北侧为高压带,随着低涡的北上,高压带变窄,风向切变增加,高空辐散异常值逐渐增加,出现大于 $3\sigma \sim 4\sigma$ 的正异常(图 3(a))。500 hPa 高度上副热带高压整体偏北、偏强,降雨区位于副热带高压西北侧边缘, S_0 呈现弱的正异常,对降雨的动力条件作用不大,850 hPa 位势高度也略高于气候平均值。850 hPa 风速的标准化异常度分析显示(图 3(b)),在副热带高压西北侧有较强的低空急流,低层风场存在一条带状的大于 $3\sigma \sim 4\sigma$ 的正异常带,且主要异常出现在经向风速上,偏强的西南风更加有利于水汽的向北输送。

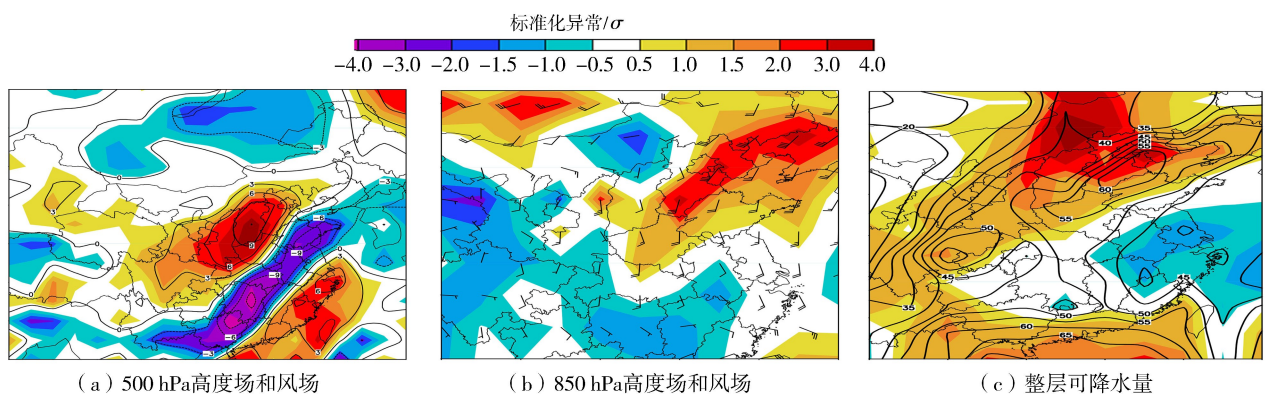


图3 7月15日20时物理量及其标准化异常度

Fig.3 Physical quantity and standardized anomaly at 20 BT 15 July

水汽及不稳定条件的标准化异常分析显示,850 hPa 比湿异常明显,普遍超过 $2\sigma \sim 3\sigma$,水汽通量和水汽通量散度也存在明显的异常,整层可降水量为 $55 \sim 60 \text{ mm}$,达到 $3\sigma \sim 4\sigma$ (图3(c))。850 hPa 假相当位温的异常为 $2\sigma \sim 3\sigma$,异常的不稳定条件也有利于强降雨的发生。

从怀柔 and 石景山单站的要素概率分析来看,200 hPa 散度非常强,均超过了历史概率分布区间,500 hPa 和 850 hPa 位势高度场基本处于气候平均附近,天气系统较弱。850 hPa 辐散非常强,怀柔站的 850 hPa 散度远超过了历史概率分布区间,石景山的 850 hPa 散度也远小于 5%,表明存在异常的低层辐合。上述分析表明,低层的强辐合不是由高度场的天气系统造成的,而是由低空急流引起的中尺度强辐合。怀柔站和石景山站的水汽条件和不稳定条件均超过了历史概率分布的最高值。此外,怀柔站在整个过程中整层水汽含量的异常值维持在 $2\sigma \sim 4\sigma$ 之间,平均值 2.53σ ,最大异常值达到 4.3σ ,假相当位温的异常值维持在 $2\sigma \sim 3.5 \sigma$ 之间,平均值 2.5σ ,最大异常值达 3.4σ ,两站的最大异常值均与强降雨最强时段相对应。

通过上述分析可知,高层辐散、低层辐合、水汽和不稳定能量的异常及其持续影响为此次极端降雨创造了极其有利的动力、水汽和不稳定条件。

4.2 强降雨的中尺度特征

华北地区夏季的极端降雨通常伴随高效率的对流性降雨。“7·16”暴雨发生在暖区中,降雨效率高,属于典型的中尺度对流性降雨。其中房山区河北镇 16 日 1—3 时总降水量为 132 mm,最大小时降水量达 88.6 mm,密云区西白莲峪村 16 日 1—5 时总降水量为 280 mm,最大小时降水量达 117 mm。

杨忠林等对 R 类极端对流和 H 类极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究表明^[20],R 类极端对流较 H 类极端对流的总体雨滴粒径更小而浓度更高,导致 R 类极端对流的地面降雨更强。同 R 类极端对流相比,H 类极端对流的上升运动更强,将更多的水汽和过冷水输送到 0°C 层以上,有利于形成更大的冰相粒子(如霰粒子等),并通过融化形成大雨滴。极端降雨主要是中等高度的对流引起的,可以理解为高效低质心的对流系统相比上升运动更强发展高度更高的对流系统,通常会产生更强的降雨。本文通过分析雷达组合反射率和双偏阵雷达雨滴谱的演变特征来解释中尺度对流系统的触发和组织化过程。

从雷达发射率的演变来看,对流系统的活动可分为两个主要阶段。第一阶段为对流触发阶段(15 日 20 时至 16 日 1 时,图4(a)~(f))。15 日 20—23 时,保定附近有对流生成,自西南向东北方向移动,16 日 0 时进入房山区,移速减慢,强度加强,最大回波强度为 45 dBZ,房山区 1—2 时出现 43.4 mm 的降雨。22 时保定市南部有新的对流系统生成,向东北方向移动的过程中快速加强。同时,16 日 0 时,怀柔区也有中尺度对流系统生成并向东北方向移动,1 时移至密云区后停滞少动,强度逐渐加强。第二阶段为对流组织化阶段(16 日 2—4 时,图4(g)~(i))。保定市南部地区触发并北移的中尺度对流系统 16 日 1 时进入房山区,2 时与其北部的对流系统合并,强度和影响范围均进一步增强,过程中最大回波强度为 55 dBZ,3 时房山 1 h 降水量达 88.6 mm。影响密云区的对流系统缓慢北移,强度逐渐加强,最大回波强度达 55 dBZ,对流系统的停滞少动及加强使得密云区在 2 时和 3 时的小时降水量分别达 67.6 mm 和 117 mm。房山区的对流系统在 3—5 时北移至密云,北移过程中强度和范围基本维持不变,最大回波强度为 55 dBZ,4 时和 5 时密云区再次出现小时降水量分别为 63.2 mm 和 32.2 mm 的强降雨。5 时后,上述对流系统移出北京市,此阶段降雨趋于结束。

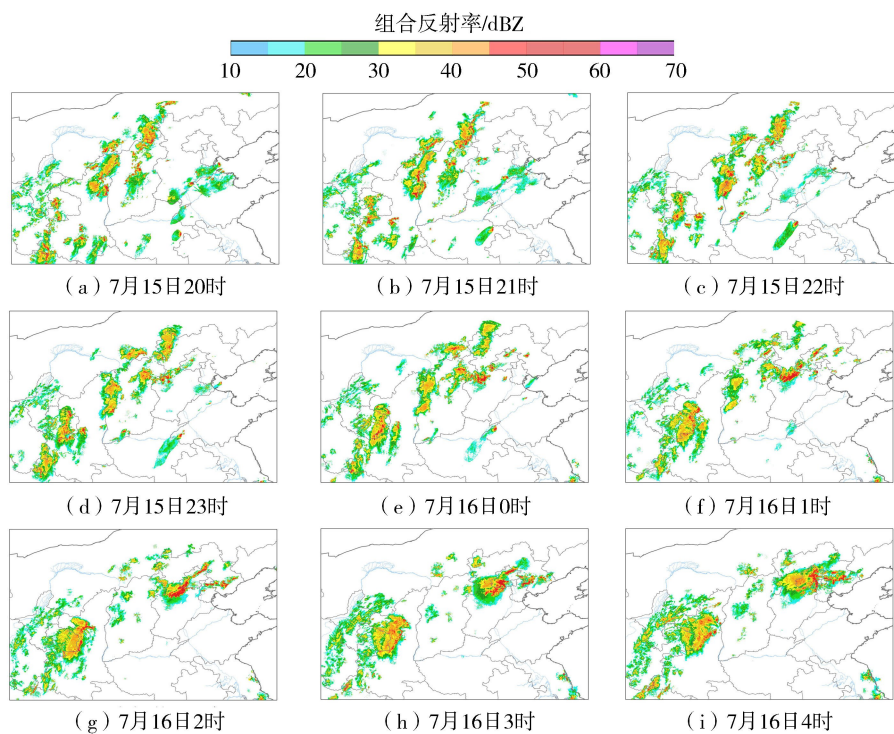


图 4 间隔 1 h 的华北雷达组合反射率

Fig. 4 Combined reflectivity of radar in North China with 1 h interval

通过双偏阵雷达不同距地面高度组网的降雨粒子相态识别拼图(图略)可见,16 日 1 时 36 分至 2 时 24 分,房山区和密云区 1 km 和 3 km 组网观测中均识别到大雨相态,3 km 观测中大滴范围明显增大,5 km 高度以上干雪湿雪增加,有部分冰晶,表明此时段对流系统降雨效率较高。对应房山区和密云区在 3 时分别出现 88.6 mm 和 117 mm 的小时降水量。另外,沧州雷达 2 时 36 分的反射率剖面图也显示房山的强回波质心高度在 6 km 左右,属于比较典型的低质心高效率降雨。

分析表明,强中尺度对流系统活动的两个阶段均伴有明显的“列车效应”,主要表现为保定市附近多个时次均有对流系统生成并向东北方向移动,在移动过程中发展加强,或与其下游对流系统合并再加强。降雨最强阶段对应雷达回波质心较低,降雨效率极高,以上均是房山区和密云区产生极端小时降水量的重要原因。

4.3 低空急流对强降雨的增幅作用

分析显示 850 hPa 低空急流在强降雨期间异常偏强。15 日 20 时至 16 日 2 时,850 hPa 低空急流轴左侧和出口处伴有明显的垂直上升运动,上升运动从低层发展至 500 hPa,为强降雨的发生提供了有利的动力抬升条件。

风廓线和多普勒雷达组网风场观测显示,自 15 日 21 时至 16 日 4 时,1 500 m 高度大于 12 m/s 的强风速带由河北沧州衡水一带逐渐北传至北京市,北京市风速在 15 日 23 时至 16 日 2 时显著增强。从南郊站的半小时平均雷达风廓线观测来看,15 日 14 时开始 2 500 m 左右西南风增强并逐步向低层扩展,17 时开始,风随高度增加由东南风向西南风顺转,低层存在暖平流。北京市 850 hPa 15 日 14—20 时的假相当位温和对流有效位能均显著增强,表明低层西南风的存在将北京市以南地区的高温高湿空气向北京市输送,有利于北京市不稳定大气层结的建立。南郊站平均雷达风廓线观测显示(图 5),15 日 20 时至 16 日 8 时,低层维持西南风且风速维持在 14 ~ 16 m/s,整层可降水量从 52 mm 增加至 60 mm,表明低层西南急流有利

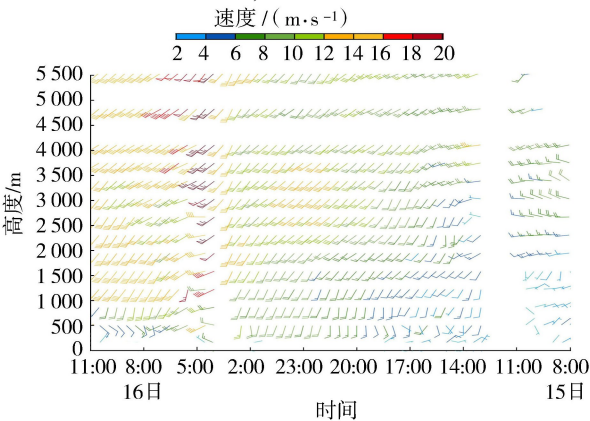


图 5 7 月 15 日 8 时至 16 日 11 时(间隔 3 h)风廓线和多普勒雷达南郊站(54511)平均风羽图

Fig.5 Wind profile and average wind barb map at Doppler Radar Nanjiao Station (54511) from 08 BT 15 July to 11 BT 16 July (interval: 3 h)

于北京市水汽的输送和增强。

上甸子站的半小时平均风雷达风廓线组网观测显示,16日2—5时低层西南风维持在急流强度,最大达16 m/s,低空急流在上甸子附近产生辐合抬升,与2—5时的小时降水量均超过50 mm相匹配。

上述分析表明,低空急流的维持,一方面在其左侧出口区保持强的低空辐合,另一方面将暖湿空气向北京市输送,使北京市上空大气迅速建立不稳定层结并保持高温高湿状态,为强降雨的加强和维持创造了有利的环境条件。

4.4 地面辐合线的作用

北京市的地形对暴雨的影响表现在迎风坡对气流有抬升作用,在山谷地区气流辐合抬升和气流遇山阻挡后绕流在山前出现地形切变辐合线,因此山区暴雨常出现在一定的风向条件下^[19]。由地面辐合线的演变可见(图6,图中风向杆为地面风场,红色双虚线为当时的地面辐合线,填色为地形,红色区域为北京市),15日21时,在保定市至房山区,地面沿太行山有偏南风 and 偏北风辐合线,在辐合线西侧有对流系统触发,同时降雨在保定市西部开始产生,至23时,地面辐合线维持,其右侧东南风加强,保定市西部的降雨也得到加强。16日1—4时,地面辐合线缓慢东移,其右侧东南风逐渐加强,南部降雨区继续向东北方向移动,1—3时影响房山区;密云区北部有喇叭口地形,降雨1—4时持续在密云区北部产生。密云区降雨在2—3时达到巅峰,地面辐合线东移后,降雨开始减弱,降雨中心在密云北部喇叭口地形处持续近4 h。

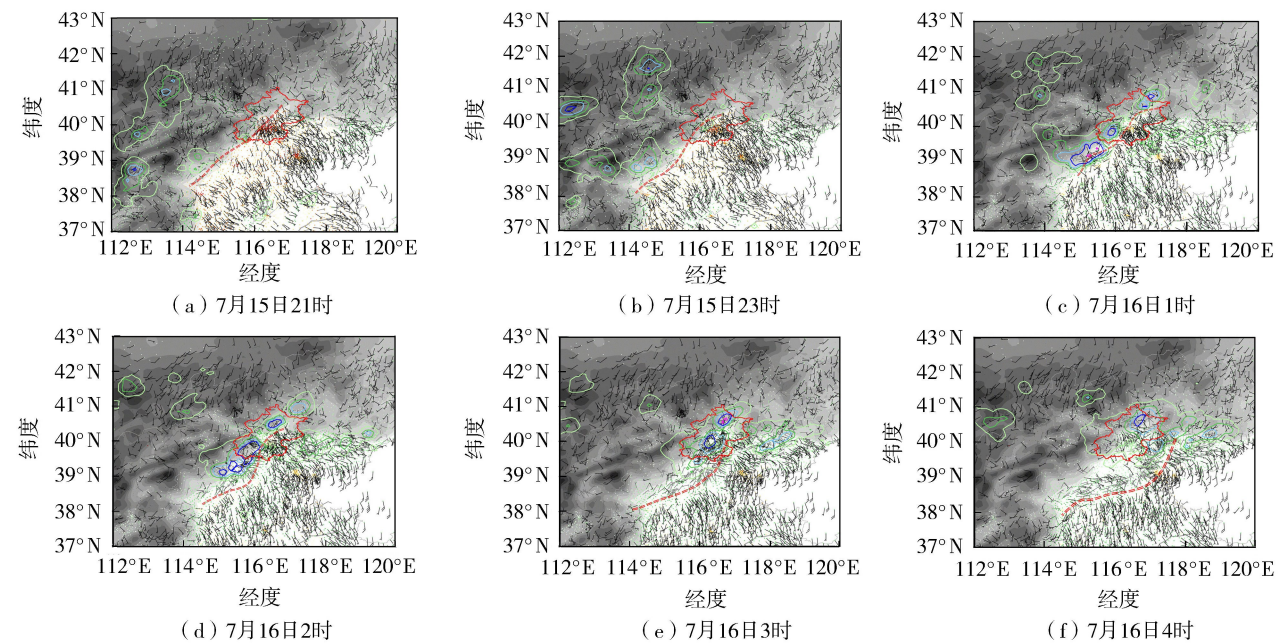


图6 7月15日夜间地面风场及未来1 h 降水量(等值线)

Fig. 6 Ground wind field and precipitation in the next 1 h (mm, contour line) at night on 15 July

在降雨主要时段,地面辐合线右侧主要为东南风,左侧为偏北风。地面辐合线维持西南—东北方向,与850 hPa 低空急流方向一致,同时与强降雨对流云团的移动方向也一致,利于对流触发之后出现“列车效应”,使得多地重复出现强降雨且短时雨强较大。

图7为北京市“7·16”极端暴雨的概念模型。在北京市夏季降雨的预报中,在西太平洋副热带高压“588线”外围高湿高能的环流形势和环境背景下,需关注西部和北部山前地面辐合线的位置及其对对流系统的触发作用,同时关注西南急流增强后对降雨的持续和加强作用;此外,若对流系统移向与低空急流、地面辐合线一致,则需关注“列车效应”导致的强降雨在同一地区多次出现从而产生极端降

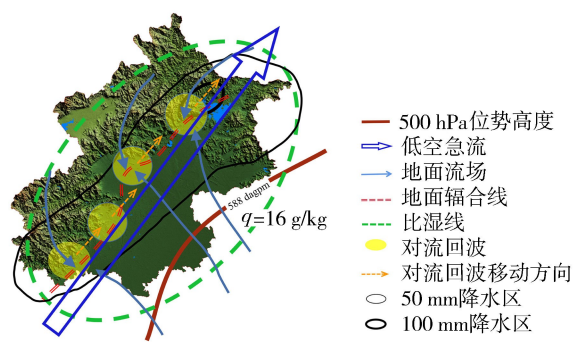


图7 北京市2018年“7·16”极端暴雨概念模型
Fig.7 Schematic diagram of extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing

雨的可能性。

5 结 论

- a. 极端降雨发生在副热带高压和高空槽之间、地面冷锋前部暖区中,低层有明显西南急流,来自南方的水汽向华北地区持续输送,水汽充沛。
- b. 暴雨发生时,高层辐散、低层辐合、水汽和不稳定能量均存在显著的标准化异常,极端性环流和温湿条件及其长时间的维持是产生极端降雨的重要原因。
- c. 与强降雨对应的中尺度对流系统活动的两个阶段均伴有明显的“列车效应”,且降雨最强阶段雷达回波质心较低,降雨效率极高,这是造成房山区和密云区累计降水量较大的重要原因。
- d. 地面辐合线是对流系统触发的重要因素,低空西南急流使得北京市上空大气建立热力和动力不稳定层结,并且持续地向北京市输送水汽,两者均是造成此次极端降雨的主要因素。

参考文献:

[1] 王佳丽,张人禾,王迎春. 北京降水特征及北京市观象台降水资料代表性[J]. 应用气象学报,2012,23(3):265-273. (WANG Jiali, ZHANG Renhe, WANG Yingchun. Characteristics of precipitation in Beijing and the precipitation representativeness of Beijing Weather Observatory[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2012,23(3):265-273. (in Chinese))

[2] 谢庄,王桂田. 北京地区气温和降水百年变化规律的探讨[J]. 大气科学,1994,8(6):683-690. (XIE Zhuang, WANG Guitian. The changes of temperature and precipitation in Beijing during last 100 years[J]. Scientia Atmospherica Sinica,1994,8(6):683-690. (in Chinese))

[3] 雷蕾,邢楠,周璇,等. 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,2020,78(1):1-17. (LEI Lei, XING Nan,ZHOU Xuan,et al. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing area[J]. Acta Meteorologica Sinica,2020,78(1):1-17. (in Chinese))

[4] 周鸣盛. 我国北方 50 次区域性特大暴雨的环流分析[J]. 气象,1993,19(7):14-18. (ZHOU Mingsheng. The circulation analysis of regional heavy rainstorms in the north of China[J]. Meteorological Monthly,1993,19(7):14-18. (in Chinese))

[5] 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析[M]//中国科学院大气物理研究所集刊(第 9 号):暴雨及强对流天气的研究. 北京:科学出版社,1980:119-134.

[6] 吕艳彬,郑永光,李亚萍,等. 华北平原中尺度对流复合体发生的环境和条件[J]. 应用气象学报,2002,13(4):406-412. (LYU Yanbin,ZHENG Yongguang,LI Yaping,et al. Environment and conditions of mesoscale convective complex development in North China Plain[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2002,13(4):406-412. (in Chinese))

[7] 王迎春,钱婷婷,郑永光,等. 对引发密云泥石流的局地暴雨的分析和诊断[J]. 应用气象学报,2003,14(3):277-286. (WANG Yingchun,QIAN Tingting,ZHENG Yongguang,et al. Analysis and diagnosis of a local heavy rain in Miyun County, Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2003,14(3):277-286. (in Chinese))

[8] MEEHL G A, KARL T, EASTERLING D R, et al . An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2000,81(3):413-416.

[9] MEARNS K R W. Extreme high-temperature events in their probalities changes in mean temperature[J]. Climate and Appl Meteor,1984,23(2):1601-1613.

[10] KHARIN V V, FRANCIS W Z. Estimating extremes in transient climate change simulations[J]. Climate,2005,18:1156-1173.

[11] 荣艳淑,王文,王鹏,等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):1-8. (RONG Yanshu, WANG Wen, WANG Peng, et al. Analysis of characteristics of extreme rainfall and estimate of rainfall during return periods in Huaihe Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (1): 1-8 (in Chinese))

[12] 王辉,吴文俊,王广,等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J]. 水资源保护,2021,37(4):61-68. (WANG Hui, WU Wenjun, WANG Guang, et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):61-68. (in Chinese))

[13] 郝晓丽,穆杰,喻海军,等. 城市洪涝试验研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(1):80-86. (in Chinese))

[24] 刘堃,何祺胜,荆琛琳,等. 基于机器学习的蒸散量插补方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):109-115. (LIU Kun,HE Qisheng,JING Chenlin,et al. Gap filling method for evapotranspiration based on machine learning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):109-115. (in Chinese))

[25] 张楠,夏自强,江红. 基于多因子量化指标的支持向量机径流模拟[J]. 水利学报,2010,41(11):1318-1324. (ZHANG Nan,XIA Ziqiang,JIANG Hong. Prediction of runoff based on the multiple quantity index of SVM[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(11):1318-1324. (in Chinese))

[26] 刘宝成. 基于最小二乘支持向量机的时空序列混合模拟模型及实证研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.

[27] HU C,WU Q,LI H,et al. Deep learning with a long short-term memory networks approach for rainfall-runoff simulation[J]. Water,2018,10(11):1543.

[28] MA X,TAO Z,WANG Y,et al. Long short-term memory neural network for traffic speed prediction using remote microwave sensor data[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2015,54:187-197.

[29] LIANG C,LI H,LEI M,et al. Dongting Lake water level forecast and its relationship with the Three Gorges Dam based on a long short-term memory network[J]. Water,2018,10(10):1389.

[30] 于国强,张茂省,王根龙,等. 支持向量机和BP神经网络在泥石流平均流速模拟模型中的比较与应用[J]. 水利学报,2012,43(增刊2):105-110. (YU Guoqiang,ZHANG Maosheng,WANG Genlong,et al. Application and comparison of prediction models of support vector machines and back-propagation artificial neural network for debris flow average velocity[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(Sup2):105-110. (in Chinese))

[31] 潘志刚,林祥峰,张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):78-81. (PAN Zhigang,LIN Xiangfeng,ZHANG Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(6):78-81. (in Chinese))

[32] 贺玉琪,王栋,王远坤. BRR-SVR 月降水量模拟优化模型[J]. 水利学报,2019,50(12):1529-1537. (HE Yuqi,WANG Dong,WANG Yuankun. BRR-SVR optimization model for monthly precipitation prediction[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(12):1529-1537. (in Chinese))

[33] 杜聪,邵建华,杨薇,等. 网格搜索法优化的支持向量机室内可见光定位[J]. 激光杂志,2021,42(3):104-109. (DU Cong,SHAO Jianhua,YANG Wei,et al. Support vector machine indoor visible light positioning optimized by grid search method[J]. Laser Journal,2021,42(3):104-109. (in Chinese))

[34] TIAN H,WANG P,TANSEY K,et al. An LSTM neural network for improving wheat yield estimates by integrating remote sensing data and meteorological data in the Guanzhong Plain,P R China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2021,310:108629.

[35] MAIMAITIJANG M,SAGAN V,SIDIKE P,et al. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning[J]. Remote Sensing of Environment,2020,237:111599. (收稿日期:2021-09-28 编辑:胡新宇)

(上接第49页)

[14] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J]. 水资源保护,2021,37(1):20-27. (LIU Yongzhi,TANG Wenwen,ZHANG Wenting,et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):20-27. (in Chinese))

[15] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru,LUO Haiwan,LU Xinxiang,et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))

[16] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (XU Zongxue,REN Meifang,CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):10-14. (in Chinese))

[17] 杜钧,GRUMM R H,邓国. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”:以北京2012年7月21日特大暴雨为例[J]. 大气科学,2014,38(4):685-699. (DU Jun,GRUMM R H,DENG Guo. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing[J]. Scientia Atmospherica Sinica,2014,38(4):685-699. (in Chinese))

[18] 曹勇,包红军,张恒德,等. 基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):303-308. (CAO Yong,BAO Hongjun,ZHANG Hengde,et al. Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):303-308(in Chinese))

[19] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1980:14-117.

[20] 杨忠林,赵坤,徐坤,等. 江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J]. 气象学报,2019,77(1):58-72. (YANG Zhonglin,ZHAO Kun,XU Kun,et al. Microphysical characteristics of extreme convective precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin during the Meiyu season based on polarimetric radar data[J]. Acta Meteorologica Sinica,2019,77(1):58-72. (in Chinese)) (收稿日期:2021-09-28 编辑:胡新宇)