

方翀,毛冬艳,张小雯,等. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J]. 气象, 2012, 38(10): 1278-1287.

2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨 中尺度对流条件和特征初步分析^{* 1}

方 翀¹ 毛冬艳¹ 张小雯¹ 林隐静¹ 朱文剑¹
张 涛¹ 谌 芸¹ 盛 杰¹ 蓝 渝¹ 林 易² 郑永光¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 贵州省气象台, 贵阳 550002

提 要: 本文利用常规、自动气象站观测资料, 卫星、雷达、风廓线探测资料和 NCEP 再分析资料($1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 逐 6 小时), 对 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨的中尺度对流条件和对流系统特征进行了初步探讨, 结果表明: 本次极端强降雨成因主要包括非常充沛的水汽, 一定的对流不稳定性, 对流系统持续的“列车效应”, 以及低质心高效率的降雨对流系统。低层的切变线和地面辐合线相交的地区, 是对流单体初生和强烈发展的区域; 根据中层风的风向风速及地面辐合线的位置和走向, 可以大致判断对流单体的移动方向及是否存在列车效应。基于静止卫星红外云图和雷达反射率因子资料的中尺度对流系统分析表明该次降水过程存在三个阶段: 第一阶段为对流系统强烈发展的前期阶段; 第二阶段对流系统发展最为强烈, 北京大部分地区出现极端强降雨; 第三阶段为北京地区对流和降雨显著减弱阶段。

关键词: 短时强降雨, 列车效应, 低质心, 垂直风切变, 基本反射率, 风廓线

Analysis on the Mesoscale Convective Conditions and Characteristics of an Extreme Torrential Rain in Beijing on 21 July 2012

FANG Chong¹ MAO Dongyan¹ ZHANG Xiaowen¹ LIN Yinjing¹ ZHU Wenjian¹
ZHANG Tao¹ CHEN Yun¹ SHENG Jie¹ LAN Yu¹ LIN Yi² ZHENG Yongguang¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

Abstract: Using the data of conventional and automatic weather stations (AWS), Doppler radar, satellite and wind-profiler radar (WPR) as well as the associated NCEP reanalysis data ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$), this paper analyzed the convection conditions and mesoscale characteristics of an extreme rainstorm in Beijing and its surrounding areas on 21 July 2012. The results suggested that sufficient moisture, convective instability, continuous “train effect” of the convection systems and a low-mass center precipitation echo structure with high precipitation efficiency were the main causes for the generation and development of the extreme heavy rainfalls. It also showed that the newborn and severely developing convective cells were located at the intersection part of low-level shear line and surface convergence line. The movement direction of convective cells and the presence of “train effect” can approximately be judged according to the direction and speed of the mid-level winds as well as the position and direction of surface convergence line. Mesoscale analysis on the severe precipitation was

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2012-073)、国家自然科学基金面上项目(41175048)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004和GYHY201006005)以及气象关键技术集成与应用项目(GMAGJ2012M59)共同资助

2012 年 9 月 8 日收稿; 2012 年 9 月 25 日收修定稿

第一作者: 方翀, 主要从事强对流天气预报研究. Email: fangchong@ema.gov.cn

made based on satellite infrared cloud images and radar reflectivity data, and the results showed that there were three stages in the process of the rainstorm: (1) The first stage is the generation period of the convective systems before their strongly developing; (2) The second stage is the most severely developing period in which extreme rainstorm can be observed by most meteorological stations in Beijing; (3) The third stage is significantly diminishing period of the severe convection and precipitation.

Key words: short-term heavy rainfall, “train effect”, low-mass center precipitation, vertical wind shear, base reflectivity, wind-profiler radar (WPR)

引 言

暴雨是北京地区夏季主要灾害性天气之一,由于其突发性和局地性都比较强,因此难以预报和追踪,且近年来随着经济社会发展和城市扩大,由暴雨形成的城市内涝常常造成越来越大的生命财产损失,是气象预报服务的重点和难点。许多气象工作者对此做了大量工作,雷雨顺等^[1]在 20 世纪 70 年代指出了特大暴雨的发生条件之一是从地面到 300 hPa 为准饱和深厚湿层。孙建华等^[2]、何敏等^[3]分别研究了北京地区主要暴雨类型和北京夏季降雨异常的大尺度环流特征,指出低涡暴雨和冷锋低槽类暴雨是北京地区主要暴雨类型;毛冬艳等^[4]利用中尺度数值模拟结果对北京暴雨的中尺度系统的结构特征及其发生发展原因进行了分析,结果表明 MCS 在对流层中低层表现为中尺度辐合线和低压;雷蕾等^[5]对北京地区夏季暴雨、冰雹、雷暴大风等强对流天气的物理量进行了统计分析,指出 500 和 850 hPa 温差、大气可降水量等物理量可以较好地地区分强对流天气类别;孙靖等^[6]对 2008 年 8 月 10 日北京强降雨进行研究,表明预报中需特别注意降水云系移动的近前方,尤其是边界层环境风转为偏东风的时候。这些研究充实了对北京地区暴雨天气的认识。

2012 年 7 月 21 日,北京及周边地区发生了一场大范围的特大暴雨,多站降水量超过了历史极值,此次过程导致北京 79 人死亡,经济损失超过百亿元。各级气象台站虽然均较好地预报出了此次暴雨天气过程,但对降雨量的极端性预报均存在较大不足。

初步分析表明,在此次过程中北京地区有锋面过境,以锋前暖区对流性降雨为主,业务数值预报模式对此次暴雨过程的雨带位置、强度以及时间预报均存在明显偏差。在 21 日 07 时发布的 12 小时(21 日 08—20 时)强对流天气预报中,较为准确地预报了北京全境将出现较大范围的 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短

时强降雨天气,较好地订正了数值预报模式的降雨预报结果,但对降雨达到如此强度仍然预计不足。本文主要希望通过此次极端强降雨过程的强对流天气特征和中尺度系统发生发展的分析,探讨此次极端强降雨过程中产生持续短时强降雨的中尺度对流系统特征,为进一步认识该类天气提供一定基础。

1 降雨概况

7 月 22 日 08 时(以下时间如无特殊说明均为北京时)北京 20 个国家气象观测站 24 小时雨量分布图(图 1a)表明北京市大部分地区出现了大暴雨天气,尤其西南部多站出现了特大暴雨。水文站和自动气象站降水量记录显示最大 24 小时降雨量出现在房山河北镇(水文站),达 460 mm,北京城区最大降雨量出现在石景山模式口,达 328 mm。图 1b 的最大小时雨量分布表明超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的最大小时雨量区域覆盖了北京大部分地区,且最大小时雨量达 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。因此,无论从过程降雨量还是小时降雨量来看,本次过程都非常接近登陆台风的降雨强度,为历史罕见的极端降雨过程。而 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降雨出现的频次分布图(图 1c)表明北京房山及北京与河北交界的部分地区短时强降雨持续时间达 4~5 个小时以上,局部超过 7 个小时,显示此次强降雨的持续时间之长。综上所述,本次降雨过程具有强度强、分布范围广、持续时间长及灾害重的特点。

2 极强暴雨的环流背景和中尺度对流条件分析

对流活动的三个基本条件是一定的水汽、大气不稳定性及抬升条件。从环流背景、抬升条件、水汽、热力不稳定和垂直风切变等方面分析本次极端强降雨天气的对流条件成因。

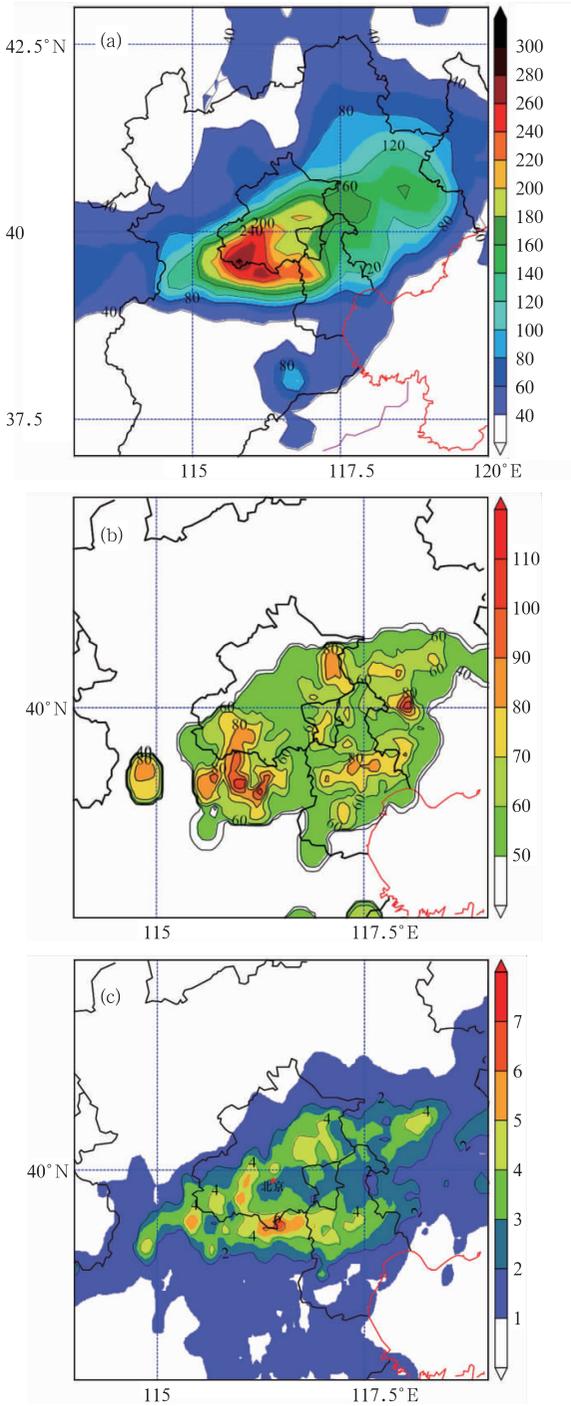


图 1 2012 年 7 月 21 日北京强降雨分布特征
(a) 国家基本、加密气象观测站雨量分布,
(b) 短时强降雨($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)分布,
(c) 短时强降雨($\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)频次分布

Fig. 1 Distribution characteristics of the severe torrential rains in Beijing from 08 BT 21 to 08 BT 22 July 2012
(a) Distribution of accumulated precipitation observed by national and intensive surface observation stations,
(b) Distribution of short-time severe rainfall ($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) (c) Frequency distribution of short-time severe rainfall ($\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

2.1 大尺度环流背景

对 21 日 14 时常规地面观测和 08 时 NCEP、T639 分析场(图略)分析表明:有利的大尺度环流形势为本次强降雨过程的中尺度对流系统发生发展提供了非常有利的背景条件^[10-11]。

200 hPa 高空急流在华北西部分为南北两支,华北地区正好位于 200 hPa 急流核的右后侧,为次级环流圈的上升支,且为强烈的风向和风速辐散区,为中尺度对流系统的发生发展提供了有利的上升条件和高层气流辐散条件。

500 hPa 华北地区处于从贝加尔湖伸至陕西的低槽槽前和副热带高压西北侧,槽前的正涡度平流也提供了强对流天气发生发展的有利大尺度上升条件。

850 hPa 孟加拉湾低压东侧的西南气流和南海低压环流东侧的东南气流向华北地区输送水汽,有利于华北地区水汽辐合和持续补充。

14 时地面锋面仍位于华北西部,北京位于锋前暖区之中,因此午后至傍晚时段的降雨为锋前暖区强对流性降雨,降雨局地性较强。20 时地面锋面移至北京境内,17—20 时降雨为锋面逼近时锋前暖区降雨,降雨范围显著增大,对流性依然较强,强度依然很大。

2.2 对流条件分析

2.2.1 抬升条件分析

基于 21 日 14 时 NCEP 分析场和地面观测资料给出了本次天气过程的中尺度对流环境条件分析(图 2)。图 2 显示 850 和 925 hPa 的切变线位于山西北部到河北与北京交界处,二者位置接近重合,非常有利于边界层的暖湿空气辐合抬升,尤其在北京西南侧与河北交界处,低层的切变线与地面辐合线重叠,在重叠处非常有利于对流单体生成和加强;此外,850 和 925 hPa 的急流均位于北京及附近地区的南侧,北京地区为风速辐合区;同时,北京地区 925 hPa 为东南风气流,有利于暖湿空气在房山至门头沟等地西部的太行山东侧山坡被强迫抬升,激发和加强了山前对流性降雨。

500 hPa 的急流呈西南—东北走向,而地面的辐合线亦呈西南—东北走向,对流云团易在地面辐合线附近生成并发展,沿着中层风即 500 hPa 急流的方向移动。在午后 14 时至傍晚时段,500 hPa 急

流显著增强,且由于对流单体右后侧传播的特性,对流单体基本向东北略偏东方向缓慢移动并发展,形成列车效应造成强降雨。至 20 时后,500 hPa 中层急流开始减弱,地面冷锋逼近并东移,对流单体向东移动的分量逐渐加大,此时对流云团已开始发展成范围较大的长轴为西南—东北向的 MCC,北京东部和天津等地继续出现强降雨。

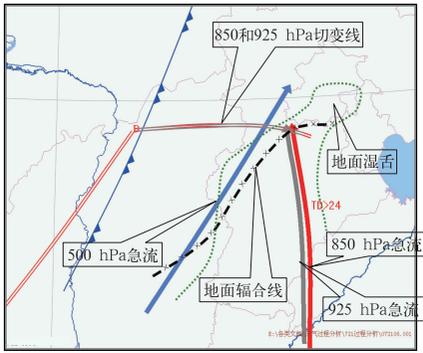


图 2 2012 年 7 月 21 日 14 时中低层中尺度分析
Fig. 2 Comprehensive mesoscale analysis in middle-low levels at 14:00 BT 21 July 2012

自动气象观测站(图略)观测表明,房山地区从 15:20—18:40,一直都存在辐合线或者小尺度气旋式环流,这为对流单体在此地加强发展提供了辐合抬升条件。后文的风廓线分析结论也表明,主要的强降雨区域均在辐合线或者小尺度气旋式环流的中西侧。

2.2.2 水汽特征

本次强降雨发生前和整个过程中,北京地区在 500 hPa 以下均有偏南风急流维持并不断加强;午后来自西南和东南方向暖湿气流输送的水汽在北京上空辐合,为暴雨的产生和维持提供水汽来源。

地面露点超过 24°C 的等露点线(图 2)和整层大气可降水量都显示湿舌向北伸展至北京南部,表明该区域水汽特别充沛。从假相当位温(图略)来看,08 时北京地区 850 hPa 假相当位温达 347 K,超过定义夏季风前沿的 850 hPa 假相当位温(340 K),这也表明北京地区位于非常暖湿的夏季风气团内。

对比本次过程、2011 年 6 月 23 日和 8 月 14 日三次强降雨过程表明(图略),本次过程的整层可降水量(PWAT)要明显大于另两次过程,其中 20 时的 PWAT 达到 70 mm 左右,而其余两次过程的 PWAT 均在 60 mm 以下。这也体现了这次强降雨过程水汽条件的极端性。

水汽通量散度反映一个地区水汽的集中程度,从 NCEP 再分析资料 925 hPa 的水汽通量散度演变可见,08 时(图 3a)水汽辐合中心位于甘肃南部到陕西北部,呈西南—东北向,北京西南部到河北中部亦为水汽辐合区;午后随着低空急流的东移加强,水汽辐合区向东移动并随偏南气流向北伸展,14 时(图略)辐合中心位于河北中部到山西北部,中心强度超过 $-3 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,北京西部约为 $-2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,20 时前后(图 3b)水汽辐合最强,辐合中心位于北京中东部,水汽通量散度约为 $-7 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,远超 2011 年 6 月 23 日和 8 月 14 日北京强降雨对应的 925 hPa 水汽通量散度 -2×10^{-7} 和 $-0.5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,因此强烈的水汽辐合是导致北京出现极端强降雨的原因之一。20 时北京 35 个加密自动站出现了 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降雨,最大雨强达到了 $99 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,强降雨中心与水汽辐合中心有非常一致的对应关系。

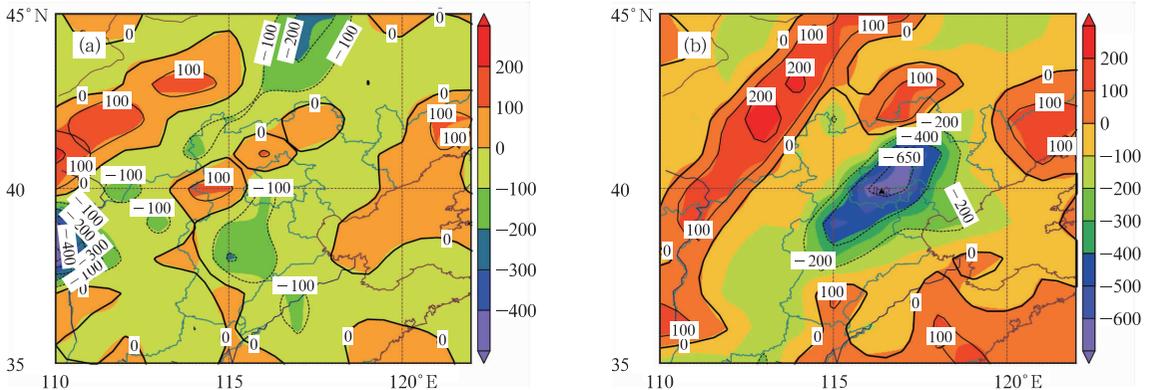


图 3 2012 年 7 月 21 日 925 hPa 水汽通量散度分布(单位: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)08:00, (b)20:00

Fig. 3 The 925 hPa moisture flux divergence (unit: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 08:00 and (b) 20:00 BT 21 July 2012

在沿 116.5°E 的 20 时水汽通量散度垂直剖面(图 4a)上可见:水汽辐合区位于山脉的迎风坡,从低纬到高纬沿着山脉坡度延伸到 500 hPa 高度附近,主要的水汽辐合中心位于 850 hPa、 41°N 附近,

中心值为 $-8.3 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从 41°N 的垂直剖面(图 4b)可以看到,由于 850 hPa 为东南风,与地形刚好垂直,水汽辐合中心区也就位于地形辐合抬升最大处。

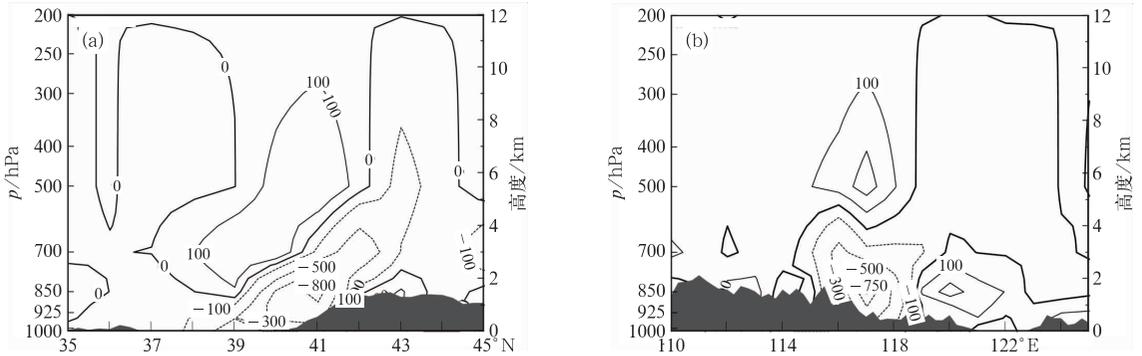


图 4 沿 116.5°E (a) 和 41°N (b) 的水汽通量散度垂直剖面(单位: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 The vertical profile of moisture flux divergence along 116.5°E (a) and 41°N (b)
(unit: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.2.3 不稳定条件和垂直风切变

21 日 08 时北京 $T\text{-log}p$ 图(图略)显示 CAPE 值并非很大,约为 $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,如果进行对流温度订正,CAPE 也仅为 $1560 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。700 hPa 附近湿度较小,各层风速及垂直风切变也比较小,此时出现强对流性降雨的可能性较低。

到 14 时(图 5), $T\text{-log}p$ 图显示大气对流条件有了非常大的变化:CAPE 值显著增大,达到 $2089 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,热力层结非常不稳定;700 hPa 附近的大气湿度显著增大,从低层到高层大气中水汽都较充沛;700 hPa 西南风速达到较为罕见的 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,3 km 以下的垂直风切变达到了大约 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大气低层切变显著增大。

强降雨和特大暴雨的大气状态。

虽然 14 时 700 hPa 以下的垂直风切变很大,但是中上层较 08 时风速变化并不大,500 hPa 以上的风速甚至减小,使得对流单体不会发展到非常的高度形成云砧并将水滴从高层扩散出去,而且由于对流单体主体位于 0°C 层以下,云中粒子以水滴为主而非冰晶,从而提高了降雨效率,即低质心高效率的降雨;700 hPa 以偏南风为主则使得上升气流形成的水滴在低层向北略偏东方向移动,与地面辐合线配合,在中尺度系统上表现为列车效应,并在北京附近地区辐合,从而对北京及附近地区的极强降雨也做出了贡献。

20 时,北京大部分地区虽然水汽条件依然很好,但是北京西部的大气层结已经转换为稳定层结,700 hPa 风速也显著减小,辐合区有所东移,强降雨区域东移。

2.2.4 地形影响

相关文献^[7-8]研究表明,由于北京特殊的地形,北京地区的绝大部分暴雨过程,尤其是西部山前地区的局地暴雨,都与东南风联系紧密。东南风的存在、发展与消亡过程,基本和局地暴雨的生命史相对应。降雨前低层东南风波动的加强对降雨有一定的指示意义;降雨过程中东南风的大小、厚度与雨量均存在一定的相关关系。

而本次暴雨过程中,北京地区 925 hPa 受较强的东南风影响,一方面由于地面辐合线的触发,另一

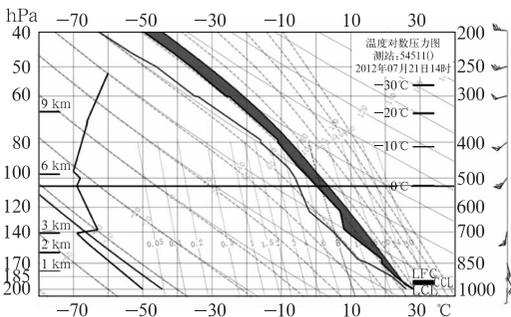


图 5 2012 年 7 月 21 日 14 时北京温度对数压力

Fig. 5 $T\text{-log}p$ diagram at Beijing 14:00 BT 21 July 2012

以上大气层结变化表明:水汽条件和不稳定层结条件都非常好,北京地区转变为非常有利于短时

方面也有地形强迫抬升的因素造成对流单体沿着山前生成发展移动,导致持续性对流性强降雨。

3 中尺度对流系统特征分析

3.1 静止卫星红外云图特征

FY2E 红外 1 通道云图显示此次强降雨过程中

华北地区为西南—东北向的对流云带,在对流云带上不断有对流云团生消、分裂、合并(图 6)。图 6 中标注的 A 和 B 分别为不同的中尺度对流云团。

12:30 云团 A 开始进入北京西南部地区,在东移过程中同时伴随着与周围云团的合并,给房山地区及北京城区带来第一次强降雨过程。14:30 (图 6c),云团 A 逐渐分裂为偏东北的云团 A1 和偏西南的云团 A2。在这个阶段,主要是 A1 云团在城

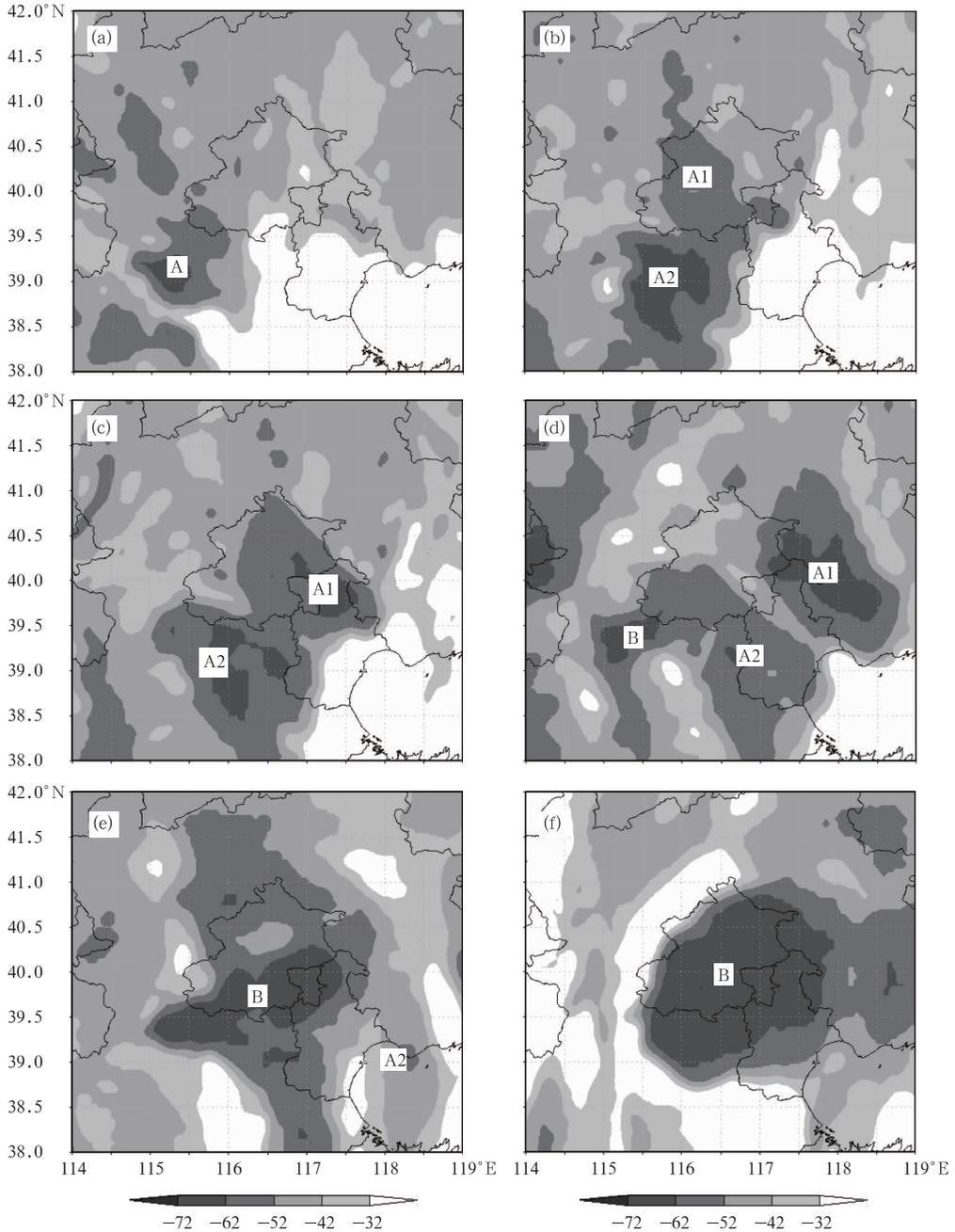


图 6 2012 年 7 月 21 日红外云图显示的对流云团演变(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a) 13:00, (b) 14:00, (c) 14:30, (d) 15:30, (e) 17:30, (f) 19:30

Fig. 6 Evolution characteristics of convective clouds based on infrared satellite images on 21 July 2012 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

(a) 13:00, (b) 14:00, (c) 14:30, (d) 15:30, (e) 17:30, (f) 19:30 (BT)

区东北部、昌平、顺义、怀柔东南部及平谷西部等地区造成了较强的降雨,至 16:00 随着 A1 云团的东移其对北京地区的影响趋于结束。

15:00,紧邻 A2 云团的西侧有云团 B 生成发展。从中尺度对流系统(MCS)识别追踪结果(图 7)来看,从 15:30(图 6d)至 17:00,云团 B 发展前期一直在房山的西南部地区原地少动,17:00—19:30(图 6e,6f),云团 B 在不断发展的同时,其质心逐渐向东北移动,而其长轴方向亦为西南—东北走向,其形成的列车效应导致北京城区,尤其是在云团 A、A2 和 B 均有影响的房山地区产生了极端强降雨天气。此后,云团 B 伴随着一系列分裂、合并过程显著发展,最终形成一个典型的 MCC,在天津、河北东部、山东北部等地也造成了较强的降雨。

图 6 还显示,无论是 A 云团还是 B 云团,都是从房山与河北交界处开始加强发展,即前文分析的低层切变线与地面辐合线重叠处附近。

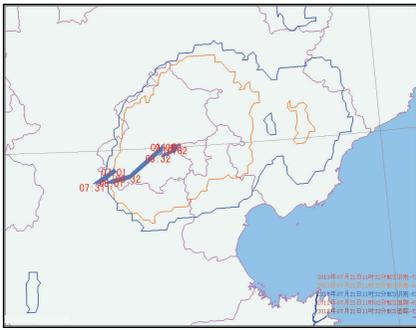


图 7 对流云团 B 的识别、追踪结果
(图中时间为世界时)

Fig. 7 Identification and track of convective cloud B (UTC)

图 8 展示了 21 日 15 时至 22 日 07 时,云团 B 在发展过程中 IR1 通道最低亮温,以及低于 -52°C 的冷云区面积随时间的变化特征。同时,利用自动站观测资料,给出了云团 B 对应的最大的 30 分钟降雨量。可以看出,自 21 日 15 时至 22 日凌晨,云团 B 经历了两次主要的发展阶段。第一阶段从自 21 日 15—22 时,最低亮温达到 -72°C 。这一阶段也是降雨强度较大的时段,多个时次出现了 30 分钟超过 50 mm 的降水强度,最强出现在 22 时,达到 30 分钟 74 mm 降水强度,雨强较大的时段对应着对流云团面积快速增长的阶段。21 日 23 时至 22 日 04 时,是云团 B 发展的第二阶段,最低亮温达到极值 -77°C ,低于 -52°C 的面积达到最大 252 000 km^2 ,冷云区面积峰值滞后最低亮温约 3 小时。在第二阶段,云团 B 的短长轴比超过 0.7,低于 -52°C 的冷云

区面积达到 50 000 km^2 的时间超过了 10 小时,发展成一个典型的 MCC。但在第二阶段,云团对流性有所减弱,所产生的降雨强度相对较弱,约为 30 分钟降雨 30~50 mm。此次影响北京地区的强降雨主要出现在 21 日 15—22 时,即对流云团 B 的第一个发展阶段。

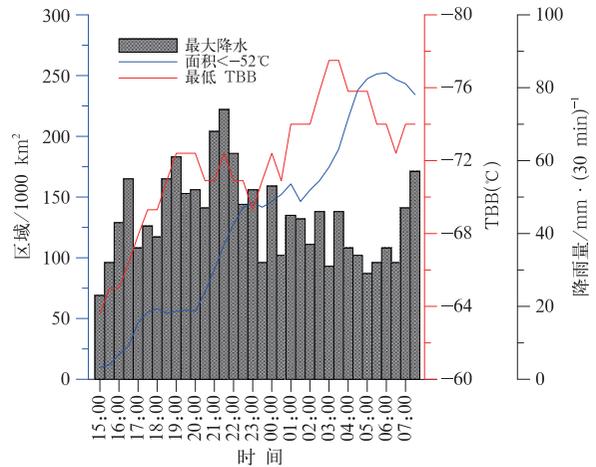


图 8 对流云团 B 的演变特征

Fig. 8 Evolution characteristics of convective cloud B

3.2 雷达资料特征

3.2.1 雷达反射率因子

对应于静止卫星红外云图上的不同强度的中尺度对流云团,北京 SA 雷达 1.5° 仰角雷达反射率因子分布特征也显著不同。

6:12 左右(图 9a)对流回波在河北中部偏西部地区开始发展,之后沿地面辐合线方向不断向东北移动,但强度变化不大,至 8:30 左右(图 9b)中心移至距离北京南部约 40 km 处加强发展至 45 dBz,11:30(图 9d)移至北京房山与河北交界处并继续向东北移动,强度继续略有加强,且该较强回波后续有一些中等强度回波进入房山亦明显加强。但此时静止卫星红外云图显示的对流云的云顶亮温还较高,北京区域的平均亮温还未低于 -52°C 。该时段的降雨为对流系统强烈发展的前期不稳定对流性降雨。

而前期较强降雨在房山附近出现的同时,对应于中尺度对流云团 A(图 6),12:42(图 9e)左右河北中部略偏西南再度有对流回波生成并向东北方向移动,前期略有发展,14:48(图 9g)与西侧的回波结合范围扩大。与卫星云图上的中尺度对流云团 B 相对应,强回波在 15:48 左右(图 9h)进入房山,在房山地区的地面辐合线的作用下,回波强度加强至 45 dBz,并且中心回波带呈西南—东北走向,之后由

于房山地区地面维持有中尺度辐合线或辐合中心,回波稳定少变,与此同时,河北中部出现了多单体风暴向北京方向快速移动,于 17:48(图 9k)左右并入原先的强风暴并开始影响房山地区,停滞一段时间后,随着锋面逼近,辐合线东移,主回波带的向东分量开始加大,系统逐步东移,19:18(图 9l)左右,对流回波呈现西南—东北向的较为宽广的带状分布,对流系统组织性较强,北京中东部地区雨量进一步增

大。而且与云图分析基本一致,从 8:30—17:00 左右,回波单体均在房山与河北交界处,即 14 时低层切变线和地面辐合线重叠处附近加强发展。

基于雷达资料的 TITAN 算法的对流风暴追踪结果(图略)与前文的卫星云图 MCS 识别追踪结果基本一致:对流风暴移动相对缓慢,每小时为 20~30 km,其移动方向与回波带的方向基本一致,同时不断有新对流风暴产生,造成持续性强降雨。

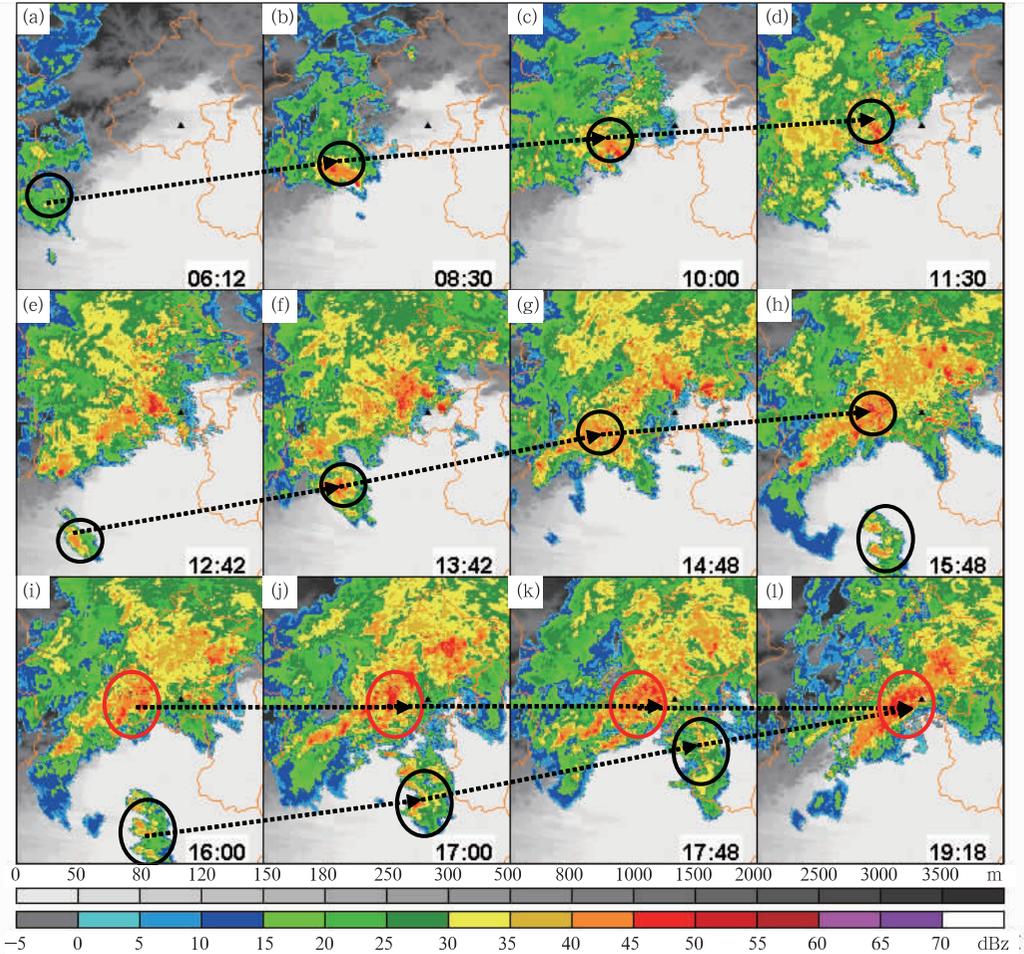


图 9 北京 SA 雷达 1.5°仰角基本反射率
(图中黑色小三角为雷达所在处)

(a) 06:12, (b) 08:30, (c) 10:00, (d) 11:30, (e) 12:42, (f) 13:42,
(g) 14:48, (h) 15:48, (i) 16:00, (j) 17:00, (k) 17:48, (l) 19:18

Fig. 9 Echo images at different times for base reflectivity of Beijing SA radar on 1.5°
(Small black triangle represents radar location)

(a) 06:12, (b) 08:30, (c) 10:00, (d) 11:30, (e) 12:42, (f) 13:42,
(g) 14:48, (h) 15:48, (i) 16:00, (j) 17:00, (k) 17:48, (l) 19:18 (BT)

而从房山县坨里镇 9:00—20:00 逐 6 分钟雨量与 0.5°仰角基本反射率因子序列的对应(图略)也可以看到,该站的降雨主要出现在两个时段,即 12:00—14:00 和 17:00—19:30,雷达反射率因子与雨量序列对应较好,且回波反射率的峰值一般超前

于雨量峰值大约 3~4 个体扫,说明基本反射率因子变化相对于降雨强度变化有一定的提前性。

基于塘沽雷达基数据的 19:24 房山附近雷达垂直剖面图(图 10)显示强降雨区域的超过 25 dBz 的强雷达反射率因子高度极低,仅为 3 km 左右,而且

最大反射率因子也并不是很强,大约在 45 dBz 左右,但造成了如此强的短时强降雨,这显示对流系统的降雨效率非常高,与大陆型的高反射率高回波顶的强对流系统完全不同,而类似于热带海洋对流系统的雷达反射率因子分布特征。其形成可能与这次降雨的水汽来源一部分来自热带环流有关,另一方面与风向风速的垂直分布也有一定关系。

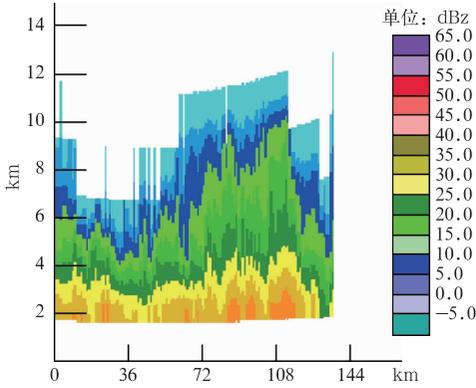


图 10 2012 年 7 月 21 日 19:24 房山附近雷达剖面

Fig. 10 The radial vertical profile of

Fangshan Observatory at 19:24 BT 21 July 2012

3.2.2 基本速度场

北京 SA 雷达 1.5°仰角雷达基本速度场表明在出现强降雨的两个时段,风场上都有风向辐合,且与强反射率因子一致,辐合位置不断向东北方向移动。16:06 左右速度场上房山地区出现了明显的风向辐合,该风向辐合区也随着强对流回波向东北方向移动,并于 16:30(图 11a)在房山潭拓寺镇南部、河北

镇东部出现非常明显的辐合点,风速辐合达到约 $41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气流的强烈辐合使对流单体在房山地区强烈发展并出现较强降雨,与此相对应,正是在房山河北镇,出现了此次强降雨过程的极值点。而在 17:48 的雷达反演风场(图 11b)上也显示房山及以东地区有明显的风向风速辐合(图中虚线为辐合线),且偏南或东南急流非常显著,造成极强的降雨。

3.3 垂直风廓线分析

垂直风廓线资料能够提供高时间分辨率的风场演变,图 12a 为 12:36—14:36 海淀风廓线产品与实际分钟雨量的对比。

13:00 前后 700 hPa 附近低空急流加强,13:36—14:06,850 hPa 急流风速加大,且由东南风转为南风,南风分量明显加大,有利于水汽的输送和辐合。到 14:00 前后,近地层由东南风转为东北风,一方面与上层配合使垂直风切变增大,有利于对流单体的维持,另一方面说明低层有低压环流或倒槽移入,同时偏北风楔入到前期极其暖湿的环境中,有利于气流的辐合抬升,从而触发了对流系统发生。

而到 18:54 以后(图 12b),海淀从地面到高空均转变为西南风,风速显著减小,高空南风分量也明显减小,海淀降雨接近结束。

从风廓线产品与分钟雨量的对应来看,对于此类锋前暖区降雨,在前期高空偏南气流加强的基础上,底层气流由偏南转为弱的偏北分量时,降雨开始并加强,而到了后期高空南风分量减小,地面弱的偏北分量消失,降雨开始减弱,所以利用风廓线产品能在一定程度上判断降雨开始、加强及减弱的时间。

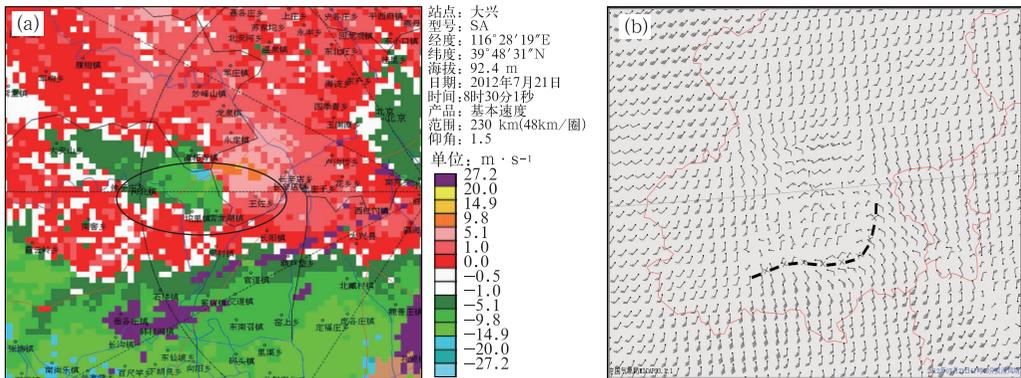


图 11 2012 年 7 月 21 日 16:30 北京 SA 雷达 1.5°仰角基本速度场 (a)和 17:48 雷达 1.5°仰角风场反演(b) (b中虚线为辐合线)

Fig. 11 (a)The radial velocity of Beijing SA radar on 1.5° at 16:30 BT 21 July; (b)Wind field inverted by radar on 1.5°at 17:48 BT 21 July 2012 (Dashed line is convergence line)

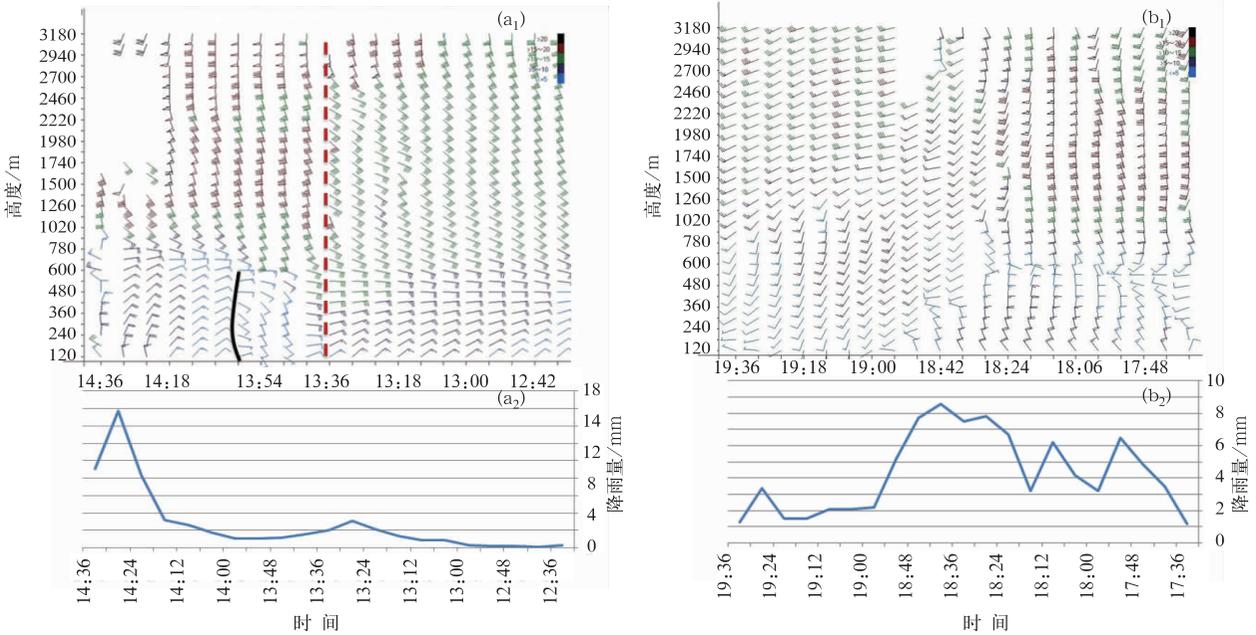


图 12 2012 年 7 月 21 日 (a) 12:36—14:36 和 (b) 17:36—19:36 海淀风廓线 (a_1, b_1) 与雨量 (a_2, b_2) 对比图 (间隔 6 min)
 Fig. 12 Comparison of vertical wind profile (a_1, b_1) and the time evolution of rainfall (a_2, b_2) in Haidian during
 (a) 12:36—14:36 BT and (b) 17:36—19:36 BT 21 July (6 min time span)

4 总 结

本文对 2012 年 7 月 21 日北京极端强降雨过程的强对流天气条件和中尺度特征进行了初步分析, 主要获得如下一些结论。

(1) 本次极端强降雨成因最需要关注的要点是: 大气中非常充沛的水汽, 对流系统持续的“列车效应”, 以及低质心高效率降雨对流系统。

(2) 大气低层的切变线和地面的辐合线相交的地区, 是对流单体初生和强烈发展的区域, 然后根据中层风的风向和风速, 结合对流单体的右后侧传播特征, 可以大致判断对流单体的移动方向, 并根据地面辐合线的位置和走向, 判断是否有列车效应。风的垂直分布特征可以在一定程度上判断是否是低质心高效率的降雨。

(3) 静止卫星红外云图展示的中尺度对流云团和雷达反射率因子场演变都表明该次降雨过程在北京地区存在三个阶段: 第一阶段为 21 日 09:30—15:00, 对流系统强烈发展的前期阶段, 北京地区强降雨主要出现在房山; 第二阶段为 15:30—22:00, 对流系统组织完整, 发展最为强烈, 北京大部分地区出现强降雨; 第三阶段为 21 日 23:00 至 22 日 04:00, 北京地区降雨显著减弱。

(4) 雷达径向速度场上的最强辐合位置可以大

致判断最强降雨位置; 使用风廓线雷达监测中低层风向风速的转变, 可以判断水汽输送的变化, 同时底层风向的转变在一定情况下可以用于判断强降雨的开始时间。

参 考 文 献

- [1] 雷雨顺, 吴宝骏, 吴正华. 用不稳定能量理论分析和预报夏季强风暴的一种方法[J]. 大气科学, 1978, 2(4): 297-306.
- [2] 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 20 世纪 90 年代华北暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 492-506.
- [3] 何敏, 林建, 韩荣青, 等. 影响北京夏季降雨异常的大尺度环流特征[J]. 气象, 2007, 33(6): 89-951.
- [4] 毛冬艳, 乔林, 陈涛, 等. 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨数值模拟分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 25-321.
- [5] 雷蕾, 孙继松, 魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 2011, 37(2): 136-141.
- [6] 孙靖, 王建捷. 北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨[J]. 气象, 2010, 36(12): 19-27.
- [7] 吴庆梅, 杨波, 王国荣, 等. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用[J]. 气象, 2012, 38(2): 174-181.
- [8] 吴庆梅, 郭虎, 杨波, 等. 地形和城市热力环流对北京地区一次 β 中尺度暴雨的影响[J]. 气象, 2009, 35(12): 58-64.
- [9] 毛冬艳, 周雨华, 张芳华, 等. 2005 年初夏湖南致洪大暴雨中尺度分析[J]. 气象, 2006, 32(3): 63-70.
- [10] 湛芸, 孙军, 徐珺, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考[J]. 气象, 2012, 38(10): 1255-1266.
- [11] 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二) 极端性分析及思考[J]. 气象, 2012, 38(10): 1267-1277.