

曹艳察,郑永光,盛杰,等,2020.2018年7月15—17日北京极端强降水过程三类对流风暴及其强降水特征分析[J].气象,46(7):885-897. Cao Y C,Zheng Y G,Sheng J,et al,2020.Characteristics of three types of convective storms during the Beijing extreme precipitation event in 15—17 July 2018[J].Meteor Mon,46(7):885-897(in Chinese).

## 2018年7月15—17日北京极端强降水过程 三类对流风暴及其强降水特征分析\*

曹艳察 郑永光 盛杰 林隐静 朱文剑 张小雯

国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 2018年7月15—17日,北京遭遇当年入汛以来最强降水过程。该过程具有持续时间长、累计雨量大、局地雨强强等特点。针对小时降水量阶段性减弱的特征,对该过程不同阶段三类对流风暴及其强降水特点进行了对比分析。结果表明:16日凌晨副热带高压边缘暖区强降水主要由低质心型对流风暴造成,该时段暖湿层结深厚,垂直风切变较弱;对流系统具有类似热带强降水型风暴特征,加之“列车效应”影响,导致北京密云出现极端强降水;高质心型对流风暴出现在16日至17日凌晨,受高空槽和副热带高压共同影响,中层有干空气侵入,整层垂直风切变较强;对流系统存在悬垂结构特征,但局地性强、移速快,其造成的最大降水量要弱于低质心型对流风暴;混合型对流风暴对应17日高空槽过境的强降水,该时段能量和水汽条件较前期明显减弱;对流风暴的强度和降水量级在三类风暴中最弱。不同类型对流风暴对应的环境条件、结构特征及其移动传播特点决定了该过程不同阶段的降水强度和量级。

**关键词:** 极端降水,低质心型对流风暴,高质心型对流风暴,混合型对流风暴,分钟级雨量,列车效应

**中图分类号:** P457,P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.002

### Characteristics of Three Types of Convective Storms During the Beijing Extreme Precipitation Event in 15—17 July 2018

CAO Yancha ZHENG Yongguang SHENG Jie LIN Yinjing ZHU Wenjian ZHANG Xiaowen

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** An extremely severe precipitation event took place in Beijing during 15—17 July 2018. This event was characterized by long duration, large accumulated precipitation amount and locally strong intensity. According to the features of hourly precipitation decrease stage by stage, the three types of convective storms and their precipitation characteristics are analyzed and compared. The results show that the extreme precipitation at the edge of the subtropical high in the morning of 16 July was mainly caused by the low-echo-centroid convective storms, during which the warm and wet layer was deep and the vertical wind shear was weak. The characteristics of convective storms, which were similar to the severe tropical precipitation storms, along with the impact of “train effect” were the direct causes for the extreme severe precipitation in Minyun District of Beijing. The high-echo-centroid convective storms mainly took place during the daytime of 16 to the early morning of 17 July, when the westerly trough and the subtropical high affected this area together. During this period, the dry air intruded into the middle layer and the vertical wind shear

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507504、2017YFC1502003)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-140)、广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)、国家自然科学基金青年基金项目(41605080)及中国电力建设股份有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02)共同资助

2019年2月20日收稿; 2020年1月31日收修定稿

第一作者:曹艳察,主要从事强对流天气预报和研究. E-mail:caoych@cma.gov.cn

of the whole layer was stronger. The convective storms had some characteristics such as high-echo-centroid, draping structure, strong local features and rapid movement, and the maximum precipitation intensity caused by the high-echo-centroid convective storms was weaker than it caused by low-echo-centroid convective storms. Hybrid convective storms corresponded to heavy precipitation during the transit of westerly trough on the 17th July. Compared with the early stage, the energy and water vapor conditions during this period decreased significantly. The echoes and precipitation intensity of hybrid convective storms were the weakest of the three types. The intensity and magnitudes of precipitation in different stages of this process were determined by the corresponding environmental conditions, structural characteristics and moving propagation characteristics of different types of convective storms.

**Key words:** extreme precipitation, low-echo-centroid convective storm, high-echo-centroid convective storm, hybrid convective storm, minutely precipitation, train effect

## 引 言

2018年7月15—17日,北京地区遭遇当年入汛以来最强降雨过程,全过程共持续将近60h,最大小时雨量为117mm、最大累计雨量为386mm;无论是持续时间还是不同时段累计雨量值,在北京地区近8年以来的所有暴雨个例中均位居前三位,为历史罕见的极端强降水事件。本次过程包含多个强降水时段,不同时段的降水特点和中尺度对流系统特征差异明显,有必要进行分析和探讨,从而为提高类似天气过程的预报能力提供参考依据。

近年来,以降水强度高、持续时间长为主要特征的极端降水事件在北京地区已发生多次,如2012年7月21日、2016年7月20日的极端降水天气过程,均造成了严重的生命财产损失和巨大的社会影响,引起了广泛关注(俞小鼎,2012;谌芸等,2012;孙军等,2012;孙继松等,2015;符娇兰等,2017;雷蕾等,2017)。众多研究结果表明,北京极端降水事件多是在有利的大尺度环流背景下,由发展旺盛的中尺度对流系统引发的(方翀等,2012;符娇兰等,2017;郑永光等,2017),而在不同环境条件下触发的不同类型中尺度对流系统及其降水特点存在明显差异(孙继松等,2015;杨波等,2016)。

根据产生强降水的对流系统特征和属性差异,Lemon(1977)将强降水对流系统划分为高质心的大陆强对流型和低质心的热带强降水型,但研究(俞小鼎,2012;孙继松等,2015;郑永光等,2017)也发现,一些发生在中国盛夏季节的中高纬度强降水系统也具有类似热带暖云降水的属性。Doswell III et al

(1996)则指出可根据强降水雨带中对流单体的移动方向与雨带本身走向之间的夹角大小来判断某一地点的降水持续时间与累计降水量,当单体移动速度矢量与雨带分布几乎平行时,强降水雨带的对流单体会依次经过同一地点,形成“列车效应”,易导致极端强降水事件的发生。孙继松等(2015)将造成华北地区暴雨的中尺度对流系统分为由长生命周期的单体或多单体组织合并的中尺度对流系统(第I类中尺度对流系统)和由多单体途径某地形成“列车效应”的中尺度对流系统(第II类中尺度对流系统)两类,进而总结出二者在移动传播、垂直结构及其造成的强降水时空分布方面的差异和特点。

由于中小尺度对流系统时空尺度小、生消演变快(俞小鼎,2012;郑永光等,2017),在研究其降水特点时需利用高频次、高分辨率的观测资料,近年来,分钟级雨量资料开始应用于强降水个例的分析研究中(盛杰等,2012;田付友等,2018;徐珺等,2018),在更小的时间尺度上揭示了不同类型中尺度对流系统影响下的降水特点。

此次北京地区的强降水过程发生在副热带高压(以下简称副高)西北侧,同时受到东移高空槽的影响,过程中有不同类型的对流风暴产生了不同强度的强降水。本文对比分析各类对流风暴与环境条件及其降水特点之间的关系,以期为提高对该类天气的业务预报能力提供一定参考和依据。

## 1 资料和方法

本文使用的主要资料包括:北京地区自动气象站逐小时和逐分钟降水、北京新一代天气雷达、FY-4 静

止卫星 TBB(temperature of black body)、闪电、常规气象和 GPS 水汽等观测资料以及  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  美国国家环境预报中心(NCEP)最终分析资料。

本文的分析方法是首先对本次过程的对流风暴进行分类,然后对比不同类型对流风暴环境条件的异同,最后重点分析各类对流风暴的结构特征和降水特点以及二者之间的机理联系。

## 2 降水和环流背景特征

### 2.1 降水特点

7月15日20时至17日20时(北京时,下同)的自动站累计降水量分布(图1a)表明,北京山前一带均遭受了100 mm以上的强降水天气,最强降水中心位于密云地区,最大累计雨量高达386 mm(密云张家坟水文站),此次过程具有持续时间长、雨强强、累计雨量大、空间分布不太均匀等特点。

最大小时雨量分布(图1b)显示,本次强降水过程中,北京地区短时强降水量级大都为  $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而超过  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端小时强降水相对局地分散,主要分布于北京东北部和西南部的山前区域(图1b),  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上小时降水出现的时间段集中在16日01—05时,该时段北京北部个别

站点  $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的短时强降水持续时间达3 h以上,其中16日02—03时在密云西白莲峪站出现了  $117 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端强降水,而在16日上午至17日夜间,虽然强降水一直有所持续,但小时降水量基本小于  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,这表明不同阶段强降水雨强特点存在较大差异,应当是由相应的环流背景、对流环境条件及其引发的对流风暴结构特征不同所决定的。

### 2.2 环流背景

7月15日20时至17日20时北京强降水过程主要是在副高和东移高空槽共同影响下产生的(图2),大尺度系统位置相对稳定是造成持续性降水的重要天气尺度原因。

与整个过程小时雨量阶段性减弱特征相对应,其大尺度环流背景也表现出明显的阶段性特征(图2)。强降水过程的第一阶段,即对应极端强降水的16日凌晨时段,高空槽主体位于西北地区东部至内蒙古西部一带,副高加强北抬,北京地区处于副高外围西南急流控制的高温高湿区,中低层为一致的西南气流,存在深厚的暖湿输送带,属于副高边缘的暖区强降水。

第二阶段是16日白天至17日凌晨时段,副高略有东退,高空槽随之东移,北京地区处于二者之间,

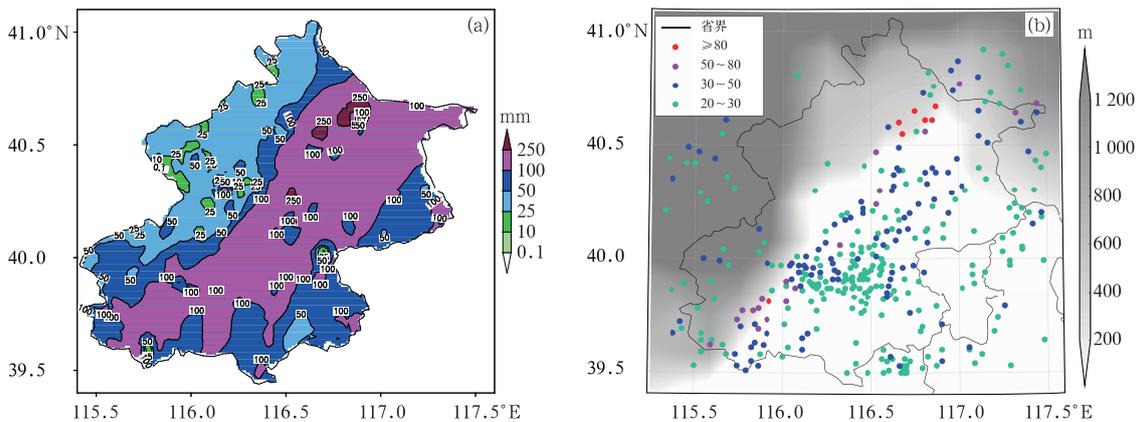


图1 2018年7月15日20时至17日20时北京强降水分布特征

(a)国家基本站、加密气象观测站累计降水量,

(b)最大小时雨量站点分布(彩色圆点,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;阴影:地形高度)

Fig. 1 Distribution characteristics of the severe rainfall in Beijing from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 17 July 2018

(a) accumulated precipitation observed by national and dense surface observation stations,

(b) distribution of maximum hourly rainfall station (colored dot, unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ; shaded area: topography)

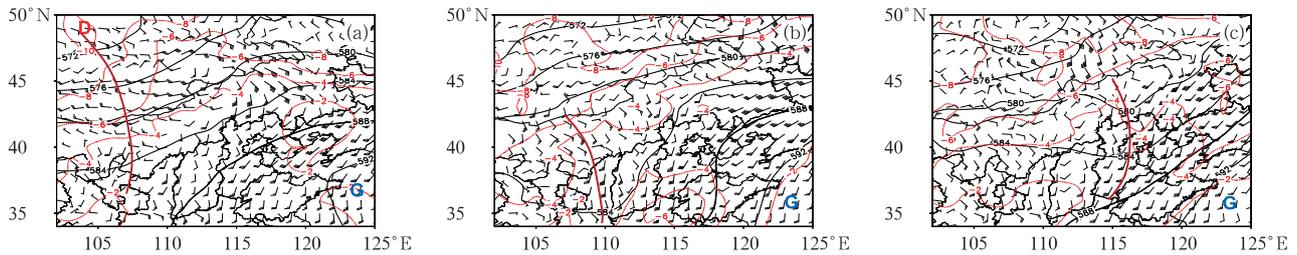


图 2 2018 年 7 月 (a)15 日 20 时、(b)16 日 20 时、(c)17 日 20 时 NCEP 最终分析资料天气形势图  
(黑线:500 hPa 高度场,单位:dagpm;红线:500 hPa 温度场,单位:℃;风向杆:850 hPa 风场;棕色短线:500 hPa 槽线)

Fig. 2 Synoptic charts at (a) 20:00 BT 15, (b) 20:00 BT 16 and

(c) 20:00 BT 17 July 2018 based on NCEP FNL data

(black lines: 500 hPa geopotential height, unit: dagpm; red lines: 500 hPa temperature, unit: ℃;

barbs: 850 hPa wind; brown lines: 500 hPa trough)

低空急流较前期有所加强,850 hPa 西南风速达  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且该阶段高空槽略有前倾,探空显示 400 hPa 以上风随高度逆时针旋转,高层伴随有冷平流(图 4b),属于高空槽前配合副高外围西南急流共同影响下的强降水。

第三阶段是 17 日上午至夜间时段,高空槽进一步东移,北京地区位于高空槽槽线附近,属于高空槽过境影响下的强降水。

已有研究表明,强降水往往是多尺度天气系统相互作用的结果(杨波等,2016;孙建华等,2013;易笑园等,2018),因此,不同环流背景下的对流环境条件及其引发的对流风暴特征之间的差异应当是造成本次过程不同阶段小时雨量差异的直接原因,下文将对该过程中的对流风暴进行分类,分析各类对流风暴环境条件、结构特征及其降水特点之间的关系,解释极端强降水的产生原因和不同阶段小时雨量的差异。

### 3 对流风暴分类

基于已有研究中尺度对流系统的分类标准(Lemon,1977;Doswell III et al,1996;孙继松等,2015)和降水雷达回波分类方法(Xu et al,2008;Zhang et al,2011;俞小鼎等,2006),通过对本次过程各个强降水时段对应的逐 6 min 雷达回波特征进行分析,本文根据对流风暴成熟阶段的最大回波强度和垂直结构特征,将其分为低质心型、高质心型和混合型三类对流风暴。低质心型对流风暴对应的强度中心最大反射率因子约为 50 dBz,其 50 dBz 强回

波顶高在  $0^\circ\text{C}$  层以下,表现为质心较低的低质心型回波特征;高质心型对流风暴对应的强度中心最大反射率因子通常在 55~65 dBz,其 50 dBz 回波顶高至少高于  $0^\circ\text{C}$  层高度 2 km 以上,表现为高质心的强对流型回波特征;混合型对流风暴对应的强度中心最大反射率因子一般在 50 dBz 以上,其 50 dBz 强回波顶高略高于  $0^\circ\text{C}$  层高度,未达到  $0^\circ\text{C}$  层高度以上 2 km,表现为由暖云降水主导、冷云降水参与的回波特征。同时,根据不同时段对流风暴的移动传播和组织形态特点,本次过程中既包含具有“列车效应”的对流风暴,也包含快速移动型对流风暴。

按照以上分类标准,对本次过程各个强降水时段的对流风暴进行了普查,结果显示(表 1),本次强降水过程的对流风暴以低质心型和混合型为主,并有高质心型。本次过程总共包含 8 个强降水时段,其中,有 3 个时段的强降水主要由低质心型对流风暴造成,有 2 个时段的强降水主要由混合型对流风暴造成,而其余 3 个时段的强降水则主要由混合型和高质心型对流风暴造成。

表 1 显示,在本次过程所包含的三类对流风暴中,由具有“列车效应”的低质心型对流风暴造成的强降水小时雨强和累计雨量值都是最大的,其中包含密云西白莲峪站  $117 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端强降水。同时,本次过程不同阶段强降水对应不同类型的对流风暴,16 日凌晨主要受低质心型对流风暴影响,16 日白天至 17 日凌晨主要受混合型和高质心型对流风暴的影响,而 17 日上午和夜间则主要受混合型对流风暴影响。本文将深入探讨和细致分析三类对

表 1 2018 年 7 月 16—18 日强降水过程对流风暴类型及降水特点

**Table 1 Convective storm types and precipitation characteristics of this extreme rainfall process during 16—18 July 2018**

强降水时段	对流风暴类型	移动传播特点	代表站,最大雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	代表站 3 h 最大累计雨量/mm
16 日 00—05 时	低质心型为主 包含混合型	列车效应	密云西白莲峪,117	248
16 日 00—03 时		列车效应	房山河北镇,89	132
16 日 03—05 时		快速移动	昌平桃峪口,44	49
16 日 06—11 时	混合型和高质心型 为主包含低质心型	列车效应	顺义北石槽,72	110
16 日 17—20 时		快速移动	昌平沙河水库,46	54
17 日 06—09 时	混合型为主 包含低质心型	快速移动	顺义奥林匹克水上公园,44	52
17 日 09—11 时		快速移动	房山交道,36	44
17 日 23 时至 18 日 01 时		快速移动	顺义张镇,34	38

流风暴环境条件、结构特征和降水特点之间的差异。

## 4 三类对流风暴环境条件、结构特征及降水特点

### 4.1 环境条件对比

#### 4.1.1 水汽和层结条件对比

7 月 15—17 日北京地区地面自动站(图略)和房山 GPS 站点整层水汽观测(图 3a)显示,强降水过程北京地区均处于暖湿环境中,各个强降水阶段整层水汽含量保持在 55 mm 以上,且每个阶段前期都伴有水汽的跃升。其中主要发生低质心型对流风暴的 16 日凌晨时段对应的水汽最为充沛,几乎整个北京地区均处于地面露点温度高于 24℃ 的湿区,最大露点温度值达 27℃,这表明大气具有了非常好的水汽条件(方翀等,2012;郑永光等,2017),整层水汽含量最大可达 70 mm 以上;高质心型对流风暴影响的 16 日上午至 17 日凌晨时段地面湿区范围呈现逐渐减小的趋势,露点温度高于 24℃ 的地面湿舌主要位于北京中南部和东北部地区,对应该时段整层水汽含量约为 65 mm 左右;而主要由混合型对流风暴影响的 17 日白天至夜间时段地面露点温度高于 24℃ 的湿区范围较前期明显减小,主要位于北京南部和东北部地区,对应的整层水汽含量最小,约在 55~60 mm。

#### (1)低质心型对流风暴

从强降水过程发生期间北京地区(40°N、116°E) NCEP 分析资料假相当位温和水汽通量散度垂直剖面(图 3b)可以得出,在主要受低质心型对流风暴影响的 7 月 16 日凌晨时段,北京地区处于深厚的暖湿层结环境中,近地面层的假相当位温达 360 K,350 K 以上的暖湿层扩展至 700 hPa 高度,而水汽辐合主要集中在低层 900 hPa 以下,辐合中心强度超过

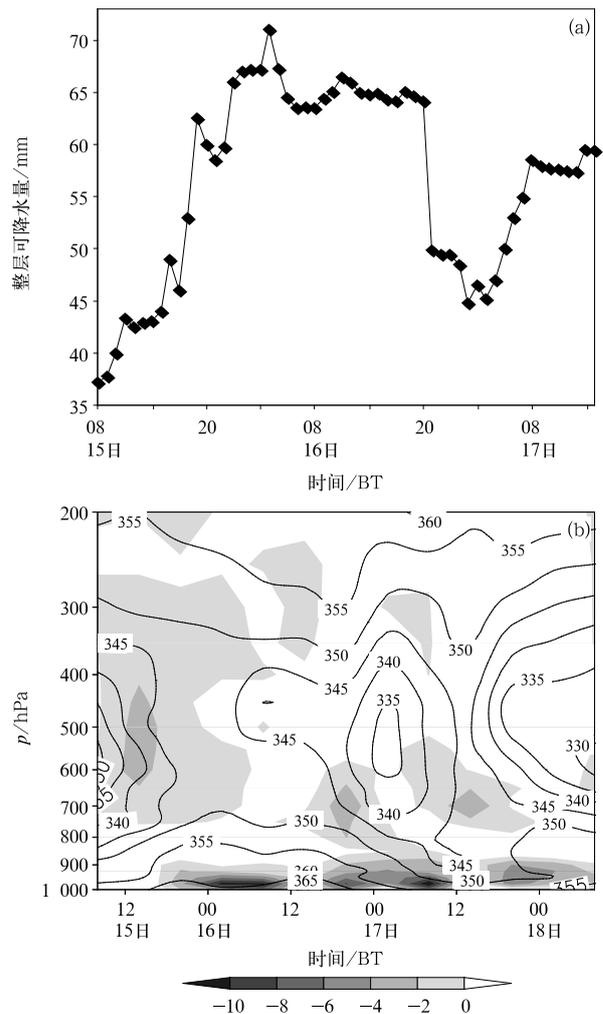


图 3 2018 年 7 月 15 日 08 时至 18 日 08 时  
(a)北京房山 GPS 整层水汽观测值,  
(b)北京地区 NCEP 最终分析资料假相当  
位温(黑色实线,单位:K)和水汽通量散度(阴影,  
单位:10<sup>-7</sup> g·cm<sup>-2</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)垂直剖面  
Fig. 3 (a) Fangshan GPS for water vapor observation  
in Beijing, (b) vertical section of pseudo-equivalent  
potential temperature (black solid line, unit: K) and  
vapor flux divergence (shaded area, unit: 10<sup>-7</sup>  
g·cm<sup>-2</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>) in Beijing  
area of NCEP final analysis data from  
08:00 BT 15 to 08:00 BT 18 July 2018

$-10 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 明显强于 2011 年 6 月 23 日和 2012 年 7 月 21 日北京强降雨对应的 925 hPa 水汽通量散度(分别为  $-2 \times 10^{-7}$ 、 $-7 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )(方翀等, 2012), 低层强烈的水汽辐合是该时段产生极端降水的原因之一。

### (2) 高质心型对流风暴

高质心型对流风暴发生发展的 16 日上午至 17 日凌晨, 中层 500 hPa 附近受干冷空气影响, 并不断向低层扩展, 低层暖湿层结由深厚向浅薄转变, 然而水汽辐合区向更高的层次发展, 600 hPa 以下均存在明显的水汽辐合, 低层水汽辐合强度较 16 日凌晨略有减弱, 但中心强度仍可达到  $-8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 深厚的水汽辐合为高质心深对流系统的垂直发展提供了良好的水汽供应。

### (3) 混合型对流风暴

混合型对流风暴主要发生发展在 17 日上午至夜间, 低层的暖湿环境条件要明显弱于前期, 仅近地面层的假相当位温在 350 K 左右, 低层水汽辐合强度也明显减弱, 中心强度为  $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 从水汽供应条件来看, 决定了该时段的对流系统产生的降水要较前期偏弱。

#### 4.1.2 不稳定条件和垂直风切变对比

##### (1) 低质心型对流风暴

低质心型对流风暴发生前期, 15 日 20 时北京地区 CAPE 仅为  $247.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 且低层存在一定的对流抑制, 低层和中高层均有显著的干区存在(图 4a), 这些环境条件特征并非有利于高强度降水天气的发生(Davis, 2011; Tian et al, 2015), 但实况监测显示, 15 日夜间至 16 日凌晨, 随着整层西南暖湿气流的加强, 北京及周边区域的对流条件开始不断改善, 利用 16 日 02 时的地面观测对探空进行修正, CAPE 值显著增大, 达  $1597.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略), 热力层结非常不稳定。整层风场表现为较一致的西南风, 垂直风切条件较弱。

##### (2) 高质心型对流风暴

高质心型对流风暴发生时段对应的 16 日 14 时的实况探空(图 4b)显示, 北京地区 600 hPa 以下相对湿度较大, 为接近饱和的状态, 而 600 hPa 以上则对应明显的干层, 这种上干冷下暖湿的垂直结构特征, 导致其 CAPE 值达  $1948.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 且从垂直风切变

来看, 16 日 08 时北京实况探空(图略)显示近地层逐渐向东偏北风转变, 850 hPa 为明显的西南风, 且风速较前期明显增大, 达  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 850 hPa 以下低空垂直风切变达  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而高空 300 hPa 以上冷平流作用下, 风向随高度存在明显逆转现象, 因此, 从风向和风速垂直变化来看, 该时段垂直风切变条件要强于 16 日凌晨, 16 日 08 时北京实况探空观测 0~6 km 垂直风切变可达  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 较强的垂直风切条件和较好的能量条件有利于深厚对流系统的发展。

##### (3) 混合型对流风暴

混合型对流风暴发生时段所对应的 17 日 14 时实况探空(图 4c)显示, 北京地区处于整层较湿的环境中, 且地面温度较 16 日午后有所降低, 因此其 CAPE 值明显减小, 约为  $335.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。然而探空风垂直廓线显示, 850~700 hPa 的低空急流较前期明显加强, 700 hPa 风速达  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 因此, 3 km 以下的垂直风切变达到  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 较强的垂直风切变集中在大气低层。这种弱能量和风切变条件下限制了对流风暴的发展高度。

## 4.2 三类对流风暴结构特征和降水特点

通过北京 SA 新一代天气雷达、FY-4 TBB 和闪电资料、地闪定位资料和分钟级降水观测资料对比研究三类对流风暴的组织结构、活动特征和降水特点, 以分析各类对流风暴的特征及三者之间的差异。由于本次强降水过程均处于暖湿的环境中, 因此, 从地闪监测和自动站观测数据显示, 整个过程对应的地闪活动和冷池均不明显, 三类对流风暴之间的差异主要表现在其组织结构和所造成的降水特点上。

##### (1) 低质心型对流风暴

本次过程中, 低质心型对流风暴根据对流单体的移动传播及组织形态可分为“列车效应”型和快速移动型对流风暴两种(图 5)。具有“列车效应”的对流风暴, 其回波形态为东北—西南带状分布(图 5a, 5b)。对流系统西南侧不断有新生单体发展并汇入, 而中高层引导气流为西南风, 因此, 风暴系统表现为明显的后向传播特征, 对流单体移动方向和传播方向几乎相反导致系统稳定少动, 持续影响同一区域, 特别是下游回波地区不断受对流系统更替影响, 造成“列车效应”, 对应地面降水特点是局地性强, 累计雨量大, 甚至达到极端降水级别。

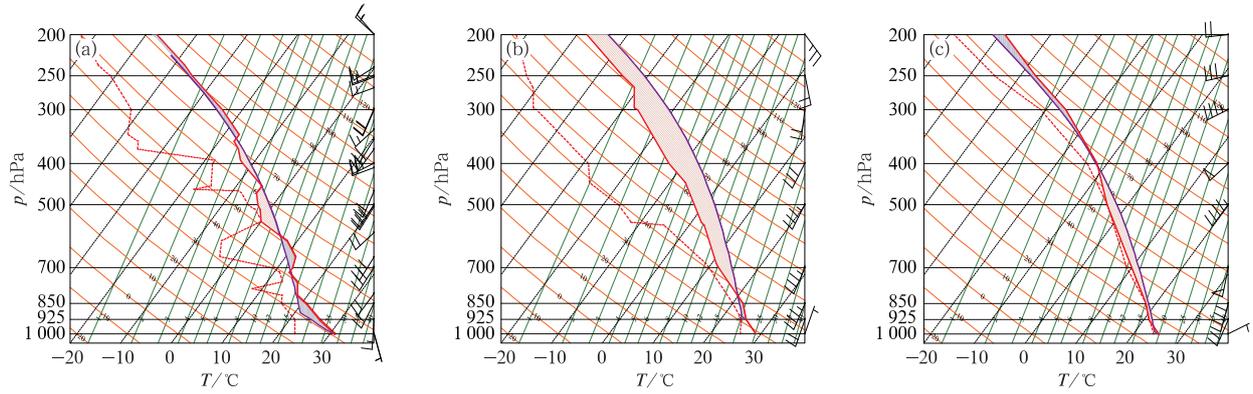


图 4 2018 年 7 月 (a)15 日 20 时、(b)16 日 14 时、(c)17 日 14 时北京探空廓线  
(红色实线:温度,红色虚线:露点温度,填充区域:CAPE)

Fig. 4  $T-\ln p$  at Beijing Station at (a) 20:00 BT 15, (b) 14:00 BT 16 and (c) 14:00 BT 17 July 2018  
(solid red line: temperature, dashed red line: dew temperature, filled area: CAPE)

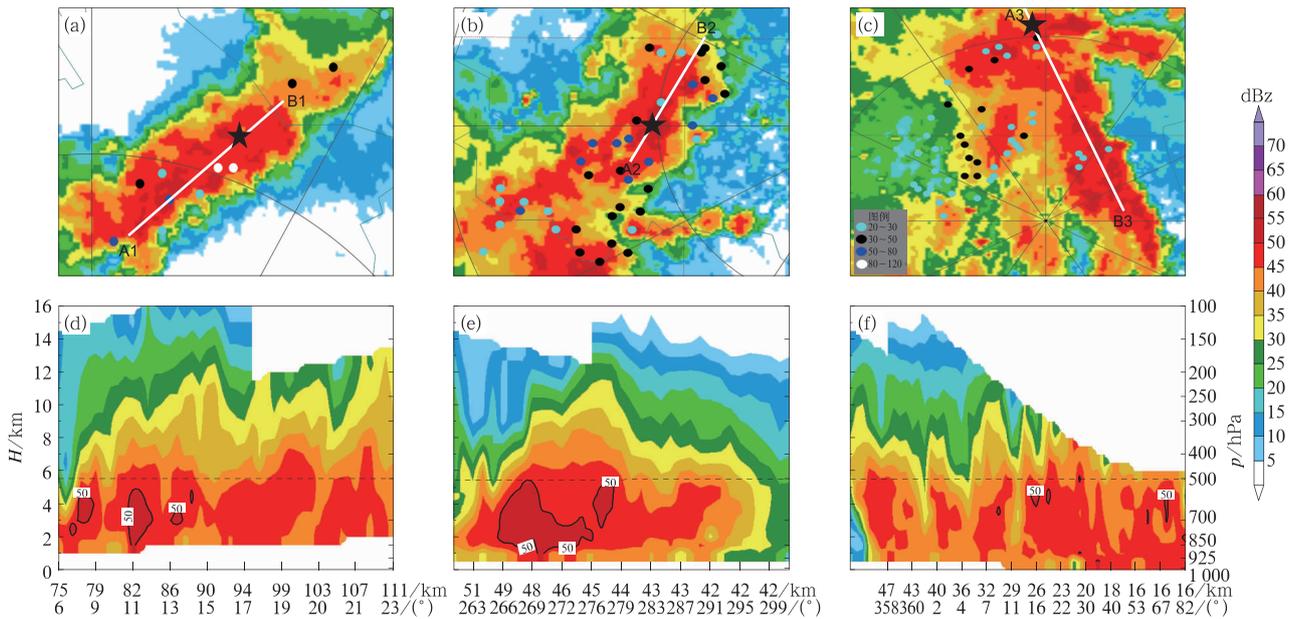


图 5 2018 年 7 月 16 日 (a,b,c)低质心型对流风暴成熟阶段北京雷达组合反射率因子(填色)、小时累计降水(实心点,单位:mm)分布及(d)沿图 5a 中 A1—B1、(e)图 5b 中 A2—B2、(f)图 5c 中 A3—B3 白色实线的回波垂直剖面  
(a,d)03:00 密云,(b,e)02:06 房山,(c,f)03:36 昌平、顺义、通州等

(整点时刻的小时降水量为该时刻之前 1 h 的累计值,非整点时刻的小时降水量为所在  
时次内的 1 h 累计值;图 5a~5c 中黑色五角星:代表站的位置;图 5d~5e 中黑色虚线:0°C 层高度;  
横坐标上排数字:距离雷达站距离,下排数字:方位角,正北方为 0°,顺时针增加)

Fig. 5 (a,b,c) Distribution of Beijing radar composite reflectivity (colored) and hourly rainfall (solid dots, unit: mm), and echo profiles through the white solid line in Fig. 5a A1—B1 (d), Fig. 5b A2—B2 (e), Fig. 5c A3—B3 (f) for the maturity stage of low-echo-centroid convective storms

(a, d) 03:00 BT 16 at Miyun, (b, e) 02:06 BT 16 at Fangshan, (c, f) 03:36 BT 16 at Changping, Shunyi and Tongzhou etc.

(The hourly rainfall at the hour is the one-hour accumulated rainfall and before it, while for off-hour rainfall is the hourly accumulated rainfall; in Figs. 5a—5c black star; locations of the representative stations; in Figs. 5d—5f black dashed lines: height of 0°C layer; upper numbers in the horizontal axis are the distance to the radar site, while the lower numbers are azimuth with north to 0°, increasing clockwise)

该类型对流风暴的代表站点分钟雨量时序图表现为波动而持续的强降水特点(图 6),例如 16 日凌晨极端强降水发生时段,密云西白莲峪 16 日 01—02、02—03 和 03—04 时的小时降水分别为 67.6、117.0 和 63.2  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 3 h 累计降水达 247.8 mm。该站 02—03 时 117 mm 极端小时降水的分钟雨量时间演变显示,前 40 min 内该站降水强度呈波动式逐渐加强的趋势,表明影响该区域的降水云团在不断增强,约在 02:41 达到  $3.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的分钟降水极大值,随后强度略有降低,但在平均  $3.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的降水强度上持续了约 10 min,之后降水强度明显降低,但很快又回升至  $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的强度,表明该站的强降水是受多个对流单体交替影响下造成的,由多个强降水时段组成,这与已有研究所总结的热带系统强降水特点有相似之处(盛杰等,2012;田付友等,2017),虽然该过程在分钟降水强度上要低于 2017 年 5 月 7 日的广州暴雨,但“5·7”暴雨毕竟是更为极端的降水个例;二者均具有波动性的降水特征,可能与中尺度对流系统在移动传播过程中产生的“列车效应”有关。

快速移动型对流风暴回波形态表现为西北—东南带状分布(图 5c),其前侧暖湿区域不断会有新生单体触发并发展,系统前向传播明显,且系统走向与中层西南引导气流几乎垂直,因此,对流单体的移动

方向和传播方向一致,系统移速较快,对应地面降水特点为分布地理范围较大,但累计雨量相对较小。代表站分钟时序图表现为短暂且高效的降水特点,虽然快速移动型对流风暴造成的小时雨强要小于“列车效应”型对流风暴,但二者在分钟降水量上差异不大,达到了  $3.3 \sim 3.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

低质心型对流风暴之所以能造成高效的降水,主要与对流风暴的环境条件和结构特征具有较大关系。低质心型对流风暴发生在整层西南风控制的暖湿环境中,垂直风切变较小,对流云团多为垂直发展的降水云团,对流风暴成熟阶段强反射率因子顶高基本位于  $0^\circ\text{C}$  层以下(图 5d~5f),且云底高度较低,表明降水云团具有类似热带型低质心降水云团性质(Maddox et al,1977),这种情况下云中粒子的蒸发很小,易造成有效的地面降水。但与一些热带型降水云团不同的是,本次过程暖区对流风暴回波顶高均达到了 12 km 以上,对应的云顶亮温也都在  $-65^\circ\text{C}$  以下(表 2),对流的云发展高度很高,说明发生在热力和暖湿条件充沛环境中的暖区对流虽然 50 dBz 以上的强回波质心低,但云顶发展还是非常旺盛的,表现为暖区深对流过程的强降水回波特征。

## (2) 高质心型对流风暴

本次过程中,高质心型对流风暴局地性较强,且移动快速,通常表现为局地垂直发展旺盛的对流单体

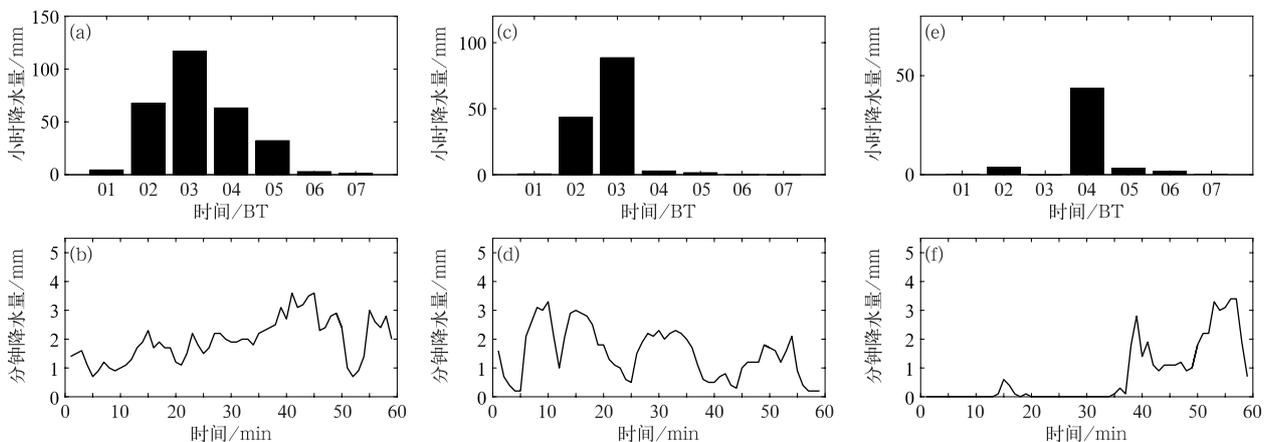


图 6 2018 年 7 月 16 日 01—07 时低质心型对流风暴对应代表站密云西白莲峪(a,b)、房山河北镇(c,d)、昌平桃峪口(e,f)小时雨量变化(a,b,c)及最大小时降水时段内的分钟雨量变化(b,d,f)

Fig. 6 Variations of hourly rainfall (a, b, c) and minutely rainfall during the maximum rainfall intensity hours (b, d, f) at the three representative stations of (a, b) Xibailianyu in Miyun District, (c, d) Hebei Town in Fangshan District, and (e, f) Taoyukou in Changping District during the influence period of low-echo-centroid convective storms from 01:00 BT to 07:00 BT 16 July 2018

形成,或者由多个对流单体合并加强、组织而成(图 7)。对应的小时雨强多分布在  $20\sim 40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  量级,空间分布与对流系统的位置、形态分布相对应。代表站小时降水和分钟雨量时序图(图 8)显示,高质心型对流风暴造成的降水持续时间较短,一般只会在一个时次出现  $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  以上的短时强降水;对应的最大分钟降水量基本在  $2.5\sim 3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  左右,因此,高质心型对流风暴造成的小时雨强和分钟雨量均弱于低质心型对流风暴。

二者造成的雨强差异可能与不同环境条件下的对流云结构特征不同相关。从高质心型对流风暴的垂直结构来看,系统发展阶段垂直伸展高度很高,个别单体  $50\text{ dBz}$  以上的强回波顶高可达  $7.5\text{ km}$  左右,对应的云顶亮温低于  $-65^\circ\text{C}$ (表 2)。  $50\text{ dBz}$  强回波质心明显高于  $0^\circ\text{C}$  层高度(图 7d~7f),对应的最大反射率因子可达  $55\sim 65\text{ dBz}$ ,表明对流云团垂直发展剧烈,云团中除液态水以外,还含有过冷水或冰晶粒子等混合相态水物质(Williams,2001),导致

表 2 2018 年 7 月 16—18 日三类对流风暴的云顶亮温、回波顶高及  $0^\circ\text{C}$  层高度的关系

Table 2 The relationship among TBB, echo top height and  $0^\circ\text{C}$  level height of three types of convective storms during 16—18 July 2018

分类	主要影响时段/地点	最低 TBB/ $^\circ\text{C}$	最大雨强对应的回波顶高/ $\text{km}$	最大雨强对应的 $50\text{ dBz}$ 强回波顶高/ $\text{km}$	$0^\circ\text{C}$ 层高度/ $\text{km}$
低质心型对流风暴	16 日 00—05 时/密云	-66	15	5.3	5.4
	16 日 00—03 时/房山	-75	15	5.2	5.4
	16 日 03—05 时/昌平	-75	14	5.3	5.4
高质心型对流风暴	16 日 06—11 时/顺义	-66	12	7.5	5.4
	16 日 17—20 时/昌平	-67	12	7.6	5.0
	17 日 06—09 时/顺义	-50	11	7.5	4.7
混合型对流风暴	17 日 09—11 时/房山	-31	7.8	5.5	4.7
	17 日 23 时至 18 日 01 时/顺义	-55	11	6.0	5.0

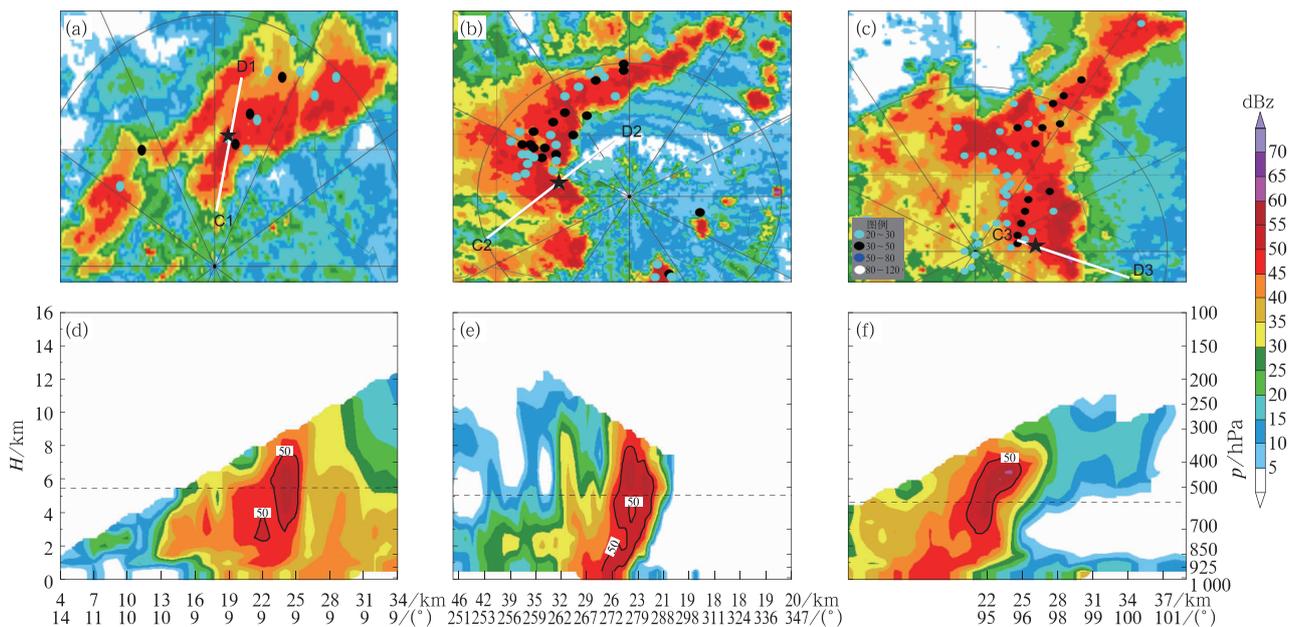


图 7 同图 5,但为高质心型对流风暴成熟阶段,(d)沿图 7a 中 C1—D1、

(e)图 7b 中 C2—D2、(f)图 7c 中 C3—D3 白色实线的回波垂直剖面

(a,d)16 日 07:06 朝阳、顺义,(b,e)16 日 18:12 丰台、石景山等,(c,f)17 日 07:36 朝阳、通州

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the high-echo-centroid convective storms, and echo profiles through the white solid line in Fig. 7a C1—D1 (d), Fig. 7b C2—D2 (e), and Fig. 7c C3—D3 (f)

(a, d) 07:06 BT 16 at Chaoyang and Shunyi, (b, e) 18:12 BT 16 at Fengtai,

Shijingshan, etc., (c, f) 07:36 BT 17 at Chaoyang and Tongzhou

其最大回波强度要高于低质心型对流风暴。但由于该时段环境场上中层存在干层,垂直风切变较大,因

此,对流风暴垂直结构上存在明显的悬垂结构特征,系统倾斜发展,部分雨滴粒子被带到云体外部,其下

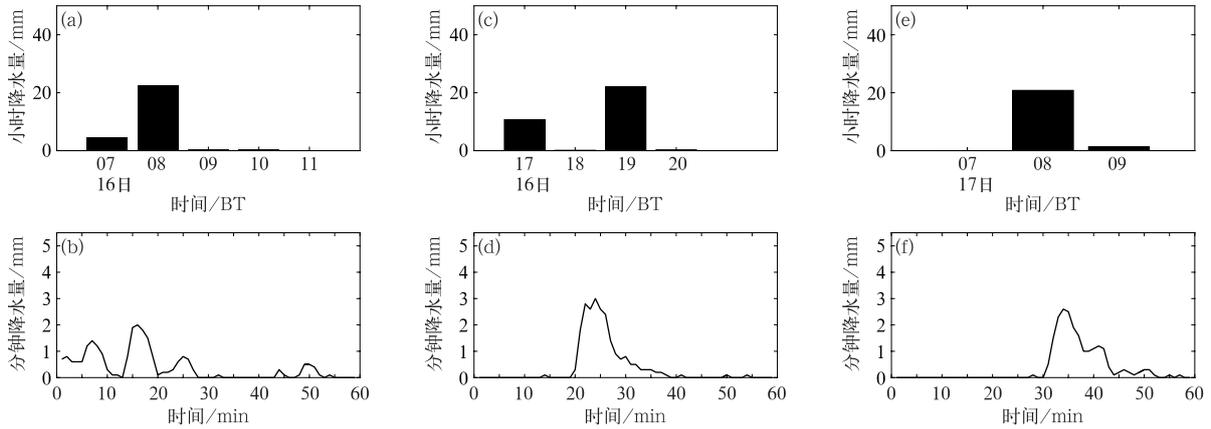


图 8 同图 6,但为 2018 年 7 月 16—17 日高质心型对流风暴影响时段代表站朝阳崔各庄(a,b)、丰台卢沟新桥(c,d)、通州台湖公园(e,f)

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the three representative stations of (a, b) Cuigezhuang in Chaoyang District, (c, d) Lugou New Bridge in Fengtai District, (e, f) Taihu Park in Tongzhou District during the influence period of high-echo-centroid convective storms during 16—17 July 2018

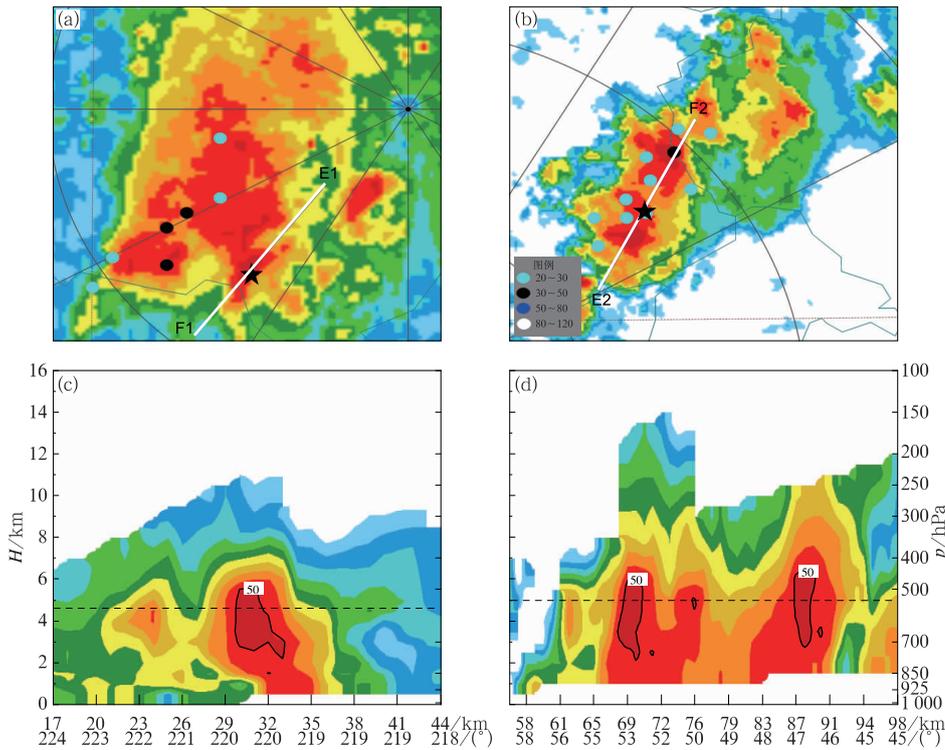


图 9 同图 5,但为混合型对流风暴成熟阶段,(c)沿图 9a 中 E1—F1、(d)图 9b 中 E2—F2 白色实线的回波垂直剖面 (a,c)17 日 09:42 房山,(b,d)18 日 00:30 平谷

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for the hybrid convective storms and echo profiles through the white solid line in Fig. 9a E1—F1 (c), Fig. 9b E2—F2 (d) (a, c) 09:42 BT 17 at Fangshan, (b, d) 00:30 BT 18 at Pinggu

落过程中由于距离长、摩擦大等因素导致蒸发而未降落到地面(孙继松,2014);同时高质心对流风暴局地性强,移动快速,导致其累积雨量较小,因此,对流风暴的移动传播特征及其类型都是影响降水特点的重要因素。

### (3)混合型对流风暴

混合型对流风暴在本次过程的各个强降水阶段都有出现,以主要受混合型对流风暴影响的2个时段为例,分析其对流组织结构及降水特点。图9显示,混合型对流风暴主要由快速移动的多个对流单体构成,回波形态呈局地块状分布,系统移动过程中伴随有对流单体的生消发展过程,但是对流单体之间的合并加强过程并不明显,对应上文环境条件分析,17日的水汽和能量条件均要弱于16日,因此,混合型对流风暴的回波顶高相对前期的低质心型对流风暴和高质心型对流风暴要明显偏低,其最低云顶亮温一般高于 $-55^{\circ}\text{C}$ (表2)。垂直结构上来看,混合对流风暴最大反射率因子约为50 dBz,50 dBz强回波顶高在5~6 km左右,略高于 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度(图7c,7d)。

由于系统的强度发展较弱和快速移动性等特点,混合型对流风暴对应的地面降水也是三类系统中最弱的,其对应的小时降水量以 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 为主,且局地性较强,持续时间较短。代表站分钟雨量时序图(图10)显示,混合型对流风暴对应的最大分钟降水量为 $1.8\sim 1.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,明显弱于前两类对流风暴,这主要与混合型对流风暴的环境条件和系统强度较弱有关。

## 5 结论与讨论

2018年7月15—17日北京地区的极端强降水过程是在副高和西风槽共同影响下产生的,由于不同阶段对流环境条件和风暴结构特征差异,造成小时雨量呈现依次减弱的阶段性特征。本文根据对流风暴成熟阶段的雷达回波结构特征,将本次过程的对流风暴分为低质心型、高质心型和混合型三类,通过对不同类型对流风暴的环境条件、组织结构及降水特点的对比分析,得到如下结论:

(1)低质心型对流风暴主要影响16日凌晨时段,北京地区处于副高边缘的深厚暖湿层结中,整层水汽含量充沛,垂直风切变条件较弱。对流风暴多表现为垂直发展的塔状结构,50 dBz以上的强回波质心较低,具有类似热带强降水型风暴特征。对应的地面小时雨强和分钟降水量在三类风暴中最强,最大分钟降水量可达 $3.3\sim 3.6\text{ mm}$ 。由具有“列车效应”的低质心型对流风暴产生的高效且持续的降水是导致密云极端强降水的直接原因。

(2)高质心型对流风暴影响的16日上午至17日凌晨时段,北京地区处于高空槽前和副高的共同作用下,高空伴有干冷空气活动,整层对应较强的垂直风切变。对流风暴中50 dBz以上的强回波顶高远高于 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度,且存在明显的悬垂结构特征,降水粒子下落过程中由于距离长、摩擦大等因素造成蒸发过程明显,且对流风暴局地性强,移动快速,因此,产生的小时雨量和最大分钟雨量要弱于低质心

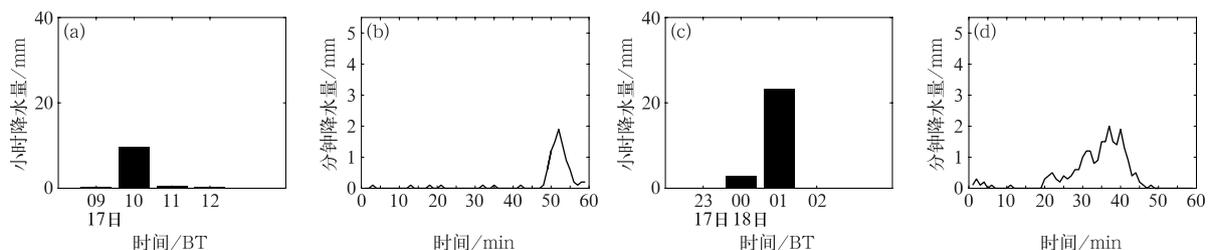


图10 同图6,但为2018年7月17—18日混合型对流风暴影响时段代表站大兴定福庄(a,b)、平谷鱼子山(c,d)

Fig. 10 Same as Fig. 6, but for the two representative stations of (a, b) Dingfuzhuang in Daxing District, (c, d) Yuzi Mountain in Pinggu District during the influence period of hybrid convective storms during 17—18 July 2018

型对流风暴。

(3)混合型对流风暴影响的 17 日上午至 18 日凌晨时段,北京地区处于高空槽过境期,能量和水汽条件较前期明显减弱,较强的垂直风切变集中在 700 hPa 以下。对流风暴的发展强度和降水量级在三类风暴中最弱。

(4)不同类型对流风暴的环境条件、结构特征及其移动传播特点直接决定了本次极端降水过程中不同阶段的降水强度和量级。

需要指出的是,本文虽重点围绕本次过程不同强降水阶段各类对流风暴特征及其造成的强降水特点的差异进行了详细的对比分析,但本次强降水过程持续时间如此之长,中尺度对流系统复杂多变,很多问题需进一步深入研究,如不同阶段对流系统的触发和维持机制、对流风暴内部的微物理结构特点之间的差异,这些问题有待进一步深入分析研究。

## 参考文献

- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012.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,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xun J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 方翀,毛冬艳,张小雯,等,2012.2012 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,38(10):1278-1287. Fang C, Mao D Y, Zhang X W, et al, 2012. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(10):1278-1287(in Chinese).
- 符娇兰,马学款,陈涛,等,2017.“16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J].气象,43(5):528-539. Fu J L, Ma X K, Chen T, et al, 2017. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China[J]. Meteor Mon, 43(5):528-539(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,何娜,等,2017.“7·20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,75(2):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(2):685-699(in Chinese).
- 盛杰,张小雯,孙军,等,2012.三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析[J].气象,38(10):1161-1169. Sheng J, Zhang X W, Sun J, et al, 2012. The comparative analysis of minute class rainfall on three different heavy rain processes[J]. Meteor Mon, 38(10):1161-1169(in Chinese).
- 孙继松,2014.从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作用[J].气象,40(1):1-6. Sun J S, 2014. Role of cloud physics in precipitation forecasting by synoptic dynamics[J]. Meteor Mon, 40(1):1-6(in Chinese).
- 孙继松,雷蕾,于波,等,2015.近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,73(4):609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):609-623(in Chinese).
- 孙建华,赵思雄,傅慎明,等,2013.2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J].大气科学,37(3):705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3):705-718(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. 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).
- 田付友,郑永光,张涛,等,2017.我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].暴雨灾害,36(6):518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6):518-526(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).
- 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).
- 杨波,孙继松,毛旭,等,2016.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J].气象学报,74(6):919-934. Yang B, Sun J S, Mao X, et al, 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 74(6):919-934(in Chinese).
- 易笑园,陈宏,孙晓磊,等,2018.“7·20”气旋大暴雨中多尺度配置与 MyCS 发展的关系[J].气象,44(7):869-881. Yi X Y, Chen H, Sun X L, et al, 2018. Multi-scale configuration of the 20 July 2016 cyclone induced severe torrential rain and its relationship with the development of MyCS[J]. Meteor Mon, 44(7):869-881(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).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:47-52. Yu X D, Yao X P, Xiong T N,

- et al, 2006. Doppler Principle and Operational Applications of Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press; 47-52 (in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[M] // Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society; 481-525.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Lemon L R, 1977. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: a preliminary report[R]. NOAA Tech Memo. NWS-NSSFCI, Washington: NOAA, 60.
- Maddox R A, Caracena F, Hoxit L R, et al, 1977. Meteorological aspects of the big Thompson flash flood of 31 July 1976[R]. NOAA Technical Report # ERL 388-APCL 41. Washington: U. S. Government Printing Office, 83.
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China[J]. J Meteor Res, 29(3):370-384.
- Williams E R, 2001. The electrification of severe storms[M] // Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society; 527-561.
- Xu X Y, Howard K, Zhang J, 2008. An automated radar technique for the identification of tropical precipitation[J]. J Hydrometeor, 9(5):885-902.
- Zhang J, Howard K, Langston C, et al, 2011. National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans[J]. Bull Amer Meteor Soc, 92(10):1321-1338.