

谌芸,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.

# 北京721特大暴雨极端性分析及思考

## (一) 观测分析及思考<sup>\*</sup>

谌 芸 孙 军 徐 琚 杨舒楠  
宗志平 陈 涛 方 艸 盛 杰

国家气象中心,北京 100081

**提 要:**本文利用多种常规和非常规观测资料对北京2012年7月21日大暴雨过程的降水特点,引发特大暴雨的中尺度对流系统的环境场条件及其发生发展过程进行了全面的分析。观测分析发现:这次特大暴雨是一次极端性降水过程,具有持续时间长、雨量大、范围广的特点。降水过程由暖区降水和锋面降水组成。暖区降水开始时间早,强降水中心较为分散,持续时间长。锋面降水阶段,多个强降水中心相连,形成雨带,雨强大,降水效率高,持续时间较短。引发此次特大暴雨的中尺度对流系统的环境场条件分析发现:极端降水过程发生在高层辐散、中低层低涡切变和地面辐合线等高低空系统耦合的背景下。来源于热带和副热带的暖湿空气在暴雨区辐合,持续输送充沛的水汽,具有极高的整层可降水量、强低层水汽辐合等极端水汽条件。在充沛的水汽条件下,低涡切变、低空急流上的风速脉动、地面辐合线、地形作用等触发了强降水。随着锋面系统东移,在冷空气和适度的垂直风切变作用下对流系统组织化发展,产生较强的锋面降水。中尺度对流系统发生发展过程分析发现:降水过程首先以层状云降水和分散的对流性降水为主。随着干冷空气的侵入逐渐转化为高度组织化的对流性降水,多个中小尺度对流云团组织化发展并形成MCC,产生极端强降水。由于回波长轴方向、地形以及回波移动方向三者平行,此次过程的雷达回波具有明显的“列车效应”;并具有明显的后向传播特征和低质心的热带降水回波特点。

通过此次罕见暴雨事件观测资料的综合分析,提出了需要进一步研究的问题:此次特大暴雨过程极端性降水特点及极端水汽条件的成因;北方地区暖区暴雨的形成机制;列车效应和后向传播的形成机制;对流单体的组织维持机制以及数值预报对暖区降水的模拟诊断能力等。

**关键词:**极端暴雨, 暖区降水, 对流云团组织化, MCC, 列车效应

## Analysis and Thinking on the Extremes of the 21 July 2012 Torrential Rain in Beijing Part I: Observation and Thinking

CHEN Yun SUN Jun XU Jun YANG Shunlan  
ZONG Zhiping CHEN Tao FANG Chong SHENG Jie  
National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Precipitation characteristics, environment conditions, generation and development of the mesoscale convective system that brought about the extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012 were analyzed comprehensively in this paper by using various conventional and unconventional data. The results showed that the extreme torrential rain had the characteristics of long duration, great rainfall and wide coverage area and its process consisted of warm area precipitation and frontal precipitation. The warm area rainfall started earlier, the severe precipitation center was scattered and lasted long while the frontal rainfall process

\* 国家自然科学基金面上项目(41175048)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004、GYHY201006005 和 GYHY200906001)共同资助

2012年9月6日收稿; 2012年9月27日收修定稿

第一作者:谌芸,主要从事中尺度天气研究. Email:chenyun@cma.gov.cn

contained several severe rainfall centers with high precipitation efficiency, lasting a short time.

Environment conditions of the mesoscale convective system that triggered this extreme severe rainfall were analyzed. The results showed that interactions of high-level divergence, the wind shear and convergence with the vortex in the lower troposphere and the surface wind convergence line provided favorable environment to the severe extreme rain. The warm humid airs from the tropical and sub-tropical zones converged over the torrential rain region, continuous and sufficient water vapor manifested as high atmospheric column of precipitable water and strong low-level water vapor convergence and other extreme vapor conditions for the torrential rain. In addition, the intense precipitation was triggered by the vortex wind shear, wind disturbance on low-level jet, surface wind convergence line and the effect of terrain under the condition of the plentiful water vapour and maintained. With the cold front moved eastward, heavy frontal rainfall was brought by the development and evolution of convective system made by the cold air and the suitable vertical wind shear.

Generation and development processes of the mesoscale convective system were also studied. The findings suggested that stratiform cloud precipitation and dispersed convective precipitation occurred firstly in the precipitation process. The warm and steady stratiform cloud precipitation changed to be highly organized convectional precipitation as the cold dry air invaded. Many small-scale and mesoscale convective clusters developed into mesoscale convective complex (MCC), leading to the extreme severe precipitation. Since all the directions of the echo long axis, terrain and echo movement were parallel, train effect was obviously seen in the radar echo imagery during this precipitation process. Meanwhile, the radar echo had the characteristics of backward propagation and low centroid which was similar to tropical heavy rainfalls. Finally, a series of scientific problems were proposed according to the integrated analysis on the observation data of this rare torrential rain event, such as the causes for the extreme torrential rain and the extreme rich water vapor, mechanisms for the warm area torrential rain in the north of China, the mechanism for the train effect and backward propagation, mechanisms for the organization and maintenance of the convective cells, the simulation and analysis ability of the numerical models to extreme torrential rains and so on.

**Key words:** extreme torrential rain, warm area precipitation, systematization of convective cloud clusters, mesoscale convective complex (MCC), train effect

## 引 言

北京地区地形复杂,背山面海,位于山地与平原的过渡地带,年平均降水量为 420~660 mm<sup>[1]</sup>。由于地形地势和气候环境等原因,极易发生强度大,时间、范围集中的灾害性暴雨<sup>[2]</sup>。北京站日降雨量(1951—2012 年 08—08 时)极值高达 318.1 mm,200 mm 以上的大暴雨及特大暴雨出现过两次,100 mm 以上的发生过 22 次,强降水过程大多发生在 7 和 8 月份,与年降水量分布主要集中在夏季<sup>[3]</sup>相对应。统计研究表明,北京市年降水量自 1951 年来整体上呈减少趋势<sup>[3-5]</sup>,但是在气候变暖的大背景下,极端降水事件明显增多<sup>[6]</sup>,局地大暴雨、特大暴雨事件时有发生。不同性质的下垫面对北京地区降

水影响显著,受地形影响,西部山前迎风坡(密云、怀柔和房山)降水量明显多于其他地区<sup>[7-8]</sup>。而城市的热岛、雨岛效应又进一步增大了降水的空间、时间非均匀性,造成大降水往往集中在局部地区<sup>[9]</sup>。

在地形、城市环境与气候背景的综合作用下,常有极端强降水事件发生。1959 年 7 月 30—31 日的大范围大暴雨、局地特大暴雨过程降水中心主要位于海淀、德胜门一带,松林匣站日雨量达到 185.2 mm,其中最大小时雨量达到 122.0 mm<sup>[10]</sup>。1963 年 8 月 8—9 日,北京的极端降水事件主要集中在海淀和朝阳地区,15 个国家站平均日降水量达到 161.9 mm,北京、丰台、朝阳和大兴 4 站的日降水量目前还是建站以来最大值。1998 年 7 月 5 日的强降水过程大暴雨区主要位于北京的北部和西部,有 9 个国家站总降水量超过 100 mm,延庆的大

庄科站(水文站)降水达到了 351 mm, 昌平、佛爷顶和汤河口站的 24 小时降水量为建站以来到现在的最大值<sup>[11-12]</sup>。

随着气候变化、经济和城市化发展, 近年来北京极端降水事件造成的经济损失也逐渐增大。不透水下垫面的大幅度增加, 导致地面径流增加, 城市内涝积水现象时常发生, 对城市排水、交通、通讯、供水、供电等系统构成极大的威胁, 越来越受到社会各界的关注, 也给我们的预报工作和防灾减灾提出了许多问题和挑战。2005 年 7 月 23 日的全市大范围暴雨过程, 房山、霞云岭站日降水量达到 150 mm 以上, 暴雨造成 2 人死亡, 城市内涝, 大量房屋倒塌。2008 年 6 月 13 日城区的局地暴雨过程, 城市局部地区积水近 2 m 深, 多个地铁站被迫暂时封站<sup>[13]</sup>。

2012 年 7 月 21—22 日, 北京出现了一次持续时间长、雨量大、范围广的极端降水事件, 给人民生命和财产安全造成了巨大损失。虽然各级台站均预报出了此次天气过程, 但对降水极端性的估计和降水时段的认识都存在不足, 加上业务数值预报模式对暖区降水的模拟能力有限, 增加了预报难度, 是一次非常值得总结和分析的过程。本文将利用多种常规和非常规观测资料对此次过程的降水特点、中尺度对流系统的环境场条件、极端暴雨的水汽特点及中尺度对流系统发生发展过程等方面进行分析, 总结此次降水过程的特点和三维概念模型, 并提炼科学问题, 为以后的科学研究提供基础和参考, 以加深对极端降水事件的理解, 提高此类极端天气过程的预报能力。

度对流系统的环境场条件、极端暴雨的水汽特点及中尺度对流系统发生发展过程等方面进行分析, 总结此次降水过程的特点和三维概念模型, 并提炼科学问题, 为以后的科学研究提供基础和参考, 以加深对极端降水事件的理解, 提高此类极端天气过程的预报能力。

## 1 过程简介

2012 年 7 月 21—22 日, 北京地区出现了一次大范围大暴雨, 局地特大暴雨过程(图 1)。强降水从 21 日 10 时开始, 22 日 02 时基本结束。全市平均日降水量达  $190.3 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ , 为 1951 年以来最大。暴雨中心在房山区河北镇, 降水量达 460.0 mm(图 1b), 城区最大降雨出现在石景山区模式口 328.0 mm。最大小时雨量出现在平谷挂甲峪, 21 时的小时雨量达  $100.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

受本次强降水影响, 北京地区出现严重城市内涝, 对城市交通造成严重影响, 强降水还引起了严重的经济损失和人员伤亡, 导致部分农田被淹, 暴雨、泥石流、雷电、大风等灾害致使数十人伤亡。

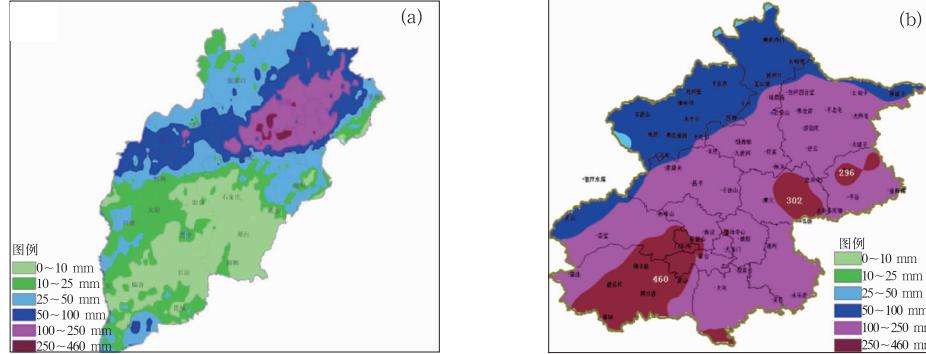


图 1 2012 年 7 月 21 日 08 时至 22 日 06 时华北地区降水量实况图(a),

北京市 21 日 10 时至 22 日 06 时降水量分布图(b)

Fig. 1 The observed accumulated precipitation (unit: mm) for  
(a) North China region from 08 BT 21 to 06 BT 22 July 2012,  
(b) Beijing from 10 BT 21 to 06 BT 22 July 2012

## 2 降水特点

### 2.1 降水极端性分析

此次特大暴雨过程日降水量超历史纪录测站

多, 有 8 个国家基本站超过建站以来历史极值(图 2), 其中北京有 5 个站超历史极值, 分别是霞云岭、房山、海淀、石景山和门头沟站, 其中霞云岭站 22 日 08 时日降水量  $337.5 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ , 特大暴雨区主要位于北京西南部。北京市除延庆外均出现了 100 mm 以上的大暴雨, 占全市 90% 以上的行政

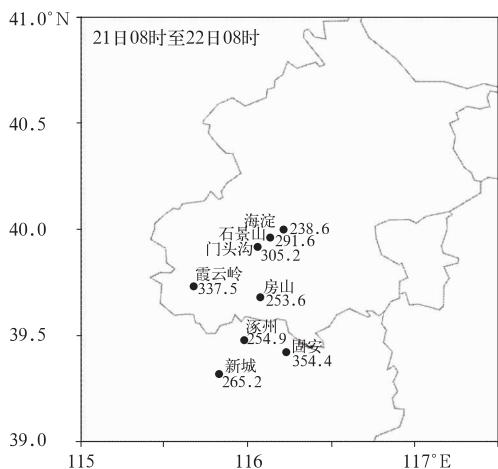


图 2 2012年7月22日08时24小时累积降水量突破建站极值(包括08—08时和20—20时的降水极值)的站点分布及降水量值(单位:mm)

Fig. 2 Station distributions and the precipitation amount (unit: mm) for stations whose 24 h accumulated precipitation from 08 BT

21 to 08 BT 22 July 2012 breaks the historical record of precipitation (including both 08—08 BT and 20—20 BT records)

区域。可见本次极端降水具有降水强度大,强降水范围广的特点。

同时,本次过程北京地区的小时雨量普遍达 $40\sim80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,持续时间达3~4 h(图3),雨强超过 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围大(图3)、持续时间长,最终造成北京地区的极端强降水。

## 2.2 降水时段

从降水的空间分布来看(图略),累积降水量超过300 mm的站点主要位于北京及西南部与河北交界处。由图3和图4可见,21日10时降水首先出现在霞云岭附近,北京位于锋面系统东侧,随后雨团增强,范围增大,并向东北方向扩展,14时降水中心位于门头沟附近,小时雨量达 $87\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。15时移至昌平东南部,沙河水库小时雨量 $56\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。15—16时北京西南部有新的雨团发展,16时降水量中心位于霞云岭附近,小时雨强超过 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,随后雨团缓慢东移并增强。17时前,多个小时雨量的大值中心较为分散。北京位于锋面东侧,降水以暖区降水为主,持续时间长达7小时以上。降水主要集中在西南部,大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水也集中于此。

17时前后锋面系统移入北京(图3和4),北京地区降水以锋面降水为主,分散的降水中心形成一条东北西南向的强降水带,雨带上有多个小时雨量

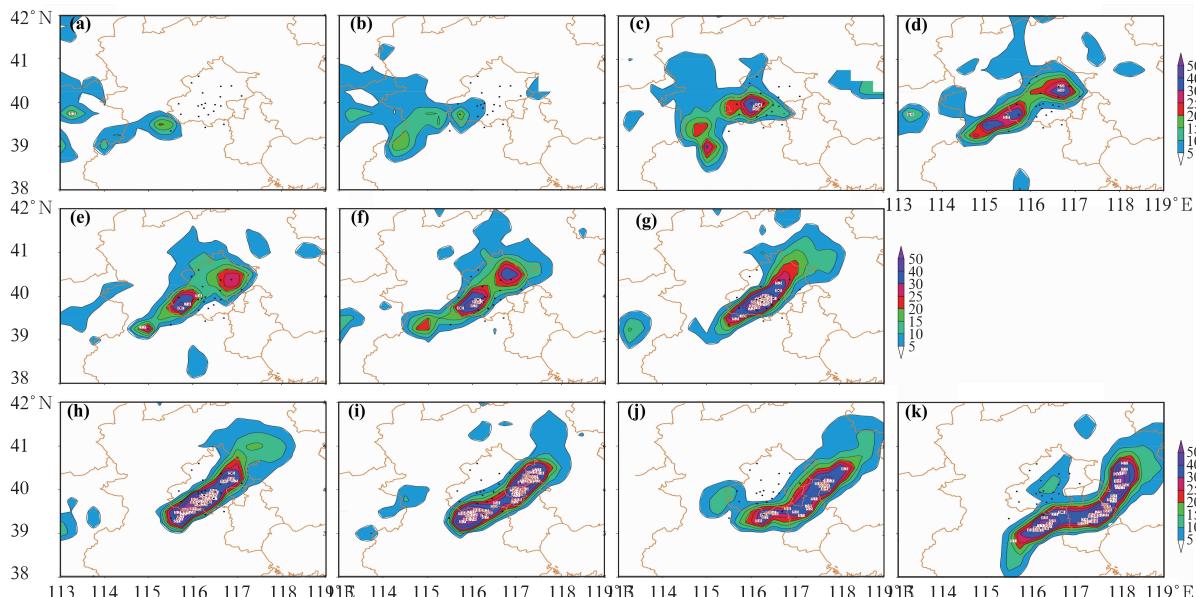


图 3 2012年7月21日10时至22日02时自动站小时雨量(填色)及北京周边地区国家基本站(黑点)

(a)~(d) 10—16时(间隔2 h),(e)~(g) 17—19时(间隔1 h),(h)~(k) 20时至22日02时(间隔2 h)

Fig. 3 Hourly rainfall observed by automatic weather stations (shaded) and the national basic weather stations around Beijing (black dot) from (a)~(d) 10 to 16 BT 21 July 2012 with 2 h time intervals, (e)~(g) 17 to 19 BT 21 with 1 h time intervals, (h)~(k) 20 BT 21 to 02 BT 22 July 2012 with 2 h time intervals

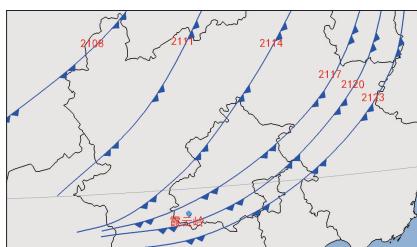


图 4 2012 年 7 月 21 日 08—23 时  
锋面系统的动态图

Fig. 4 Dynamical image of the front systems from 08 to 23 BT 21 July 2012

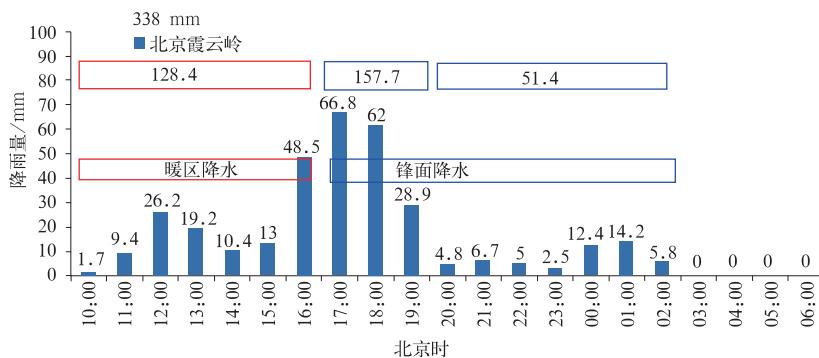


图 5 北京霞云岭 1 小时雨量序列图 (单位:mm)  
Fig. 5 Hourly rainfall sequence diagram for Xiayunling, Beijing (unit: mm)

此次过程国家基本站最大日降水量霞云岭站的 1 小时雨量序列图。如图 5 所示,霞云岭降水过程可细分为 3 个阶段:21 日 10—16 时的暖区降水(第一阶段);21 日 17—19 时锋面强降水(第二阶段);以及 21 日 20 时—22 日 02 时的锋后降水(第三阶段)。第一阶段雨强较第二阶段弱,小时雨强大都在  $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以下,只有 16 时的小时雨量达到  $48.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,降水时间长达 7 h,累积降水量达 128.4 mm,占过程雨量的 38%。降水开始时间早,持续时间长。第二阶段降水强度大,17 时小时雨强大达  $66.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,强降水持续 3 h,累积降水量达 157.7 mm,占过程雨量的 46.7%,降水强度之大,降水效率之高,是预报员完全没有估计到的。第三个阶段为锋后降水,强度减弱。3 个阶段共持续了 17 h,在霞云岭造成了 338 mm 的特大暴雨,降水主要由长时间的暖区降水和超强的锋面降水构成。

### 2.3 小结

此次特大暴雨过程是一次极端降雨过程,具有超历史纪录测站多,超过 100 mm 降雨的覆盖范围广,持续时间长等特点。北京地区的降水主要由暖

的大值中心。小时雨强较暖区降水更大,18 时房山局地累积雨量已超过 250 mm。北京西南部及与河北的交界处出现多个累积雨量超过 300 mm 的站点(图略)。17—19 时强降水中心始终位于房山附近,其中 18 时南客站小时雨量达  $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,19 时坨里站小时雨量达  $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。20 时随着锋面系统逐渐向东南方向移动,强雨带也向东南方向移动,横扫北京,22 日 00 时以后,西南部降水开始减弱,02 时以后,逐渐停止。

为详细分析每个阶段的降水特点,图 5 给出了

暖区降水和锋面降水过程组成,暖区降水开始时间早,强降水中心较为分散,持续时间长。锋面降水阶段多个强降水中心相连,形成雨带,锋面降水雨强大,降水效率高,持续时间较短。

### 3 中尺度对流系统的环境场条件分析

此次特大暴雨过程具有典型的华北暴雨形势,环流经向度大,北涡南槽、东高西低。强降雨区位于高空急流入口区右后侧,高空(200 hPa)为显著分流区(图 6);副热带高压(简称副高,下同)西伸北进控制黄淮南部、江淮地区,其西侧存在明显偏东气流;高空槽位于贝加尔湖到河套一带,强西南气流位于槽前;850 hPa 低涡从西北地区移出并逐渐加强,21 日 14 时,低涡位于山西北部,暖切变线伸到北京南部(图 7a),同时低空急流不断向北扩展增强,14 时扩展至北京南部,偏东、偏南气流的汇合,为暴雨区输送充沛水汽和不稳定能量。高低空系统耦合为暴雨的发生发展创造了良好的环境条件。

暴雨的产生是在有利的大尺度环境背景由中尺度系统触发产生的。此次过程的产生具有较好的中

尺度对流条件<sup>[14]</sup>。环境场条件分析显示(图7),21日在偏东及偏南持续强低空急流共同作用下,北京及周边为显著水汽辐合区,大气整层可降水量超过60 mm。14—17时,北京位于925 hPa低涡切变和地面风速辐合线附近,位于低空急流前部的显著风速辐合区。在充沛的水汽条件下,降水首先由地面辐合线和低空急流触发,随着锋面东移,地面偏东风和低层西南低空急流的垂直风切变则有利于强对流组织化发展,17时后在地面锋面触发作用下产生了小时雨量更大的短时强降水。

综上总结出该次极端降水的概念模型:暖区降水中,暴雨区位于高空急流入口区右侧和显著分流区,高空槽和副高相持增大了环流的经向度,提供了相对稳定的环流形势;高空槽前有低涡生成,低涡暖切南侧为显著风速辐合区,偏东及偏南低空急流为暴雨区提供了充沛的水汽,使整层可降水量超过60 mm;在高湿背景下,地面风速辐合配合中低空多层急流前的风速辐合,在低层极端高湿区域触发和维持了强降水。随着低涡东移,冷空气移近,西南风增加,在锋面触发作用下可产生小时雨量更大的强降水,暴雨区则位于锋面附近。

## 4 水汽特点

### 4.1 水汽来源

这次过程的突出特点是在锋面云系还未到达时锋前暖区内有对流发生,从850 hPa 350 K假相当位温线演变可见:18—21日350 K假相当位温线分别从西南和华南东部沿海逐渐向北扩展,至21日20时扩展至北京南部(图8),高温、高湿空气为该次类似热带性质的降水奠定基础。

由850 hPa风场和水汽通量的分析可见(图9),此次特大暴雨有两条明显的水汽通道:从中南半岛一直伸展到华北的偏南水汽和从东部沿海伸展到华北的偏东水汽,两条水汽通道在华北中部交汇,暴雨过程期间北京位于显著水汽通量辐合中心。源于热带和副热带的暖湿空气持续输送,为暴雨区提供了充沛的水汽和不稳定能量。然而,这两条水汽通道中哪条是主要的?它们在水汽输送和水汽辐合中各起什么作用?是值得深入研究的问题。

### 4.2 极端性水汽特点

由图10b可见:21日20时北京(54511)大气可降水量超过77.1 mm,为近20天来最高值,与之相伴地面上升气流也持续增加,21日14时超过25°C。GPS探测的京津地区大气可降水量也表明(图10a),在主要降水开始前,大多数站点可降水量均超过60 mm,北京西南部为高值区,超过70 mm。

通过形势和要素偏离气候平均值的程度可以对过程的异常性进行判断,一般偏离 $3\sigma$ 以上往往意味着小概率的严重事件,Grumm<sup>[15]</sup>计算了该次过程大气可降水量、850 hPa水汽通量、850 hPa风和相应标准化距平,得出3个物理量的偏离都达到了 $3\sigma$ 以上,偏离气候平均明显,尤其是850 hPa水汽通量北京地区甚至达到了 $6\sigma$ ,显示为极其异常,水汽输送较气候常态非常充沛。

选取54511站2007年以来日降水量 $\geq 50$  mm的7次暴雨个例作为统计对象,利用NCEP再分析资料,计算与水汽有关的物理参考数(整层可降水量,水汽通量散度)及其平均值(图11),可见即使和暴雨过程的样本相比,无论是整层可降水量还是水汽通量散度都远远超过了7次暴雨样本的平均值,而且均为极值,再次表明了这次降水过程的极端性水汽特点。可见极端水汽条件决定了该次极端降水的发生。极端性降水成因的初步分析见文献[16]。

## 5 中尺度对流系统发生发展过程分析

### 5.1 卫星监测

#### 5.1.1 降水各阶段云图特征

2012年7月21日08时(图12),降水发生前,高空槽位于贝加尔湖到河套一带,北京西南部降水从10时开始,在暖区降水时段(10—16时,第一阶段)北京位于高空槽前大范围叶状云系反气旋曲率一侧,以层状云为主,降水主要为平缓的持续性降水。随着高空槽云系后部的暗区(图中黑色箭头)越来越清晰,它所带来的干冷空气东移南下,在叶状云系西侧形成干侵入,促进了叶状云气旋曲率增加,加之地面降水潜热释放的相互作用,东侧多方向外流明显增强(图12b)有利于层状云系中位于华北地区的多个对流系统的激发和维持。第二阶段(17—19时),随冷锋系统逐渐移近,中小尺度对流系统迅速

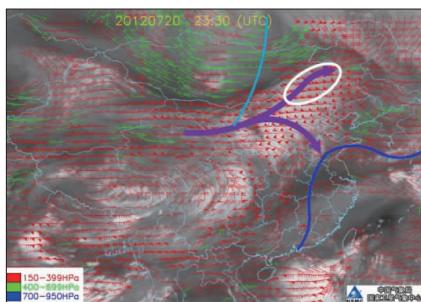


图 6 2012 年 7 月 21 日 07:30 云导风和水汽图像  
(紫色箭头为 200 hPa 高空急流, 浅蓝色线为 500 hPa 槽线, 深蓝色线为副高, 白色椭圆为急流核)

Fig. 6 Cloud-derived wind and satellite water vapor imagery at 07:30 BT 21 July 2012  
(Purple arrow, shallow blue line, dark blue line and white ellipse indicating the 200 hPa upper level jet, trough line at 500 hPa, subtropical ridge and jet-core, respectively)

发展,并高度组织化,形成 MCC(图 12d 中黑色圈所示),MCC 在向东北方向移动的过程中北京出现了强降水,降水强度较第一阶段明显增强。第三阶段(20 时以后)随着锋面向东南方向移动,MCC 进一步发展成熟,向东北方向逐渐移出北京,西南部降水

减弱。22 时(图 12e)西南侧一新生流云团并入,使得北京的降雨再次加强。

### 5.1.2 对流云团组织化特征

如图 13,21 日 16—18 时是 MCC 的形成阶段,同时也是暖区降水结束,锋面强降水开始的时段,这一时段锋面系统逐渐移进北京,锋面带来的干冷空气有利于触发新的对流,并将对流组织起来。位于北京西部的较小尺度的对流云团逐渐发展、合并,云团中  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  的冷云盖面积合并、扩大,最终形成一个较为完整的 MCC。18—22 时是 MCC 发展阶段,  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  的冷云盖面积进一步扩大,接近圆形,最大降水出现在此阶段。21 日 23 时至 22 日 04 时为 MCC 成熟阶段,MCC 云团中自 23 时开始出现  $\leq -62^{\circ}\text{C}$  的冲顶对流云团,在随后的几个小时里  $\leq -62^{\circ}\text{C}$  的云团面积逐渐扩大,01 时西侧有新生对流云团发展合并,MCC 西侧 TBB 最大梯度区加强。此时,云系向东南移动的速度较快,最大降水带快速移出北京。04 时以后,MCC 中  $\leq -62^{\circ}\text{C}$  的云团面积逐渐缩小,降水趋于结束。

### 5.1.3 小结

此次降水过程由层云降水和对流性降水共同组成。暖区降水阶段主要以层状云降水和分散的对流



图 7 2012 年 7 月 21 日 14 时(a)和 17 时(b)中尺度对流系统的环境场条件分析  
[蓝色锯齿线和黑色叉划线为地面锋面和辐合线;黑色双线和灰色箭头为 925 hPa 切变线和急流;红色箭头、黑色虚线为 850 hPa 急流和水汽通量散度,单位:  $10^{-5} \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ;点线为大于 60 mm 大气可降水量(单位: mm);彩色为组合反射率回波]

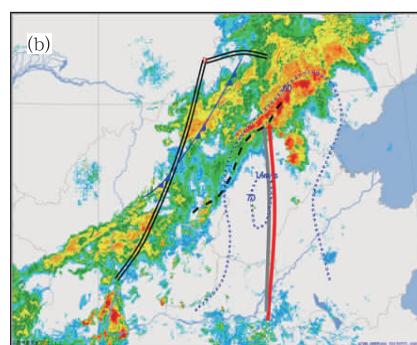


Fig. 7 Synoptic conditions for mesoscale convective systems at (a) 14 BT and (b) 17 BT 21 July 2012  
[Blue saw-tooth line and black dash-forked line indicate the surface front and convergence line, respectively; black double line and gray arrow denote 925 hPa shear line and jet, respectively; red arrow and black dash line representing 850 hPa jet and moisture flux divergence, unit:  $10^{-5} \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ , respectively; blue dot line shows the atmospheric precipitable water ( $\geq 60 \text{ mm}$ ), and shaded area is the composite reflectivity]

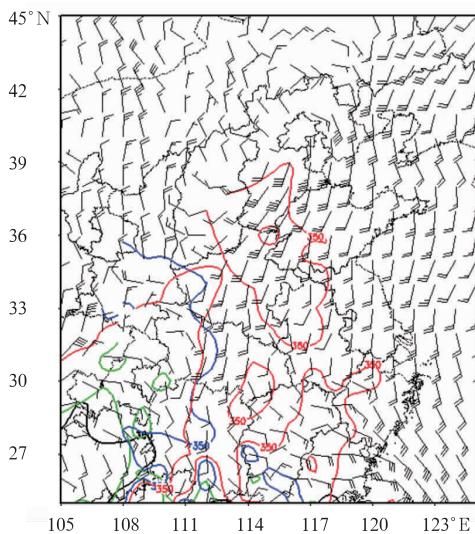


图 8 2012年7月18—21日850 hPa 350 K  
假相当位温线演变

(黑线为18日20时、绿线为19日20时、蓝线  
为20日20时、红线为21日20时)  
以及21日14时850 hPa风场

Fig. 8 The 350 K potential pseudo-equivalent  
temperature isoline at 850 hPa at 20 BT 18  
(black line), 19 (green line), 20 (blue line),  
and 21 (red line) July 2012, and the 850-hPa  
wind field at 14 BT 21 July 2012

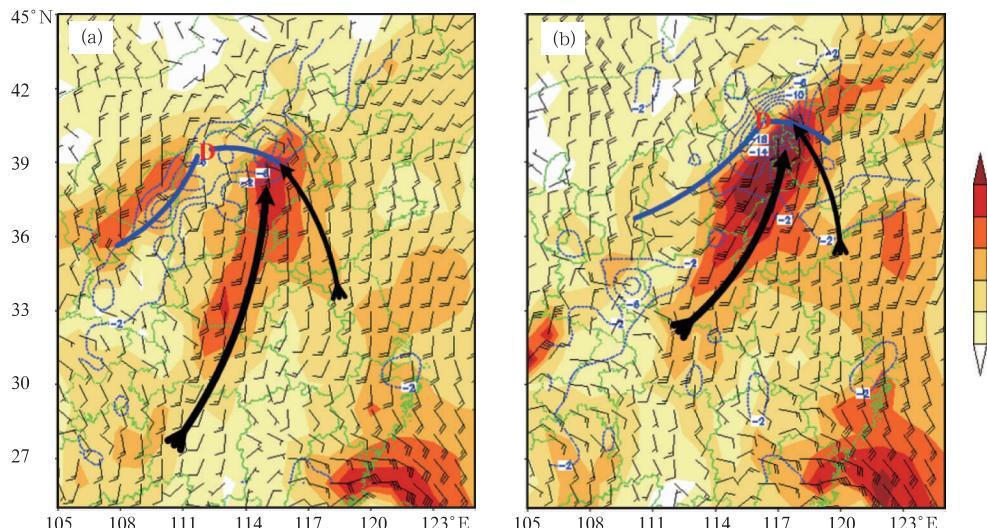


图 9 2012年7月21日14时(a)和20时(b)850 hPa风场  
〔虚线为水汽通量散度,单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ;填色为水汽通量,  
单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ;D为840 hPa低涡中心;深蓝实线为  
850 hPa切变线;黑色箭头为主要水汽通道〕

Fig. 9 850 hPa wind field, water vapor flux divergence [dash line, unit:  $10^{-8} \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ] and water vapor flux [shaded, unit:  $10^{-3} \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ] at  
(a) 14 BT and (b) 20 BT 21 July 2012  
(Blue line is shear line at 850 hPa and dark arrows are major water vapor channels,  
D is the centre of lower vortex for 840 hPa)

性降水为主,随着冷锋系统的移近,多个中小尺度对流云团发展加强并高度组织化,形成MCC,增强对流性降水,加大锋面降水强度。后期随着新生流云团的并入北京再次出现对流性降水。降水过程也是多个中小尺度对流云团发展并组织化形成MCC的过程。

## 5.2 雷达回波特征

### 5.2.1 雷达回波的演变特征

分析北京雷达回波演变特征(图14)发现:在暖区降水阶段(10—16时),11时北京西南部山前有孤立单体出现,整个对流系统结构较为松散,此后回波发展加强并沿与山脉平行的东北方向移动,逐渐合并,向东扩展,中心强度达45~50 dBz。15时新生对流单体从西南方向移入北京,向东北方向移动。16时回波呈现块状,发展合并。

17时锋面系统移进北京,降水转为锋面降水。锋面降水阶段(17—19时),在冷空气作用下,分散的回波沿山方向形成带状,回波强度达到55 dBz以上。17—19时带状回波逐渐向东扩展,其上有高度组织排列的多单体风暴活动,平均强度达55 dBz以

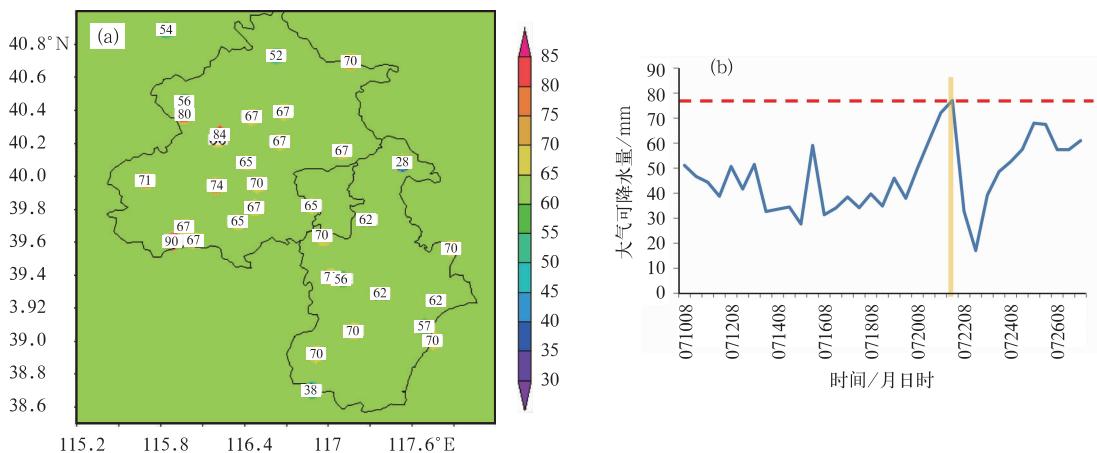


图 10 2012 年 7 月 21 日 13 时京津地区 GPS 探测大气可降水量(a, 单位:mm),  
北京(54511)7 月 10—27 日大气可降水量时间演变(b, 单位:mm)

Fig. 10 (a) atmospheric precipitable water (unit: mm) explored by GPS at Beijing and Tianjin at 13 BT 21 July 2012, (b) temporal evolution of atmospheric precipitable water (unit: mm) at Beijing Station (54511) from 10 to 27 July

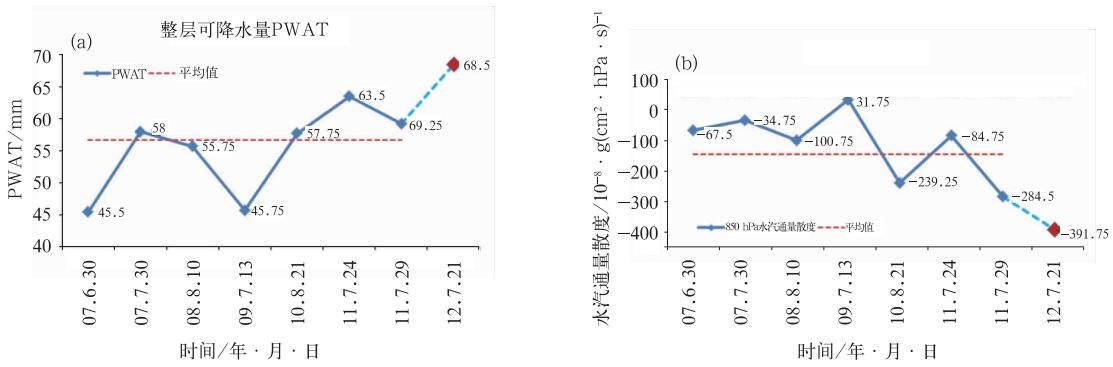


图 11 54511 站(北京)2007 年以来 7 次日降水量  $\geq 50$  mm 的过程中,  
整层可降水量(a), 水汽通量散度(b)及其平均值的对比图  
(虚线为平均值)

Fig. 11 Comparison of seven rainfall events with daily precipitation over 50 mm at Beijing Station (54511) since 2007 including atmospheric precipitable water (a, unit: mm) and water vapor flux divergence [b, unit:  $10^{-8} \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ]  
(Dash line shows mean values of the seven events)

上,位于山前的霞云岭等站出现持续的强降水,雨强大  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上。

20 时以后,锋面系统向东移动,带状回波中的单体在向东北移动的同时向东扩展,并发展加强,21 时断裂,北段向东北移,南段向东南压,并先后移出北京,23 时以后东南方向的回波向东北移,造成了 22 日凌晨的强降水,02 时以后对流单体完全移出北京,降水逐渐减弱停止。

此次过程,强回波沿与山脉平行的方向移动,块

状回波长轴方向、地形以及回波移动方向三者平行,均为西南东北向,“列车效应”较为明显。另外新的对流单体在旧单体的右后方生成,系统向东北方向移动,回波单体存在明显的后向传播特征。

### 5.2.2 雷达回波的垂直结构

从各个阶段的雷达回波垂直剖面图(图 15)可以看到:12 时(暖区降水时段),最大回波强度为 45 dBz,40 dBz 以上的强回波位于 4 km 以下,回波质心低,具有热带暖区降水回波性质。17 时(锋面

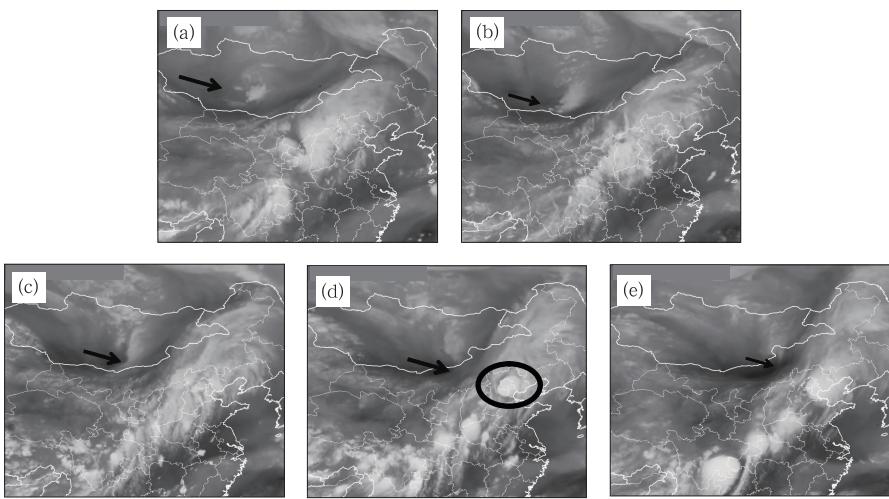


图 12 2012 年 7 月 21—22 日 FY2-E 水汽图像

(a)08 时, (b)12 时, (c)16 时, (d)20 时, (e)22 日 00 时  
 Fig. 12 FY2-E water vapor imagery at (a) 08 BT, (b) 12 BT,  
 (c) 16 BT, (d) 20 BT 21, and (e) 00 BT 22 July 2012

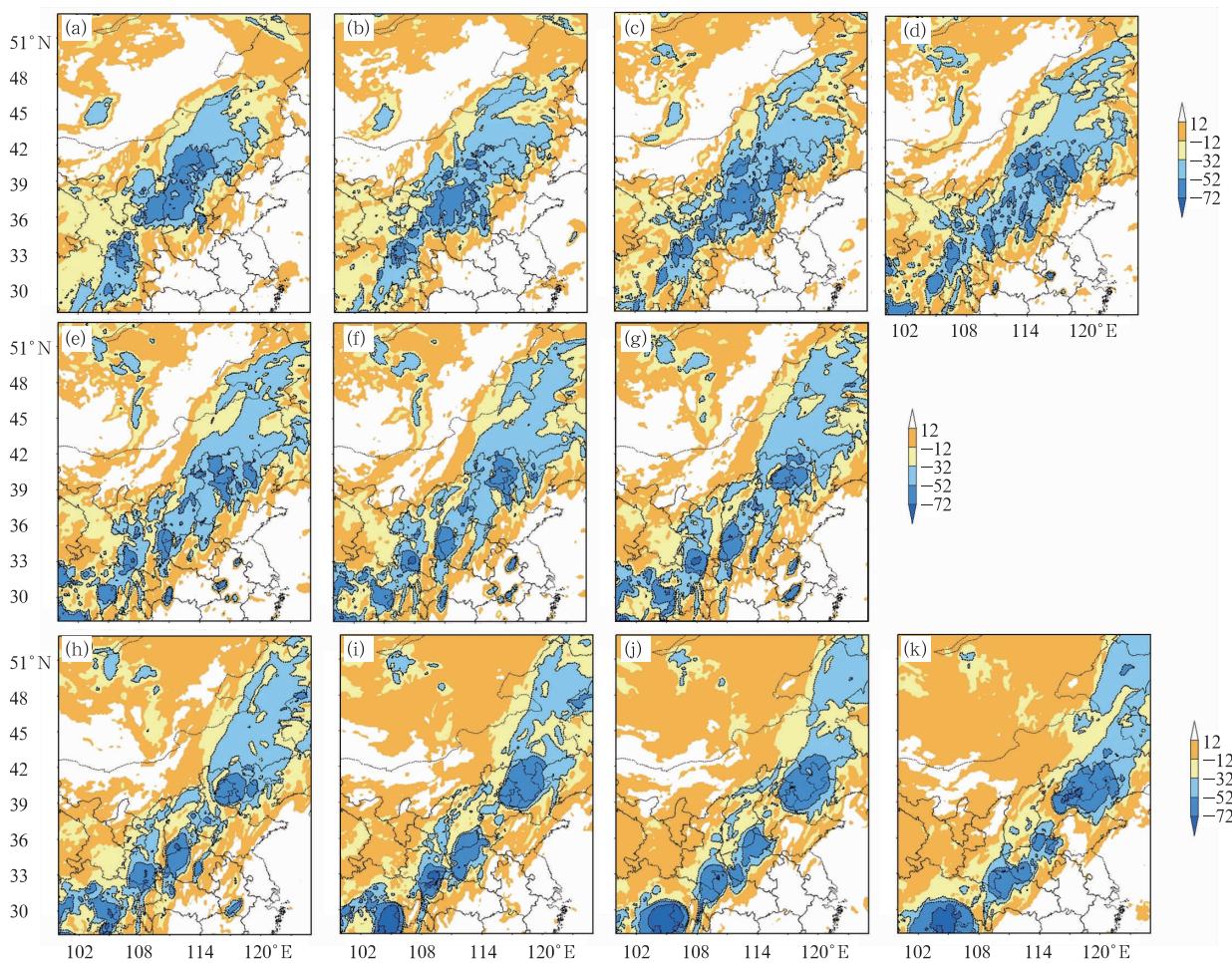
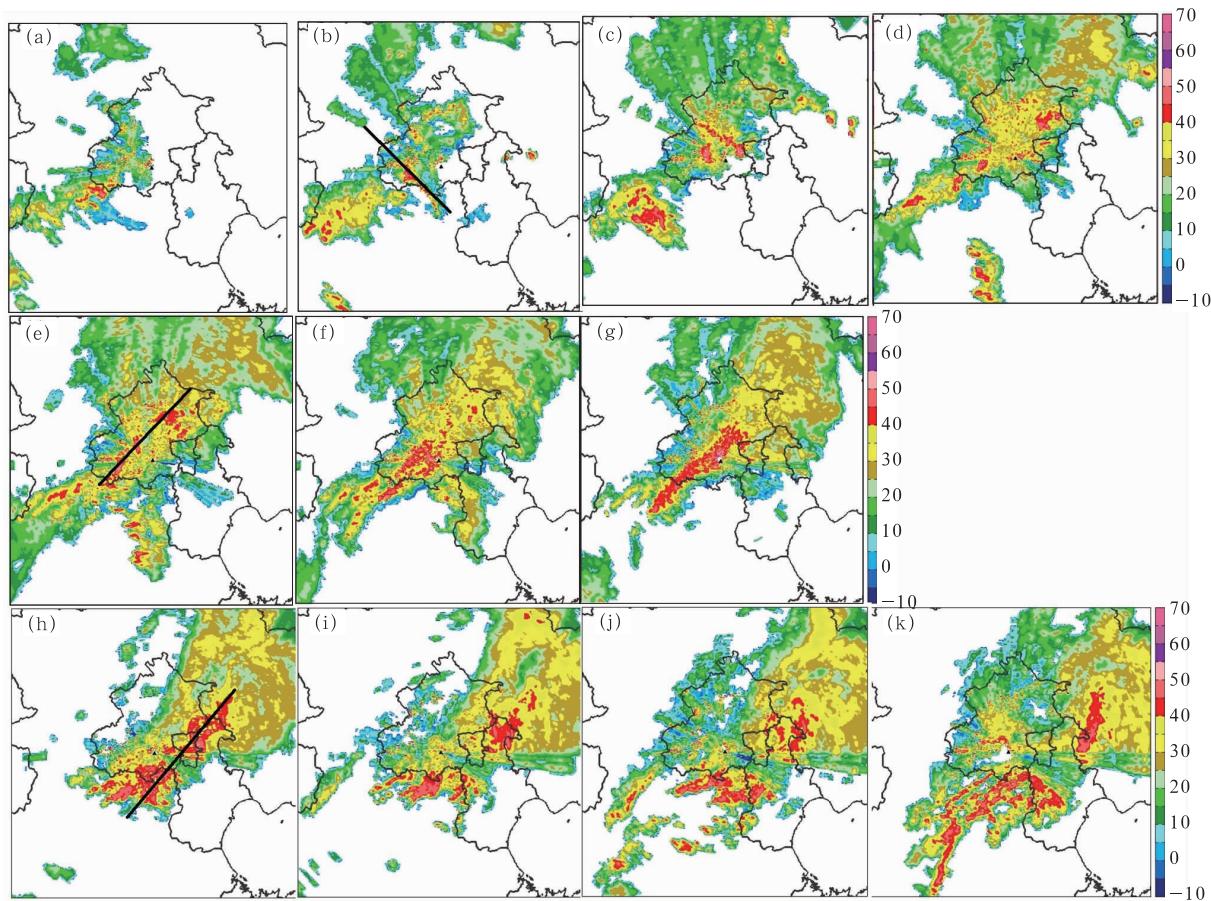


图 13 2012 年 7 月 21 日 10 时至 22 日 02 时 FY2E TBB 演变

(a)～(d)10—16 时(间隔 2 h), (e)～(g)17—19 时(间隔 1 h), (h)～(k)21 日 20 时—22 日 02 时(间隔 2 h)  
 Fig. 13 Temporal evolution of FY2-E TBB

(a)～(d) from 10 to 16 BT 21 July 2012 with 2-h time intervals, (e)～(g) from 17 to 19 BT with 1-h time intervals, (h)～(k) from 20 BT 21 to 02 BT 22 with 2 h time intervals

图 14 2012 年 7 月 21—22 日北京 SA 雷达仰角  $0.5^{\circ}$  反射率因子图

(a)~(d) 10—16 时(间隔 2 h), (e)~(g) 17—19 时(间隔 1 h), (h)~(k) 20—02 时(间隔 2 h)

(黑实线为图 15 剖面图的位置, 单位: dBz)

Fig. 14 Radar reflectivity at elevation  $0.5^{\circ}$  of Beijing SA radar at (a–d) from 10 to 16 BT 21 with 2 h time intervals, (e–g) from 16 to 19 BT 21 with 1 h time intervals, and (h–k) from 22 BT 21 to 02 BT 22 with 2 h time intervals (unit: dBz)

(Black line indicates the location of the vertical cross-section of Fig. 15)

强降水开始),最大回波值达到 55 dBz 以上,大于 40 dBz 的回波顶高达到 6 km,对流系统中镶嵌多个孤立的对流单体,正是这些中尺度对流系统造成该地区的强降水天气。22 时最大回波值达到 60 dBz 以上,大于 40 dBz 的回波顶高接近 8 km,对流系统中镶嵌多个更小尺度的单体连成一片,形成线状对流。

### 5.2.3 小结

不同降水阶段雷达回波特征各有不同,暖区降水期间(10—16 时)整个对流系统结构较为松散,中心强度 40 dBz 左右。锋面强降水期间(17—20 时)随着新的对流单体的发展东移逐渐形成块状,并发展合并形成带状,其上有高度组织排列的多单体风

暴活动,平均强度达 55 dBz 以上。22 时以后也是一些零散的回波。回波长轴方向、地形以及回波移动方向三者平行,“列车效应”明显。新生对流单体在旧单体的右后方生成,具有明显的后向传播特征。

## 6 结论与讨论

北京 721 特大暴雨过程是一次极端降水过程,产生在极为有利的水汽、不稳定和低层触发作用下,具有持续时间长、雨量大、范围广的特点。本文通过对多种常规和非常规观测资料的分析,按不同降水阶段全面揭示了其观测特点。

(1) 极端降水由暖区降水和锋面降水组成,暖区

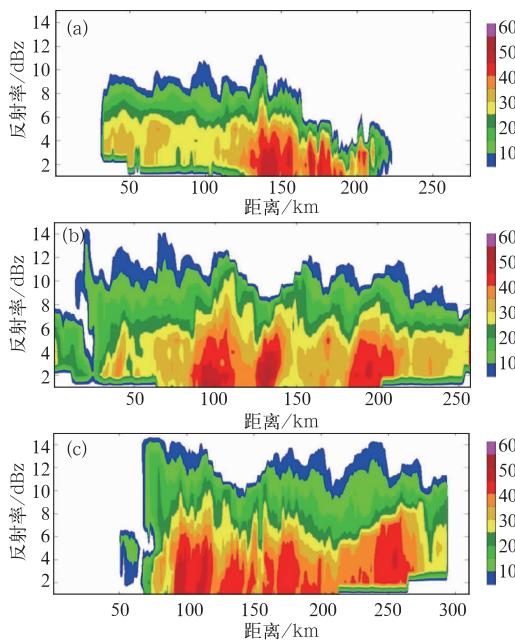


图 15 2012 年 7 月 21 日 12 时(a)、17 时(b)  
和 22 时(c)雷达反射率垂直剖面图  
(剖面所在位置对应图 14 中的黑实线)

Fig. 15 Vertical cross-section of radar reflectivity along the black line shown in Fig. 14 at (a) 12:00 BT, (b) 17:00 BT, and (c) 22:00 BT 21 July 2012

降水开始时间早,强降水中心较为分散,持续时间长。锋面降水阶段多个强降水中心相连,形成雨带,雨量大,降水效率高,持续时间较短。

(2)此次过程是典型的华北暴雨的环流形势是高层辐散、中低层低涡切变、辐合耦合的结果;低涡切变、低空急流、地面辐合线、地形等作用,在边界层极端高湿区域触发和维持了强降水;随低涡东移,暖区降水转为锋面降水,在锋面触发作用下产生雨强更大的强降水。

(3)此次特大暴雨过程具有极端性水汽条件,来源于热带和副热带的暖湿空气在暴雨区辐合,持续输送充沛的水汽。整层可降水量和水汽通量散度都远远超过气候平均,并超过 2007 年以来暴雨样本的平均值。

(4)降水过程首先以层状云和分散的对流性降水为主,随着干冷空气的侵入逐渐转化为高度组织的对流性降水,多个中小尺度对流云团发展并形成 MCC,产生极端降水。

(5)雷达回波列车效应和后向传播现象明显,回波具有低质心的热带降水回波特点。锋面降水以组

织化的强回波带为主,移动较快。

通过对这次罕见暴雨事件观测资料的综合分析发现:此次特大暴雨过程极端性降水特点及极端水汽条件的成因;北方地区暖区暴雨的形成机制;数值模式对该类暖区暴雨的模拟诊断能力;地形在极端强降水产生中的作用;列车效应和后向传播的形成机制;对流单体的组织维持机制等一系列科学问题都是值得深入研究的问题。

**致谢:**感谢国家卫星气象中心王新、任素玲在卫星云图分析上提供的帮助,感谢国家气象中心的朱文剑,南京大学的何静在雷达资料的处理上提供的帮助。

## 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.
- [2] 王敏,谭向诚. 北京城市暴雨和雨型的研究[J]. 水文,1994(3),58-64.
- [3] 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,1994,18(6):683-690.
- [4] 郝立生,丁一汇. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展,2012,31(5):593-601.
- [5] 朱龙腾,陈远生,李璐,等. 1951—2009 年北京市降水变化情势分析[J]. 水资源保护,2012,28(3):42-46.
- [6] 马京津,李书严,王冀. 北京市强降雨分区及重现期研究[J]. 气象,2012,38(5):569-576.
- [7] 吴正华,储锁龙,李海盛. 北京相当暴雨日数的气候特征[J]. 大气科学,2000,24(1):58-66.
- [8] 张朝林,季崇萍, Ying-Hwa Kuo, 等. 地形对“00.7”背景特大暴雨过程影响的数值研究[J]. 自然科学进展,2005,15(5):572-578.
- [9] 孙继松,舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学,2007,31(2):311-320.
- [10] 李裕宏. 1959 年北京城大水回顾[J]. 北京水利,1999,(4),21-23.
- [11] 郭幼君. 北京一次大暴雨过程视热源和视减湿特征分析[J]. 气象,2000,26(11):7-14.
- [12] 李廷福,廖晓农,俞连芳.“98·7”北京大暴雨的中尺度分析[J]. 气象,1999,25(5),44-48.
- [13] 李书严,马京津,轩春怡,等. 1951—2008 年北京极端天气事件分析[J]. 气候与环境研究,2012,17(2):24-250.
- [14] 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.
- [15] Grumm R H. Beijing flood of 21 July 2012-Draft[R]. NWS State College Case Examples, 2012.
- [16] 孙军,谌芸,杨舒楠,等. 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,2012,38(10):1267-1277.