

# 北京 2006 年夏季接连两场暴雨的观测对比分析

赵 玮<sup>1</sup> 王建捷<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院,北京 100081; 2. 北京市气象局)

**提 要:** 利用北京地区高时空分辨率的地面自动站资料、多普勒雷达数据、卫星图像、风廓线数据以及 6 小时一次的 NCEP 再分析资料等,对 2006 年 7 月 31 日和 8 月 1 日接连发生在北京地区的两场暴雨做观测对比分析。结果表明:(1)7 月 31 日降水为典型的华北强低槽锋面影响下的北京大范围强对流降水,8 月 1 日降水为该华北低槽东移变为低压后的一次飑线影响下的北京部分地区强对流降水;两场暴雨大尺度环境条件相似,但与 7 月 31 日相比 8 月 1 日贯通南北的远距离水汽输送以及干冷空气与暖湿空气在北京地区的对峙已明显减弱,即形成全北京范围扰动的环境条件已经减弱。(2)两场暴雨的中尺度对流系统在形状、强度、移动路径等方面均有不同,但两场暴雨的中尺度对流系统的发展都与地面中尺度辐合线的发展有密切联系。(3)两场暴雨发生前北京局地对流层低层风场短时间变化特征不同,但低层偏东风和近地面东南风的出现,对于北京这两场暴雨的产生是比较关键的,预报中应该加以关注。

**关键词:** 暴雨 中尺度对流系统 观测分析

## Comparison and Analysis on Two Successive Torrential Rain Events over Beijing in Summer of 2006

Zhao Wei<sup>1</sup> Wang Jianjie<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;  
2. Beijing Meteorological Bureau)

**Abstract:** Comparison and analysis on two successive torrential rain events occurred in Beijing on 31 July and 1 August of 2006 were conducted using high spatial-temporal resolution data, such as auto-weather station (AWS) network data, Doppler radar data, wind profile data, satellite images and NCEP analysis data. It is revealed that the two successive torrential rain events are affected by the same large-scale trough at 500hPa from Hetao area of North China, but in their

本文得到科技部奥运科技专项课题《北京奥运短时临近预报实时业务系统研发》(2005BA904B05)的支持

收稿日期:2008年4月15日; 修定稿日期:2008年5月22日

different temporal phases. Although the two torrential rain events have similar large-scale environmental conditions, there are still slight differences in diagnostic results. For instance, the long distance transfer of moisture from south to north and the confrontation of cold air and warm air over Beijing area in the second event become weaker compared to those in the first one. Investigation using AWS and Weather Radar data shows that the two rainstorms are induced by mesoscale convective systems, developments of which are closely related to the evolutions of mesoscale convergence lines of surface. However, the features, such as the size, shape, track, radar reflectivity and lifetime of mesoscale convective systems between the two torrential rain events, are quite different. The occurrence and duration of easterly winds in planetary boundary layer (PBL) in Beijing few hours before the start of rainfall events seem essential to the formation of the torrential rainfalls, although vertical and temporal evolutions of easterly winds in PBL for the two events are different.

**Key Words:** torrential rain mesoscale convective system observational analysis

## 引 言

暴雨是北京地区夏季比较多见的高影响天气之一。受所处地理位置、地形和城市发展等多种因素的影响,北京地区的暴雨有其独特性和复杂性<sup>[1-3]</sup>,暴雨多出现在盛夏、降水量及暴雨次数虽然无法与南方地区相比,但是夏季降水常表现出的突发性、局地性、短历时和高雨强,对北京这样一个快速发展的超大城市的影响是多方面和严重的<sup>[4-5]</sup>。

暴雨作为国际国内研究热点和难点之一,长期得到气象学者的关注。我国气象学者经过长期不懈的努力,特别是近 20 年来通过大型科学试验和重点研究与攻关项目的带动,对我国暴雨的研究不断深入,尤其是对我国南方暴雨进行了比较持续和系统性的研究,在季风与暴雨、暴雨产生的环境条件与系统、高低空急流与暴雨、水汽收支与能量输送、多尺度天气系统相互作用、不同纬度间系统的相互作用、暴雨云系的卫星云图和雷达回波特征以及暴雨预报方法等方面取得了一系列成果<sup>[6-18]</sup>。这些成果不仅对认识暴雨、而且对指导预报实践都产生了积极作用。然

而,由于暴雨发生发展的机理相当复杂,它是多尺度天气系统相互作用的产物、由中尺度系统直接影响所致,而业务气象探测网对中尺度系统的探测能力仍然相当有限,因而关于暴雨中尺度系统及结构、对流发展的局地物理条件及其变化过程、暴雨发生发展机理等,仍然是暴雨研究中的挑战性难题。这些未解难题直接影响了对暴雨规律的认识和把握,从而成为提高暴雨预报准确率的瓶颈。

我国气象事业的发展和北京近些年筹备奥运气象服务工作的进展,极大推动了北京地区综合探测现代化建设的步伐和业务化进程,已经可以实时获取有着高时空分辨率的地面自动站资料、多普勒雷达数据、卫星云图和 TBB 资料、风廓线数据、微波辐射计资料等。这些资料不仅为北京地区暴雨预报预警,而且为暴雨观测分析和研究提供了有利条件和基础。本文即是应用时间分辨率 $\leq 1$ 小时的地面自动站、雷达、卫星和风廓线以及每 6 小时一次的 NCEP 再分析资料等,对 2006 年 7 月 31 日和 8 月 1 日北京地区接连两场暴雨进行观测分析,因为这两场暴雨具有一定典型性,它们对北京城区的影响正好分别是在上班早高峰期和下班晚高峰期,给城市交通

和市民正常工作和生活带来明显影响。本文期望通过较为细致的观测对比分析,揭示在同一个天气尺度系统不同阶段影响下的两场暴雨的特征和暴雨发生的大尺度环境条件及其差异,分析暴雨中- $\beta$ 尺度对流系统及其演变过程,并尝试为综合探测资料在夏季暴雨预报预警中的应用提供着眼点。

## 1 暴雨的特征

2006年7月31日和8月1日,北京地区先后下了两场暴雨。7月31日为华北地区较大范围的降雨过程,暴雨区覆盖整个河北中部至北京中南部地区,北京只是中尺度暴雨区的一部分;而8月1日暴雨的范围要小得多,是一场局地暴雨,主要落区为北京市区。本文关注的重点是北京地区的暴雨。地面降水观测显示,北京的两场暴雨分别发生在2006年7月31日08—14时和8月1日16—20时。从12小时累积降水量分布看,7月31日暴雨(此后简称第一场暴雨)过程华北中南部地区出现大范围较强降雨,北京出现全市性降雨、北京城区和整个南部郊区为大雨局部暴雨,最强降雨出现在城区的来广营( $70.6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),强降水分布在中南部呈片状;8月1日暴雨(此后简称第二场暴雨)过程北京市大部分地区出现了降雨,山前平原地区分布着东北西南向的窄长中雨区、其中局部点为大到暴雨,最强降雨出现在城区的青龙桥( $45\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),强降水沿山前平原呈点状分布(见图1)。

从地面逐时雨量图(图2a)上可以看到,第一场暴雨为一个相对较大雨团连续移动所致。雨团是自西南的房山穿过城区移到顺义和平谷的,移动路径呈西南—东北走向;雨团直径大约60km,移到城区时发展到最强、移到平谷后明显减弱。8—9时,雨团中有3个强降水中心,分别位于北京南部、石景山区和

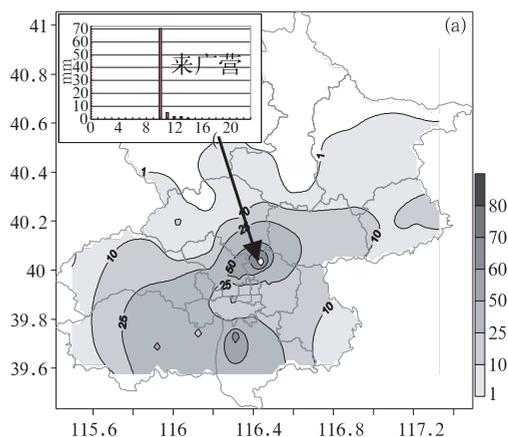


图 1a 2006 年 7 月 31 日 06—18 时  
12 小时(北京时)降水量

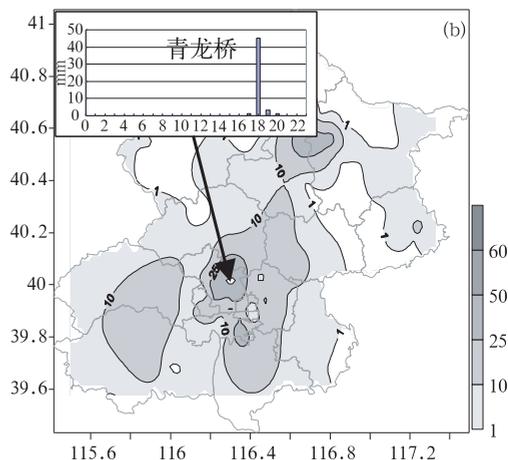


图 1b 2006 年 8 月 1 日 12 时至 8 月 2 日 00 时  
12 小时降水量图(北京时)

海淀区,以北京南部的雨量最大( $44.9\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ );9—10时,雨团中强降水中心移到朝阳区变为一个中心,位于来广营,出现了该场暴雨的最大小时降水(达到了  $70.6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ );此后雨团向东偏北方向移动,分裂成两个降水中心但强度明显减弱。雨团在北京的活动期为7月31日上午的08—12时、维持了大约4小时,追溯进京前后,该雨团的生命期约为5~6小时。

与第一场暴雨不同,第二场暴雨是孤立雨团移动或新生所致(图2b)。雨团直径较

小(在 20~30km),16 时首先在北京北部山前的怀柔出现了一个孤立雨团;17 时该雨团南移并加强,与此同时在西部山前门头沟出现一个孤立雨团,并且沿西部和北部山前一线产生了弱降水,在海淀区也有一个孤立小雨团出现;18 时山前平原区变成带状降水区,原在北部和西部山前的两个孤立雨团向东南移动,与海淀区发展加强的雨团呈东北—西南线状排列,该加强雨团造成青龙桥  $45\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  暴雨;之后上述 3 个雨团继续向东南移动并减弱,19 时以后进一步减弱消失或移出北京。几个雨团生成时间略有差异,但活动期在 8 月 1 日午后到傍晚的 15—20 时,雨团生命期大约为 3 小时。

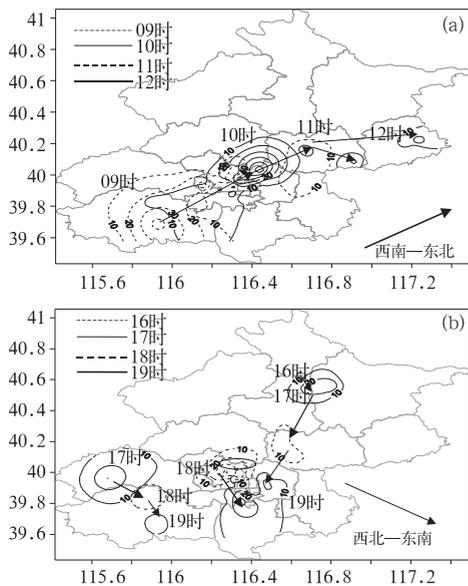


图 2 2006 年 7 月 31 日 09—12 时(北京时)(a)和 8 月 1 日 16—19 时(b)地面 1 小时降水量分布及雨团移动演变图

总的来说,这两场暴雨都有明显的中- $\beta$  尺度活动特征,历时短、强度大,最强降水出现在城区是其共同特点。与此同时,两场暴雨的中尺度特征具体表现又有明显不同。如:影响范围大小不同,第一场为面状、范围较大,由一个直径 60km 左右的较大雨团连续移动影响所构成;第二场为线状、范围相对

要小,是孤立小雨团(直径约 20~30km)移动或新生所产生。强降水区移动路径不同,第一场自西南向东北移动;第二场自西北向东南呈线状排列移动。影响时间和雨团生命史不同,第一场暴雨出现在上午,雨团生命史 5~6 小时;第二场暴雨出现在午后到傍晚,雨团生命史更短、约 3 小时。

## 2 暴雨大尺度环境条件及其差异

2006 年 7 月 31 日至 8 月 1 日北京地区先后两场暴雨,发生在相似的高空大尺度环流背景下,受 500hPa 高空西来槽不同发展阶段的影响。在第一场暴雨发生前的 7 月 31 日 08 时,500hPa 槽位于河套地区,北京处于低槽前部,即将受其影响。此时黑龙江西部到内蒙古东部地区有一个低压槽维持,西太平洋副热带高压主体呈块状分布,588 线北界基本维持在  $38^{\circ}\text{N}$  附近,大于  $592\text{dgpm}$  的闭合中心位于  $30^{\circ}\text{N}$  附近的长江下游到江南一带。850hPa 天气图(图 3a)上可看到,500hPa 河套低槽系统在对流层低层表现为一个闭合低压并伴有冷、暖式切变线;暖式切变线位于北京西南方向的河北南部,北京在暖切变线前部的弱偏东气流中;切变线的南边是一支强劲的低空西南急流,最大风速中心位于山东( $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。这支低空急流沿副高西部和北部边缘贯通南北,这显然对水汽和能量源源不断地从南海向华北输送十分有利。对应地面图上在  $110^{\circ}\text{E}$  附近有一近于南北向的冷锋,北京位于锋前暖区低压倒槽中。值得注意的是在 31 日 08 时,低压倒槽顶部石家庄到北京南部地区有一个中- $\beta$  尺度低压环流生成(图 3d),之后发展东移直接影响北京地区降水。在对流层高层,200hPa 有一支明显的高空急流,最大风速超过  $50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,急流核在  $45^{\circ}\text{N}$  附近,北京位于急流核入口区右侧,同时也是在低空急流核的左侧。7 月 31 日暴雨是

典型的华北低槽冷锋暴雨。

从天气图分析不难知道,在第一场暴雨到第二场暴雨间隔不到 30 小时里,中国大陆范围内的环流形势没有发生明显调整,500hPa 槽脊系统缓慢东移,其分布没有明显改变。暴雨发生前的 8 月 1 日 14 时,河套地区低槽移动到 116°E 左右的北京上空,并且切断出低压中心,高空冷空气已开始侵入北京(图 3b);850hPa 北京仍受低值系统影响,但已由暖切变控制变为低压槽控制,低空急流依然存在,最大风速中心往东北方向移动,北京虽还处于低空急流左侧但急流核位置已有所远离;200hPa 高空急流经向度加大,最大风速中心东移有所减弱。对应在地面图上,冷锋南压过北京,北京处于高压底部的高低压过渡区里,地面高压尚未控制北京。8 月 1 日暴雨则是华北低槽东移切断变为低压后的产物。将高中低层主要系统叠加在一张图上可以发现,两场暴雨都发生在有利的相似大尺度环境条件下,即北京处于 500hPa 低压槽前(或槽区)、位于高低空急流之间的高空急流核入口区右侧与低空急流核出口区,高空辐散、低空辐合,有利于动力抬升和低层能量输送的环境之中(图 3c)。

尽管两场暴雨的大尺度环流背景从天气图定性的角度看在整体上比较相似、差异不

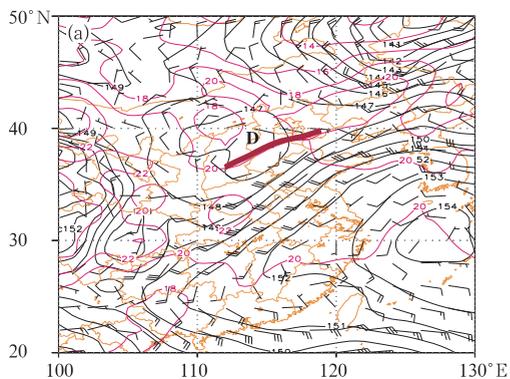


图 3a 2006 年 7 月 31 日 08 时(北京时) 850hPa 天气图

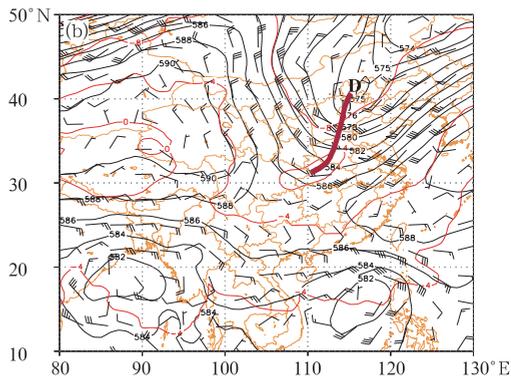


图 3b 2006 年 8 月 1 日 14 时(北京时) 500hPa 天气图

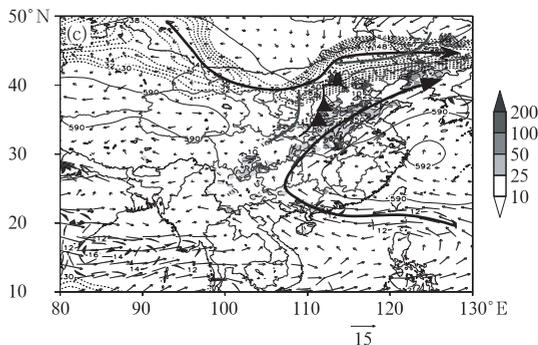


图 3c 2006 年 7 月 31 日 08 时(北京时) 高低空系统配置

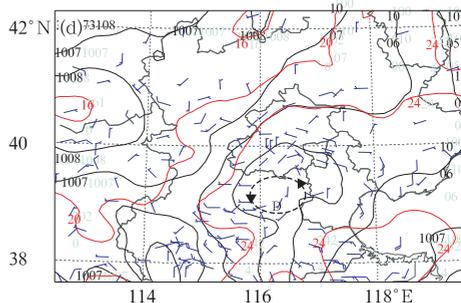


图 3d 2006 年 7 月 31 日 08 时(北京时) 地面天气图

是很明显,但是进行具体的物理量诊断时,却可以清晰地看到两场暴雨大尺度环境条件的差异、特别是低层暖湿条件方面的差异。如:在水汽通量的分布上,在第一场暴雨(7 月 31

日)存在一支贯通南北的水汽通道,使水汽沿着副热带高压外围从南海和台湾东南海面一带向华北输送;但在第二场暴雨时(8月1日)南北贯通一线的水汽输送通道不存在了,水汽的远距离输送明显减弱(图4a、b),这或许也是第二场暴雨持续时间比第一场暴雨短的原因之一。再看假相当位温  $\theta_{se}$  的分布。第一场暴雨时(7月31日08时),全北京区域位于850hPa能量锋区中,即处于低层冷与暖、干与湿交绥最明显的区域,容易产生扰动并得到发展而影响整个北京(图4c)。到了第二场暴雨时(8月1日14时),能量锋区已南压到河北南部一带并有所减弱,对于北京而言,产生大范围扰动所需的冷与暖、干与湿对峙的有利环境条件已明显减弱(图4d)。这从116°E假相当位温  $\theta_{se}$ 和相对湿度垂直剖面图上可以看得更清楚,7月31日08时,北京(40°N附近)所在之处锋区两侧暖湿空

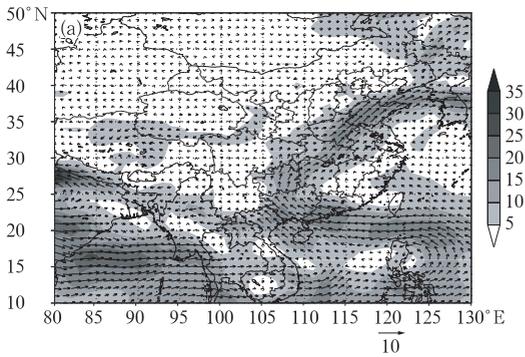


图4a 2006年7月31日08时850hPa水汽通量图

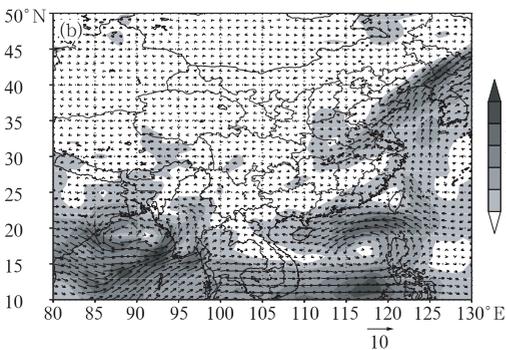


图4b 2006年8月1日14时850hPa水汽通量图

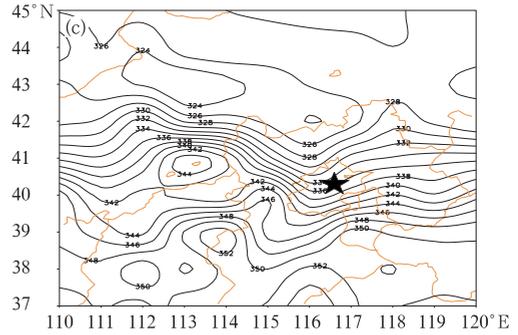


图4c 2006年7月31日08时850hPa假相当位温  $\theta_{se}$ 分布图(c)

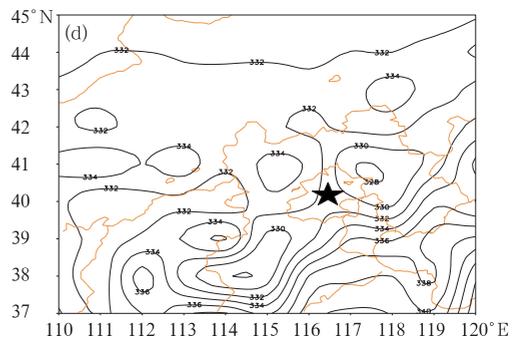


图4d 2006年8月1日14时850hPa假相当位温  $\theta_{se}$ 分布图(d)

气与干冷空气对峙明显,600hPa以下大气层结是对流不稳定的。8月1日14时,北京低层大气虽仍然是对流不稳定的,但锋区已南移,位于河北南部,高湿柱随着锋区一起移动到了北京以南地区(图略)。

综上所述,500hPa西来河套槽东移过程中的两个不同发展阶段,即加深的槽和切断为低压槽,分别是北京7月31日和8月1日两场暴雨的主要天气尺度影响系统。7月31日第一场暴雨是典型的华北低槽冷锋暴雨,它的大尺度环境场提供了有利暴雨发生的条件:较强的上升运动、充足的水汽输送以及不稳定的大气层结。8月1日,大尺度环流背景和动力条件虽与前一天有不少相似之处,但贯通南北的远距离水汽输送以及干冷空气与暖湿空气在北京地区的对峙已明显减

弱,即形成全北京范围扰动的环境条件已经减弱,第二场暴雨是低压槽控制下的对流活动的产物,而非全区域性的暴雨。

### 3 暴雨中尺度对流系统

#### 3.1 暴雨中尺度对流系统的云图特征

从大范围的卫星云图可以看到,7月31日02时在上游,500hPa河套低槽前有一条冷锋云系缓慢东移发展;与此同时河套南部到黄河中下游一带是西太平洋副高西北边缘的带状降水云系,此云系亦正好位于低层的能量锋区( $\theta_{se}$ 密集带)附近,与低层切变线相配合,一些大小不一、发展强烈的中尺度对流云团或复合体主要分布在河套槽冷空气和副高边缘暖湿气流近距离交汇的地带(图略)。7月31日早晨08时33分,随着河套槽逼近北京和低层切变线北移,槽前冷锋云系与副高边缘云带在北京西南上游的河北南部地区耦合,在两条云带的交汇处,一个新生的中尺度对流系统发展并随冷槽东移,在此过程中影响北京、造成第一场暴雨(图5,见彩页)。此后北京上空对流云系消散,副高边缘云带南撤。第二场暴雨发生前北京上空有小的对流云团发展,西太平洋副高西北边缘的带状云系从黄河中下游南移到黄淮地区(位于低层能量锋区附近)。与7月31日相比,8月1日北京地区上空为局地孤立对流云团,副高云系南撤,没有出现两条系统性云带交接的现象。

#### 3.2 暴雨中尺度对流系统的雷达回波特征

用北京南郊每6分钟一次体扫的SA新一代多普勒雷达资料对两场暴雨的中尺度对流系统的发展演变作分析诊断,发现第一场暴雨的中尺度对流系统是尺度为50~60km的块状对流系统,而第二场暴雨的中尺度对流系统是一条飚线。2006年7月31日早晨

7时07分,位于北京西南方向的河北涿州市和涑水县一带有零星对流回波生成发展,回波强度约40dBz。8时左右,这些零星对流回波合并发展,强度达到55dBz,成为水平尺度约为50km的对流回波系统,其前部已经进入北京南部,受地形影响,回波沿着北京西部山脉向东偏北方向前进,此时北京西山山前有多个孤立弱回波单体发展(图6a,见彩页),对应地面北京房山区南部、门头沟、昌平等区县出现零星降水。8时40分以后,该中尺度对流回波系统在前进过程中与山前对流单体回波连成一片,呈现出更有组织的发展,9时左右在回波图上呈现出一个横着的“人”字形回波(图6b,见彩页)。所谓“人”字形回波是与高低空影响系统相联系的,“撇”是低槽云系的反映,“捺”是切变线回波,是造成北京暴雨的主要云团。本文主要关注的是人字形回波的“一捺”,在其前进过程中不断有对流单体发展并且汇入其中,9时20分左右对流系统主体逐渐移动到海淀、朝阳区上空,强回波面积不断增大,水平尺度增长到60~70km(图6c,见彩页),低层风场为大片风向辐合区,9时到10时之间该对流系统缓慢移动,造成市区大暴雨,朝阳的来广营站9—10时降水量70.6mm。图6e(见彩页)是沿9时20分回波图上最强回波所做的剖面图,可以看到回波体的顶端发展到12km以上,大于50dBz的回波从8km左右高度一直伸展到地面,该单体还会继续发展加强。10时以后,对流系统东移减弱,11时以后北京城区上空剩下一些零碎的对流回波。

第二场暴雨发生前8月1日下午14时,北京北部山区首先有多个对流单体生成,随后对流单体发展下山,在15时27分,北部山前和西部山区多个孤立单体排成一线,这些对流单体或移动或发展(图7a,见彩页),在16时04分,北部怀柔—密云一带几个单体连成一线,最大回波强度达67dBz,此时西部

山前也有几个发展比较旺盛的对流单体逐渐连在一起。24 分钟后(图 7b, 见彩页), 在海淀区出现一个对流单体, 并且该单体在几分钟之内快速发展, 回波强度在 16 时 34 分由 50dBz 增至 64dBz, 对这个对流单体做剖面(图 7e, 见彩页)可以看到大于 55dBz 的回波从 8km 高度一直伸展到地面, 最强回波在 3km 高度达到 65dBz 以上, 说明这个单体发展是很旺盛的。此后北部和西部的对流带向这个新生单体移动, 在 17 时左右形成一条飑线(图 7c, 见彩页)。图 7f(见彩页)是沿飑线的排列方向剖面, 可以看到该飑线由多个对流单体组成, 这些单体的回波高度并不高, 大于 40dBz 的回波高度不超过 10km, 但是这些单体的回波强度较强, 多数单体的最大回波强度达到 60dBz 以上。18—19 时飑线移过北京, 移动方向西北—东南向, 给北京市区带来暴雨天气。

### 3.3 暴雨中尺度对流系统的地面观测特征

结合地面自动站逐时资料分析看, 7 月 31 日 8—9 时雷达回波在北京、特别是南部地区更有组织地发展, 是与图 3d 中石家庄到北京南部地面中- $\beta$  低压环流北部一侧风场辐合区的发展相联系。由图 8a 可知, 7 月 31 日 07 时, 北京西山山前形成了一条近南北向的中尺度风场辐合线, 辐合线的左侧是偏北风, 右侧是偏东风, 08 时, 中尺度辐合线向东移动, 辐合线上及其后部出现块状中尺度正变压和冷中心, 中心位于辐合线后, 这正是对流发展在地面要素上的表现。09 时, 中尺度辐合线移动到城区, 且辐合加强, 其后部中尺度正变压中心强度有所增强, 块状结构更为明显, 说明中尺度对流系统在 08 时到 09 时之间发展旺盛。10 时中尺度辐合线有所减弱, 11 时中尺度辐合线减弱消失。降水发生

后, 地面温度场上表现出降水的伴随降温现象, 冷中心与暴雨中心较一致。

对应地面温、压、风场可知, 8 月 1 日 16 时北京城区是一个暖中心, 而北部山区的温度要比城区低 8℃左右。强烈的温度差异引发热力对流, 在海淀区出现尺度很小的气旋性环流, 对应雷达回波在海淀区产生了一个强对流单体(图略)。17 时地面风场上有两条风场辐合线, 一条位于北部密云县区, 一条位于城区及以南。值得注意的是在密云县辐合线的后部有反气旋环流出现, 说明有中尺度高压产生, 配合变压场上有正变压出现。16—17 时温度场上表现出强烈的温度梯度, 有一条等温线密集带沿西南—东北向分布, 其后有几个小的温度低值中心紧随温度密集带移动, 在这段期间海淀区温度骤降。17—18 时, 两条辐合线合并成一条, 向东南方向移动, 其后部中尺度正变压呈带状且强度加强, 此时海淀和朝阳区有暴雨。对应温度场上出现伴随降温, 在海淀和朝阳区是一个低温中心, 19 时中尺度辐合线移出北京(图 8b)。

通过上述分析可知, 两场暴雨中尺度对流系统发生发展的相同之处表现在对流的旺盛发展均与地面中尺度辐合线的加强相联系, 辐合线上及其后部有正变压尾随辐合线移动。不同之处表现在:(1) 第一场暴雨的中- $\beta$  尺度对流系统生成于北京地区东面的冷锋云系和北京南面的暖切变云带近距离交汇处, 第二场暴雨是局地对流云团影响。(2) 第一场暴雨为块状中- $\beta$  尺度对流系统连续移动造成, 第二场的中尺度对流系统为一条飑线。(3) 第二场暴雨中尺度对流系统的雷达回波强度比第一场的低, 发展高度没有第一场的高, 这也可能是第二场暴雨降水比第一场降水量少的原因之一。

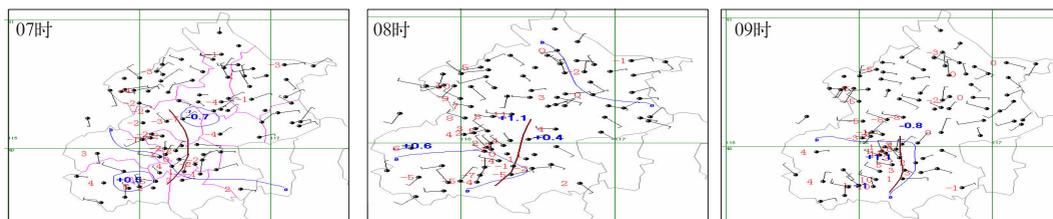


图 8a 2006 年 7 月 31 日 07—09 时(北京时)地面风场、1 小时变压场

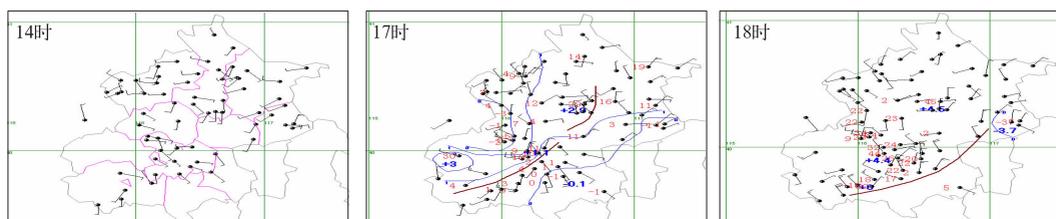


图 8b 2006 年 8 月 1 日 14 时、17—18 时(北京时)地面风场、1 小时变压场

## 4 局地低层风场变化对暴雨的影响

### 4.1 第一场暴雨低层风场特征

7 月 31 日和 8 月 1 日两场暴雨最大中心都发生在城区,利用城区海淀站风廓线(有效探测高度约 3.5km)资料,分析暴雨发生前后局地对流层低层水平风的垂直变化和时变特征,发现两场暴雨发生前对流层低层局地水平风的变化特征有明显不同,尽管两场暴雨的发生都与局地边界层内短时(数小时)偏东风的建立有关。

分析可知:第一场暴雨发生前约 4 小时(7 月 31 日凌晨 4 点左右),海淀局地对流层低层有偏东风开始建立,水平风从前期比较零乱的垂直分布状态向比较系统的偏东气流转变,风向随高度顺转,即本站对流层低层开始有一致的暖平流输送。偏东气流在 1500~1800m 和 300~600m 两个层次里表现尤为清楚,呈现上下两个东风大值层,其中 1500~1800m 层偏东风在暴雨发生前 1 小时(7 月 31 日早晨 7 时左右)迅速向上扩展接近 3000m,使偏东风垂直层在暴雨即将发生时变得更加深厚(图 9a)。海淀东偏南方向

直线距离约 32km 的南郊观象台风廓线也观测到上述低层偏东风发展变化的类似特征,说明低层东风的发生在水平空间上具有一定范围(中- $\beta$  尺度或者更大一些),应该是与低层一定尺度系统的演变相联系的。结合 850hPa 天气系统和地面中尺度系统进行分析,可以知道:第一场暴雨发生前数小时北京局地低层较深厚的一致偏东风的建立,特别是 1500m~1800m 偏东风大值层的发展,是 850hPa 位于北京南部的中- $\alpha$  尺度暖式切变线向北京逼近的结果,即 1500~1800m 东风层是对流层低层切变线北侧的系统性东风。而近地面偏东风大值层的出现则很可能是地面倒槽中石家庄到北京之间的中- $\beta$  低压环流(图 3d)的产物,即 300~600m 东风层的出现与局地环流有关。因为暴雨临近时这一地面中- $\beta$  低压环流系统的生成,正好使位于该环流中心北侧的北京南部地区(包括城区)出现偏东风,随着该中- $\beta$  低压环流的东移,海淀暴雨发生后风廓线图上近地面转为偏北风,似乎也佐证了这一点。

以上分析显示,在高低空有利的大尺度背景和系统配置下(图 3c),500hPa 河套西来冷槽东移过程中,7 月 31 日凌晨,槽前低层

850hPa 的中- $\alpha$  尺度暖式切变线由南向北京的逼近和地面倒槽中石家庄到北京之间的中- $\beta$  低压环流的生成(从风廓线观测估计,该系统可能具有一定垂直厚度,即在 600m 以内的近地面层都有表现),在时间和垂直空间上的耦合发生,一方面诱发了北京南部地区到城区一

带低层深厚的偏东风的发展和暖平流输送,使第一场暴雨发生前数小时局地低层能量积累明显增强、对流潜势加大;另一方面为北京第一场暴雨的发生提供了直接的中尺度动力强迫条件——850hPa 和近地面的中尺度辐合和正涡度,从而触发对流的发生。

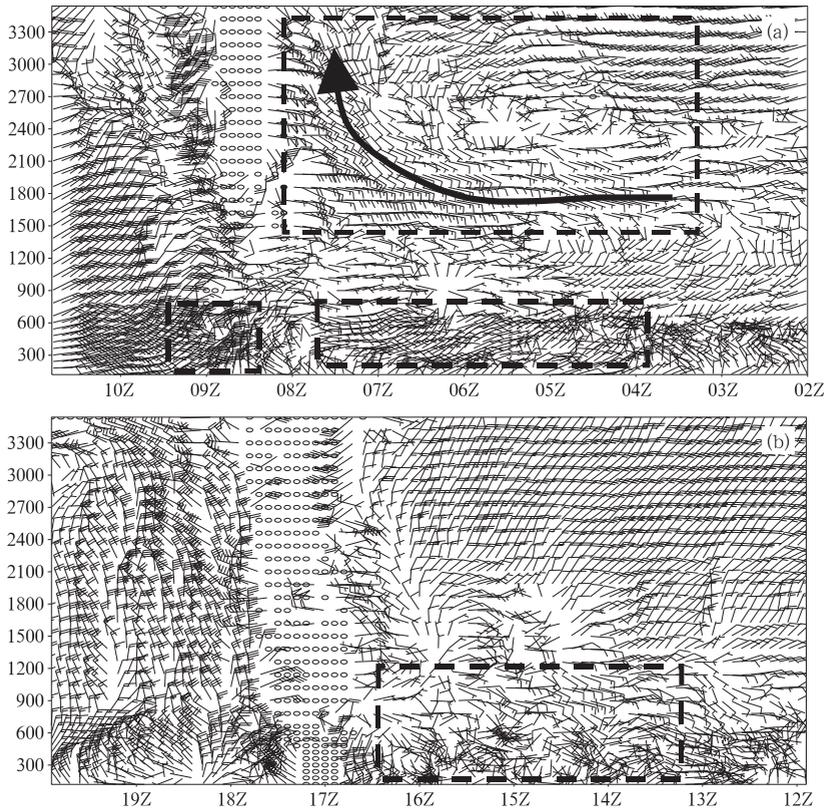


图 9 2006 年 7 月 31 日(a)、8 月 1 日(b)海淀风廓线图  
时间分辨率为 6 分钟,垂直高度单位:m

#### 4.2 第二场暴雨低层风场特征

分析表明,第二场暴雨(8 月 1 日)发生前数小时,北京局地低层也有偏东风建立。由图 9b 可看到,从第二场暴雨前发生 4~5 个小时(即 8 月 1 日中午),900m 以下的近地面层首先开始由偏北风主导转为以东南风主导,之后东南风逐渐向上发展达到 1200m 高度。与第一场暴雨发生前偏东风相比,第二

场暴雨东南风垂直厚度相对浅薄、风速相对较小、偏东风风向随高度的变化亦缺乏系统性。然而,第二场暴雨(临近时)低层东南风建立之前,连续十多个小时(从第一场暴雨之后的 31 日夜间至 8 月 1 日上午),对流层低层尤其是 850hPa 及其以下为偏北风或东北风,风向随高度始终是顺转的(海淀和南郊观象台风廓线表现出同一特征),表明北京地区对流层低层有持续暖平流输送,这显然会加

大对流不稳定(31日20时南郊观象台探空显示700hPa以上是冷平流),并为第二场暴雨的发生积累能量。

第二场暴雨前,东南风的出现发生在午后,主要表现在近地面层,风由平原吹向山区(图8b,14时)。这一表现以及东风出现前(31日夜间至8月1日中午)北京地区地面要素特征——北京处于地面高压前部低压倒槽后部的弱气压梯度区内(地面自动站观测显示,北京西部北部山前的平原地带基本上是一个“均压”区,气压差别很小);地面没有明显冷空气活动,平原与山区之间的温差主要是地形高度不同所造成的“自然”差别(按照干绝热递减率订正到同一高度时,平原与山区之间就表现不出什么温差了),似乎暗示第二场暴雨前东南风的出现与北京特殊地形条件(西部北部是山区,山前东南部为平原)有一定关系,即与山区和平原地表热力差异引起的“山—谷”风环流的日变化有关。进一步可以看到,东南风出现两小时后(大约下午16—17时),北部、西部山区迎风坡先后有孤立的对流系统(单体)发展和局地中雨发生(图2b),可见近地面东风的出现,对第二场暴雨早期对流的发生是有贡献的。

## 5 小结

本文通过对7月31日和8月1日北京地区接连两场暴雨进行细致的观测对比分析,得出以下结论:

(1) 500hPa西来河套槽东移过程中的两个不同发展阶段,即加深的槽和切断为低压槽,分别是北京7月31日和8月1日两场暴雨的主要天气尺度影响系统。第一场暴雨是典型的华北低槽冷锋暴雨,第二场暴雨是低压槽控制下的对流活动的产物,而非全区域性的暴雨。

(2) 这两场暴雨都有明显的中- $\beta$ 尺度活

动特征,历时短、强度大,最强降水出现在城区是其共同特点。同时,两场暴雨的中尺度特征具体表现又有明显不同,分别表现在影响范围大小不同、强降水区移动路径不同、影响时间和雨团生命史不同等方面。

(3) 两场暴雨均有有利的大尺度环境条件,较强的上升运动、不稳定的大气层结等。8月1日大尺度环流背景和动力条件虽然与前一天有不少相似之处,但是远距离水汽输送以及干冷空气与暖湿空气在北京的对峙比前一天明显减弱,即形成全北京范围扰动的环境条件已经减弱。

(4) 两场暴雨均由中- $\beta$ 尺度对流系统引起,第一场暴雨的中- $\beta$ 尺度对流系统是冷锋云系与副热带高压西北边缘暖湿云带近距离交汇处产生,发展影响北京,第二场暴雨的中尺度对流系统是冷涡内午后热对流引发的飏线。

(5) 通过雷达回波分析(配合地面温、压、风场信息)可知,第一场暴雨是由水平尺度在60km左右的块状中尺度对流系统自西南向东北连续移动产生,8—9时雷达回波在北京、特别是南部地区更有组织地发展,是与北京城区及南部地面中尺度辐合线的发展相联系的。随着中尺度辐合线的东移,雷达回波主体移动到城区,在9—10时旺盛发展,致使城区出现暴雨。第二场暴雨是线性中尺度对流系统——飏线自西北向东南方向移过北京造成的,16—17时对流的发展与地面中尺度辐合线的发展加强有关。伴随飏线过程,地面中尺度辐合线后部尾随中尺度高压,16—17时地面温度场表现出很强的温度梯度,海淀区降温明显。

(6) 分析可知,两场暴雨发生前的局地风场演变条件是不同的。但北京低层偏东风和近地面东南风的出现以及地面辐合线的形成,对于北京这两场暴雨的产生是比较关键的,预报中应该加以关注。

**致谢:** 感谢北京市气象局王迎春、孔荣、魏东, 中国气象科学研究院樊利强为本文提供资料和在数据处理方面给予的帮助。

### 参考文献

- [1] 华北暴雨编写组. 华北暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 1-12.
- [2] 中国科学院大气物理研究所集刊. 暴雨及强对流天气的研究[J]. 北京: 科学出版社, 1980: 117-161.
- [3] 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]. 暴雨及强对流天气的研究. 气象出版社, 1980: 1-14.
- [4] 何立富, 陈涛, 周庆亮, 等. 北京“7.10”暴雨 $\beta$ -中尺度对流系统分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 655-665.
- [5] 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学, 2006, 30(2): 221-234.
- [6] 陶诗言, 陈隆勋. 夏季亚洲大陆上空大气环流的结构[J]. 气象学报, 1957, 28(3): 234-247.
- [7] 孙淑清, 马廷标, 孙纪改. 低空急流与暴雨相互关系的对比分析[J]. 气象学报, 1979, 37, 36-44.
- [8] 丁一汇. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993, 1-25.
- [9] 吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 I 爆发地点[J]. 大气科学, 1998, 22, 470-480.
- [10] 薛纪善. 1994年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999, 68-69.
- [11] 王建捷, 郭肖容. 1996年初次华南暴雨过程的数值模拟及其分析[J]. 应用气象学报, 1997, 8(3): 257-268.
- [12] 陈红, 赵思雄. 第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究[J]. 大气科学, 2000, 24(2): 238-254.
- [13] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 气象出版社, 2001, 1-183.
- [14] 王建捷, 李泽椿. 1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 146-155.
- [15] 周秀骥, 薛继善, 陶祖钰, 等. ‘98华南暴雨科学试验研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 20-40.
- [16] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 675-691.
- [17] 倪允琪, 周秀骥. 我国长江中下游梅雨锋暴雨研究的进展[J]. 气象, 2005, 31(1): 9-12.
- [18] 陶诗言, 卫捷. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J]. 气象, 2007, 33(3): 10-18.

# 赵玮等：北京2006年夏季接连两场暴雨的观测对比分析

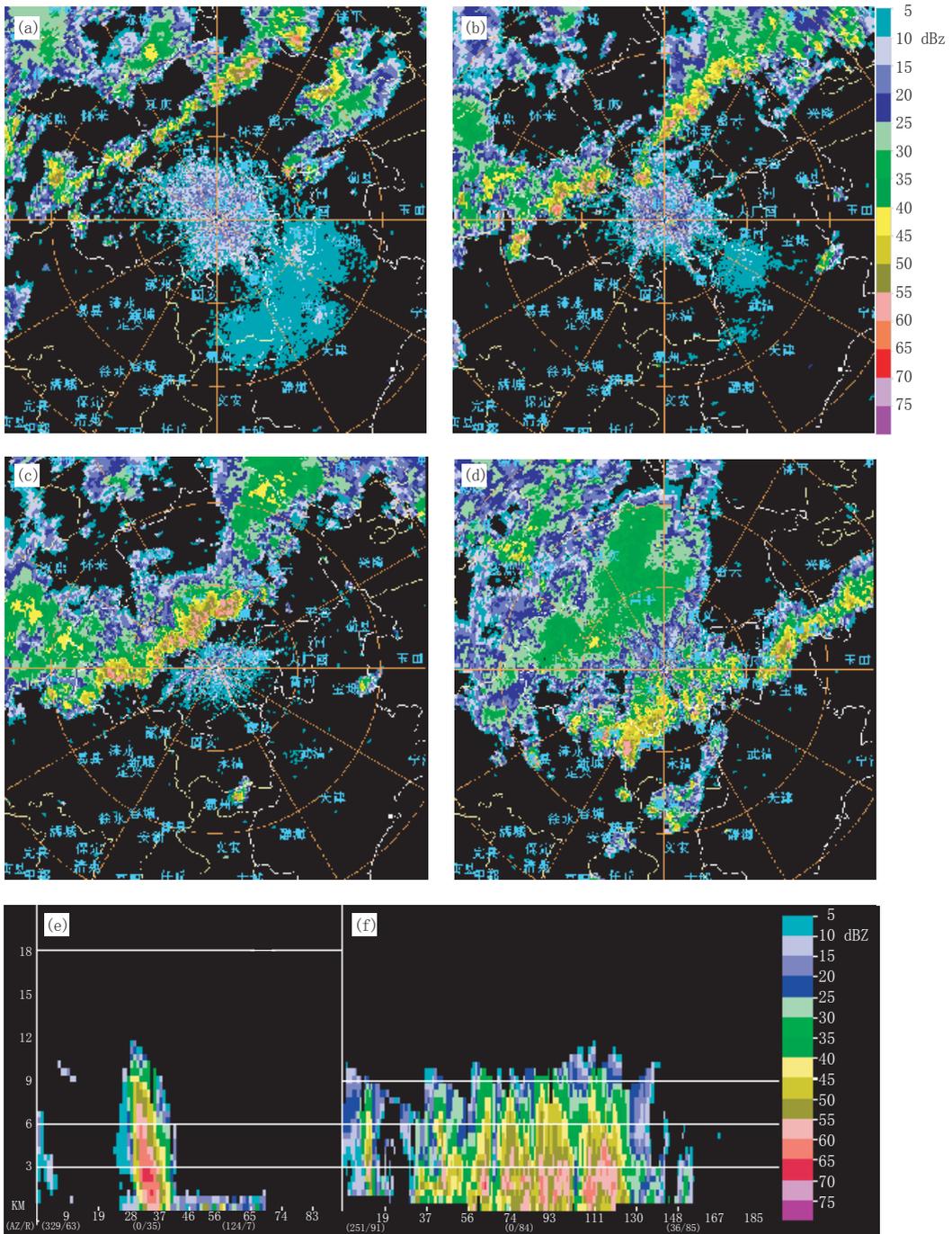


图7 2006年8月1日15:27(a)、16:28(b)、17:35(c)、18:59(d) 雷达1.5°仰角反射率因子演变和16:34分回波单体(e)、17:35与爬线平行方向(f)雷达反射率因子垂直剖面

# 赵玮等：北京2006年夏季接连两场暴雨的观测对比分析

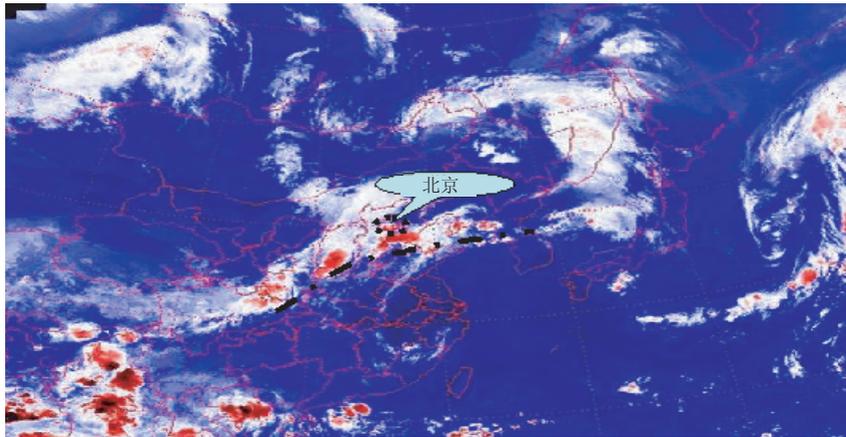


图5 2006年7月31日08时红外卫星云图（北京时）

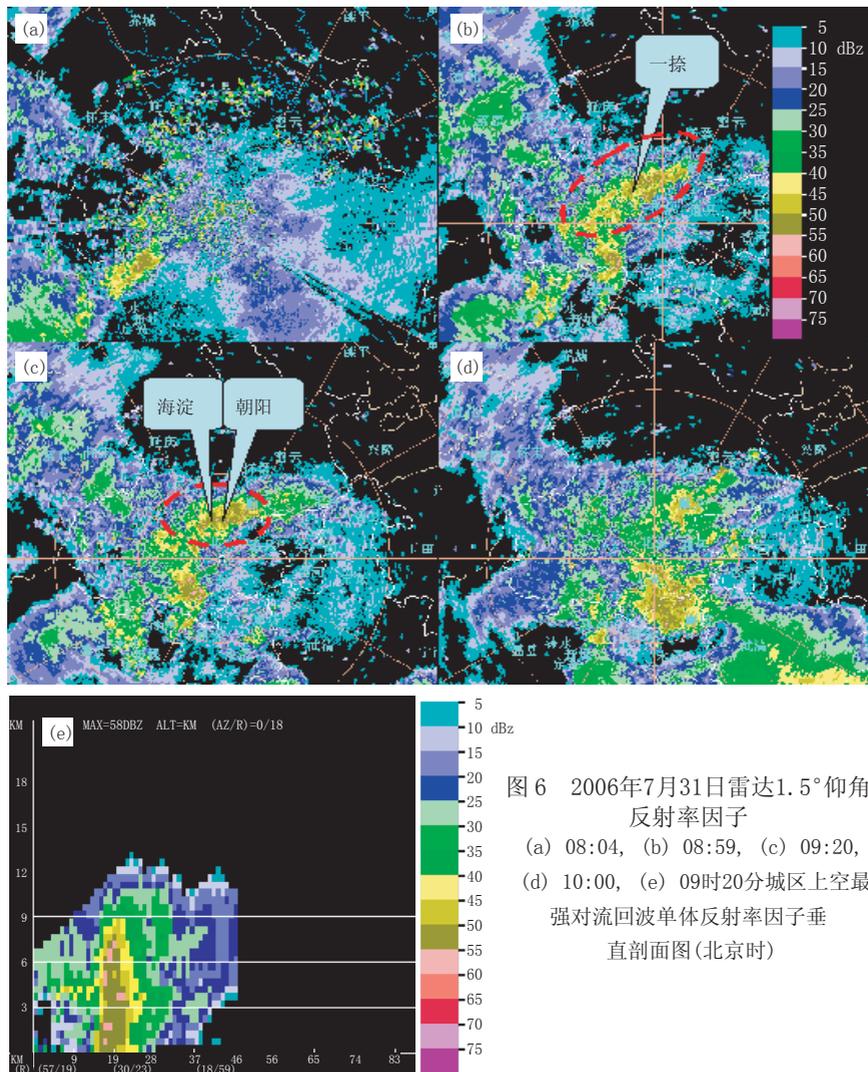


图6 2006年7月31日雷达1.5°仰角  
反射率因子

(a) 08:04, (b) 08:59, (c) 09:20,  
(d) 10:00, (e) 09时20分城区上空最  
强对流回波单体反射率因子垂  
直剖面图(北京时)