

代刊,何立富,金荣花.加密观测资料在北京 2008 年 9 月 7 日雷暴过程分析中的综合应用[J].气象,2010,36(7):160-167.

加密观测资料在北京 2008 年 9 月 7 日 雷暴过程分析中的综合应用^{*1}

代 刊 何立富 金荣花

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用多种加密观测资料,对 2008 年 9 月 7 日凌晨北京一次雷暴过程进行详细中尺度分析,研究其发生发展的物理机制。研究表明,强对流发生前,北京地区处于 200 hPa 急流轴右后部和 850 hPa 暖式切变南侧的西南气流里,加上地面暖湿空气输送使得大气不稳定能量积聚,这时只要有恰当的触发机制或系统,强对流就会发展起来;另外城市热岛效应形成的地面辐合线,以及地形辐合抬升后卷形成的边界层扰动,使得移入北京的对流系统再度发展成为强对流,造成北京城区强降水;此后,强对流系统地面高压前部的流出气流与山风相遇形成新的地面辐合线,从而诱发新的对流系统而造成北部强降水。

关键词: 中尺度对流系统,加密观测资料,发展机制

Synthetic Applications of Intensive Observations to Analysis of the 7 September 2008 Severe Convective Systems in Beijing

DAI Kan HE Lifu JIN Ronghua

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: Using multiple intensified observation data, detailed mesoscale and microscale analyses are undertaken on the severe convective systems in the early hours of September 7, 2008 over Beijing. Results show that, before the thunderstorms develop, Beijing lay in the right rear quadrant of 200 hPa jet streams and also in the southwesterly on the south side of the 850 hPa warm shear. Combined with the accumulation of unstable energy due to the low level warm-moist air advection, appropriate low level lifting mechanism or triggering would raise severe convective systems therein. Those MCSs, which moved eastward into Beijing, developed into severe convective systems again, after encountering the surface convergence line caused by urban heat island effect and the boundary layer disturbance caused by uplift and back roll of the topographic convergence, leading to a torrential rain event in the urban area of Beijing. Moreover, in northern Beijing, new thunderstorms were triggered by the surface convergence line, which was formed by the colliding between the outflow in front of surface high and the mountain breeze.

Key words: mesoscale convective systems, intensive observations, developmental mechanism

引 言

随着大气探测手段的不断丰富和发展,尤其是

利用北京 2008 年奥运会与残奥会举办的契机,在北京地区及其周围形成常规观测、加密探空、双星观测、自动地面站、多普勒雷达、风廓线雷达、闪电定位和 GPS 水汽反演等多种手段的密集的监测网络。

* 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY200706042)资助
2009 年 9 月 9 日收稿; 2010 年 1 月 18 日收修定稿
第一作者:代刊,从事中尺度天气分析和涡旋动力学研究. Email:daikan1998@163.com

近年来,越来越多的气象工作者投入到这些新资料的应用中,有力促进了北京地区强对流天气的研究和业务预报能力。如陈明轩等^[1]、王令等^[2]利用多普勒雷达资料得到北京地区的强对流雷达回波特征;郑栋等^[3]利用 M-LDARS 闪电定位系统分析了北京及其周边地区的闪电时空分布特征;李建华等^[4]、王飞等^[5]给出北京地闪活动与雷达回波的对应关系;古红萍等^[6]展示了边界层风廓线资料在北京夏季强降水天气分析中的应用;廖晓农等^[7]探讨了14时探空在改进北京地区对流天气潜势预报中的作用;楚艳丽等^[8]应用地基 GPS 水汽资料研究北京“7.10”暴雨过程等。

上述工作都是应用一种或对比两种非常规资料来研究强对流天气过程,是新资料应用的基础。但作为天气预报员,更需要对更多类型(包括常规和非常规)资料的综合分析能力,以获得完整的天气过程的物理图像,从而做出更准确的天气预报。因此如何融合多种观测资料变得很重要。这方面的工作才刚起步,如何立富等^[9]采用 NCEP 分析资料、自动站加密资料、逐时云顶亮温和多普勒雷达资料对北京2004年7月10日中尺度系统的发生发展、结构与成因进行综合分析;郭虎等^[10]和吴庆梅等^[11]使用多普勒雷达、地面自动站、垂直风廓线、微波辐射资料及 GPS 水汽分布等资料分别对2006年7月9日和24日的北京局地大暴雨天气进行了精细中尺度分析。

2008年北京奥运会及残奥会期间,正值华北汛期,强对流天气多发。另外由于奥运气象保障的需要,北京地区建设了较为密集的天气监测网络,非常规资料丰富。因此选取2008年9月6日残奥会开幕式之后,次日凌晨北京出现的一次雷暴过程作为分析对象,综合多种观测资料获取这次过程的完整物理图像。

分析所使用的资料包括:间隔1小时的加密观测降水资料;间隔半小时的 FY-2C 和 FY-2D 卫星观测云顶黑体亮温(TBB)资料,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$;每日4次的 NCEP 分析资料,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;增加了14、17、02时的北京观象台加密探空资料;间隔6 min 的多普勒雷达基数据;10 min 累积闪电定位;间隔5 min 地面自动站观测;海淀站6 min 间隔的垂直风廓线资料。

1 降水实况及天气背景分析

尽管基本站24 h 累积降水量显示,9月6日08时至7日08时(北京时,下同)北京观象台为中雨量级的19 mm 降水,但部分加密自动站观测站点达到暴雨量级,表明此次降水具有较强的局地性。降水从7日02时开始,强降水区主要分布在北部山区和城区南部,至08时的6小时累计降水量一般为20~60 mm。最大降水量出现在世界公园,达66.3 mm。

从逐小时加密观测降水分布来看(如图1),此次降水过程主要有4个雨团活动:一个雨团在北部山区生成,并东移发展,05时至06时达到最强盛阶段,其后减弱移出北京;一个雨团从门头沟以西移入北京城区,04时至05时最强,其后在朝阳区消散;另外两个雨团在房山地区发展,而前一个雨团东北移动是引起南部城区强降水的主要系统。

利用 NCEP/NCAR 分析资料,分析强对流发生大气背景特征(图略)。结果表明,在内蒙古东部至辽宁上空200 hPa 存在风速大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流轴,而北京恰好处于该急流轴的右后部,这种高空辐散配置非常有利于低层对流的发展。在500 hPa 位势高度场上:中高纬为两槽一脊稳定形势,其中内蒙古北部高空槽有利于高纬冷空气从中高层南下,增加北京地区的层结不稳定性;新疆深槽底部有高原槽东移,该高原槽9月5日就在西藏西部生成并东移发展,进入河套以西之后受蒙古高压脊和副热带高压的共同阻挡而横摆,然而其槽前 MCS 在副高边缘气流的引导下继续东移,到达北京地区后再度发展而造成雷暴天气;低纬副热带高压从9月5日开始西伸北抬,至9月7日02时588线西脊点伸展到 95.5°E ,而北边界达到 36.3°N ,副高的这种形势更有利于北京地区的水汽输送。850 hPa 风场上,北京位于暖切变南侧的西南气流里,为产生对流的典型天气形势。地面气象场上,9月7日02时北京以南有地面倒槽存在,河北北部有一条东西向的湿度锋区,北京位于其南侧的大湿度区内,并且近地面吹南风,表明已具备对流发生的低层水汽条件。

进一步利用北京观象台2008年9月6日14时至7日02时的加密探空资料分析强对流发生前的大气物理条件,结果表明:(1)6日14时有正不稳定能量区存在(图2a),但自由对流高度较高(约700 hPa),其对流有效位能(CAPE)为 $2032 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,此后CAPE

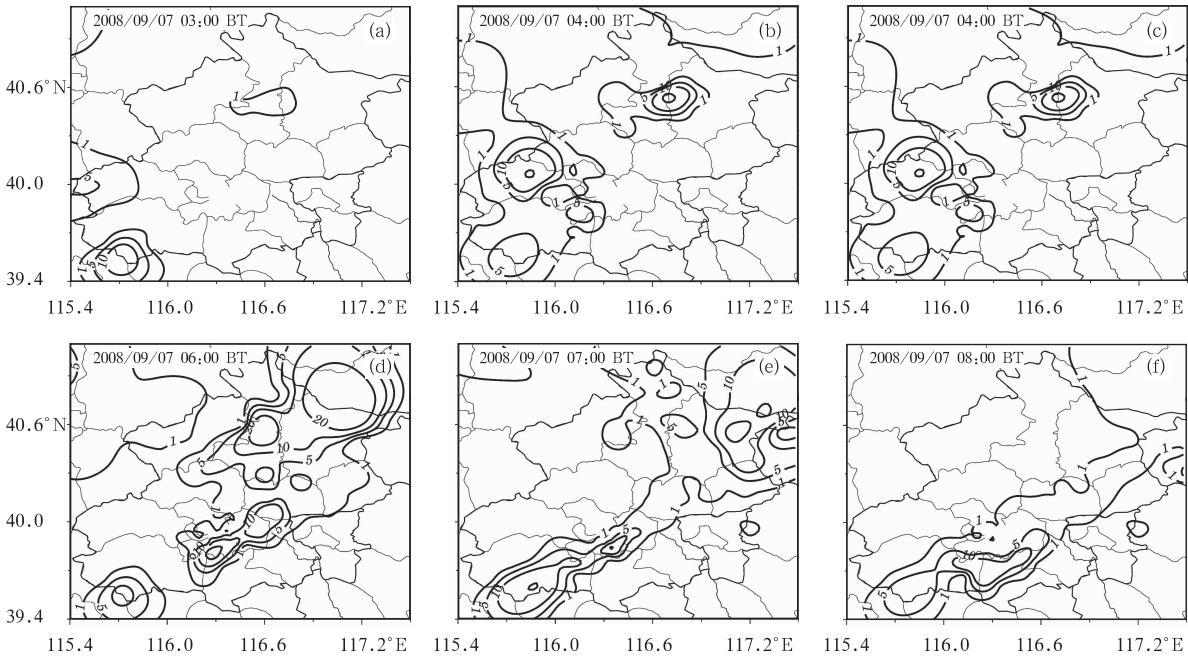


图 1 2008 年 9 月 7 日北京地区雷暴天气过程逐小时雨量图(单位: mm),等值线分别为 1、5、10、20 mm
(a)7 日 0200—0300,(b)7 日 0300—0400,(c)7 日 0400—0500,
(d)7 日 0500—0600,(e)7 日 0600—0700,(f)7 日 0700—0800

Fig. 1 Hourly precipitation during severe rain period of thunderstorms in Beijing on September 6, 2008
(unit: mm). Contour values are 1, 5, 10 and 20 mm, using Beijing Time (GMT+8) all this paper
(a) 0200—0300 BT, (b) 0300—0400 BT, (c) 0400—0500 BT,
(d) 0500—0600 BT, (e) 0600—0700 BT, (f) 0700—0800 BT

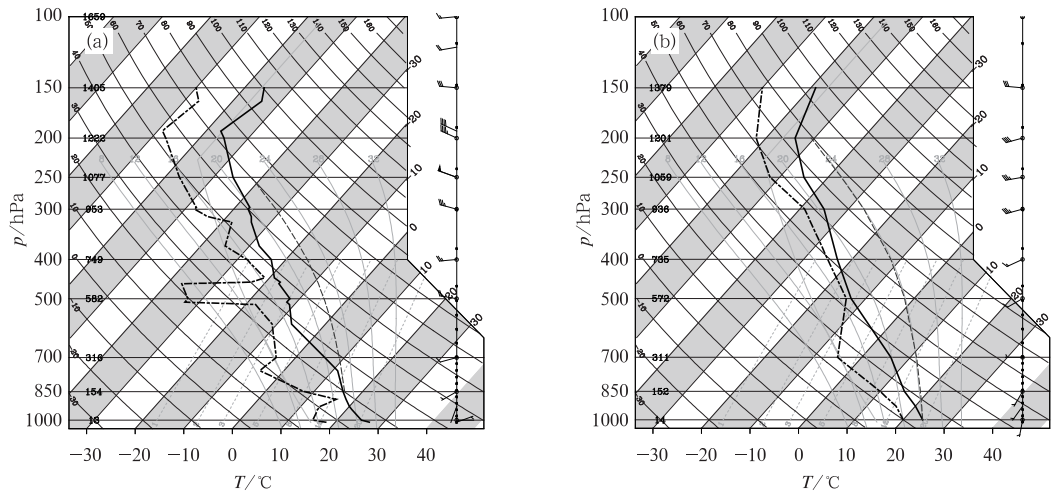


图 2 2008 年 9 月 6 日 14 时(a)和 7 日 02 时(b)北京观象台加密探空 Skew-T 图
Fig. 2 Skew-T figures of intensive sounding observations at Beijing Observatory.
(a) 1400 BT on September 6, 2008, (b) 0200 BT on September 7, 2008

值逐步递增,17 时和 20 时分别为 2357、2894 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,至 7 日 02 时达到 3361 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2b);
(2)6 日 14 时 925 hPa 至 700 hPa 层为对流抑制能量,有利于不稳定能量在低层积聚,此后对流抑制能

量减小,至 6 日 20 时自由对流高度也下降到 850 hPa 附近(图略);(3)分析整层湿度的分布和演变情况,850 hPa 以下 6 日 14 时至 7 日 02 时低层的比湿逐渐增大,而 700 hPa 附近有相对湿度较低的干空

气,这种上干下湿的配置有利于低层对流不稳定的维持和发展;(4)925 hPa 和 850 hPa 从 6 日 17 时至 7 日 02 时一直吹西南风,且 925 hPa 的风速逐渐增大(7 日 02 时达到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),至 700 hPa 以上偏西风为主,且随高度增加风速迅速增大(图 2),该配置有利于低层水汽输送入北京地区,并且垂直风切变的存在能使对流更好发展。

2 中尺度系统活动的云图分析

由前述中尺度雨团演变分析可以看到,中尺度对流系统(MCS)的活动应是导致此次强降水过程的直接系统。通过高时空分辨率的云顶亮温(TBB)资料,给出 MCS 的活动情况。9 月 5 日 00 时至 7 日 12 时的逐半小时 TBB 资料显示(图略),此次影响北京的 MCS 最初于 5 日 00 时在青藏高原北部生成,并在中纬环流和副热带高压的共同引导下向东移动,其间经历发展、减弱和再发展的阶段,至 7 日 02 时到达北京西侧。

图 3 给出 MCS 进入北京地区整个过程的活动演变情况。7 日 03:00(图 3a),主要关注 3 个 MCS 的活动,分别为北京以西位于河北省的对流云团 A,房山区的对流云团 B,和北部山区的对流云团 C。至 7 日 04:00(图 3b):云团 B 向东北方向移动到城区,其强度增强,并与东移的云团 A 合并;同时北部山区云团 C 发展起来。7 日 04:30(图 3c):云团 B 进一步发展,低于 -50°C 的云顶形成直径约 45 km 的准圆形;云团 C 发展更旺盛,云砧形状表现更明显。7 日 05:00(图 3d):云团 B 和 C 已经连接合并起来,强度变得更强(出现低于 -55°C 的云顶温度),正是该合并云团造成 05 时至 06 时北部山区的强降水;另外,又有对流云团 D 在门头沟以西的河北省发展起来。7 日 05:30(图 3e):云团 C 继续向东北方向移动,而 D 东移入门头沟区。7 日 06:30(图 3f):云团快速向东北方向移动与 C 连接起来,而云团 C 的主体已移出北京;另外大兴区有强度较弱的对流云团 E 发展。

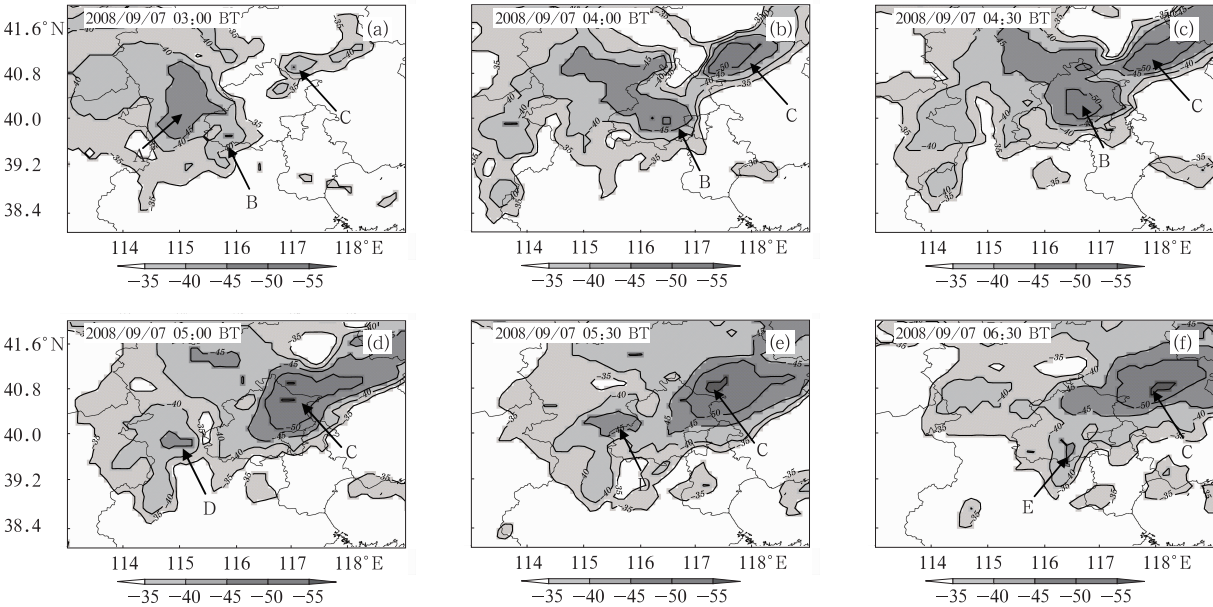


图 3 2008 年 9 月 7 日 02 时至 08 时云团的 TBB 演变图(单位: $^{\circ}\text{C}$)
(a)03:00;(b)04:00;(c)04:30;(d)05:00;(e)05:30;(f)06:30

Fig. 3 TBB (unit: $^{\circ}\text{C}$) evolution from 0200 to 0800 BT September 7, 2008
(a) 0300 BT, (b) 0400 BT, (c) 0430 BT, (d) 0500 BT, (e) 0530 BT, (f) 0630 BT

可以看出,此次雷暴过程影响北京的云团来源主要有两种:一种是由河北省东移入北京(云团 A、B、D、E),另一种是在北部山区直接生成发展(云团 C)。单个对流云团的发展,以及两个云团的合并是造成降水增强的主要原因。此外值得注意的是,若对比 TBB 低值区和强降水区位置,可以发现同一时

段两者并不重合,一般强降水区位于 TBB 低值区的后部,其主要原因是对流云顶受高层气流引导而比低层对流云区移动快,而强降水与低层强对流区的对应关系更好(可以通过后面的雷达回波分析看出)。从另一个侧面也反映出垂直方向上存在着较强的风速切变,且对流云顶可以较好的指示低层对流区的移动。

3 强对流的中尺度分析

雷暴天气发生和发展需要具备 3 个基本条件:大气层结不稳定,相对暖湿的低层水汽条件和对流触发机制^[12]。从前面的大尺度天气背景分析可以看到,至 7 日 02 时,不稳定层结和低层水汽条件已经具备,只要有合适的触发机制,对流就会生成或发展起来。本节将利用更高时空分辨的雷达、闪电、自动站和风廓线资料来分析对流系统的发生、发展的演变过程,并讨论其触发机制。

3.1 对流系统的雷达回波及其闪电特征

分析造成强降水的强回波活动演变。如图 4,给

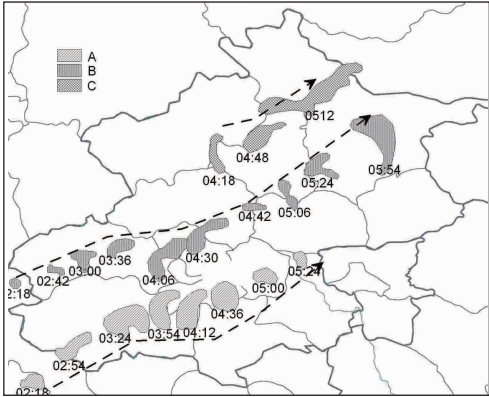


图 4 2008 年 9 月 7 日凌晨北京强雷暴过程 3 个对流强回波区演变示意图
图中阴影为回波 ≥ 45 dBz 区域,箭头为移动方向,标注为时间
Fig. 4 Evolutions of Doppler radar echoes of three convective systems in the early hours of September 7, 2008. Shadow shows the ≥ 45 dBz composite reflectivity area. Arrow indicates the path of echo. Label is Beijing Time

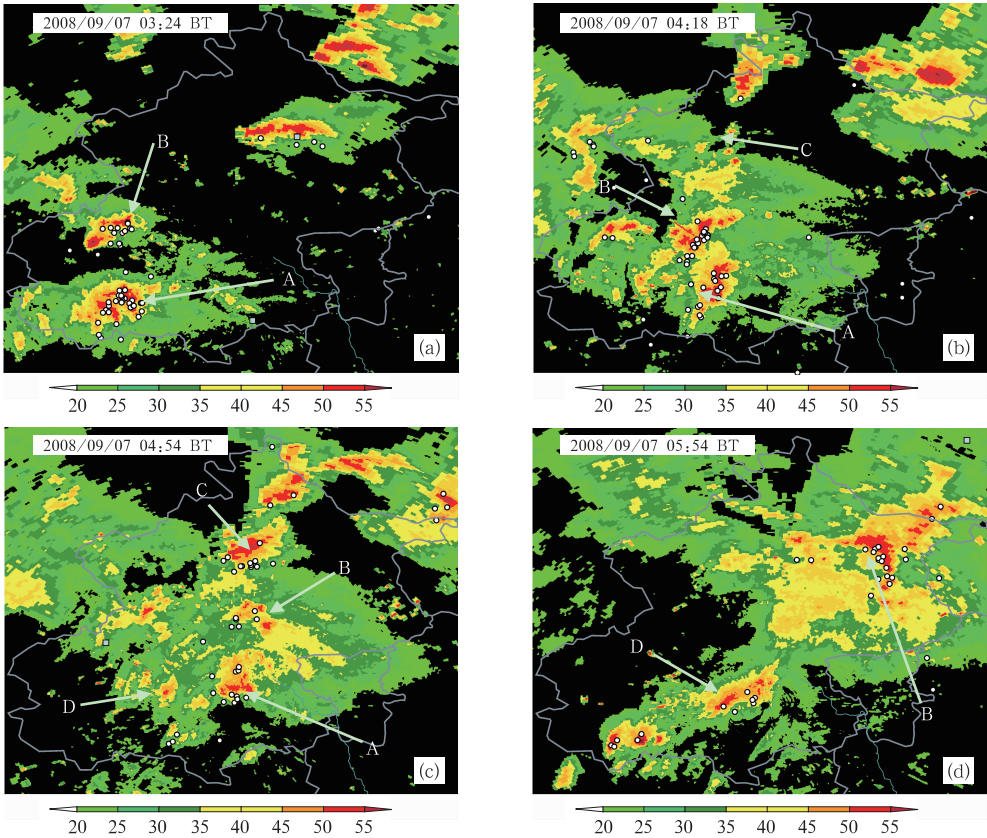


图 5 2008 年 9 月 7 日凌晨北京强对流的 10 分钟闪电定位和南郊多普勒雷达组合反射率(单位: dBz)叠加图
图中○表示负闪电,□表示正闪电。(a)03:24;(b)04:24;(c)04:54;(d)05:54
Fig. 5 The Doppler radar composite reflectivity factor (unit: dBz) and 10 min cumulative lightning detections in the early hours of September 6, 2008. Symbol ○ is negative lightning, and □ is positive. (a) 03:24 BT, (b) 04:24 BT, (c) 04:54 BT, (d) 05:54 BT

出 3 个主要对流系统的活动演变示意图。总体上,3 个对流系统的移向都是西南至东北向,其中 A 和 B 是从河北移入北京,而 C 直接在北京北部生成。对流系统 A 约在 9 月 7 日 02:54 移入房山区,并逐渐加强(图 4 和图 5a),03:54 进入北京城区,于 04:30 发展最旺盛,之后逐渐减弱消失。该系统直接造成南部城区 04 时至 05 时的强降水。对流系统 B 于 02:30 移入门头沟区,并发展加强,04:06 进入海淀区后强度达到最强(图 4 和图 5b),之后继续向东北方向移动并减弱,至 04:42 强度最弱,而后再度发展加强,05:24 进入密云县造成强降水。对流系统 C 于 04:18 时在怀柔西南部生成,之后东北移动并发展加强,在 05:00 与北侧移入北京的强回波连接起来形成回波带,造成 05 时至 06 时北部山区的强降水。另外在对流系统 A 减弱时,04:54 其西侧又生成对流系统 D(图 5c),该系统发展加强再次在南部城区造成强降水(图 5d)。

分析对流系统的闪电时空分布特征。如图 6,此次雷暴过程以负闪为主(占总量的 95.4%),闪电最强时段发生在 04 时至 05 时,与强降水和强回波时段有较好对应关系。对于闪电的空间分布(如图 5),对流系统 A 和 B 是闪电的主要来源。负闪频率与雷达回波有较好的对应关系,高频率负闪主要分布在回波强度 ≥ 40 dBz 的区域。但需注意两者不是一一对应关系,即强回波区不一定有高频率闪电。

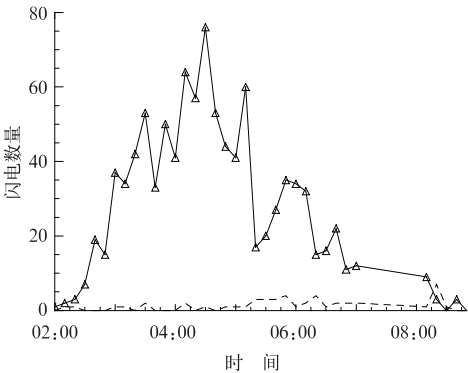


图 6 2008 年 9 月 7 日 02 时至 09 时北京地区闪电数量逐 10 分钟演变图
图中虚线为正闪,实线为负闪
Fig. 6 The time series of the number of 10 min cumulative lightning.
Dashed (solid) line is negative (positive) lightning

3.2 对流系统的触发机制

在环境条件具备的前提下,强对流的发生、发展、移动和衰弱主要取决于低层触发机制。及时准确地

分析各种强对流触发机制是预报雷暴天气过程的关键。本节主要利用高时空分辨率的自动站和风廓线观测资料来分析此次雷暴过程的主要触发机制。

分析地面风场演变:6 日 18:00(图略),北京近地面为一致的南风或西南风;至 7 日 01:55(图 7a),北京城区为低压中心,有一条地面辐合线西南至东北向贯穿城区和顺义(图 7a 粗实线);随着强对流系统 A 和 B 进入北京城区(图 5b),配合地面高压的移动(图 7b),高压前部存在阵风锋(图 7b 粗虚线);至 05:10,北部的两高压之间出现西北至东南向的辐合线,城区的西部出现高压舌后部流出气流与山风之间辐合线(图 7c 粗实线);到 05:55,配合对流系统 D(图 5d),城区为高压中心所占据,而北部辐合线依然存在。

从上面分析可知,地面辐合线和阵风锋是影响本次过程的主要触发机制。如图 7a,对流系统 A 进入北京后沿该地面辐合线移动,并在城区南部遇到辐合中心从而发展更为强盛,造成强雷暴天气。进一步分析该辐合线形成原因:从地面温度场上看(图 8a),强降水发生前北京市区温度比周边高 3~4℃,具有明显的热岛现象;该热岛效应使城区出现低压中心(图 7a),进而使南边的暖湿气流与北边的山风在城区辐合,形成地面辐合线,这与江晓燕等^[13]的研究结果一致;强降水发生后,该热岛效应消失(图 8b),地面低压为雷暴高压所替代,辐合线也随之消亡。当强对流系统进入北京市区之后,其配合地面高压前部的流出气流与前方风场形成的地面辐合线,是对流系统 C 和 D,以及 B 再发展的主要触发机制。

风廓线海淀站位于对流系统 B(图 4)的移动路径上,下面利用风廓线资料进一步探讨其演变过程。如图 9,在对流系统 B 发展之前,02:00 至 03:00 边界层 600 m 以下为东南风(风速 ≥ 12 m·s⁻¹),600 m 以上为西南气流。低空风速高值区的存在非常有利于暖湿空气的输送,此外风垂直切变也有利于对流的发展。至 03:00 之后边界层出现扰动(图 9 中黑色矩形所示),按照郭虎等^[10]和段丽等^[14]提出的概念模型,该扰动是由于平原东南气流受山脉的阻挡而抬升后卷形成,400~600 m 后卷的偏西风与平原的南风(或西南风)辐合使得对流系统 B 进一步加强。在 03:30 至 04:30,海淀站进入对流 B 的回波范围内,低层风速反而逐渐减弱。04:30 之后,低层转为对流系统后部的较强偏西风入流。

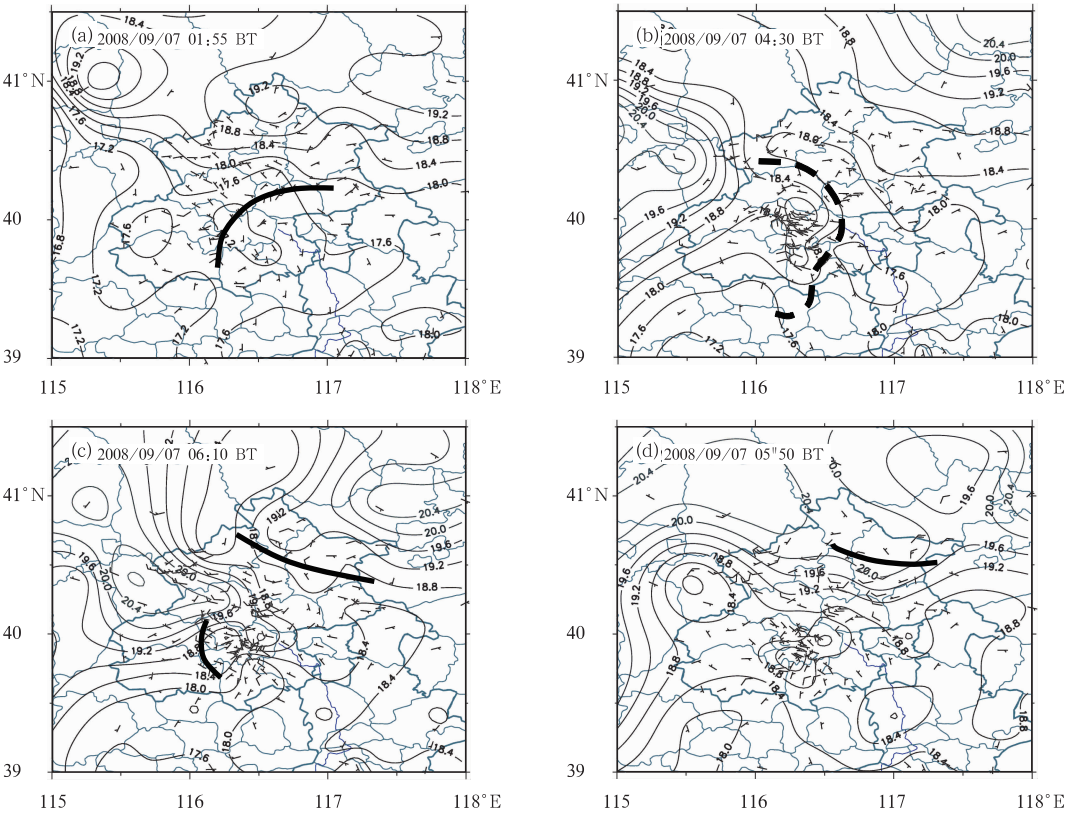


图 7 2008 年 9 月 7 日凌晨北京强对流过程的 5 分钟间隔地面自动站观测资料分析
(图中等值线的标值为海平面气压减 1000 hPa,图中粗实线为地面辐合线,粗虚线为阵风锋)

(a)01:55;(b)04:30;(c)05:10;(d)05:50

Fig. 7 Analysis of observations from AWS at five-minute intervals. Contour lines are sea level pressure, whose labels are observation value minus 1000 hPa on September 7, 2008
Thick solid (dashed) line shows surface convergence line (outflow boundary)

(a) 01:55 BT, (b) 04:30 BT, (c) 05:10 BT, (d) 05:50 BT

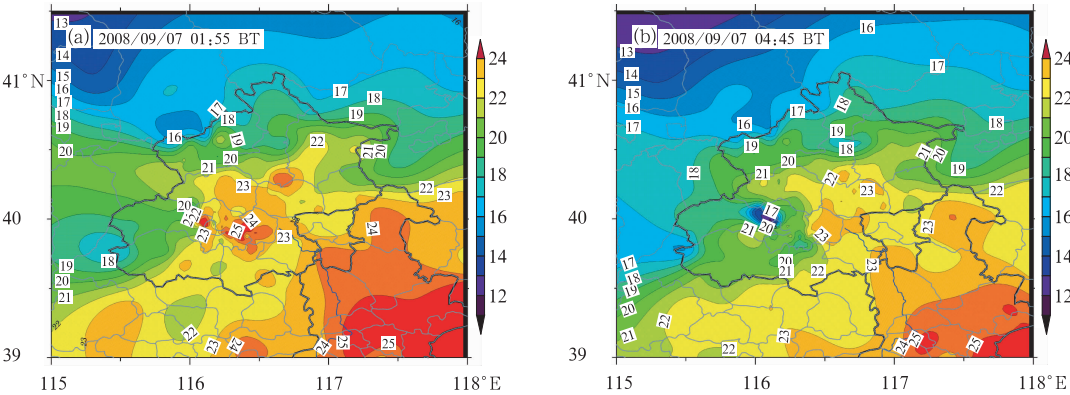


图 8 地面自动站观测温度(单位:℃)分布

(a)2008 年 9 月 7 日 01:55;(b)2008 年 9 月 7 日 04:45

Fig. 8 The distribution of surface temperature (unit: °C) from AWS on September 7, 2008
(a) 01:55 BT, (b) 04:45 BT

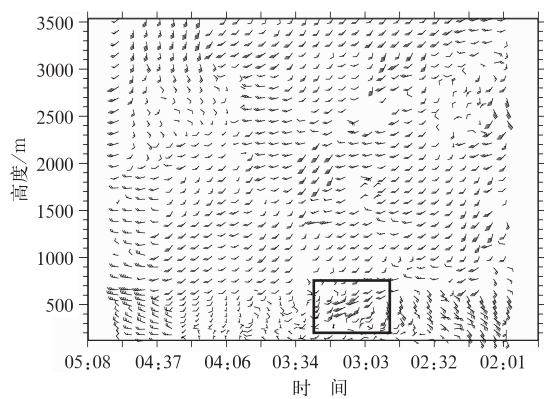


图 9 2008 年 9 月 7 日 02 时至 04 时
海淀站 6 分钟间隔风廓线图
黑色方框表示边界层扰动时段

Fig. 9 Wind profiles at Haidian station every 6
minutes from 02:00 to 04:00 BT
on Sep. 7, 2008.
The black rectangle shows the period of
boundary disturbance

4 结 语

随着新观测手段的不断出现,天气预报员面临未有的新挑战和新机遇。本文利用奥运期间多种加密观测资料分析了 2008 年 9 月 7 日凌晨北京一次雷暴过程的发生发展机制,得到如下结论:

(1) 北京处于 200 hPa 急流轴右后部、850 hPa 暖切变南侧的西南气流里,加上地面暖湿空气输送,形成强对流发生发展有利背景条件。

(2) 加密探空资料及时捕捉到强对流发生前北京整层大气的变化,不稳定能量的增加、自由对流高度的下降、低层暖湿空气的流入以及垂直风切变的存在都有利于对流的发展。

(3) TBB 资料分析显示,高原槽前中尺度对流系统东移再发展是造成此次强降水的主要原因。

(4) 多普勒雷达回波显示此次过程中有 3 个产生闪电和强降水的主要对流系统活动,其中两个从河北移入北京地区经历发展、衰弱、消亡(或再发展)的过程,另一个直接在北部生成并经历发展、合并、移出的过程。另外闪电资料统计表明此次雷暴以负闪为主,

其时空活动与雷达回波强度有较好对应关系。

(5) 自动站观测风场和风廓线资料分析表明,两个从河北移入的对流系统分别遇到城市热岛而形成的地面辐合线、以及平原东南气流受山脉的阻挡而抬升后卷形成边界层扰动,再度发展成为强对流系统造成北京城区的强降水。此外发展起来的强对流系统地面高压前部的流出气流与山风相遇形成新的地面辐合线,从而诱发新的对流系统而造成北部强降水。

参考文献

[1] 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 北京 2004 年“7.10”突发性强对流降水的雷达回波特征[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3): 333-345.

[2] 王令, 康玉霞, 焦热光, 等. 北京地区强对流天气雷达回波特征[J]. 气象, 2004, 30(7): 31-35.

[3] 郑栋, 孟青, 吕伟涛, 等. 北京及其周边地区夏季地闪活动的时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 638-644.

[4] 李建华, 郭学良, 肖稳安. 北京强雷暴的地闪活动与雷达回波和降水的关系[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(2): 228-234.

[5] 王飞, 张义军, 赵均状, 等. 雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 153-160.

[6] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用[J]. 气象科技, 2008, 36(3): 300-304.

[7] 廖晓农, 俞小鼎, 谭一洲, 等. 14 时探空在改进北京地区对流潜势预报中的作用[J]. 气象, 2007, 33(3): 28-32.

[8] 楚艳丽, 郭英华, 张朝林, 等. 地基 GPS 水汽资料在北京“7.10”暴雨过程研究中的应用[J]. 气象, 2007, 33(12): 16-22.

[9] 何立富, 陈涛, 周庆亮, 等. 北京“7.10”暴雨一中尺度对流系统分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 655-665.

[10] 郭虎, 段丽, 杨波, 等. 0679 香山局地大暴雨的中小尺度天气分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 265-275.

[11] 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.

[12] Air force weather agency training division. Convective weather trainee workbook[M]. 2001, 169pp.

[13] 江晓燕, 刘伟东. 从不同的陆面资料看城市化对北京强降水的影响[J]. 气象学报, 2006, 64(4): 527-536.

[14] 段丽, 卞素芬, 俞小鼎, 等. 用 SA 雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 21-28.