

王令, 王国荣, 孙秀忠, 等. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水[J]. 气象, 2012, 38(3): 281-290.

应用多种探测资料对比分析 两次突发性局地强降水^{*}

王 令¹ 王国荣¹ 孙秀忠¹ 段 丽² 时少英¹ 郭金兰¹ 丁青兰^{1,3}

1 北京市气象台, 北京 100089

2 中国气象局公共服务中心, 北京 100081

3 中国气象局大气探测重点开放实验室, 成都 610225

提 要: 为了做好突发性局地暴雨的临近预报和预警, 利用常规天气图、BJ-ANC 系统的北京区域雷达拼图和 VDRAS 风场、地面自动站、风廓线雷达的水平风垂直廓线、卫星云图等多种探测资料, 对 2009 年 7 月 13 日和 2008 年 8 月 14 日北京城区的两次突发性强对流局地暴雨天气的影响系统和中小尺度系统进行了对比分析, 提炼了城区突发对流性暴雨预报预警的预报着眼点。分析表明: 两个个例在水汽输送条件、中低层的动力条件、冷空气侵入等方面有有利的天气尺度条件; 暴雨之前卫星云图上介于南北两个系统之间的晴空区、对流系统的发生发展与 1 km 以下的中尺度辐合中心的联系等方面有相似之处; 而在雷达回波的移向移速、各层 VDRAS 风场配置及风廓线雷达资料中水平风垂直廓线结构等方面有差异。通过分析研究, 进一步提高了运用高时空分辨率资料作短时突发性对流性暴雨的预报能力, 这对于主汛期的预报和服务工作有十分重要的作用。

关键词: 强对流, 暴雨, 卫星云图, 雷达拼图, VDRAS 风场, 风廓线雷达

Comparative Analysis on Two Severe Convective Rainstorm Events

WANG Ling¹ WANG Guorong¹ SUN Xiuzhong¹ DUAN Li²

SHI Shaoying¹ GUO Jinlan¹ DING Qinglan^{1,3}

1 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

2 CMA Public Service Centre, Beijing 100081

3 Key Laboratory of Atmospheric Sounding, CMA, Chengdu 610225

Abstract: In order to make the sudden rainstorm nowcasting and early warning more timely and accurately, using the detection data including conventional synoptic analysis, Beijing radar regional mosaic and VDRAS (variational Doppler radar analysis system) retrieved wind field, AWS (auto weather stations), wind profile data, and satellite images, we have conducted the comparative analysis on synoptic scale and mesoscale systems of two severe convective rainstorm events, which happened in Beijing area on August 14, 2008 and July 13, 2009, and put the forecast focus in the rainstorm nowcasting and early warning in Beijing area. It shows that the two rainstorm events have many similarities, e. g. in the good synoptic scale conditions, such as moisture condition, the dynamic condition at the middle and low levels, and the intrusion of the cold air, the clear areas between the pre-storm southern and northern mesoscale systems of satellite images, the occurrence and development of mesoscale systems being associated with mesoscale convergence below 1 km ASL. And on the other hand, they have many differences in the direction and speed

* 公益性行业(气象)科研专项 200906039, 中国气象局预报员专项(CMAYBY2011-001)和 2007 年中国气象局大气探测重点开放实验室课题“X 波段双线偏振天气雷达在灾害天气预警中的应用”共同资助

2011 年 4 月 18 日收稿; 2011 年 11 月 7 日收修定稿

第一作者: 王令, 主要从事短时预报和强对流天气预警工作. Email: wling54@126.com

of the movement of the radar echoes, the structures of VDRAS wind fields in the lower troposphere, the structures of vertical wind profiles. It is proved that by the study and analysis, the nowcasting ability of severe convective rainstorm can be promoted using high space resolution detection data and there is important significance to the forecasting service in the main flooding season.

Key words: severe convection, rainstorm, satellite images, radar mosaic, VDRAS wind, wind profile radar

引 言

受观测条件限制,20世纪80年代以前我国暴雨研究重点是大尺度环流和天气尺度降水系统。当时发现暴雨在一定程度上也是中尺度现象,是几种不同尺度天气系统相互作用的结果^[1]。此后,孙淑清等^[2-3]研究了低空急流与暴雨发生的关系。随着近20年来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,不断揭示出暴雨系统发生发展的机理及其物理过程。1999年启动的“973”项目,利用野外科学试验资料获得了一系列成果,发展了长江中下游梅雨锋暴雨的多尺度结构模型^[4-5]。北京处于华北地区,加上大城市下垫面、特殊地形的作用,与长江流域的梅雨锋暴雨有所不同,经常以局地性、突发性的强对流暴雨形式出现。苏永玲等^[6]研究了京津冀地区强对流时空分布与天气学特征后指出,短时暴雨是京津冀地区强对流的主要发生形式之一,北京地区约占42%的比例,7—8月是其频发的时期。短时暴雨与地形有密切关系,而且有明显的日变化。丁青兰等^[7]对1995—2007年12年间北京地区的各种对流天气进行了统计和分析,指出北京暴雨多发季节为7月中旬到8月上旬,一般呈东北—西南方向带状分布,具有夜发性的特点。由于北京地区暴雨具有局地性、突发性,而且多集中于主汛期,因此,如何运用高时空分辨率的资料做好短时暴雨的预报,对于主汛期的预报和服务工作都有着十分重要的作用。

随着奥运气象服务工作的开展,极大推动了北京地区多种探测资料的应用研究和业务化进程。实时获取的高时空分辨率的地面自动站资料、北京及周边的多普勒雷达数据、卫星云图、风廓线数据资料等,不仅为北京地区暴雨预报预警提供信息,而且为暴雨观测分析和研究提供科技支撑。2004年王令等收集了2年的短时局地暴雨两个例雷达回波资料,并结合每小时的地面自动站雨量资料进行对比分析,表明在多普勒径向速度图上,“辐合点”、“中气

旋”图像特征的出现有利于局地暴雨发生^[8]。郭虎等^[9-10]利用SA多普勒雷达、地面自动站、垂直风廓线及GPS水汽对发生在2006年的两次局地暴雨进行了分析和研究,发现这两次局地暴雨是由不同的系统造成的,动力机制、触发机制都不一样。赵玮等^[11]等利用SA雷达、地面自动站、Profile垂直风廓线、卫星云图和NCEP再分析资料对2006年的两次暴雨进行对比分析,也得出一些有用的结论。丁青兰等^[12]利用常规气象资料、SA雷达、风廓线和地面自动站资料,分析了2007年的两次局地对流天气,发现地形抬升和边界辐合线是对流天气的重要触发机制。孙靖等^[13]利用自动站、SA雷达、风廓线、微波辐射计和雷达变分同化系统(VDRAS)资料,分析研究了2008年北京一次强降水过程中对流单体组织发展的特征和成因。郭虎等^[14]运用这些资料对一次锋面降水进行了细致的分析,为60周年国庆服务提供了准确的短时预报。上述分析和研究都使用了SA雷达、风廓线、地面自动站、GPS水汽,卫星云图等高时空分辨率的资料,这些高时空分辨率的资料能够对中尺度天气系统进行追踪分析,揭示北京局地暴雨的发生、发展过程和边界层的动力条件,为主汛期短时临近预报提供有效的支持。BJ-ANC系统以北京周边雷达资料和数值预报为基础,同化多种探测产品,经过模糊逻辑算法的运算,给出多种实时产品和短时临近预报产品^[15-16]。魏东等、雷蕾等^[17-18]利用微波辐射计和风廓线雷达资料构建的特种探空资料与探空和数值预报的多种物理量比较,在强天气发生前,不同天气差异明显。本文利用BJ-ANC系统的多部雷达拼图和VDRAS风场产品、风廓线雷达资料和地面自动站等多种新型高时空密度探测资料,结合天气形势对2009年7月13日和2008年8月14日(以下简称713和814)对发生在北京城区附近的两次突发暴雨过程进行分析和对比,试图揭示夏季北京城区的突发暴雨的中尺度天气系统差异和相似性,并尝试为突发对流性暴雨的预警提供着眼点。

1 暴雨实况

2009年7月13日15—21时北京出现了局地暴雨,城区南部雨量较大(见图1a)。1小时最大雨量出现在玉泉营,15—16时降雨量为65.8 mm。降水出现在上下班高峰期,造成了南三环、四环交通拥堵。斋堂气象站记录冰粒直径4 mm;有目击者称,位于北京城区东部的四惠桥附近有冰雹。出现的雷暴大风的自动站见表1。针对此次过程分别于15:17和15:31发布了雷电、暴雨临近预警信息,并根据天气系统的变化提供跟进式的预警服务。

表1 出现雷暴大风的自动站

Table 1 The automatic weather stations (AWS) with thunderstorm and gale occurring

站名	时间	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
新发地(丰台区)	16:07	17.9
岳各庄(房山区)	16:31	17.1
古观象台(东城区)	16:30	18.7
丰台(丰台区)	16:46	17.6

2008年8月14日正值北京奥运会期间,城区出现了突发性局地暴雨,根据自动站5分钟资料显示,降水从10:50开始,18:00基本结束。1小时最大雨量出现在大兴,11—12时降雨量51.1 mm,11:35出现 $19.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极大风速。12:56—13:05海淀气象站记录冰雹直径6 mm。这次过程分别于11:30和11:47发布雷电、暴雨临近预警信息,在其后的时间里提供了跟进式预警服务(图1b)。

这两次过程的降雨实况相似之处在于降水初期都有突发的特点,伴有雷电、局部冰雹和雷暴大风,局部过程雨量达到了暴雨量级。分析认为,这两次暴雨都是突发性的强对流暴雨。713城区雷暴大风出现在新发地,最大雨强出现在玉泉营,这两个地面自动站都位于北京西南四环附近,直线距离约2 km,因此可以说暴雨是中尺度强对流云团造成的天气现象。814的1小时最大雨强出现在大兴,雷暴大风出现在大兴,也是一次中尺度强对流云团造成的天气现象。图1a和1b根据北京自动站记录绘制两次过程降水分布图。

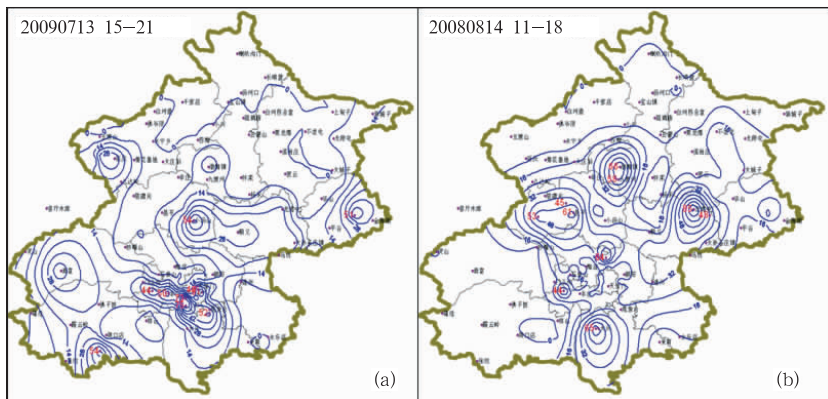


图1 2009年7月13日15:00—21:00(a)、2008年8月14日11:00—18:00(b)过程雨量(单位:mm)分布图

Fig. 1 The accumulated rainfall (unit:mm) in Beijing area during the period of (a) 15:00—21:00 BT July 13, 2009, (b) 11:00—18:00 BT August 14, 2008

2 两次暴雨的天气形势对比

图2a~2c与图2d~2f分别是2009年7月13日08时、2008年8月14日08时的高空、地面天气图。在图2a中,中纬度地区锋区分南北两支。南支槽区宽广,槽线位于山西北部到陕西西南部,北京、河北处于南支槽前和副热带高压西北边缘的西南暖

湿气流顶端,对水汽输送十分有利。在图2d中南支锋区与图2a形势相似,槽线也是位于山西北部到陕西西南部,北京地区处于南支槽前西南气流顶端,水汽输送同样很有利。

图2b和2e分别显示两次过程中北京地区上空对流层中低层都存在切变辐合。713暴雨,切变辐合主要出现在850 hPa,沿着 40°N 山西北部到北京地区。814暴雨切变辐合层次较高,主要在

700 hPa,沿 40°N 山西北部到北京地区。中低层的切变辐合是暖湿空气对流形成的有利动力源。

分析两次暴雨过程降水前高空形势可以看出:两次过程中暴雨发生期间都有冷空气侵入。但冷空气影响条件有所不同。在图 2a 中,北支锋区在北京及河北北部以北的内蒙古中东部地区,槽线超前于南支锋区槽线。冷空气从西北方向影响北京(同时间 700 hPa 北京上游为西北冷平流,图略)。在图 2d 中,北京以北受蒙古高压东南部和东北冷槽后部

东北气流控制,冷空气自东北方向影响北京。

从地面形势分析,两次暴雨过程地面影响系统有所不同。从图 2c 可见,华北地区受低压系统控制,而在图 2f 中,华北大部在高压系统影响中。露点温度 T_d 是可以用来表征空气中水汽多少的一个物理量,通过分析地面 T_d 及其变化可以得到空气中水汽的含量及变化。从分析北京地区 T_d 及其变化可知, T_d 一直在不断增加,到暴雨发生前, T_d 都大于 20°C,说明北京地区水汽已经很丰富了。而且

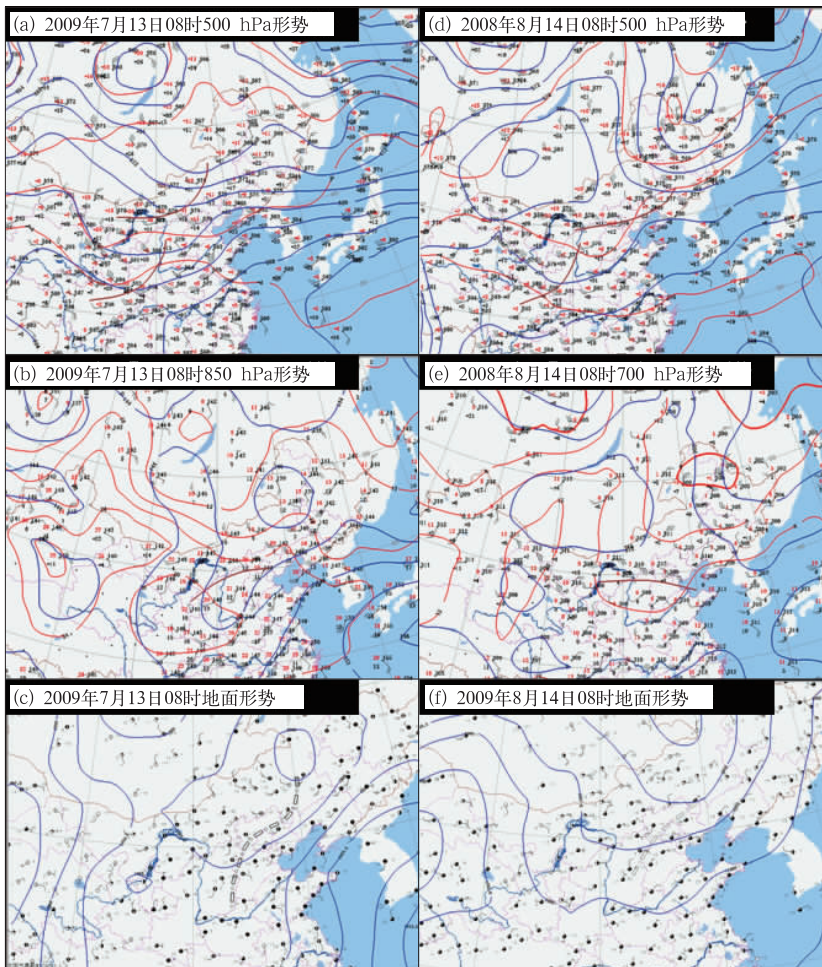


图 2 2009 年 7 月 13 日 08 时、2008 年 8 月 14 日 08 时天气形势对比
(a)~(c)分别是 2009 年 7 月 13 日 08 时的 500 和 850 hPa 和地面形势场;
(d)~(f)分别是 2008 年 8 月 14 日 08 时的 500 和 700 hPa 和地面形势场
(其中蓝色实线为等高线(高空)或等压线(地面),红色实线为等温度线,
棕色短线为槽线或切变线,粗点划线为露点锋)

Fig. 2 The synoptic charts at 08:00 BT 13 July 2009 (left panel) and 08:00 BT 14 August 2008 (right panel) are given at different levels: 500 hPa (a, d), 700 hPa (e), 850 hPa (b), and the surface (c, f), where the geopotential height (aloft) or sea level pressure (surface) analysis is presented by blue solid lines, the isotherm by red solid lines, the trough or wind shear by the brown short lines, and the dry line by thick dash-dotted lines

在上游附近,则都有一条露点锋(干锋),锋的北侧 T_d 较低,说明那一侧空气相对干燥,而在北京一侧空气暖湿。露点锋是强对流天气出现的重要触发条件之一^[19]。

从 713 和 814 的 08 时 T - $\ln p$ 图显示(图略),降水前北京地区近地面湿度都很大,对流层中上层部 600~350 hPa 均有深厚的高湿高能层;713 暴雨时,CAPE 从 08 时到 14 时增加了 $677 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到 $1776.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 从 $405 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降到 $7.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。CIN 可以有效抑制对流的发生,但也能充分积蓄能量。08 时 CIN 较大,可以大量储备能量,到 14 时,CIN 快速减弱,能量得以释放。814 暴雨时,08 时 CAPE 达 $1403.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 为 $86 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,较小,有利于降雨从中午前就产生了。这些条件显示,北京地区中低层气团在外力作用下一旦产生抬升,很容易获得能量,触发对流的发展。

综合上述分析,713 和 814 两次暴雨过程高空天气形势和地面影响系统有相当差异,713 在低层是冷切变,814 在低层是暖切变;但在西南暖湿气流输送、冷空气楔入(西北或是东北)、中低层切变辐合、本站温湿不稳定和露点锋(干锋)等基本对流发展条件方面是相同的,都十分有利于北京地区对流不稳定的发生和发展。

3 中尺度系统的分析比较

突发性局地暴雨的预报预警最大的难点在于,

预报员虽然从天气学的角度可以预报有雷阵雨天气,但是不能确定发生的时间、位置。根据相关分析和以往经验^[8,12],可以关注山前迎风坡、边界层辐合线等易发对流区,而实际上每次过程的新生对流云都发生在不同的位置,这也是临近预警中的最大难点。

3.1 暴雨发生前的卫星云图

卫星云图资料已经广泛用于暴雨预报中^[20]。在图 3a 中,云系主要有两片:长江中游经山东到东北南部的副热带高压西北侧对流云系和北京上游附近对应的北支槽云系。北京地区处于副热带高压西北侧对流云系和北支槽云系之间,由于对流云处于下游,而北支槽云系大多结构松散,不致密,北京上空大多为薄云区或少云区,所以对地面温度的上升影响较小。在图 3b 中,与高空强大的暖脊相对应,蒙古国一带是大片的晴空区,从东北东部经辽东半岛到河套对应的是东北低涡底部的低槽云系。由于低槽较弱,所以云系同样结构松散,在北京上空留有云隙。随着太阳高度角的抬升,地面增温。这时晴空区比周围的多云区地面升温快(地面自动站温度显示云缝之下为相对高温区,图略)。由于晴空区地面温度较周围温度高,在高空大气温度层结相似情况下,造成了晴空区对流不稳定能量的增加。从图 3c 的箭头所指处可以看到,到 16:00 对流云在图 3a 中的晴空区中发展起来了。边界层的非均匀加热产生的温度梯度、局地辐合对对流的启动作用,在

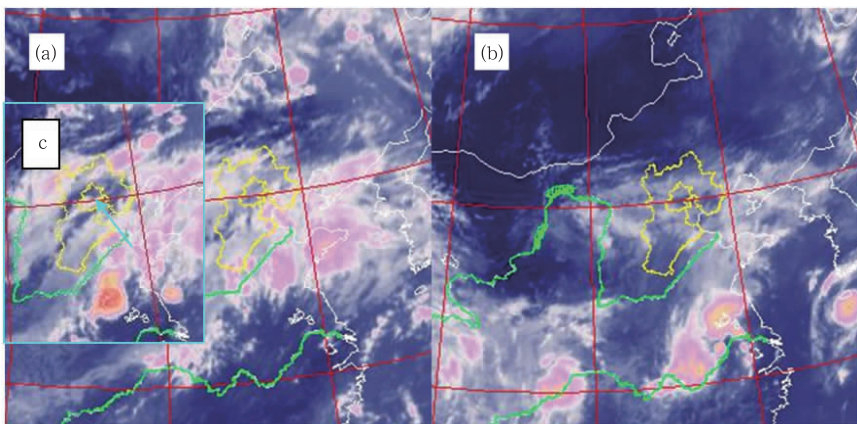


图3 风云 2C 红外云图

(a)2009年7月13日13:00,(b)2008年8月14日11:00,(c)2009年7月13日16:00
(蓝色箭头指示晴空区14:00以后发展的对流云)

Fig. 3 Infrared satellite images of FY2C at (a) 13:00 BT 13 July 2009,
(b) 11:00 BT 14 August 2008, and (c) 16:00 BT 13 July 2009

(where the blue arrow is the convective clouds developed in the clear air after 14:00 BT)

本文的分析中再次得到了证明。

3.2 暴雨发生前雷达组合反射率拼图的比较

为北京奥运气象服务需要,北京市气象局引进了NCAR开发的一个综合0~1 h临近预报系统——Auto Nowcaster (ANC),在ANC的基础上,通过调整参数、改进算法、开发新模块和新算法等一系列研究工作,建立北京地区的对流天气自动临近预报系统(BJ-ANC)。图4a和图5a分别为713、814发生局地暴雨前BJ-ANC系统雷达组合反射率拼图。其中图4a为北京及周边6部雷达拼图,图5a为北京及周边4部雷达拼图。图4a和图5a

的色块分别表示雷达组合反射率强度,图中粉红色圆圈中指示了未来城区暴雨发生的位置。

图4a中显示北京以北对应于700 hPa切变线有一条东北—西南向的对流回波带,长度100 km,宽度30 km,强度50 dBz,向东移动,移动速度 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。北京以南有散乱的弱回波向偏北方向移动。新生的对流回波就是在两片不同性质的回波之间的晴空区迅速发展起来的。从14:42回波出现到15:24发展成强度55 dBz的成熟回波单体,仅用40~50分钟时间。且新生回波强度比南、北两侧的回波强,高度达到11 km。

图5a显示814过程09:53北京北部有一条强

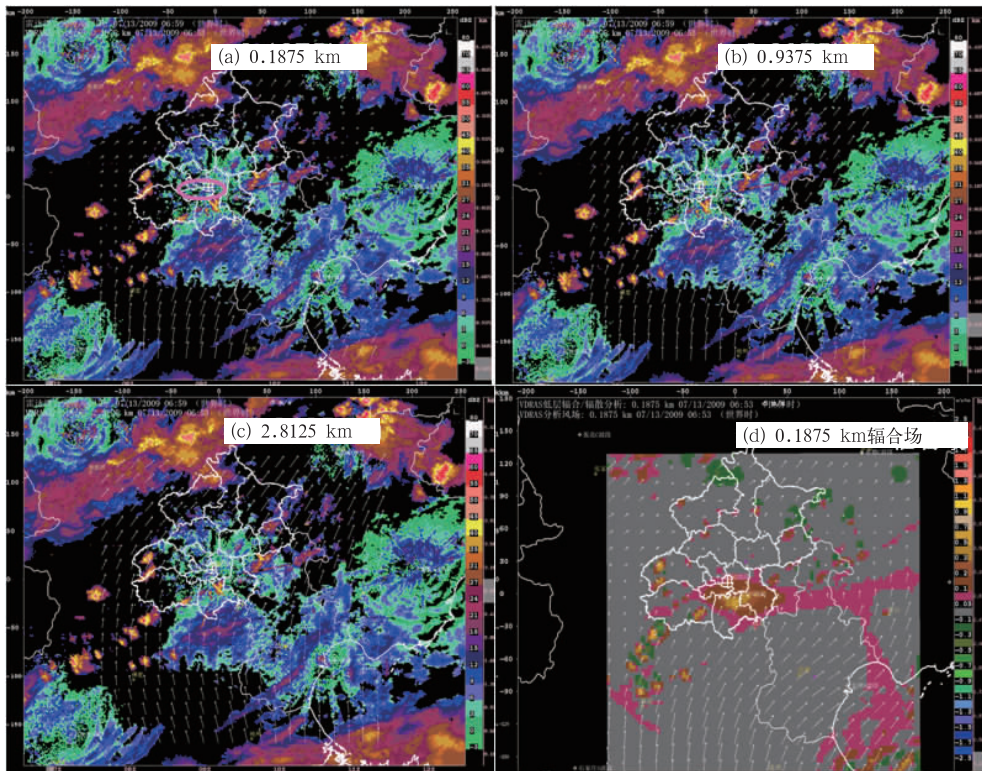


图4 2009年7月13日14:59多层VDRAS风场与北京、天津、张北、石家庄、秦皇岛、承德6部雷达组合反射率拼图的叠加。(a)~(c)的风场高度分别为0.1875 km、0.9375 km、2.8125 km (图中白色小箭头为VDRAS风矢量,箭头的方向指示风的方向,风矢的长度代表风速在同一张图中的相对大小。图4a的粉红色圆圈指出未来暴雨发生的位置;图4d为VDRAS计算的0.1875 km辐合、辐散场,城区南部为强辐合中心)

Fig. 4 The structure of vertical VDRAS wind fields being superimposed on the Beijing radar regional mosaic of Beijing, Tianjin, Zhangbei, Shijiazhuang, Qinhuangdao, and Chengde at 14:59 BT 13 July 2009. The subplots (a), (b), (c) show that the heights of wind field are 0.1875 km, 0.9375 km, and 2.8125 km, respectively, where the white arrow is the wind vector, whose direction being the wind direction and the length demonstrating the relative value of the wind speed in the same subplot, the pink circle in subplot gives the occurring new storm position, and subplot (d) presents the 0.1875 km convergence field from the VDRAS with the strong convergence center to the south of the city center

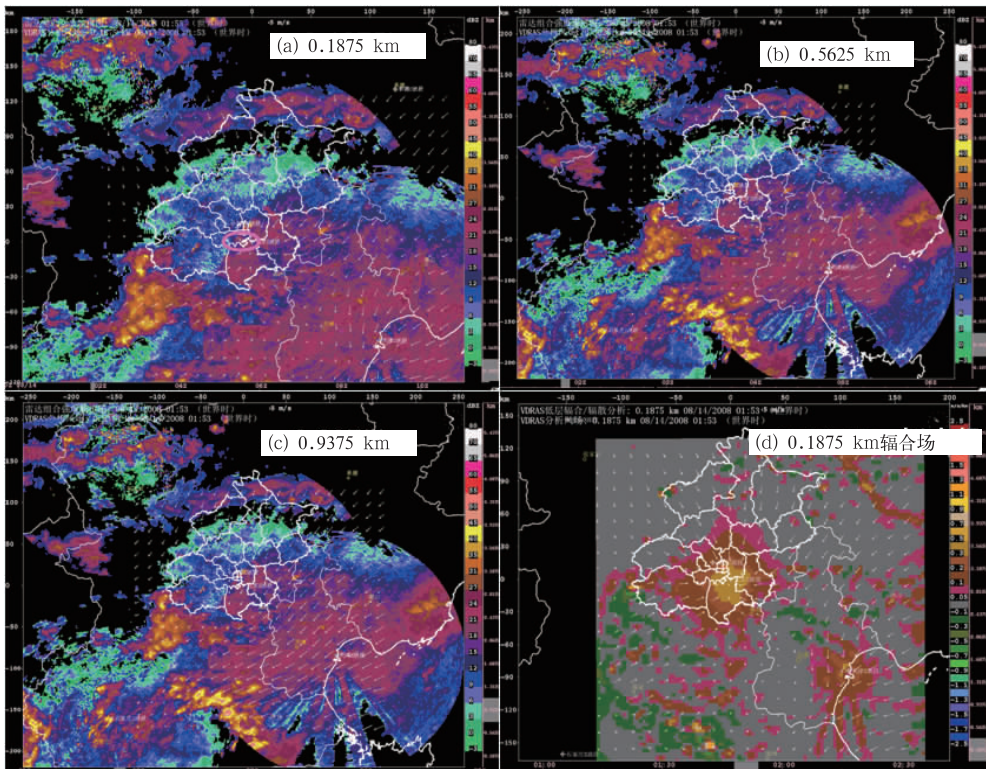


图5 2008年8月14日09:53多层VDRAS风场与北京、天津、张北、石家庄雷达组合反射率拼图的叠加。(a)~(c)的风场高度分别为0.1875 km、0.5625 km、0.9375 km(图中白色小箭头为VDRAS风矢量,箭头的方向指示风的方向,风矢的长度代表风速在同一张图中的相对大小。图5a的粉红色圆圈指出在187 m高度风向辐合的位置也是未来对流新生的位置。图5d为VDRAS计算的0.1875 km辐合、辐散场,城区东南部为强辐合中心)

Fig. 5 Same as in Fig. 4 except being superimposed on the Beijing radar regional mosaic of Beijing, Tianjin, Zhangbei, and Shijiazhuang at 09:53 BT 14 August 2008. The subplots (a), (b), (c) show that the heights of wind field are 0.1875 km, 0.5625 km and 0.9375 km, respectively. The subplot (d) shows the 0.1875 km convergence field from the VDRAS with strong convergence center to the southeast of the city center

度30 dBz以下的东西向带状回波,长100 km,宽30 km;在北京西南方向,河北境内有40 dBz的对流复合体。根据6分钟一次的雷达组合反射率拼图资料动态分析(图略):北部的回波受1 km附近东北气流的引导向西南方向移动,南部的回波受3 km高空气流引导向东北方向移动,移动速度均在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。这两部分回波从移动方向、强度分布和形状上可以分辨出分别对应于两个不同的中尺度天气系统。两个中尺度回波系统的相向而行促使了中间地带的辐合加强,两片回波区之间于10:41产生了对流回波,11:17对流回波强度达到了50 dBz,新生对流回波的强度大于南、北两侧回波的强度,高度达到12 km,11:30暴雨随之开始。

3.3 两次暴雨发生前VDRAS风场比较

BJ-ANC的模块之一对流边界层特征同化反算

法(VDRAS),利用云尺度数值模式和它的伴随模式对雷达资料进行四维变分同化分析,获取对流边界层的三维风场和温度场结构^[16]。

选取暴雨出现之前,不同高度的VDRAS风场进行比较。图4a~4c风场高度分别为0.1875 km、0.9375 km、2.8125 km。图4a粉红色圆圈的位置不仅是未来暴雨发生的位置也是偏南气流风速辐合的位置,在北京城区以南偏南风风速较大,城区及城区北部偏南风风速较小。随着高度向上,偏南风风速逐渐趋于一致,并在4.6 km的高度上转为一致的西南风(图略)。图4d为VDRAS计算的0.1875 km辐合、辐散场,城区南部为强辐合中心,从图4a可以看到在辐合中心上对流回波正在新生。

图5a~5c的风场高度分别为0.1875 km、0.5625 km、0.9375 km。图5a的粉红色圆圈指出在0.1875 km高度风向辐合的位置,在这个部位以

北为偏北风,东部为偏东风,南部为西南风,而西部的风速很小。说明该时刻在北京城区南部近地面有一个宽度 10 km 左右,直到北京西部山区的辐合带。从多层的配合来看,城区东部,在 1 km 以下,以东北风为主,而西部山区则以偏北风为主,南部有西南风。2 km 风向开始向偏南风转,到 3 km(图略)受偏南气流控制。图 5d 为 VDRAS 计算的 0.1875 km 辐合、辐散场,城区东南部为强辐合中心,从后面时次的雷达图看到(图略),强对流回波正是在辐合中心上发展起来的。

通过暴雨出现前的 VDRAS 风场比较,可以看到:1 km 以下 713 低空风场的风向为偏南风,城区附近有偏南风的风速辐合;814 为东北风、东风和西南风三个风向在城区附近的辐合。高空风的配置也完全不同,但是暴雨的雷达初始回波都出现在 1 km 以下的中尺度辐合线偏南暖湿气流的前沿,出现在 VDRAS 计算的低层辐合场中。

通过图 4a 和图 5a 雷达组合反射率拼图和图 3 红外卫星云图的分析,比较中尺度回波系统和新生回波位置,可以得出:新生回波出现在南北两个回波

系统之间的晴空区、低空 1 km 以下暖湿气流的前沿。这里动力条件、水汽条件和热力条件都非常有利;新生的、产生暴雨的对流回波强度都达到 55 dBz 以上,强度大于南、北两侧原有系统的强度;回波顶高度都达到 11 km 以上,高于原有回波系统;回波从新生到发展形成暴雨有大约 40 分钟的时间。

4 风廓线雷达探测揭示暴雨形成机制

利用架设在南郊观象台的风廓线雷达的水平风速图形产品,能够清楚地刻画水平风廓线随时间的变化规律。图 6 为架设在北北京南郊观象台的水平风垂直分布廓线图,图 6 中横坐标下的绿色柱状表示每小时 5 分钟雨量的累积,高度表示累计雨量的大小。横坐标的时间轴从右向左推移。纵坐标表示水平风距离雷达天线的高度。

4.1 713 过程的水平风垂直廓线的演变

713 降水前 13:12, 2 km 以下的西南风迅速向上扩展, 3 km 以上的西南风加大,到 14:30 两层西

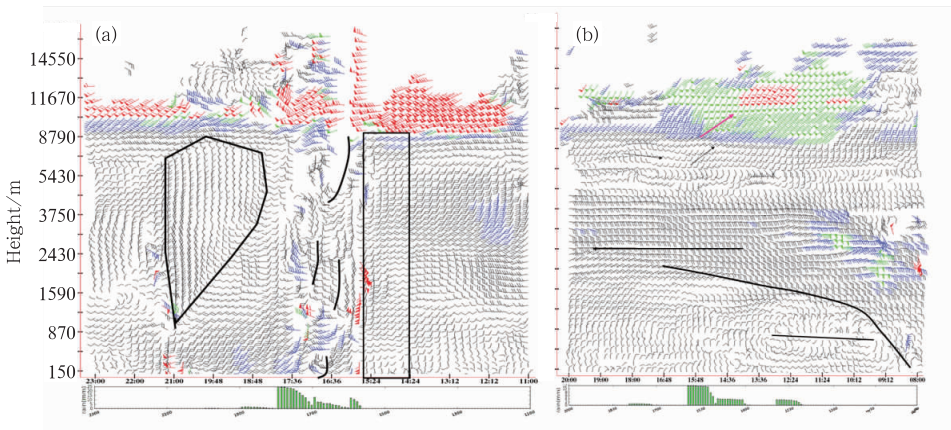


图 6 架设在北北京南郊观象台的水平风垂直分布廓线图

(a) 2009 年 7 月 13 日 11—23 时,间隔 12 分钟, (b) 2008 年 8 月 14 日 08—20 时,间隔 12 分钟

(图中横坐标下的绿色柱状线为北京南郊观象台自动站每小时的 5 分钟降水量累积值。

(a) 黑色方框区域显示的是高低空偏南风打通的时间段;黑色多边形区域则显示了干冷空气入侵的时间段;短粗黑实线为切变线。(b) 黑色粗实线为切变线,黑色或红色箭头示意了风向)

Fig. 6 The structure of vertical wind profile with 12 min time span during the period of (a) 11:00—23:00 BT 13 July 2009; and (b) 08:00—20:00 BT 14 August 2008. Here below the x-axis the green bar presents the accumulated rainfall within 5 min per hour from AWS in Beijing Nanjiao Observatory. Note that in subplot a the period of southerly wind on upper and lower aloft tending to be together is enclosed by the black block; the period of dry cold air invading by the black polygon; the wind shear indicated by black short thick lines. In subplot b the wind shear is shown by black solid lines; the wind direction by the black or red arrows

南风打通,形成从地面到8 km高度上的一致西南气流,10~13 km是西南急流,达到 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。降水是偏南风从低向高扩展,2层偏南风打通后开始的。降水阶段,开始时近地面为西南风,上部偏南风迅速加大,直冲10 km高度。风廓线的探测高度,从12 km突增到16 km。16:30,1.5~6.0 km之间有偏北风插入,出现中层冷入侵的对流特征。降水最强的阶段(16:30—17:30),出现了低层西南风加大,中空西北气流插入的对流混合现象,10 km以上的高空出现了西南风转西北风的变化。18:30降水开始减弱,有偏北风逐渐从8 km附近向下传播,风速逐渐加大,当北风接近地面(1 km以下)时,降水结束。从图6a的水平风变化,可以得到713局地暴雨出现在风切变上,垂直风廓线探测的水平风高度达到16 km,持续时间约6小时。从降水阶段水平风的垂直分布变化来看,降水开始前2层偏南风结构被打通,形成深厚的偏南气流,低层的偏南风加大;在降水最强的阶段,3~6 km的中空有偏北风的扰动入侵;在降水结束阶段,从高空逐渐向下转为偏北风,上下层的风场配置具有前倾槽的结构。

4.2 814过程的水平风垂直廓线的演变

从图6b中看到,09:00左右出现近地面到2 km东南风上传,10:00近地面有偏北风楔入,到12:30整齐的东南风下部,有偏南风和偏北风交汇的切变结构。13:00开始东北风整齐地插入到东南风的下部,降水强度加大,直到降水结束,东北风的高度稳定在3 km以下。3~4.5 km高度层在降水期间一直保有一层东风,东风之上维持西南气流,在6~7 km高度上,11—18时之间可以分析出有一个波动,8 km以上为西南风急流。从9:00—18:00的风廓线变化可以看出:降水时由于东北方向的冷空气插入东南暖湿气流之下,形成锋面结构,当偏东风被东北风强迫抬升时,对流性降水开始。

通过对水平风垂直廓线的比较分析可以看出,这两次过程的降水机制完全不同。冷空气的来源不同,713暴雨的冷空气来源于偏西北方向,而814暴雨的冷空气来源于东北方向。冷空气的高度不同,713暴雨的冷空气从3~6 km的高空入侵。814暴雨的冷空气高度低,在地面到3 km之间。冷空气造成对流机制不同,713暴雨在深厚的暖湿气流中有冷入侵,造成上层干冷,下层暖湿的层结,使得对流发展;814暴雨的冷空气,从近地面楔入暖空气

(东南风)之下,造成暖湿空气被强迫抬升,产生凝结,释放潜热,使对流发展。

5 结论和总结

通过对地面自动站、天气图、卫星云图、雷达回波拼图、VDRAS风场和风廓线雷达资料的对比分析发现,713和814局地暴雨的形成机制有许多相同之处,但是还存在很大差异。

(1)从天气图上分析,这两次暴雨过程,北京都处于南支槽前西南暖湿气流顶端,西南气流对水汽的输送十分有利;对流层中低层都存在切变辐合;但是713在低层是冷切变;814在低层是暖切变。在暖湿气流输送、本站温湿不稳定等基本对流发展条件方面是一致的,都十分有利于北京地区对流不稳定的发生和发展。

(2)从本地其他探测资料分析表明:在卫星云图上,覆盖华北的大片云系中云在北京城区上空留有云缝,有利于地面增温。非均匀加热产生的温度梯度,启动午后的对流发展。

(3)在VDRAS风场中,两次暴雨之前中尺度风场结构完全不同,但是回波新生于偏南(西南、东南)暖湿气流的前沿。在雷达回波拼图上,两次暴雨回波的移动方向、分布等不同,但是产生暴雨的中尺度回波强度、高度都大于原有回波,都是强对流回波,且回波新生到形成暴雨仅20~40 min的时间。

(4)从水平风垂直廓线可以看出,这两次降水过程的动力机制有很大不同,713开始时是深厚的暖湿气流、冷空气高空侵入和结束时整层冷空气下沉的前倾槽结构;814是东风被近地面的东北风强迫抬升。713的冷空气从高空入侵,降温从高空开始,造成上层干冷,下层暖湿的层结,使得对流发展;814冷空气从近地面楔入暖空气(东南风)之下,造成暖湿空气被抬升,使对流发展。

通过北京两次城区短时暴雨的对比分析认为,在有利的天气形势背景下,暴雨回波更容易在中尺度系统的扰动下突发。预报着眼点是:

(1)两个云系之间的空白地带,如卫星云图上出现云缝、雷达回波分为两片,且相向移动,则在这个无雨的区域里冷暖空气交汇,更容易形成对流不稳定;

(2)偏南暖湿气流的前沿,由于水汽条件在暖湿气流中更容易满足,而暖湿气流的前沿还具备动

力、热力扰动条件,因此要特别关注低空流场的切变和辐合;

(3) 关注水平风的垂直廓线,当低空急流加强,或有扰动生成,高空有波动等都预示着天气的转变。

今后还要通过更多的个例分析来验证 VDRAS 风场资料和风廓线雷达资料在短时暴雨预报中的使用价值。特别是 713 过程的 3~6 km 的中层冷入侵的现象,为研究对流云的发展机制提供了信息。

参考文献

- [1] 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 [C]. 北京:科学出版社, 1980, 117-161.
- [2] 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(4): 36-44.
- [3] 孙淑清, 翟国庆. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 1980, 4(4): 327-337.
- [4] 倪允琪, 周秀骥. 中国长江流域中下游梅雨锋暴雨形成机理及监测与预测理论和方法研究[J]. 气象学报, 2005, 63(3): 647-661.
- [5] 刘黎平, 阮征, 覃丹宇. 长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(12): 1193-1201.
- [6] 苏永玲, 何立富, 巩远发, 等. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J]. 气象, 2011, 37(2): 177-184.
- [7] 丁青兰, 王令, 陈明轩, 等. 北京地区暖季对流天气的气候特征[J]. 气象, 2007, 33(10): 38-43.
- [8] 王令, 李晓燕. 北京短时局地暴雨多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象科技, 2005, 33(s1): 53-57.
- [9] 郭虎, 段丽, 卞素芬, 等. 利用加密探测产品对“06731”北京奥体中心局地暴雨结构特征的精细分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(3): 219-227.
- [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): 265-276.
- [11] 赵玮, 王建捷. 北京 2006 年夏季接连两场暴雨的观测对比分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 3-14.
- [12] 丁青兰, 王令, 卞素芬. 北京局地降水中地形和边界层辐合线的作用[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 152-155.
- [13] 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): 19-26.
- [14] 郭虎, 王令, 时少英, 等. 国庆 60 周年演练中一次降水过程的短时预报服务[J]. 气象, 2010, 36(10): 21-28.
- [15] 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J]. 应用气象学报, 2004, 15(6): 754-763.
- [16] 陈明轩, 高峰, 孔荣, 等. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 395-403.
- [17] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J]. 气象, 2011, 37(4): 412-422.
- [18] 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.
- [19] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法(第四版) [M]. 北京:气象出版社, 2007.
- [20] 方宗义, 覃丹宇. 暴雨云团的卫星监测和研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 583-593.