

高时空分辨率观测资料对两次夏季北京暴雨的特征分析

钱恺^{1,2,3} 刘锦丽¹ 毕永恒¹ 韩永² 吕达仁¹

(1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

2 南京大学大气科学学院, 南京 210093; 3 解放军94701部队, 安庆 246001)

摘要: 利用S波段测雨雷达、毫米波测云雷达、风廓线雷达等观测资料对2011年6月23日和2012年7月21日(以下简称7·21暴雨)发生在北京地区的两次中尺度对流系统(MCS)引起的大暴雨观测资料进行分析, 结果表明: 导致两次暴雨的回波均具有线状对流特征, 其组织形态为平行层状(PS)降水中尺度对流系统; 两次暴雨中PS型MCS与长江中下游地区此类MCS移动方向偏东或东北略有不同, 而是向偏东或东南方移动, 但7·21暴雨过程中最后阶段影响北京形成的PS型MCS却是向东北移动的。毫米波测云雷达可以观测到测站上空及周边云的形态特征及发展情况, 回波强度及速度可以展现出云的演变、内部结构特征以及降水状态。而风廓线资料表明两次暴雨在风场变化中均存在着相似的特征, 两次暴雨前期低层均存在东风层, 这与北京特殊地形的共同作用可能是导致夏季强降水的因素之一; 同时, 暴雨发生之前存在对流层低层风速明显增大的过程。低层扰动的加强、风向之间的切变以及超低空急流均有可能是导致强降水的原因。

关键词: 暴雨, 中尺度对流系统, 测雨雷达, 测云雷达, 风廓线雷达

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.003

Analysis of Two Heavy Rainstorms in Summer Beijing by Using Observation Data with High Temporal and Spatial Resolution

Qian Kai^{1,2,3}, Liu Jinli¹, Bi Yongheng¹, Han Yong², Lü Daren¹

(1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation(LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093 3 Unit 94701, PLA, Anqing 246001)

Abstract: By using S-band weather radar, 8.6 mm wave-length cloud radar and wind profile radar data, the two heavy rainfalls in June 23, 2011 (hereinafter referred to as the 6-23 rainstorm) and July 21, 2012 (hereinafter referred to as the 7-21 rainstorm), which occurred in Beijing area, are caused by a meso-scale convective system (MCS). Observation results show that the characteristics of linear convection were found in two rainstorms, and its organization mode was classified as parallel stratiform MCS (PS). Such MCSs in the middle and lower reaches of the Yangtze River move to the east or northeast, but these two MCSs move to the east or southeast. However, the PS which affect Beijing during the final stages is moving to the northeast. Millimeter wave cloud radar could observe the morphological characteristics and development of the cloud over the station. The intensity and velocity of the echo show the evolution, internal structure of the cloud and precipitation state. The wind profiler data indicate that similar changes of the wind field existed in two rainstorms. The interaction of the east wind in the boundary layer during its early stages and the special terrain might be one of the factors leading to the heavy rain in that summer, Beijing. Meanwhile, the velocity in low-troposphere increases significantly before rainstorm. The strengthening of low-level disturbances, wind direction shear and the ultra low-level jet are likely to be the causes of heavy precipitation.

Keywords: rainstorm, meso-scale convective system, weather radar, cloud radar, wind profile radar

0 引言

由暴雨等引起的洪涝已经成为我国较为严重的自

然灾害之一, 针对如何提高此类灾害性天气的预报预警能力是气象学者关注的重点。我国是一个暴雨频发的国家, 除西北地区以外, 其他区域几乎都会发生暴雨。暴雨的发生与中尺度天气系统紧密相关, 随着各种观测网络的建立以及观测资料的多样化, 对直接影响暴雨的系统——中尺度对流系统(MCS)的研究,

收稿日期: 2014年3月17日; 修回日期: 2014年7月28日
第一作者: 钱恺(1983—), E-mail: qiankai_nju@163.com
资助信息: 国家重点基础研究发展计划(2010CB428601)

越来越被气象学者所重视。

Orlanski^[1]、Parker等^[2]对MCS的特征做出如下定义：雷达回波反射率大于40dBz、水平尺度范围大于100km、持续时间3~24h。针对MCS所导致的极端降水，Maddox等^[3]在1979年将美国151个致洪暴雨个例分成三类，并总结出每种类型的形势场及共有的环境特征。Doswell等^[4]指出任何地区的总降水量与降水率和持续时间直接相关，而降水率依赖于湿空气、垂直运动和降水效率，持续时间则与系统的尺度、移动速度以及暴雨内部降水强度的变化相关。Schumacher等^[5-6]利用自动雨量站与组网雷达对美国洛基山脉以东1999—2001年116次极端降水个例的观测表明，65%的极端降水是由MCSs造成的；同时对1999—2003年中184次极端降水事件的研究表明，7月发生极端降水的概率最为频繁，美国北部及平原地区的极端降水只在暖季（4—10月）发生，且极端降水几乎都是由MCS所导致，而南方地区任何季节都可发生极端降水，热带系统产生的极端降水占有相当大的比例。

台湾地区针对致洪暴雨的预报，在1985年制定了台湾地区中尺度试验（Taiwan Area Mesoscale Experiment, TAMEX）计划，其研究的主要内容为梅雨锋、MCS以及地形和两者之间的相互作用^[7]。日本于1998年启动了“中尺度对流系统的结构和发生发展机理研究”计划，利用1999—2002年在中国东海和日本九州获取雷达等观测资料对梅雨锋进行了深入的研究^[8]。国内的诸多研究也基本集中在长江中下游及华南地区。通过1997年“海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究”、1999年“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”及2004年“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”等，对中尺度暴雨系统的研究取得了一系列的研究成果^[9]。程麟生等^[10]对中纬度的MCS的研究进展做了全面的综述。近年来，华北地区处于相对干旱期，对华北地区强降水的研究相对较少，对引发华北暴雨的中尺度系统的结构和特征还不是很清楚^[11]，而华北暴雨与华南暴雨及长江中下游的梅雨又不尽相同，因此，对于引发华北/北京地区暴雨的MCS值得我们进一步关注与研究。

王令等^[12]对6·23暴雨分析表明中尺度对流云带是造成强降水的主要原因；陈赛男^[13]对本次暴雨的研究表明造成此次降水过程中的强降水是由 β 中尺度对流单体和 γ 中尺度对流单体强烈发展引起的；针对7·21暴雨，方翀等^[14]将本次暴雨分为三个阶段，分别为暖区降水阶段（09:30—16:00）、锋面降水阶段（16:00—22:00）和消散阶段（22:00—05:00），并

指出本次极端降雨成因包括对流系统持续的“列车效应”，以及低质心高效率的降雨对流系统。湛芸等^[15]研究表明低涡切变线及华北地形共同触发了MCS的暖区生成发展；低涡北跳、MCS后向传播特性使暖区MCS东移速度慢，形成“列车效应”，造成降雨持续时间长。孙军等^[16]指出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中尺度对流复合体（MCC），产生极端强降水。孙建华等^[17]利用HYSPLIT模式模拟不同层次水汽轨迹表明：3000m的水汽主要来源于从南海经我国西南地区到华北的西南通道，2000m的水汽分别来源西南通道和黄淮，对流层低层（约1000m）的水汽主要来源于黄海；通过雷达反射率表明第二阶段降水中回波在层状云系的南侧组织成了线状对流，组织形态为典型的层状云与对流云平行的类型（parallel stratiform precipitation, PS型）。

虽然对这两次暴雨过程已经有了多方面的分析，但我们仍希望利用掌握的这两次降水过程的一些高时空分辨率的观测资料对华北/北京地区产生暴雨的MCS特征进行分析，为理解暴雨结构与过程特征提供进一步认识，以期更有效地提高临近预报的能力。

1 资料介绍

本文使用的资料主要包括有：ECMWF再分析资料（ $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ）、北京市气象局自动雨量站数据、S波段测雨雷达资料、毫米波测云雷达和风廓线雷达等数据；所有观测数据在使用前均已进行质量控制；文中时间均为北京时。图1显示了北京市气象局的自动雨量站、S波段雷达和风廓线雷达的分布情况以及中国科学院大气物理研究所（以下简称大气所）的风廓线雷达、毫米波测云雷达及自动雨量站的分布。

自动雨量站资料由北京市气象局短临交互预报系统（VIPS）^[18]的自动雨量站提供。在该系统中，北京市境内共有188个自动雨量站，可提供每个雨量站的降水、温度、湿度、气压、风向以及风速等数据。大气所自动雨量站位于北京市华严里40号楼楼顶（ 39.9768°N ， 116.3612°E ），该自动雨量站不属于VIPS系统。

S波段测雨雷达位于北京市南郊观象台（ 39.8061°N ， 116.4694°E ），其中雷达观测半径为230km，波长10cm，测量参数主要包括反射率和径向速度等。

毫米波测云雷达同样位于大气所华严里40号楼楼顶。雷达波长8.6mm，探测范围150m~40km，测量参数主要有反射率、速度、速度谱宽以及线性退极化比等。

风廓线雷达分别位于海淀(39.9870°N, 116.2906°E)和大气所科研楼楼顶(39.9768°N, 116.3612°E)。两部雷达均为边界层风廓线雷达,探测高度为3000m。

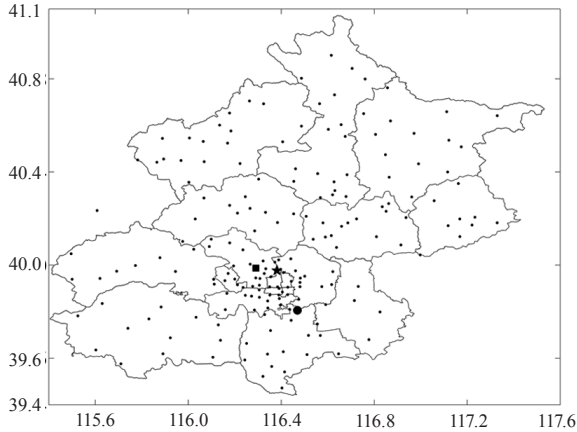


图1 试验观测站点分布
(北京市自动雨量站(·)、S波段测雨雷达(●)、海淀风廓线雷达(■),毫米波测云雷达、大气所风廓线雷达及自动雨量站(★))

2 暴雨概况及天气形势

2.1 暴雨概况

2011年6月23日和2012年7月21日,北京地区发生近几年来较为严重的两次暴雨灾害天气。6·23暴雨约从15时开始至22时降水逐渐停止,石景山、房山等中南部地区出现了24h超过100mm的降水;而7·21暴雨持续近18h,21日11时左右降水开始至22日05时降水结束,北京市部分地区出现了洪涝,市区则出现了内涝,房山区24h累计降水超过400mm。两起暴雨均导致人员伤亡和财产损失,对社会造成了巨大的影响。

2.2 天气形势

利用ECWMF再分析资料对两次暴雨进行分析。2011年6月23日08时,在500hPa天气图上(图2a),中高纬地区呈现典型的“两槽一脊”型,贝加尔湖地区附近为一阻塞高压,我国东北至河套地区为一横槽,高压前部的偏北气流将冷空气源源不断地向南输送。西太平洋地区则是强盛的副热带高压,暖湿空气沿副热带高压(以下简称副高)低层850hPa的急流不断向北运动,冷暖空气在华北中北部交汇。中纬度地区200hPa高空存在一条明显的西风急流,北京上空的急流明显加强,位于急流入口区的右侧。在850hPa流场(图2c)中,华北的西北部为一低涡,与500hPa横槽形成较为有利的高空槽暴雨^[19],有利于造成华北/北京地区的强降水。

2012年7月21日08时(图2b),中高纬贝加尔湖

地区为一冷涡,温度场落后于高度场,冷涡中不断分裂出的冷空气向南推进,河套地区的低压槽缓慢东移。我国东部沿海地区则由副高控制。北京位于200hPa高空急流的右侧,850hPa有低空急流逐渐形成并向华北地区移动,而位于河套地区的低涡(图2d)与副高之间则形成了“东高西低”的气压梯度,低涡与500hPa的低压槽相配合,同样也是较为典型的华北暴雨天气形势。

综合比较,两次暴雨均是在较为典型的华北暴雨天气形势下产生的,6·23暴雨为“两槽一脊”型,7·21暴雨为“东高西低”型,其共同特征均为高空槽配合低层低涡的发展而导致暴雨的产生,在其发生发展过程中都伴随有低涡、副高和高低空急流等天气系统。6·23暴雨中副高相对于7·21暴雨中更偏东,副高主体位于日本东南洋面上,而7·21暴雨中副高更偏西,位于我国东部洋面,与贝加尔湖冷涡形成对峙的局面,这也是造成7·21暴雨相对于6·23暴雨维持时间更久、两次暴雨表现出不同降水特征的原因之一。

3 观测结果分析

3.1 S波段测雨雷达回波特征分析

针对这两次MCS引起的北京暴雨过程,利用S波段雷达资料着重分析对流回波在北京地区的组织类型特征。

层状回波在强对流回波两侧或前方发展的MCS称之为平行层状(PS)降水MCS。图3a,3c和3e展示了6·23暴雨过程中回波变化过程。15:54对流回波主体已经位于北京市境内(图3a),且发展已经非常旺盛,呈东北—西南走向分布并向东南方移动,带状回波特征较为明显。至17:30(图3c),强对流主体已移至北京的东南部,对流强度略有减弱,但在回波的前段仍然可以分辨出带状强对流回波带;19:00之后(图3e)强对流回波已经移出北京,影响北京的过程基本结束。

7·21暴雨过程中回波的变化相对要复杂很多,在PS型MCS形成之前对流回波先期经历了“列车效应”,导致了第一阶段的强降水。因此我们给出与6·23暴雨中相似的第二阶段线状对流影响过程进行分析。图3b揭示了7·21过程中19:00对流回波带状结构非常明显,呈东北—西南分布,而此时的移动方向则是向东移动。至20:48对流主体逐渐移向北京东部(图3d),强回波带分裂为两条,一条位于东部,另一条位于房山,房山地区连续经历线状对流的影响,也导致了该地区的降水量大增。PS型MCS同样出现在了降水趋于消散的阶段(图3f),位于北京的西南方,但

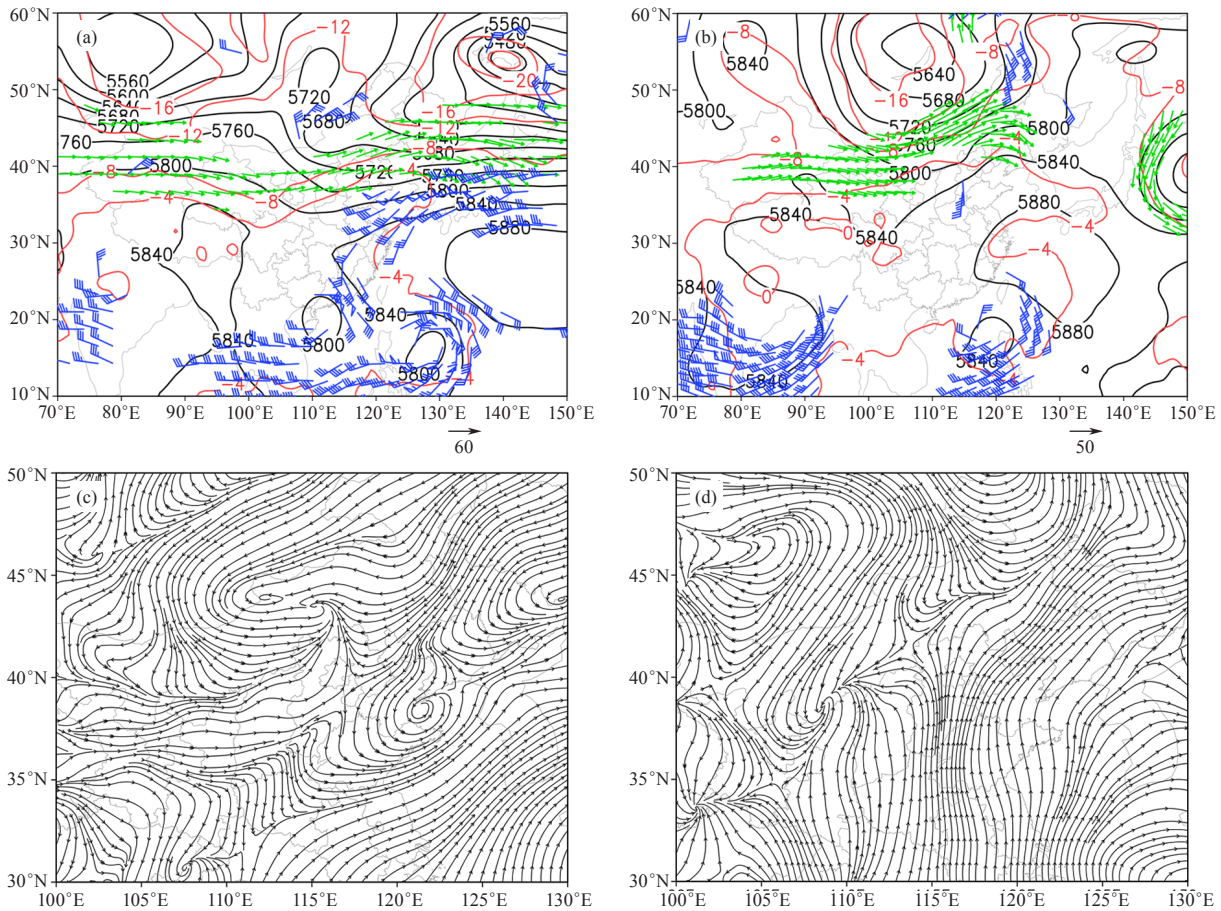


图2 2011年6月23日08时 (a) 和2012年7月21日08时 (b) 500hPa位势高度 (黑色实线, 单位: gpm)、温度 (红色实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、200hPa高空急流 (风矢表明 $\geq 30\text{m/s}$) 和850 hPa低空急流 (风羽表明 $\geq 12\text{m/s}$); 2011年6月23日08时 (c) 和2012年7月21日08时 (d) 850hPa流场

是与之之前不同的是强度和影响范围都较小, 并向东北的城区移动, 致使城区在22日02时左右迎来最后一次强降水过程, 小时降水量达到30mm。

综合两次暴雨过程, S波段雷达可以很容易地分辨出MCS的特征, 两次暴雨过程的相同之处在于对流发展最为旺盛的时刻 (图3a和3b) 均体现了线状对流特征, 其组织形态为平行层状 (PS) 降水MCS。与长江中下游地区的此类MCS (PS型) 大多是向东或东偏北移动^[20]不同的是, 这两次MCS主体则是向东或偏东南方向移动, 只有7·21暴雨过程中23:54 (图3f) 北京西南外的PS型MCS是向东北方向移动。而两次暴雨对流回波的区别在于7·21暴雨较6·23暴雨更为复杂, 先期暖区降水中的“列车效应”也是导致7·21降水量大于6·23暴雨的原因之一, 6·23暴雨只经历了单次强对流的影响。

3.2 毫米波雷达回波特征分析

利用毫米波测云雷达可以观测到测站上空及周边云的水平及垂直结构, 反射率及速度等信息可以清晰

地反应出云的宏观及微观特征。由于毫米波雷达波长较短, 对于强降水有一定的衰减作用, 因此毫米波测云雷达对于反射率值介于 $-40\sim 10\text{dBz}$ 的非降水云及弱降水云的观测具有重要意义, 强降水探测一般使用波长较长的S波段测雨雷达。因此, 利用毫米波测云雷达观测北京夏季强对流过程中的云的变化, 并结合其他探测设备进行联合观测, 可以加深对强对流过程的认识。表1为极化测量下的标准反射率等级。

表1 标准反射率等级

类型	反射率/dBz
非降水云	< -40
边界云	$-20\sim 10$
毛毛雨	< 25
雨	$25\sim 60$
干雪 (低密度)	< 35
干冰晶 (高密度)	< 25
湿雪 (正融化)	< 45
霰	$40\sim 55$
冰雹 ($< 2\text{cm}$)	$50\sim 60$
冰雹 ($> 2\text{cm}$)	$55\sim 70$
雨夹冰雹	$50\sim 70$

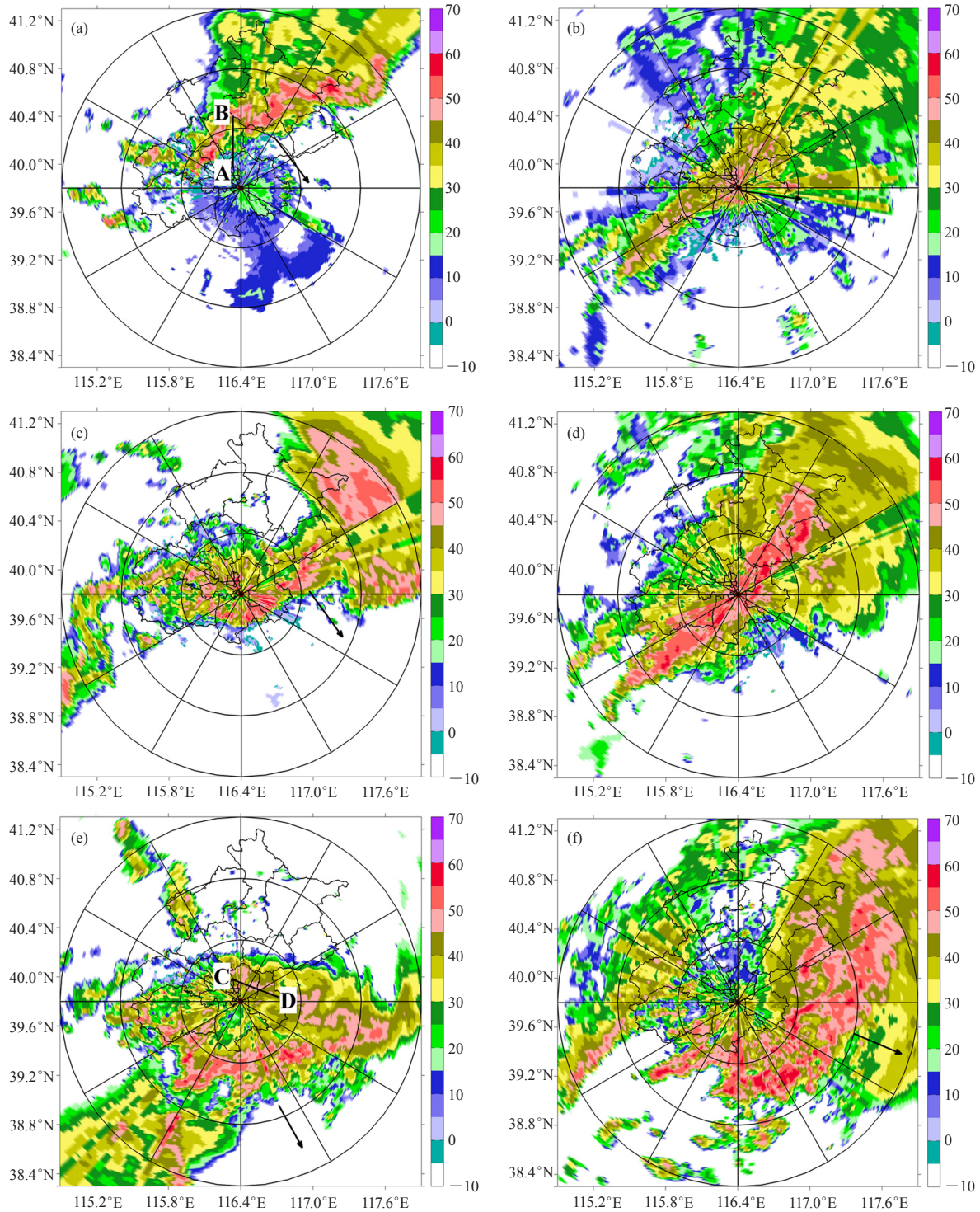


图3 6·23暴雨15:54 (a)、17:30 (c)和19:30 (e) 1.5°仰角雷达回波反射率 (单位: dBz) ; 7·21暴雨19:00的0.5°仰角 (b)、20:00的1.5°仰角 (d)和23:54的1.5°仰角 (f) 雷达回波反射率 (单位: dBz) (黑色箭头代表对流回波移动方向)

图4a和4b分别是6·23暴雨中15:50—15:56所观测反射率因子与速度。测站6km以上存在厚度约为4km云层,云底较为平直,云顶呈现不规则形态,云顶与云底的回波反射率约为-15dBz,云内反射率介

于一5~5dBz。随着时间推移,云内的反射率逐渐加强至10dBz,表明云体的增强与发展。图4b所展示的是云内垂直速度的分布,云内基本以弱下沉气流为主。在本次垂直探测后不久,本场开始出现降水。

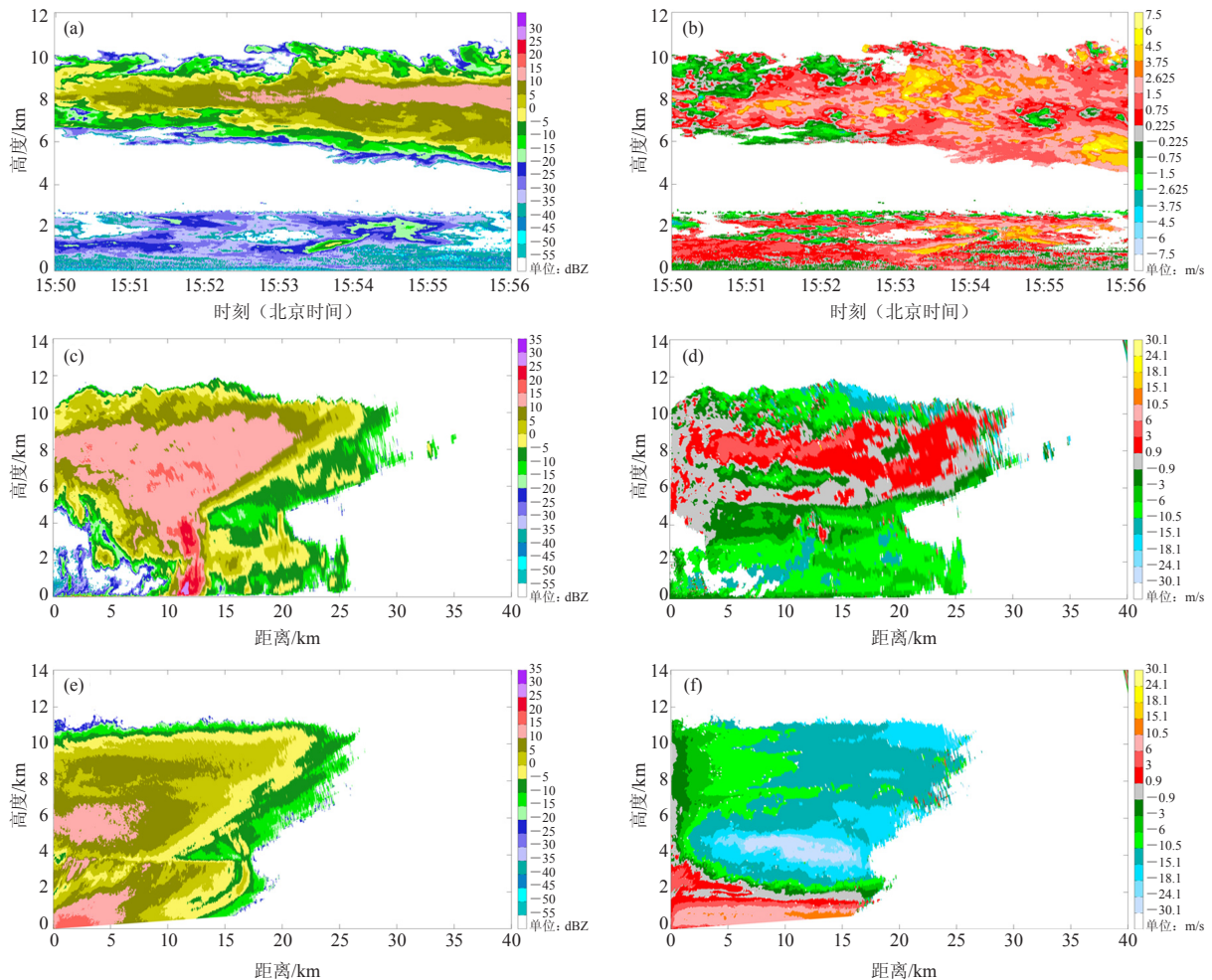


图4 2011年6月23日15:00—15:56的云反射率图 (a) 与速度 (b) (正值代表下沉气流、负值代表上升气流); 2011年6月23日15:56沿图3b中AB的云反射率 (c) 与速度 (d); 2011年6月23日19:30沿图3f中CD的云反射率 (e) 与速度 (f)

图4c和4e分别是15:56分沿图3a中AB和19:30沿图3e中CD做的RHI扫描。这两次过程分别展示了本站降水之前与降水经过本站时的探测情况。图4c中强对流刚逐渐向本站移动, 云状具有明显的积云特征。在距离本站10km的底层出现高于25dBz的回波, 并且回波接地, 表明已有降水产生; 低层的上升气流逐渐加强 (图4d), 而6km以上则是下沉气流, 这样的垂直速度分布同样有利于降水的产生。图4e中积云特征则是在4km高度出现了明显的0°C亮带。亮带的出现能够更好地识别出冰水之间的差别, 因为同等体积下冰的散射是水的1/5, 所以亮带之上以冰粒为主, 亮带之下反射率大值区则以水滴为主。底层回波约20dBz, 表明有较强的降水出现; 同时刻的速度图 (图4f) 中, 底层已经转变为下沉气流, 而对流后部 (云体后部) 则出现了较强的上升运动。

对7·21暴雨连续观测表明: 自05:00站点上空出现高度7000~9000m的卷云 (图5a), 反射率介

于一30~-10dBz, 云底高度随着时间逐渐降低。09:00之后云内回波逐渐增强, 09:20回波接地, 表明雷达上空出现高度较低的云层或有弱降水出现。11:00后低层回波增强至20dBz, 测站出现较强的降水。13:50—15:00的观测 (图5c) 在5.5km高度上存在0°C层亮带。速度图5d中, 整个对流已经呈现出下沉速度, 而在粒子下落过程通过0°C层亮带时, 出现了下沉速度突然增快, 由原先的0.5m/s增至6m/s, 产生这样的原因主要可能是小冰粒本身很小, 在遇到融化层前速度也相对较小, 通过融化层后粒子融化, 快速形成降水降落至地面。而图5c和5d中14:15—14:38的回波则可能由本站的强降水 (图5e) 而导致的衰减。

通过对两次暴雨过程中云的观测表明, 降水前均先出现高度较高的卷云, 随着时间的发展高度逐渐降低, 并伴随积云发展。回波的强度与速度可以帮助我们判别云的演变、内部特征以及降水状态; 0°C层亮带则可以分别云中粒子的状态。

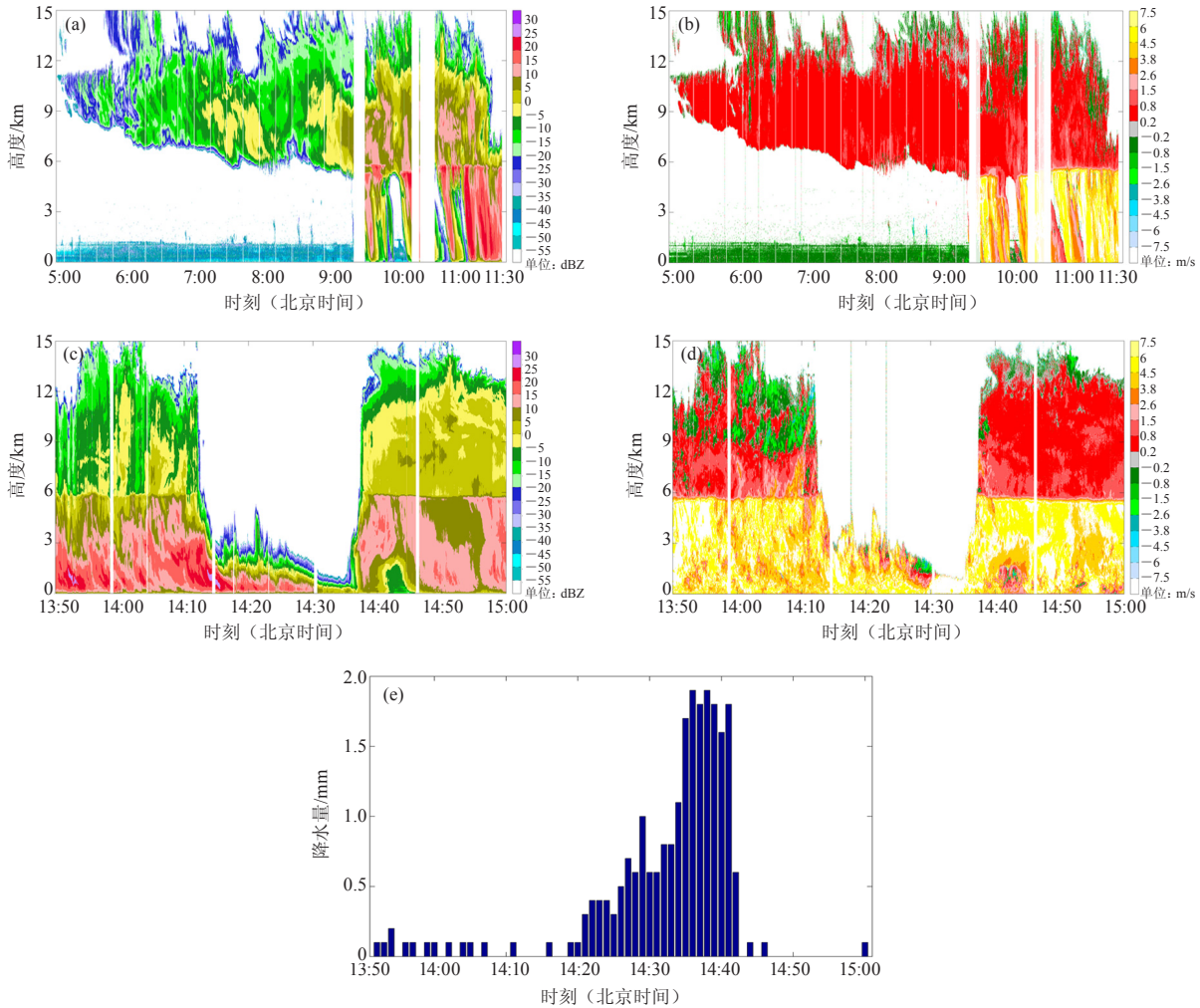


图5 2012年7月21日05:00—11:30的云反射率 (a) 与速度 (b) (正值代表下沉气流、负值代表上升气流); 21日13:50—15:00的云反射率 (c) 与速度 (d); 大气所自动雨量站监测雨量 (e)

综合S波段测雨雷达与毫米波测云雷达: S波段测雨雷达可以忽略雨水的衰减, 较为全面地反映出对流系统的演变过程, 但是对于弱云及非降水云的探测能力则略显不足; 而测云雷达可以细致地反应出经过测站上空云的演变过程, 有助于我们了解云的物理结构与规律, 也能够了解对流系统的变化特征。因此, 有效的利用两者各自的探测优势, 进行联合探测, 可以对MCS做更精细的研究。

3.3 风廓线雷达对两次强降雨过程的探测

风廓线雷达为实时监测、分析天气系统, 尤其是中小尺度天气系统的发生、发展的物理机理分析提供了可能^[21]。风廓线雷达的探测高度除了与雷达技术指标有关之外, 还受天气状况的影响。当有天气系统过境、高空水汽增加时, 伴有探测高度明显增加现象^[22]。因此, 我们在使用数据前, 滤掉了观测中的无效数据。文中所使用的两部风廓线雷达直线距离约6.8km。

降水量的分布表明7·21暴雨过程中城区经历了三次强降水(图6a和6b), 而6·23暴雨仅有一次(图6c和6d)。7月21日10:00—16:00是北京城区第一次强降水过程(图6a), 风场在低层约300m高度以下为偏东风和北风, 随着高度逐渐转变为东南风或南风。海淀站(图6b)从12:00在1500m高度上出现大于12m/s的风速, 至13:30, 500m的低空出现大于12m/s的风速, 存在着明显的风速脉动向下扩展的过程。第二次强降雨过程发生在21日17:00—22:00, 北京城区的最强降雨时间主要发生在20:00前后, 从图6a和6b中可看出, 17:00垂直方向500m高度的风向有南北风向逆转的过程, 至19:00, 500m以下水平风向发生东西风之间的逆转, 且低空急流随高度有增强的趋势, 1500m高度中的已经出现20m/s的急流。在第三阶段中, 从两站的风廓线中可以看出1500m以下的风向于22日01:00发生了反向变化, 并且风速迅速加强。600m高度上在

02:00两个测站均有大于12m/s的超低空急流出现。

而图6c和6d中6·23暴雨降水量不及前者，降水只集中某一段时间内，这与线状对流的快速发展和移动有关。6·23暴雨中降水与7·21暴雨中第一次强降水相似。降水发生之前1000m以下的偏东风随高度降低，风速逐渐减弱，1000m之上风向转为偏南及西南，这与郭虎等^[23-24]对边界层的偏西风对近地面层顶空气的后卷产生加强作用的表述非常吻合。临近降水时17:00两站低层50~500m的低空偏东风风速已经增加至10~12m/s，出现超低空急流，风速大值区有向下传播的现象，并且风向在约1500m的高度上发生顺转，19:00之后风向则为逆转，表明该高度在降水后期逐渐由冷空气控制。

通过对北京两次MCS过程的探测表明，结合之前的研究^[23-24]揭示了北京特殊地形所诱发的扰动作用，

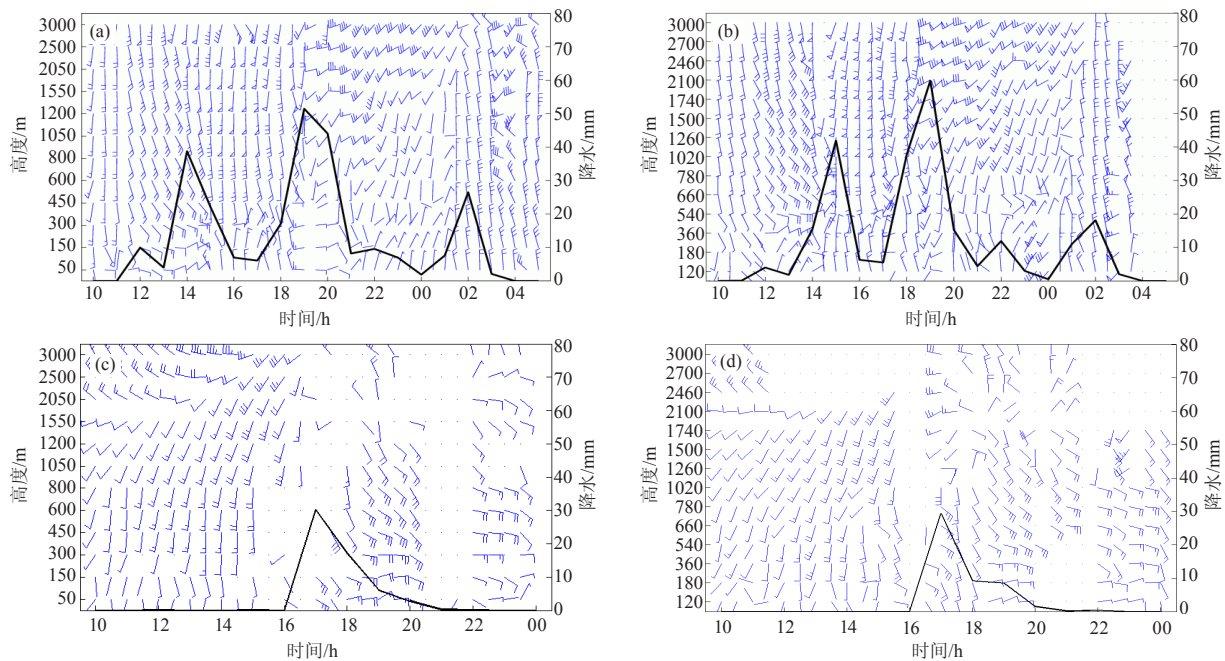


图6 大气所 (a, c) 和海淀 (b, d) 风廓线雷达每30min的平均风场及其对应的每小时雨量 (黑色实线)
(a, b) 2012年7月21日09时至22日06时; (c, d) 2011年6月23日10时至24日00时

4 小结与讨论

通过对6·23与7·21发生于北京地区两次持续性暴雨天气过程的ECMWF再分析资料及高时空分辨率资料分析，结果表明：

1) 两次暴雨均是在较为典型的华北暴雨天气形势下产生的，其共同特征均为高空槽配合低层低涡的发展，两次暴雨过程中均伴随有低涡、副高和高低空急流等天气系统。6·23暴雨中副高相对于7·21暴雨中更偏东，副高主体位于日本东南洋面上，而7·21暴

雨中的东风可能存在着重要的影响。综合两次暴雨过程中风廓线资料，6·23暴雨与7·21暴雨中第一次强降水过程与郭虎等^[23-24]提出的由北京地形作用而导致的空气沿山体抬升产生向后卷扬的概念模型非常一致，从而证明了地形的影响。同时，7·21暴雨中第一阶段中还存在明显的大值风速下传的现象，且下传速度快，一小时内由3000m高度上出现的20m/s的风速至低层500m出现大于12m/s的风速，这表明低层扰动的加强有可能是产生强降水的原因之一；而7·21暴雨中第二阶段的强降水则伴随着南风与西南风之间的切变以及低空急流的加强过程；第三阶段的情况与之相似，不仅存在南北风之间的切变，而且还有急流向低层扩展的现象，甚至出现超低空急流，这些均可能是导致强降水的因素。

雨中副高位于我国东部洋面，与贝加尔湖冷涡形成对峙，这是造成7·21暴雨相对于6·23暴雨维持时间更久、两次暴雨形成不同降水特征的原因之一。

2) 测雨雷达资料分析表明，平行层状 (PS) 降水MCS在这两次暴雨过程均有着重要的影响，但7·21暴雨对流回波过程更为复杂。经过先期暖区对流产生的“列车效应”之后，锋面降水过程中形成较为明显的PS型线状对流导致了第二次的强降水；而6·23暴雨对流回波则相对单一，局地性明显，其对流形态同样

具有平行层状(PS)降水MCS的特征。两次暴雨中PS型MCS与长江中下游地区此类MCS移动方向偏东或东北略有不同,而是向偏东或东南方移动,但7·21暴雨过程中最后阶段形成的PS型MCS是向东北移动的。

3)毫米波测云雷达可以观测到测站上空及周边云的形态特征及发展情况,回波强度及速度可以展现出云的演变、内部结构特征以及降水状态。结合两次暴雨过程,测站在暴雨来临之前均先出现高度较高的卷云,随后云层逐渐降低,并伴随积云的发展,回波强度逐渐加强,最终强反射率回波接地即地面降水开始出现;0℃层亮带可以分别分辨云中粒子的状态。

4)两次暴雨的风廓线展现了MCS低层风场特征。分析表明,两次暴雨在风场变化中均存在着相似的特征,但7·21过程风场更复杂。从风场的变化特征看,6·23暴雨与7·21暴雨前期降水过程均存在东风层,与北京特殊地形的共同作用可能是导致夏季强降水的因素之一;同时,两次暴雨过程发生之前均存在对流层低层风速明显增大的过程。风向的切变以及出现超高空急流等低层扰动加强的现象,这些均有可能是造成强降水的原因。

尽管文中利用高时空分辨率的探测资料揭示了北京6·23与7·21暴雨过程中的MCS特征,对于华北地区线状对流的组织类型和环境特征与长江中下游及华南地区的有何不同,仍需通过更多的个例对比研究。由于仪器本身仍存在一定时空布局的局限性,因此仅利用探测设备对暴雨等形成、维持的机制,地形对于华北地区MCS的产生和维持的作用等分析远远不够,在今后的工作中借助数值模拟手段来进一步研究。

致谢:北京市气象局提供资料。

参考文献:

- [1] Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull Amer Meteor Soc*, 1975, 56: 527-530.
- [2] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3413-3436.
- [3] Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. Synoptic and Meso- α scale aspects of flash flood events. *Bull Amer Meteor Soc*, 1979, 60: 115-123.
- [4] Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea Forecasting*, 1996, 11:560-581.
- [5] Schumacher R S, Johnson R H. Environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 961-976.
- [6] Schumacher R S, Johnson R H. Characteristics of U.S. Extreme Rain Events during 1999-2003. *Amer Meteor Soc*, 2006, 21:69-85.
- [7] 吴天琪. 台湾地区中尺度试验(TAMEX)简介. *气象科技*, 1992, 20(6): 47-51.
- [8] 孙晶. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统研究若干进展. *气象科技*, 2011, 39(3): 257-265.
- [9] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等. 我国南方暴雨的实验与研究. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 690-704.
- [10] 程麟生,冯伍虎. 中纬度中尺度对流系统研究的若干进展. *高原气象*, 2000, 21(4): 337-347.
- [11] 赵宇,崔晓鹏,高守亭,等. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究. *大气科学*, 2011, 35(5): 945-962.
- [12] 王令,卞素芬,王国荣,等. 2011年6月23日北京暴雨多种探测资料的分析. 第28届中国气象学会年会——S1第四届气象综合探测技术研讨会,2011.
- [13] 陈赛男. 北京“6·23”暴雨天气形成特征及云物理过程的影响研究. 北京:中国气象科学研究院硕士,2013.
- [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. *气象*, 2012, 38(10): 1278-1287.
- [15] 谌芸,孙军,徐璐,等. 北京721特大暴雨极端性分析思考(一)观测分析及思考. *气象*, 2012, 38(10): 1255-1266.
- [16] 孙军,谌芸,杨舒楠,等. 北京721特大暴雨极端性分析思考(二)极端性降水成因初探及思考. *气象*, 2012, 38(10): 1267-1277.
- [17] 孙建华,赵思雄,傅慎明,等. 2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征. *大气科学*, 2013, 37(3): 705-718.
- [18] 苏德斌,孙成云,余东昌,等. 短临交互预报系统VIPs设计开发与应用. *气候与环境研究*, 2010, 15(5): 571-578.
- [19] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,1980: 115-117.
- [20] 王晓芳,崔春光. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 909-923.
- [21] 宋巧云,孙成云,梁丰,等. 风廓线雷达在北京市气象局的业务应用. *气象科技进展*, 2013, 3(5): 24-28.
- [22] 何平,朱小燕,阮征,等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 465-470.
- [23] 郭虎,段丽,杨波,等. 0679北京香山局地大暴雨的中小尺度天气分析. *热带气象学报*, 2008, 19(3): 265-275.
- [24] 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. *热带气象学报*, 2008, 24(3): 219-227.