

# 雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用

陈明轩<sup>1</sup> 王迎春<sup>2</sup> 高峰<sup>1</sup> 肖现<sup>1</sup> 程丛兰<sup>1</sup>

(1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2 北京市气象局, 北京 100089)

**摘要:** 首先介绍了近年来国际上在雷达气候研究方面的一些进展, 特别聚焦于不同地区对流风暴和对流性降水的日变化特征, 以及京津冀地区雷达气候研究的一些最新成果。主要揭示了不同地区对流的形成、加强和日循环传播与太阳加热、地形强迫、盛行风及天气尺度和中尺度系统活动等存在紧密联系。其次, 对雷达气候学的另一特色研究——采用三维风暴属性追踪统计的方法也进行了介绍。文章也从城市化影响对流风暴和对流性降水发展演变以及从雷达气候学角度研究城市地区强天气两个方面, 做了研究进展的一些回顾。最后, 对雷达气候学在城市地区强天气演变机理研究及精细化临近预报预警方面的应用进行了讨论。

**关键词:** 雷达气候, 对流, 降水, 城市化, 临近预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.003

## An Overview of Progresses in Radar Climatology and Its Prospective Applications in Nowcasting Severe Weather over Urban Regions

Chen Mingxuan<sup>1</sup>, Wang Yingchun<sup>2</sup>, Gao Feng<sup>1</sup>, Xiao Xian<sup>1</sup>, Cheng Conglan<sup>1</sup>

(1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

**Abstract:** International progress in radar climatology in recent years is introduced first in this paper, focusing on diurnal variations of convective storms and precipitation in different regions in the world based on radar climatology, and some research findings of radar climatology for diurnal variations of warm-season convective storms over contiguous North China (Beijing and its vicinity). Studies of radar climatology mainly reveal initiation, enhancement, and diurnal cycle and propagation of convection over different regions, which has a close relationship with solar heating, topographical forcing, prevailing winds, as well as synoptic and meso-scale systems. Statistics of identified and tracked 3D storm properties are another especial study of radar climatology, and are also presented. Studies and progress in effects of urbanization on convective storms and precipitation, and studies on convective weather over urban regions based on radar climatology are also reviewed. Finally, application prospects of radar climatology in analysis on convective mechanism and fine-scale nowcasting of convective storms and precipitation over urban regions are discussed in the paper.

**Keywords:** radar climatology, convection, precipitation, urbanization, nowcasting

### 1 引言

天气雷达可以获得高时空分辨率的探测资料, 是目前对流风暴三维特征和强降水最为快速有效的气象探测工具之一<sup>[1]</sup>。如果能够对某一地区长时间的天气雷达资料(目前主要是单部雷达或者雷达组网观测得到的反射率因子资料)进行统计分析研究, 就能够了解对流风

暴和对流性降水的精细时空分布和演变特征, 也包括强天气的出现频率和风暴属性等, 这就是所谓的雷达气候研究。自从20世纪70年代开始, 随着计算机和数字化天气雷达技术的发展, 使得利用计算机处理海量雷达探测资料成为可能时, 就已经有学者开始了雷达气候研究。Kuo等<sup>[2]</sup>利用一个X波段试验雷达的4年夏季观测资料, 开展了美国Black Hills地区的雷达气候研究, 首次揭示了该地区对流降水回波的时空分布特征及其在不同盛行风形势下时空分布频率的差异, 可以说是为雷达气候研究开创了先河。近几十年来, 随着天气雷达在世界各地

收稿日期: 2013年5月30日; 修回日期: 2013年9月5日

第一作者: 陈明轩(1973-), Email: mxchen@ium.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41075036); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306008)

的广泛业务应用和雷达资料的不断积累, 雷达气候研究已经成为对流天气气候特征研究的主要方向之一, 使用的雷达资料也从单部雷达的回波观测转换为使用三维雷达组网拼图资料。特别是在美国, 自20世纪80年代后期WSR-88D业务雷达在全美的布网应用开始, 随着雷达资料的积累, 已经开展了大量的雷达气候研究方面的工作。在国际上, 也有学者利用长时间的雷达估测降水资料进行对流性降水的气候统计研究, 这也可以归属于雷达气候研究范畴。通过雷达气候研究, 不但能够为理解强对流天气的发展演变机制提供有效帮助, 为对流风暴和对流性强降水的临近预报和预警提供背景资料和科学依据, 也能够为评估和发展对流尺度数值预报、定量降水预报以及天气和气候系统模式提供一个评判基准。

随着全球城市化进程的加剧和大型城市的不断扩展, 城市和城市群地区强对流天气的发展演变越来越受到人们的关注。强对流天气经常会给城市地区带来重大的灾害损失, 包括人员伤亡、交通阻塞、城市建筑受损等。而城市下垫面的改变和城市热岛效应<sup>[3-5]</sup>等也会对强对流天气的发生和发展产生明显影响。如果将雷达气候与城市气象特别是城市地区对流天气研究相结合, 将有助于理解城市地区强对流天气的发展演变特征以及城市环境对强对流天气的影响机理, 对提升城市地区强天气的发展演变和临近预警起到重要推动作用。

本文主要介绍近年来国内外特别是国际上关于雷达气候研究方面的一些进展, 并从城市化影响对流风暴和强降水发展演变以及从雷达气候角度研究城市地区强天气两个方面, 做了一些研究进展的简介。最后, 对雷达气候研究及其在城市地区强天气临近预报方面的应用前景进行了讨论。

## 2 雷达气候研究进展

### 2.1 对流日变化气候特征及盛行风影响

雷达探测资料具有高时空分辨率的特性, 对揭示对流天气(包括对流风暴和对流性降水)时空分布的短周期变化特别是日变化特征具有独特优势。而对流的日变化特征对强天气的临近预报预警以及对流尺度数值天气预报物理过程的改进等均具有重要意义。因此, 对流天气日变化特征研究成为雷达气候研究的主要内容之一。世界各地的学者对此开展了大量的研究, 揭示了不同地区对流风暴和对流性降水的日变化特征, 以及不同天气系统、气候特征和地形强迫对对流日变化的影响机理。在美国, Carbone等<sup>[6-7]</sup>和 Ahijevych等<sup>[8-9]</sup>通过对美国大陆多年的WSR-88D雷达资料的统计研究, 分析了美国大陆对流性降水回波出现频率的时空分布特征, 揭示了降水回波存在明显的

日循环和半日循环的周期性传播气候特征, 以及由于落基山等山区的动力抬升和局地热力强迫作用, 导致降水系统存在明显的山区新生并向下游(向东)不断传播的特征(如图1和图2所示)。Carbone等<sup>[6]</sup>的研究同时也指出, 对流的日循环特征主要是由于太阳加热作用的日变化而形成的, 并且具有不可预报性, 因为数值预报包括资料同化系统主要是基于准平衡气流和天气尺度强迫的动力学基础而设计的, 其对由于天气尺度而形成的具有较长周期性变化和生命史特征的对流系统具有较高的可预报性, 而盛夏期间主要以热力对流系统为主, 所以数值预报的准确性要差很多。Hsu等<sup>[10]</sup>利用覆盖美国大陆的8年暖季雷达估测降水资料, 通过波谱分解方法, 得出了美国大陆对流性降水存在半天、1天、4天等多个周期性变化特征, 其中日循环特征最为明显, 而且小于5天的高频振荡表明中尺度对流系统主要以向东传播为主, 与Carbone等<sup>[6]</sup>得

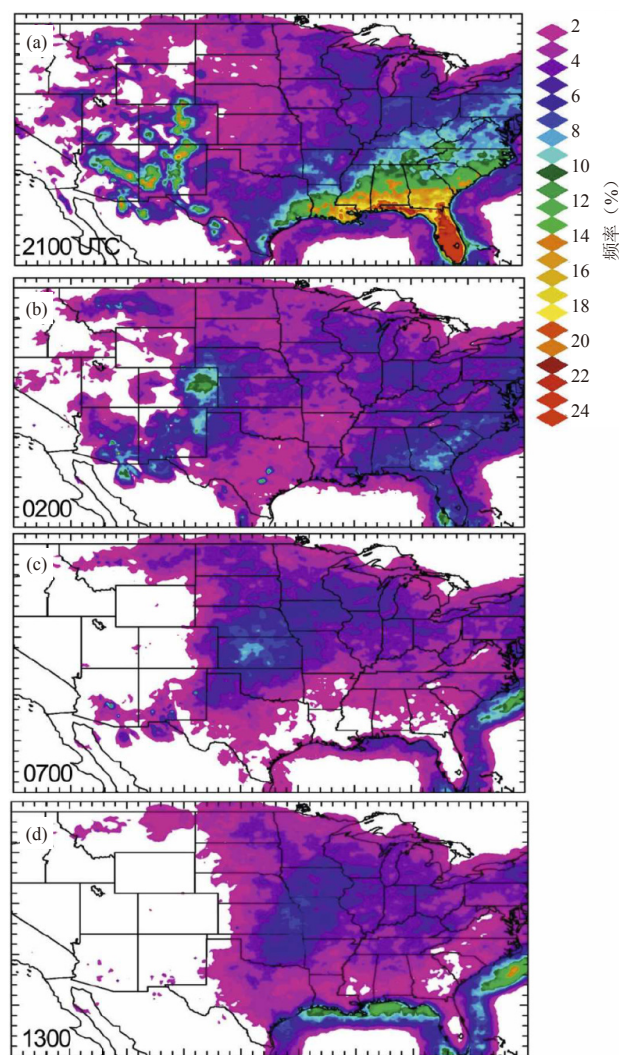


图1 美国大陆6—8月雷达回波出现频率<sup>[7]</sup>  
(a) 2100UTC; (b) 0200UTC; (c) 0700UTC; (d) 1300UTC

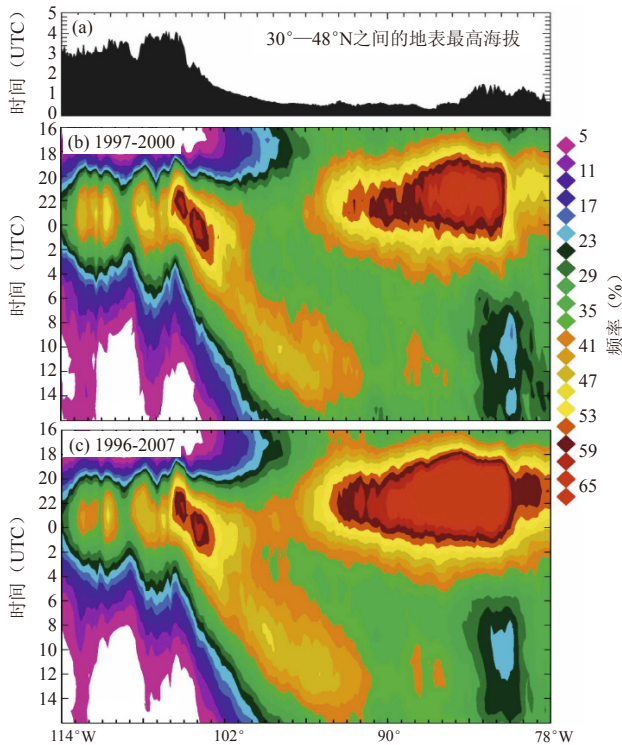


图2 美国大陆6—8月雷达回波出现频率Hovmöller图<sup>[7]</sup>  
(沿纬度平均的时间—经度图)

(a) 对应的平均地形廓线; (b) 1997—2000年资料统计结果; (c) 1996—2007年资料统计结果

出的结论相似。Lang等<sup>[11]</sup>和Rowe等<sup>[12]</sup>利用北美季风试验加强观测期间的雷达观测资料,对2004年7—8月发生在美国西南部及墨西哥湾北部的强对流个例进行了统计分析,发现地形强迫对对流风暴的每日新生和传播起到关键作用,由于局地加热对流一般在山区生成,然后在向下游传播的过程中得到明显加强。在欧洲,Weckwerth等<sup>[13]</sup>利用多年的雷达观测资料,对德国西南部到法国北部地区的对流风暴新生和加强的气候特征进行了研究,揭示了这一地区的对流风暴存在显著的日循环和频率峰值特征,每日加热和山区地形强迫对风暴的新生和加强起到关键作用,对流首先在山区大量形成,大约2h后到达平原地区。Pavai等<sup>[14]</sup>利用中国研制的WSR-98D雷达的多年探测资料,研究了罗马尼亚Bobohalma地区对流出现频率的变化特征,发现这一地区夏季对流的日变化与地形高度存在紧密关系,对流频繁地在较高地形的地区新生,然后向平原地区传播。

在中国,近年来主要基于地面观测和卫星资料,开展了不同地区的对流气候特征研究,特别是对流性降水的日变化特征研究,取得了很多重要的成果<sup>[15-24]</sup>,这里不做详细介绍。然而,基于高时空分辨率的雷达探测资料的对流气候特征研究工作则相对较少。Lin等<sup>[25]</sup>利用多年的雷达探测资料以及闪电、探空和地面资料等,

研究了台湾地区在弱天气尺度强迫形势下午后对流风暴的气候特征,发现台湾地区在弱天气尺度形势下的对流风暴出现频率存在显著的午后最大峰值特征,对流频繁出现的地区与台湾的地形分布一致,且在弱天气尺度形势下,对流不存在明显的传播特征。Yeung等<sup>[26]</sup>对36个影响香港地区的热带气旋个例的雷达回波和降水特征以及地形作用进行了统计分析研究,为热带气旋及其降水临近预报提供了背景资料。

随着中国大陆新一代天气雷达布网的完成和雷达资料的多年积累,在我国不同地区开展精细的雷达气候研究的资料条件已经逐渐成熟。特别是在京津冀地区,为办好北京奥运会等大型活动的气象保障服务,已经在北京及其周边地区建立了日趋完善的新一代天气雷达网,并且具备了较为可靠的实时雷达资料质量控制体系,也积累了多年的雷达组网资料<sup>[27-28]</sup>。这些条件为这一地区的雷达气候研究奠定了良好的基础。Chen等<sup>[29]</sup>首次利用2008—2011年暖季5—8月份京津冀地区6部新一代天气雷达逐6min的反射率因子三维拼图资料,研究了这一地区对流风暴出现频率的暖季平均日变化特征,以及暖季主要月份(6、7、8月)对流风暴日变化的差异。暖季平均日变化特征研究揭示了京津冀西北部山区是暖季对流活动的主要源地,由于太阳加热,西北部山区在午后风暴出现频率显著增加,且大多数的对流风暴从西北部山区向山脚甚至东南平原地区传播和发展。到下午接近傍晚时段,在京津冀山脚附近,特别是在北京及其周边地区,对流风暴出现频率显著增大,风暴的增强和新生与地形对低层偏南暖湿气流的强迫上升存在密切联系(图3)。在夜间到凌晨时段,对流风暴主要在东南部平原地区发展,风暴频率随着时间的推移逐渐减小,风暴频率最低时段发生在早晨。对比图2和图3可以看出,京津冀地区的对流风暴日循环和传播特征与Carbone等<sup>[7]</sup>对美国大陆的对流风暴日循环和传播的研究结果存在一定的相似性。上述研究结论也与Zheng等<sup>[16]</sup>以及He等<sup>[22]</sup>利用卫星资料开展的这一地区对流日变化特征的研究结论类似。从Chen等<sup>[29]</sup>的研究结果来看,区域平均的风暴频率显示,京津冀地区的对流风暴存在显著的双峰值特征:主要峰值是由于地形强迫导致的午后到傍晚时段山脚附近的对流频发和增强,次要峰值是由于平原地区有利的触发机制导致的夜对流频发(图4)。He等<sup>[22]</sup>利用数值模式资料分析后发现,华北平原地区有利的夜对流触发机制与山区—平原的次级环流上升支以及夜间东南平原地区的低空西南急流存在密切联系。在Chen等<sup>[29]</sup>的研究中,通过对比暖季各月的对流风暴出现频率特征发现,西北部山区午后热

对流出现频率最高在6月，最低在8月，而在平原地区午后对流出现频率最高在7月。地形强迫效应对对流风暴的增强和新生的影响，表现最为明显是在7月，其次是6月。对于平原地区夜对流而言，出现频率最高在7月和8月，而6月较低。暖季各月的风暴出现频率的平均日变化趋势和双峰值特征与整个暖季的平均趋势相似，表明6—8月的对流风暴控制了整个暖季这一地区对流风暴的日变化特征。平均而言，7月这一地区的暖季对流风暴（包括长生命史的中尺度对流系统和短时生命史的对流单体）的出现频率最高（图4）。对流风暴在6月和7月存在明显的自西北向东南的传播特征，且6月传播速度最快。

上述国内外关于对流日变化气候特征的研究是目前雷达气候研究的主流，其成果主要揭示了不同地区对

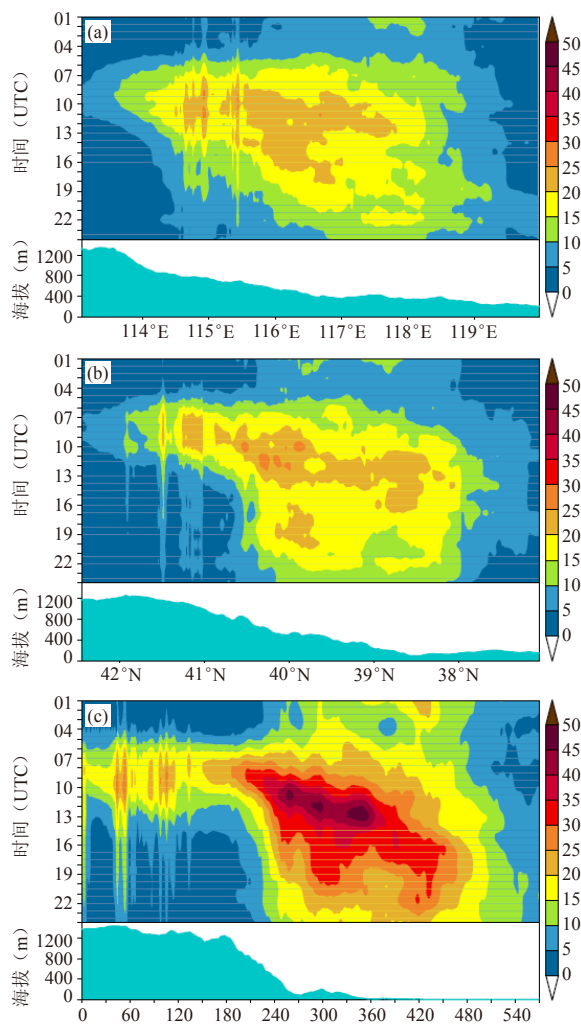


图3 京津冀地区暖季40dBz以上雷达回波出现频率 Hovmöller图<sup>[29]</sup>

(a) 纬向平均结果；(b) 径向平均结果；(c) 西南—东北向平均结果（每幅图下方的蓝绿色区域为对应的地形平均廓线）

流的形成、加强和日循环传播与太阳加热、地形强迫以及天气尺度和中尺度系统的活动存在紧密联系。一般来说，山区作为主要的热源，是夏季午后对流的主要源地<sup>[9, 11-13, 25, 29-30]</sup>。在一些地区，对流具有明显的向下游移动和发展传播的特征，而且在对流下山的过程中，由于地形强迫，使得低层吹来的暖湿空气产生强烈抬升，从而导致对流（包括对流风暴和对流性降水）在山脚附近明显加强，也频繁出现对流风暴的新生<sup>[8-13, 29]</sup>；而在另一些地区，特别是以山区为主的地区（如我国的台湾地区），如果没有强的天气尺度系统的影响，对流的传播特征也不是非常明显<sup>[25, 30]</sup>。

早在20世纪70年代，Kuo等<sup>[2]</sup>开展的雷达气候研究就揭示了暖季对流的发展演变和时空分布特征与盛行风存在密切联系。他们发现，对于美国Black Hills地区来说，因为不同方向的盛行风对应于不同的天气系统，对流回波在西南、西北向的盛行风形势下出现的频率最高。近年来，一系列的雷达气候研究进一步表明，对流风暴和对流性降水每日新生、演变和传播与盛行风存在密切关系<sup>[11, 26, 30-31]</sup>。Lang等<sup>[11]</sup>和Rowe等<sup>[12]</sup>的研究发现，由于盛行风与环境垂直风切变、大气波动等存在密切联系，再加上地形的影响，因此对对流的演变传播和时空分布特征产生重要影响。Yeung等<sup>[26]</sup>和Saxen等<sup>[30]</sup>的雷达气候研究也发现，不同的盛行风形势下，对流的出现频率差异明显。对流发展演变与盛行风的密切关系，也被数值模拟研究所证实<sup>[32]</sup>。最近，利用京津冀地区6部雷达4年暖季的反射率因子资料，计算了500和925hPa

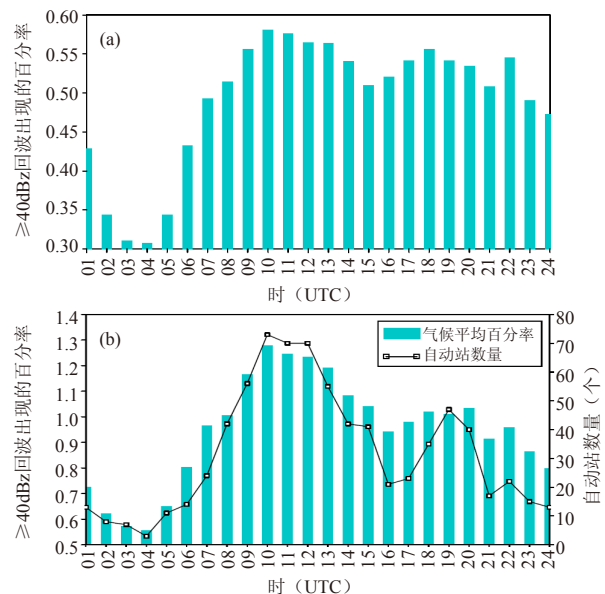


图4 暖季平均的逐小时40dBz以上雷达回波出现的百分率<sup>[29]</sup>  
(a) 京津冀地区的平均结果；(b) 北京地区的平均结果（图b中的粗黑线表示在每个小时时段过去24h雨量记录达到50mm以上的北京地区自动站数量）

不用盛行风向下的对流风暴的出现频率分布，可以看出其存在显著的差异：在500hPa，西西南（WSW）和西西北（WNW）风向形势下风暴出现频率显著偏高；在925hPa，南西南（SSW）和南东南（SSE）风向形势下，风暴出现频率显著偏高（图6）。初步分析也表明，在500hPa WSW和WNW风向下，对应的是偏西气流，主要与影响京津冀地区暖季对流风暴的三类天气系统（冷涡、西来槽、西太平洋副热带高压）存在直接联系。在925hPa SSW和SSE风向下，对应的是京津冀南部平原地区的低层偏南风，有利于低层偏南暖湿气流的向北推进，并在地形强迫抬升作用下，对对流的发生和加强起到关键作用。

如雷达气候研究结果所言，不同高度的盛行风代表了不同的天气系统和形势。一般而言，500~700hPa高度的盛行风代表了影响对流移动和传播的天气系统或引导气流，而低层（如925hPa高度）的盛行风则代表了低空急流的方向和强度，这些均与对流的每日发展演变和传播存在密切关系。进一步地，这种高低空风形势相配合所形成的垂直风切变（包括风速切变和风向切变）以及地形对低空急流带来的暖湿空气的强迫抬升作用，对对流日变化也具有显著的正面影响。这从Parker等<sup>[33]</sup>针对美国大陆对流日变化以及Lang等<sup>[11]</sup>和Rowe等<sup>[12]</sup>针对北美季风试验区域（墨西哥湾北部地区）对流日变化的雷达气候研究中也均得到了很好的验证。

另外，基于雷达观测资料，也可以开展对流风暴和对流性降水的月季、季节、年季变化等的气候特征研

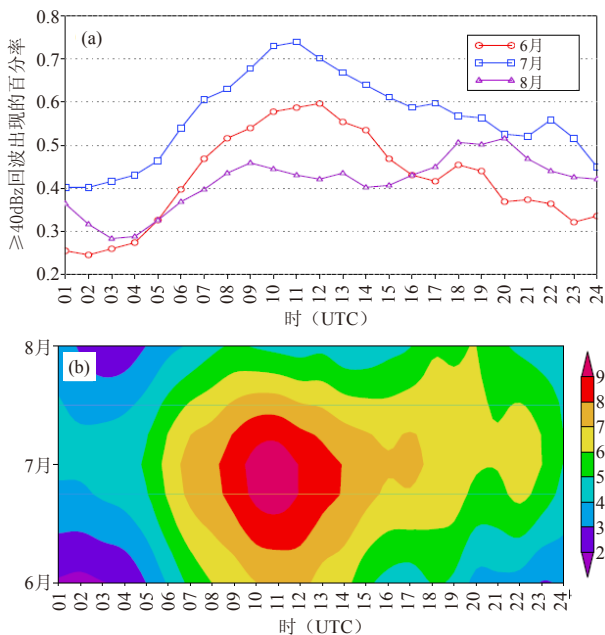


图5 京津冀区域平均的暖季6—8月各月逐小时40dBz以上雷达回波出现百分率 (a)，以及出现频率的月—小时分布图 (b) <sup>[29]</sup>

究。Hocker等<sup>[34]</sup>利用10年的雷达反射率因子资料，研究了发生在美国Oklahoma地区的飚线系统的出现频率年季变化、月季变化、日变化以及时空分布和移动路径等的气候特征。Murray等<sup>[35]</sup>利用10年的雷达资料，研究了美国东北部地区对流风暴的时空分布特征，揭示了这一地区的对流风暴时空分布存在明显的年季差异，以及与天气尺度系统的年季活动规律密切相关。Carbone等<sup>[36]</sup>也尝试利用7年暖季的雷达资料研究揭示美国大陆对流的年季变化，并对北美季风环流和ENSO对对流发展演变的影响进行了初步分析。但是，类似的雷达气候研究均需要利用较长时间积累的雷达资料，这样从气候学意义上来讲才具有一定的可靠性，这方面的工作目前开展得还不是很多。

## 2.2 风暴属性的识别追踪和统计

对于雷达气候研究，也有一些学者采用风暴属性追踪统计的方法进行。这种方法首先是基于雷达三维反射率因子回波，利用风暴识别和追踪分析算法对每个风暴单体的属性进行识别、分析和追踪，然后再对得到的所有风暴的有效属性进行统计分析，得出某一地区对流风暴属性及发展演变和传播的气候特征。目前，比较有代表性的对流风暴识别和追踪分析算法包括风暴三维属性追踪算法TITAN<sup>[37]</sup>以及风暴质心追踪算法SCIT<sup>[38]</sup>，采用风暴属性追踪统计的雷达气候研

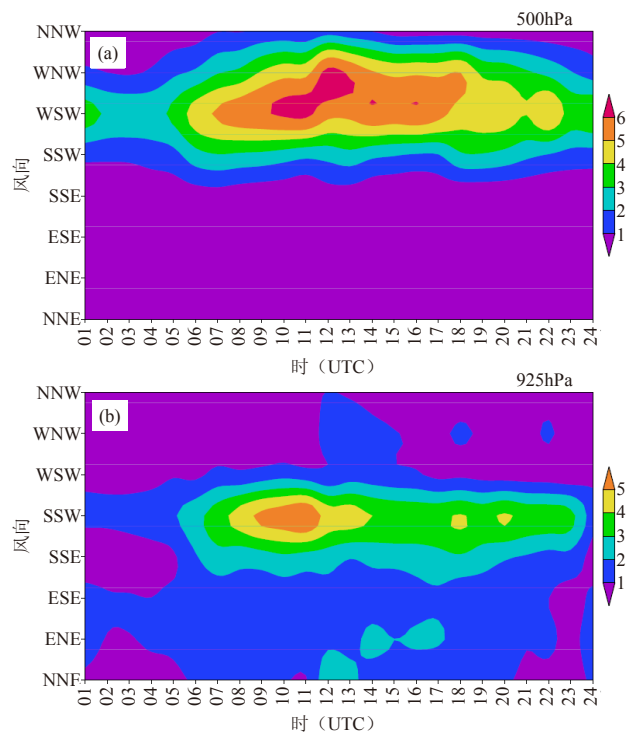


图6 40dBz以上雷达反射率因子指示的京津冀区域平均的逐小时风暴出现频率的风向—小时分布图 (a) 500hPa; (b) 925hPa

究也基本上基于这两种算法。Henry<sup>[39]</sup>利用TITAN, 通过对美国丹佛附近的雷达观测资料进行风暴追踪和统计研究, 揭示了83%的单体风暴的生命史不会超过30min, 而超过88%的多单体风暴和超级单体风暴的生命史超过30min, 为丹佛地区对流风暴尺寸和强度的临近预报提供了改进的科学基础。Saxen等<sup>[30]</sup>利用TITAN算法对美国一个多山地区的对流风暴属性的追踪统计也表明, 风暴的生命史、平均面积、移动传播速度、强度以及回波顶高等, 均表现出显著的差异和明显的峰值特征。在欧洲和南美洲, 也有学者尝试利用TITAN进行风暴属性的识别和追踪统计, 并得出了一些有意义的、定量的风暴气候学属性特征, 为对流的诊断分析和临近预报提供了科学背景支持<sup>[40-41]</sup>。Mohee等<sup>[42]</sup>利用SCIT算法, 对美国北Dakota州的对流风暴属性的气候特征进行了研究, 发现风暴出现频率在傍晚到凌晨存在明显的峰值, 风暴的平均生命史为24min左右, 平均移速为16.4m/s左右, 风暴向偏东北方向的移动趋势最为明显, 在暖季每月的变化差异也很明显, 并开展了一系列的对流风暴气候特征属性的分析。

在国内, 韩雷等<sup>[43]</sup>首次利用2003—2007年5—8月天津塘沽的新一代多普勒天气雷达三维反射率因子数据, 对天津及邻近地区的对流风暴的气候分布特征进行了统计分析。通过对风暴的识别和追踪结果的统计分析, 给出了京津地区对流风暴的面积、体积、顶高、最大反射率因子、生命史和运动规律等定量的强对流风暴气候统计特征。从韩雷等<sup>[43]</sup>给出的对流风暴面积和体积的地理分布可以看出(图7), 北京西北部 and 西南部地区风暴的面积较小, 而东部则明显较大。根据Chen等<sup>[29]</sup>对该地区对流日变化的雷达气候

研究, 并依据天气学分析, 可以推测出西北部山区的对流风暴可能更多为热力对流, 空间与时间尺度都较小, 而在东部平原地区出现具有较好组织性和长生命史特征的对流风暴系统的频率明显较高。目前, 作者正在利用京津冀地区6部雷达5年(2008—2012年)暖季5—9月的反射率因子三维拼图资料和TITAN算法, 对这一地区的对流风暴三维属性进行细致的气候特征统计研究, 相关的工作这里不再介绍。

对基于高时空分辨率雷达三维资料追踪识别得到的对流风暴的三维属性进行定量统计分析, 是雷达气候研究的一大特色, 目前来说, 也是其他资料和方法所不能比拟的。与使用常规观测资料和静止卫星红外亮温的统计结果相比, 使用雷达资料进行这样的气候统计不仅可以给出对流风暴的三维空间信息的统计结果(如体积和顶高等), 还可以给出风暴的生命史、移速、移向等定量气候分布特征, 从而可进一步充实对某一地区对流天气气候特征的认识。

### 2.3 基于雷达气候研究的个例分析

这里, 基于京津冀地区雷达气候初步研究结果<sup>[29]</sup>, 对三个影响北京地区的典型对流风暴个例进行对比分析, 分别是2012年“7·21”特大暴雨以及2013年“6·24”和“6·28”强对流天气个例。图8是40dBz以上雷达组合反射率因子回波的时间序列图。由图可以看出, 不同天气形势下的对流风暴, 均存在明显的由山区和山脚向下游平原地区传播发展的特征。而且, 从这三个个例来看, 在接近傍晚时段, 在京津冀山脚附近特别是在北京及其周边地区, 对流风暴的面积明显增大, 组织性得到显著加强。从北京南郊观察台的探空来看(图略), 对于这三个个例, 低层925hPa环境风均为明显的偏南风, 这表明对流风暴的

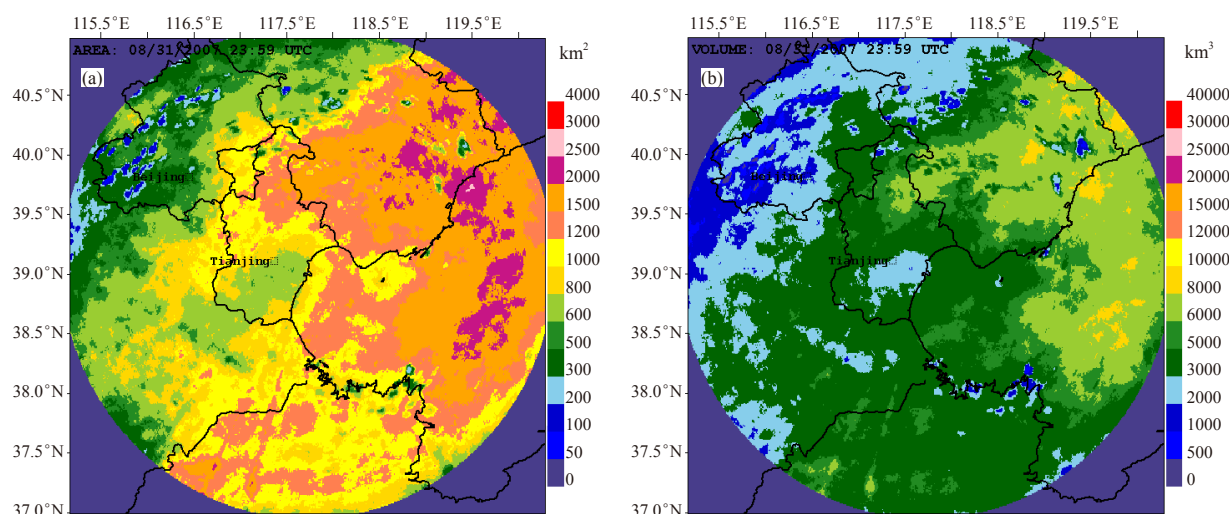


图7 基于TITAN追踪识别结果统计得到的天津及其邻近地区对流风暴平均面积(a)和体积(b)的地理分布<sup>[43]</sup>

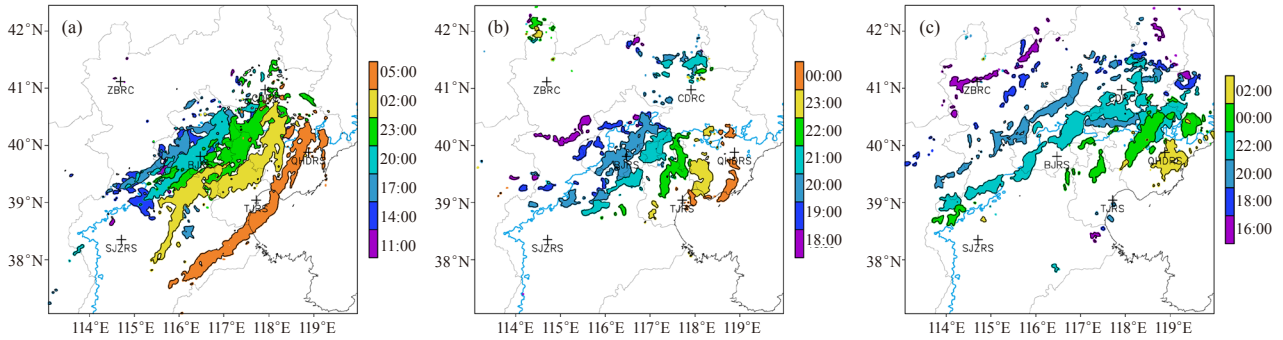


图8 京津冀地区雷达反射率因子 $\geq 40\text{dBz}$ 的对流风暴回波时间序列

(a) 2012年7月21日; (b) 2013年6月24日; (c) 2013年6月28日 (图中粗蓝线为200m地形等高线; 图中不同颜色代表不同时间(北京时间)的40dBz以上回波覆盖范围)

增强和新生与地形对低层偏南暖湿气流的强迫上升存在密切联系。上述个例分析结果与Chen等<sup>[29]</sup>的雷达气候学研究结果一致。对比这三个个例来看,“7·21”特大暴雨个例的雷达回波传播速度明显偏慢,从山脚传播到渤海湾附近大约耗时9h,而“6·24”和“6·28”强对流个例的雷达回波传播速度较快,从山脚传播到渤海湾仅耗时4h左右。Chen等<sup>[29]</sup>的雷达气候学研究指出,京津冀地区的对流风暴在6和7月存在明显的自西北向东南的传播特征,且6月传播速度最快,也符合这三个个例的实际观测结果。从500hPa探空风来看,“7·21”和“6·28”个例500hPa环境风为WSW,风暴向下游的传播方向更偏东,而“6·24”个例的500hPa环境风则为WNW,风暴的传播方向更偏向东南。这也与我们最新得出的雷达气候学研究结果一致。

精细的雷达气候研究结果是强对流天气精细化预报所必须的科学背景,可以用来指导预报人员对实际的强天气个例进行预报,也可以将雷达气候研究结果集成进自动化的强天气客观预报系统中,用来发展和改进强天气的自动化客观预报和预警<sup>[25, 28, 30]</sup>。

### 3 雷达气候在城市强天气临近预报中的应用

#### 3.1 城市对局地降水及强天气的影响

近年来,国际上开展了大量的城市化和城市区域特征对局地降水及强天气影响的研究。对于局地降水,大部分研究都表明,城市会导致局地降水量及强降水频次的增加,尤其在城市的下风方,这种效应更加明显<sup>[44-50]</sup>。但是,部分学者认为,城市效应会导致局地降水有不同程度的减少<sup>[51-53]</sup>。总之,目前城市对局地降水的可能影响问题,国际上存在两种相反的观点:多数研究者认为,城市的动力、热力作用使城区和城市下游地区降水增加;有一些研究者认为,城市大气污染物的微物理过程会使城市下游地区的降水减少。我国就城市对局地降水的影响也开展了一些研

究,得到的结论也不尽相同<sup>[54-57]</sup>。关于城市对局地强对流天气的影响,国内外研究表明,由于城市规模的不断扩大,导致城市下垫面变化并引起城市热岛等城市效应的不断加强,非常有利于近地面辐合的增强和局地热力环流的产生,导致暖湿气流上升强度加大,从而引起城市地区强对流天气的新生和强烈发展<sup>[58-68]</sup>。总的来说,城市化和城市特征对局地降水和强对流天气的影响存在较强个性,不同地区的研究结论不尽相同。在我国城市化加剧的今天,城市对局地降水和强对流天气的影响究竟如何,降水及对流的新生、增强或减弱与热岛强度、城市边界层特征等存在怎样的一种关系,尚需进一步研究。

#### 3.2 雷达气候与城市强天气临近预报的应用结合

从上文的介绍来看,一方面,基于高时空分辨率雷达观测资料的雷达气候研究,能够揭示对流风暴和对流性降水的精细时空演变特征;另一方面,虽然总体来说城市区域的尺度相对较小,但城市对对流天气的影响却非常显著。因此,如果利用雷达气候研究来揭示城市地区对流的时空变化特征,就具有一定的优越性。但是,就目前来说,国内外在这方面开展的工作还不是很多。Bentley等<sup>[69]</sup>利用10年的雷达反射率因子拼图资料,分析了美国Atlanta地区的对流气候变化特征,发现在Atlanta的城市地区以及城市扩展地区,与强的城市热岛效应相对应,对流风暴的出现频率明显偏高,表明城市对局地强对流的发生和增强具有明显正面效应。另外,城市下垫面的改变,也能够引起对流风暴的动力和热动力特征的明显变化。最近,Niyogi等<sup>[70]</sup>开展了美国印第安纳州最大城市和首府Indianapolis地区对流风暴的雷达气候研究,并对城市地区和周边非城市地区的对流特征进行了比较,揭示了大城市对区域对流的影响。他们发现,在城市地区超过60%的对流风暴会改变结构,而在非城市地区,

仅为25%。白天的城市环境对对流风暴的影响明显高于夜晚。雷达气候分析指出这一地区的对流风暴在接近城市地区上风方时易出现分裂而在下风方时又极易出现合并,使得在城市地区上风方主要以中等尺寸的对流风暴为主,而在下风方则是小尺寸和大尺寸风暴出现的概率较高。同时,Niyogi等<sup>[70]</sup>开展的敏感性数值模拟试验也表明,如果在模式中去掉Indianapolis城市地区边界层等的影响时,导致模式中的区域辐合和对流、地面能量平衡、边界层结构等发生明显变化,从而导致实际发生的对流风暴不能够被很好模拟出来。除了利用雷达资料外,Ntelekos等<sup>[71]</sup>也利用闪电资料和地面观测资料,分析了美国马里兰州Baltimore附近的城市群地区暖季对流风暴的时空分布特征,包括季节变化、日变化和空间频率等,发现风暴频率在城市地区与非城市地区存在显著差异,并指出这与城市热岛等城市化效应存在密切联系。Hand等<sup>[31]</sup>也利用地面观测和卫星资料,分析了美国Oklahoma城附近的

暖季降水气候特征,发现在弱天气尺度强迫形势下,城市效应对降水影响最为明显,城市不同地区的湿度分布非常不均匀,城市下风方地区湿度最大,降水也经常会出现异常。在上述Chen等<sup>[29]</sup>针对京津冀地区的雷达气候研究中,也透视出北京城市效应对对流风暴的发生发展起到了关键作用。从北京城区附近风暴概率变化的时段来看,20:00—21:00之间观测的城区内对流风暴出现频率仍然较低,而从21:00开始至00:00,城区内观测的孤立对流风暴单体出现的频率突然增大(图9)。上述分析表明此段时间内北京城市效应对对流风暴的加强或者新生的作用最为明显,这可能与城市热岛及城市陆面不均匀性存在密切关系,但还需要进一步去研究。上述为数不多的雷达气候学与城市对流特征相结合的研究表明,城市局地环流特征(如城市热岛环流)对局地强对流的发生和增强具有明显的正面效应。另外,城市特殊的下垫面和边界层特征,也对对流风暴的结构和热动力特征产生明显影响。

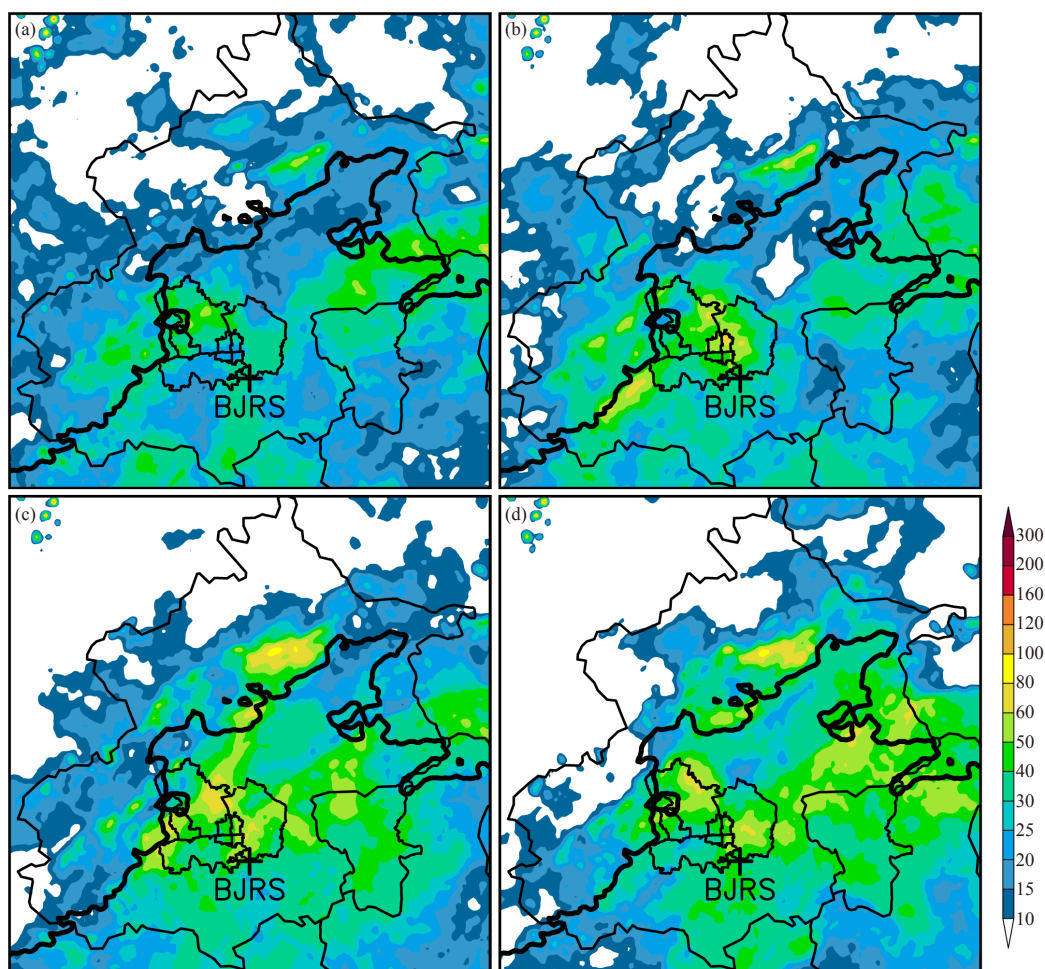


图9 北京地区雷达反射率因子 $\geq 40\text{dBz}$ 的对流风暴回波出现频率  
(a) 20:00—21:00; (b) 21:00—22:00; (c) 22:00—23:00; (d) 23:00—00:00  
(北京时; 图中粗黑线为200m地形等高线; 修改自文献[29]的图2)

可以看出, 如果将雷达气候研究与城市地区对流天气研究相结合, 不但可以掌握城市地区和城市化对流风暴和对流性降水的影响, 也可以改进对城市地区对流天气的临近预报和预警。在国际上, 雷达气候研究结果作为一个区域强对流天气发生发展和演变传播的气候背景资料, 已经被应用于局地对流天气的自动临近预报试验中<sup>[30, 72]</sup>。在北京自动临近预报系统(BJANC)的参数调整优化和系统评估中<sup>[28]</sup>, 我们也已经初步应用了一些雷达气候研究结果<sup>[43, 73]</sup>, 但如何将上述最新的京津冀雷达气候研究结果<sup>[29]</sup>应用于对流天气的自动临近预报中, 许多方面还有待于进一步深入研究。更为重要的是, 如何将雷达气候研究专门应用于城市地区对流天气精细的临近预报和预警中, 目前还未发现国际上有任何的报道或出版的论文。基于以往的研究经验, 可以认为, 对于一个特定的城市或城市群地区, 发展一套集雷达气候研究结果、城市热岛效应、城市下垫面影响效应、城市冠层和城市水文特征等在内的城市地区对流天气概念模型, 同时在模型中也必须考虑一些精细的对流热动力特征<sup>[74-80]</sup>, 并将概念模型集成进对流天气临近预报的专家系统中(可利用类似于文献[28]和[72]的模糊逻辑集成方法), 再结合城市地区精细的探测资料分析和地理信息系统(GIS), 将能够有效提升对城市地区对流天气和对流性降水的监测分析和临近预报、预警能力。另外, 利用临近预报和数值预报的融合技术(Blending), 也是提升对流尺度定量降水预报特别是城市地区暴洪短时临近预报能力的重要手段<sup>[81-82]</sup>。

#### 4 结束语

通过对国内外雷达气候研究成果的描述可以看出, 雷达气候研究对于理解一个区域内对流风暴和对流性降水的精细时空分布和演变特征非常关键, 也非常有助于作为中小尺度天气现象的对流天气的临近预报和预警能力以及定量降水预报能力的提升。从本文的介绍可以看出, 国际上特别是在美国, 已经针对不同区域的对流风暴和对流性降水, 开展了大量的雷达气候研究。目前, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)强风暴预测中心已经有专门的网页提供美国本土几乎每部雷达站覆盖范围内的强天气气候特征图(包括短时大风、冰雹、龙卷的出现报告统计图, 强天气年际变化、月季变化、日变化图), 以及相关的分析表格, 供预报人员进行强天气临近预报和预警业务时参考(网址: [www.spc.noaa.gov/climo/online/rda/](http://www.spc.noaa.gov/climo/online/rda/))。美国佛罗里达州

立大学也制作了一套佛罗里达州和南佐治亚州的雷达气候学数据集, 为佛罗里达州环保部门的地面降水和地下水资源模拟以及NOAA的水文气象分析和预报等提供科学参考(网址: [fuelberg.met.fsu.edu/research/fdep/gquina/climo.html](http://fuelberg.met.fsu.edu/research/fdep/gquina/climo.html))。本文也介绍了雷达气候研究结果可在强天气自动临近预报专家系统中得到应用。另外, 雷达气候研究结果可用于雷达杂波和雷达观测偏差分析, 从而有助于改进雷达的观测质量, 进而也能够改进雷达的定量降水估测效果<sup>[83-84]</sup>。但是, 我国在雷达气候研究方面开展的系统性工作还不是很多。目前, 我国新一代天气雷达已经基本完成布网, 部分地区也已经积累了多年的雷达观测资料, 开展雷达气候研究的资料条件业已成熟。作者基于上海及其周边地区6部新一代天气雷达在2010年5月1日—9月14日上海世博会期间的逐6min反射率因子观测资料, 统计得到了上海及其周边地区2010年暖季的对流风暴日循环特征(图10)。从这个初步的雷达气候结果可以看出, 至少在2010年暖季, 上海及其周边的对流风暴存在明显的日循环和传播特征, 其中影响上海地区的对流峰值主要出现在10:00—12:00之间, 但是不同时段影响的区域完全不同。

另一方面, 近年来, 随着国家经济发展和战略调整, 我国城市化进程的速度显著加快, 不但大城市发展规模逐渐扩大, 而且也已经涌现出了“长三角”、“珠三角”、“环渤海”等大中城市云集的城市群地区。国内外研究也说明, 城市环境对对流天气的影响非常明显。而且更为重要的是, 城市地区对对流天气灾害的承载能力更加脆弱, 需要更为准确、及时和精细化的对流天气临近预报和预警服务。因此, 如前文所言, 这就促使我们应该将雷达气候研究与城市地区对流天气研究有效结合, 从而提升城市地区对流天气的精细临近预报和预警能力。在国际上, 已经开始尝试将雷达气候研究与地理信息系统(GIS)相结合, 对对流风暴和对流性降水的气候特征进行更为精细的研究<sup>[34, 85]</sup>, 这也为城市(群)地区精细尺度的对流天气研究与雷达气候研究及城市环境特征相结合提供了一种新思路。

当然, 雷达气候研究也具有一定不确定性。首先, 天气雷达的探测资料具有一定的局限性, 比如雷达地物杂波(包括城市区域的高建筑物杂波)、亮带回波、波束阻挡、不同雷达之间的标定差异等, 均影响到天气雷达对真实对流回波的探测, 进而影响到雷达气候研究的效果<sup>[86]</sup>。其次, 在雷达站稀疏的地区, 一些区域成为雷达探测的“空缺”区, 而这些区域将不可能获得有效的雷达气候研究结果<sup>[86]</sup>。另外, 正如

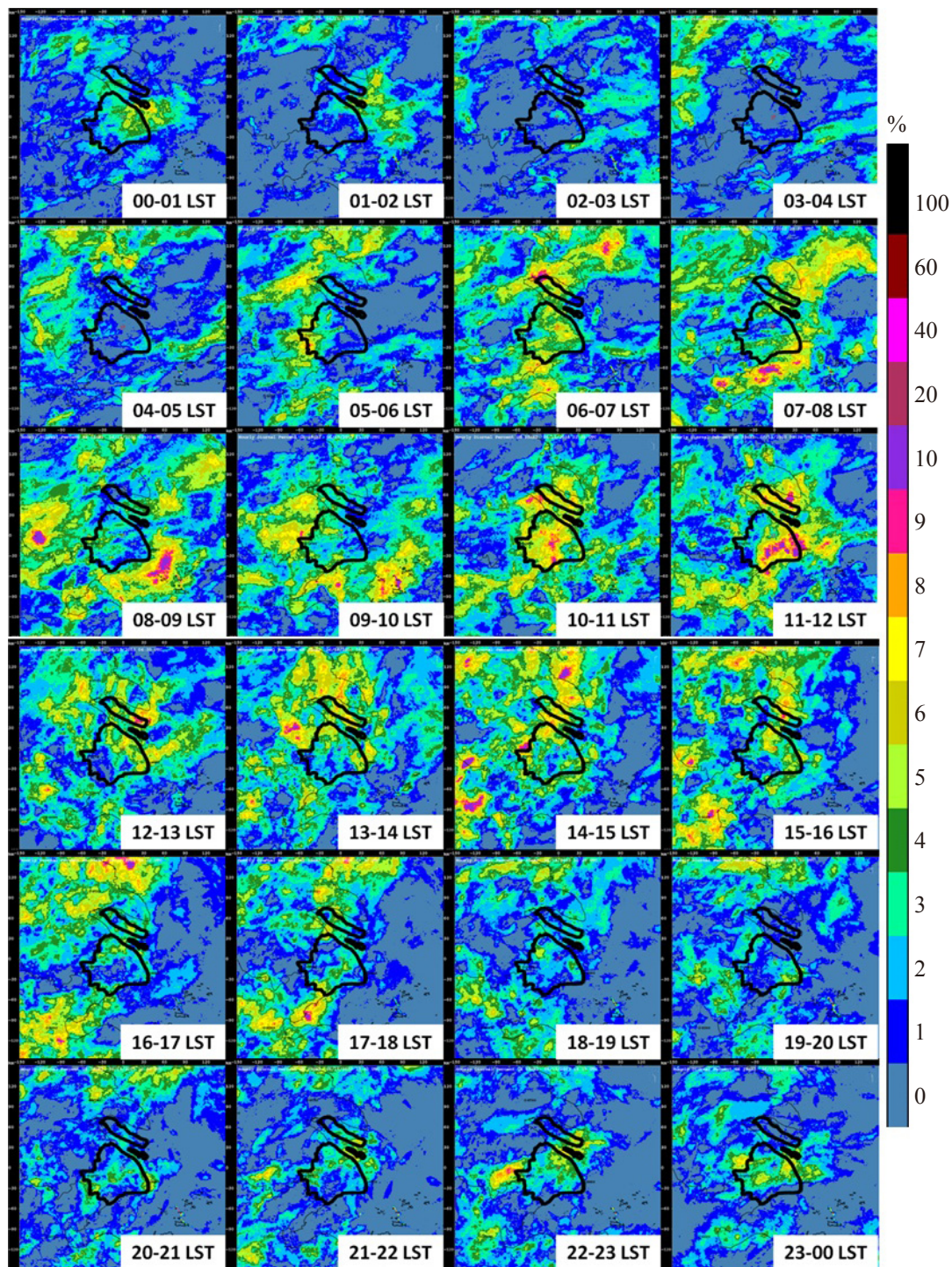


图10 上海及其周边地区雷达反射率因子 $\geq 35\text{dBZ}$ 的对流风暴回波出现概率(%) (图中粗黑线表示上海地区)

Chen等<sup>[29]</sup>所强调的一样,利用几年的雷达资料进行暖季对流天气气候特征的研究,就需要确保影响这一地区暖季的大气环流不出现异常,否则,雷达气候研究结果可能不具有代表性。在如何将雷达气候研究有效应用于城市地区对流天气的临近预报和预警的研究和业务中,也面临许多的课题。

#### 参考文献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006.
- [2] Kuo J T, Orville H D. A radar climatology of summertime convective clouds in the Black Hills. *J Appl Meteor*, 1973, 12(2): 359-368.
- [3] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bull Amer Meteor Soc*, 1972, 53(8):

- 647-648.
- [4] Carlson T N, Augustin J A, Boland F E. Potential application of satellite temperatures measurements in the analysis of land use over urban areas. *Bull Amer Meteor Soc*, 1977, 58(12): 1301-1303.
  - [5] Matson M, McClain E P, McGinnis D F, et al. Satellite detection of urban heat islands. *Mon Wea Rev*, 1978, 106(12): 1725-1734.
  - [6] Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes. *J Atmos Sci*, 2002, 59(13): 2033-2056.
  - [7] Carbone R E, Tuttle J D. Rainfall occurrence in the U.S. warm season: The diurnal cycle. *J Climate*, 2008, 21(16), 4132-4146.
  - [8] Ahijevych D A, Carbone R E, Davis C A. Regional-scale aspects of the diurnal precipitation cycle. 31st Inter Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Seattle, WA, 2003.
  - [9] Ahijevych D A, Davis C A, Carbone R E, et al. Initiation of precipitation episodes relative to elevated terrain. *J Atmos Sci*, 2004, 61(22): 2763-2769.
  - [10] Hsu H M, Moncrieff M W, Tung W W, et al. Multiscale temporal variability of warm-season precipitation over North America: Statistical analysis of radar measurements. *J Atmos Sci*, 2006, 63(9): 2355-2368.
  - [11] Lang T J, Ahijevych D A, Nesbitt S W, et al. Radar-observed characteristics of precipitating systems during NAME 2004. *J Climate*, 2007, 20(9): 1713-1733.
  - [12] Rowe A K, Rutledge S A, Lang T J, et al. Elevation-dependent trends in precipitation observed during NAME. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(12): 4962-4979.
  - [13] Weckwerth T M, Wilson J W, Hagen M, et al. Radar climatology of the COPS region. *Q J R Meteor Soc*, 2011, 137: 31-41.
  - [14] Pava C, Vamos C. Statistical characteristics of reflectivity field in areas covered by the Bobohalma WSR-98D radar. *Romanian J Meteor*, 2006, 8(1-2): 1-20.
  - [15] Wang C C, Chen G T J, Carbone R E. A climatology of warm-season cloud patterns over East Asia based on GMS infrared brightness temperature observations. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(7): 1606-1629.
  - [16] Zheng Y, Chen J, Chen M, et al. Statistic characteristics and weather significance of infrared TBB during May-August in Beijing and its vicinity. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(24): 3428-3435.
  - [17] Zhang H, Zhai P. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over Eastern China in the warm season. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(5): 1177-1183.
  - [18] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
  - [19] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variation of summer precipitation over contiguous China. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L01704, doi: 10.1029/2006GL028129.
  - [20] Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L13703, doi: 10.1029/2007GL030315.
  - [21] Yin S, Chen D, Xie Y. Diurnal variations of precipitation during the warm season over China. *Int J Climatol*, 2009, 29: 1154-1170.
  - [22] He H, Zhang F. Diurnal variations of warm-season precipitation over Northern China. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(4): 1017-1025.
  - [23] Chen G, Sha W, Iwasaki T. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: Spatial distribution and its seasonality. *J Geophys Res*, 2009, 114: D13103, doi: 10.1029/2008JD011103.
  - [24] Chen G, Sha W, Iwasaki T, et al. Diurnal variation of rainfall in the Yangtze River Valley during the spring-summer transition from TRMM measurements. *J Geophys Res*, 2012, 117: D06106, doi:10.1029/2011JD017056.
  - [25] Lin P F, Chang P L, Jou B J D, et al. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island. *Wea Forecasting*, 2011, 26(1): 44-60.
  - [26] Yeung L H, Chan S, Cheng P. Radar climatology of Hong Kong and its application to landfalling tropical cyclone rainfall estimation. 35th Inter Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Pittsburgh, Pa, 2011.
  - [27] 陈明轩, 高峰. 利用一种自动识别算法移除天气雷达反射率因子中的亮带. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 207-214.
  - [28] 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. *应用气象学报*, 2010, 21 (4): 395-404.
  - [29] Chen M, Wang Y, Gao F, et al. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm-season based on radar mosaic climatology. *J Geophys Res*, 2012, 117: D20115, doi:10.1029/2012JD018158.
  - [30] Saxen T R, Mueller C K, Warner T T, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. Army Test and Evaluation Command. Part IV: The White Sands Missile Range Auto-Nowcast System. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(4): 1123-1139.
  - [31] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48(2): 251-269.
  - [32] Tucker D F, Crook N A. Flow over heated terrain. Part II: Generation of convective precipitation. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(9): 2565-2582.
  - [33] Parker M D, Ahijevych D A. Convective episodes in the East-Central United States. *Mon Wea Rev*, 2007, 135(11): 3707-3727.
  - [34] Hocker J E, Basara J B. A 10-year spatial climatology of squall line storms across Oklahoma. *Int J Climatol*, 2008, 28: 765-775.
  - [35] Murray J C, Colle B A. The spatial and temporal variability of convective storms over the Northeast United States during the Warm Season. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(3): 992-1012.
  - [36] Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A. Inter-annual and semi-diurnal variations in summertime precipitation. 31st Inter Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Boston, 2003.
  - [37] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. *J Atmos Oceanic Technol*, 1993, 10 (6): 785-797.
  - [38] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13(2): 263-276.
  - [39] Henry S G. Analysis of thunderstorm lifetime as a function of size and intensity. 26th Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Norman, OK, 1993.
  - [40] Goudenhoofd E, Delobbe L. Statistical characteristics of convective storms in Belgium derived from volumetric weather radar observations. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52(4): 918-934.
  - [41] Gomes A M, Held G. Characterization of storm properties during the TroCCiBras Experiment. 32nd Conf on Radar Meteor, Amer Meteor Soc, Albuquerque, 2005.
  - [42] Mohee F M, Miller C. Climatology of thunderstorms for North Dakota, 2002-06. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(9): 1881-1890.
  - [43] 韩雷, 俞小鼎, 郑永光, 等. 京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征. *科学通报*, 2009, 54(11): 1585-1590.
  - [44] Takahashi H. Secular variation in the occurrence property of summertime daily rainfall amount in and around the Tokyo Metropolitan area (in Japanese with an English abstract). *Tenki*, 2003, 50: 31-41.
  - [45] Shepherd J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interactions*, 2005, 9: 1-27.
  - [46] Diem J E, Brown D P. Anthropogenic impacts on summer precipitation in central Arizona. *U S A Prof Geogr*, 2003, 55 (3): 343-355.
  - [47] Matthew S, Raman S, Suresh R, et al. Urban effects of Chennai on sea breeze induced convection and precipitation. *J Earth Sys Sci*, 2008, 117(6): 897-909.
  - [48] Burian S J, Shepherd J M. Effects of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston: Hydrological processes. *Rainfall Hydrol Proc*, 2005, 19: 1089-1103.
  - [49] Dixon P G, Mote T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 1273-1284.
  - [50] Molders N, Olson M A. Impact of urban effects on precipitation in

- high latitudes. *J Hydrometeorol*, 2004, 5: 409-429.
- [51] Tayanç M, Karaca M, Yenigün O. Annual and seasonal air temperature trend patterns of climate change and urbanization effects in relation to air pollutants in Turkey. *J Geophys Res*, 1997, 102 (D2): 1909-1920.
- [52] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793-1796.
- [53] Van den Heever S C, Cotton W R. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46(6): 828-850.
- [54] 苗世光, Chen F, 李青春, 等. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1580-1593.
- [55] 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 等. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响. *中国科学D辑: 地球科学*, 2008, 38(11): 1438-1443.
- [56] 吴风波, 汤剑平. 城市化对2008年8月25日上海一次特大暴雨的影响. *南京大学学报 (自然科学)*, 2011, 47(1): 71-81.
- [57] Guo X, Fu D, Wang J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmos Res*, 2006, 82: 112-126.
- [58] Jauregui E, Romales E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmos Environ*, 1996, 30: 3383-3389.
- [59] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three cases studies. *Atmos Environ*, 2000, 34: 507-516.
- [60] Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1462-1475.
- [61] Changnon S A, Westcott N E. Heavy rainstorms in Chicago: Increasing frequency, altered impacts, and future implications. *J Amer Water Res Assoc*, 2002, 38: 1467-1475.
- [62] Craig K, Bornstein R. MM5 simulation of urban induced convective precipitation over Atlanta. 4th Conf on the Urban Environ, Amer Meteor Soc, Norfolk, VA, 2002.
- [63] Rozoff C, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 716-738.
- [64] Chen T C, Wang S Y, Yen M C. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46(9): 1324-1340.
- [65] Miao S, Chen F. Formation of horizontal convective rolls in urban areas. *Atmos Res*, 2008, 89: 298-304.
- [66] Shem W, Shepherd M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 2009, 92: 172-189.
- [67] 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响. *大气科学*, 2007, 31(2): 364-376.
- [68] 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. *气象学报*, 2006, 64(4): 527-536.
- [69] Bentley M L, Ashley W S, Stallins J A. Climatological radar delineation of urban convection for Atlanta, Georgia. *Int J Climatol*, 2009, 30(11): 1589-1594.
- [70] Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *J Appl Meteor Climatol*, 2011, 50(5): 1129-1144.
- [71] Ntelekos A A, Smith J A, Krajewski W F. Climatological analyses of thunderstorms and flash floods in the Baltimore metropolitan region. *J Hydrometeorol*, 2007, 8(1): 88-101.
- [72] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto Nowcast System. *Wea Forecasting*, 2003, 18(4): 545-561.
- [73] 王令, 丁青兰, 陈明轩, 等. 北京地区夏季对流风暴的雷达气候初步研究. *中国气象学会雷达气象学与气象雷达委员会第二届学术年会文集*, 2006.
- [74] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究. *大气科学*, 2005, 29(3): 445-452.
- [75] 王婷婷, 王迎春, 陈明轩, 等. 北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析. *气象*, 2011, 37(2): 142-155.
- [76] 陈双, 王迎春, 张文龙, 等. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究. *气象*, 2011, 37(7): 802-813.
- [77] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 2012, 70(3): 371-386.
- [78] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. *大气科学*, 2012, 36(5): 929-944.
- [79] 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制. *大气科学*, 2013, 37(1): 137-148.
- [80] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 北京7·21暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 2013, 71(4): 569-592.
- [81] Kober K, Craig G C, Keil C, et al. Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts. *Q J R Meteor Soc*, 2012, 138: 755-768.
- [82] 程丛兰, 陈明轩, 王建捷, 等. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. *气象学报*, 2013, 71(3): 397-415.
- [83] Chang P L, Lin P F, Jou B J D, et al. An application of reflectivity climatology in constructing radar hybrid scans over complex terrain. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26(7): 1315-1327.
- [84] Overeem A, Holleman I, Buishand A. Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48(7): 1448-1463.
- [85] Hocker J E, Basara J B. A geographic information systems-Based analysis of supercells across Oklahoma from 1994 to 2003. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(5): 1518-1538.
- [86] Parker M D, Knievel J C. Do meteorologists suppress thunderstorms? Radar-derived statistics and the behavior of moist convection. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(3): 341-358.