

# 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应用

刘黎平 胡志群 吴翀

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 分析了美国下一代天气雷达WSR-88D的偏振技术升级改造进展情况、以及相控阵天气雷达的发展现状, 讨论了这两项技术在灾害天气监测和预警中的作用, 特别对在降水估测、相态识别、龙卷识别和预警中的影响。指出了我国双线偏振雷达和相控阵天气雷达的现状和发展趋势, 讨论了新技术应用效果, 为这两项技术的进一步应用提供了参考。

**关键词:** 双线偏振雷达, 相控阵天气雷达, 降水估测和相态识别, 龙卷监测和预警

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.003

## Development and Application of Dual Linear Polarization Radar and Phased-array Radar

Liu Liping, Hu Zhiqun, Wu Chong

(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** The Polarimetric upgrades to NEXRAD radar (WSR-88D) and development of phased-array radar in USA are reviewed, the application of the two radars on watching and warning of severe weather are analyzed, especially in quantitative precipitation estimate (QPE) and hydrometer classification of dual polarization radar, tornado watching and warning with phased-array radar. The current status and development of dual polarization radar and phased-array radar in China are presented in this paper. This paper is value for application of these two kinds of radars.

**Keywords:** dual polarization radar, phased-array radar, quantitative precipitation estimate and hydrometer classification, tornado watching and warning

### 0 引言

中国气象局已经建设的新一代天气雷达业务网在灾害天气监测、短时临近预报、人工影响天气、水文和地质灾害以及军事气象等方面发挥了重要作用, 其探测能力与美国的下一代天气雷达 (WSR-88D) 相当。从我国第一部新一代天气雷达投入业务运行至今已经18年, 新的探测技术的储备是雷达系统升级改造的重要工作。基于单偏振体制和机械扫描体制的新一代天气雷达在如下探测能力方面有待提高: 1) 对非气象回波的识别能力; 2) 降水估测能力, 特别是对强降水的估测能力; 3) 降水粒子相态的识别能力; 4) 对快速变化的小尺度对流系统的观测能力; 5) 工作的稳定性; 6) 气象、军事和航空的多用途能力。目前, 美国已经完成了双线偏振雷达偏振改造工作,

其探测能力明显提高, 下一代雷达技术——相控阵天气雷达也得到了发展。为此, 在充分利用新一代天气雷达功能的同时, 发展双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术, 并逐步应用到业务探测中是我国气象部门非常重要的任务。

### 1 双线偏振雷达发展现状和我国业务应用进展

#### 1.1 双线偏振雷达技术的发展

20世纪70年代末, 美国科学家Seliga等<sup>[1-2]</sup>提出了双线偏振天气雷达设想, 通过交替地在脉间发射相互正交的水平偏振波和垂直偏振波, 对降水强度进行了测量, 结果表明双线偏振雷达的测雨强精度要高于常规天气雷达。由于受当时设备条件的限制, 交替发射模式被广泛用在双线偏振天气雷达中。在偏振雷达技术发展过程中, 逐渐采用了线偏振、“双发双收”体制, 即同时发射水平和垂直偏振波 (发射45°倾斜角雷达波), 同时接收水平和垂直偏振波, 探测水平偏振反射率因子、径向速度、速度谱宽、差反射

收稿日期: 2016年2月23日; 修回日期: 2016年4月7日  
第一作者: 刘黎平 (1963—), Email: lpliu@camsma.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目 (91337103)

率因子、差传播相移、水平垂直偏振波零延迟相关系数等。“双发双收”方案的优点包括：可直接测量零延迟水平垂直偏振信号相关的系数 $\rho_{HV}$ ；传播相移率 $K_{DP}$ 可以直接计算出来，不必考虑多普勒速度谱宽的影响；地物滤波对偏振测量的影响比较小；在同样转速和取样速度下，取样对数是“交替发射”模式的两倍，且信号相关好，偏振量的估测误差比较小；不需要大功率微波开关；与原先的数据处理系统、地物滤波和速度距离模糊的消除方案等比较协调。“交替发射”模式的主要优点包括：可以测量退偏振因子 $L_{DR}$ ，两个通道的相互干扰比较小，可以减小二次回波的影响，因为前一时刻发出的水平雷达波在延迟一个周期回到雷达天线时，接收的是垂直偏振波，水平偏振波的二次回波受到至少20dB的抑制。但交替发射模式采样时间比较长，增大了地物消除的难度，而且必须采用大功率微波开关。

科罗拉多州立大学(CSU)的CSU-CHILL雷达是美国乃至世界上最先进的双线偏振雷达系统之一，是第一部用慢转换开关进行差分反射率因子测量的雷达，20世纪80年代进行了改造，最先采用大功率铁氧体开关将发射和接收信号分别与水平和垂直通道连接，但其隔离度始终没大于25dB，且受温度和PRF的影响。为此在1994和1995年进行了再次改造，更换了天线反射体，增加了一个发射机和一个接收机，能发射水平、垂直、 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ 偏振方向的线偏振波和圆偏振波<sup>[3]</sup>。1998年，又采用了新的数字中频接收机和高速信号处理器，增加了系统的灵活性、稳定性和精度。目前该雷达能以三种模式进行观测：1) 常规的交替发射水平和垂直偏振波模式；2) 同时发射交替接收(STAR)模式；3) 同时发射、同时接收。由于采用了两个发射机，就避免了使用大功率微波开关，在接收通道的开关将主回波和交叉回波信号送到两个接收机上。在此基础上，初步形成了WSR-88D的偏振改造升级方案<sup>[4,5]</sup>。美国的第一部业务用双线偏振雷达KOUN于2002年改造成功，2002年春季到2003年春季，利用WSR-88D偏振雷达改造后的原型雷达KOUN，开展了双线偏振雷达效果分析外场试验，主要目的包括：验证“双发双收”体制的偏振类改造方案；验证偏振雷达在识别非气象回波和气象回波的能力，识别降水粒子相态的能力；验证偏振雷达在面雨量估计和强降水估计的有效性；发布偏振雷达数据到NWS。初步验证了改造后的88D具有识别非气象回波、卷入龙卷内的地面物体、降水粒子相态的能力；降水估测能力得到了验证。这为实施双线偏振雷达改造提供了支撑<sup>[6]</sup>。

## 1.2 双线偏振雷达系统应用效果评估

从2007年起，美国便开展了多普勒天气雷达(NEXTRAD WSR-88D)网络的偏振升级工作。WSR-88D偏振改造开始于2011年。2013年，WSR-88D全部改造完成。NSSL等单位合作发展了双线偏振雷达业务降水估测算法，首先进行相态识别、零度层亮带识别，根据情况，采用Z-R、 $R(Z, Z_{DR})$ 、R-KDP三种方法进行降水估测。利用2012年两部改造后的WSR-88D的 $60\text{km} \times 60\text{km}$ 的共同覆盖区的对流过程降水估测进行评估，以分析不同距离降水估测的效果。发现总体讲，偏振雷达能够改进降水估测效果，但不是所有个例和所有雷达都能改进，这种改进与雷达的距离有关，与冰相粒子的影响有关；偏振雷达减小了降水估测随距离变化的影响，以及冰雹存在对降水估测的影响<sup>[7]</sup>。

对降水估测进行了详细的评估，通过47个雷达站的139个个例的分析，评估范围限制在一定范围内，以便减小零度层的影响。结果表明：对于所有的个例，平均绝对值误差减小19%；对于50mm/h降水，改善23%；对于中尺度对流系统，改善32%。另外，在降水估测改进方面，在进行冬季降水估测、零度层亮带处理的改进、暖区降水改进、 $Z_{DR}$ 误差订正、降水计算公式的改进、初相态确定等方面的改进。在双线偏振雷应用过程中，主要挑战包括：零度层亮带的影响；双线偏振雷达硬件系统的定标；雷达波的部分遮挡及其变化(树木和人工建筑等影响)<sup>[8]</sup>。

## 1.3 我国双线偏振雷达技术的发展和應用

我国将双线偏振技术应用于天气雷达始于20世纪80年代末，当时中国科学院兰州高原大气物理研究所(现称中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)将713雷达改造成高速脉间转换双线偏振天气雷达，并做了不同降水粒子散射、衰减订正、测雨效果对比以及云粒子相态和尺度空间分布等相关研究工作，取得了一些成果<sup>[9-13]</sup>。

随着我国气象现代化建设的开展，很多科研单位及雷达厂家都开始致力于双线偏振天气雷达的研制。如，中国科学院大气物理研究所研制的X波段双偏振多普勒天气雷达、中国气象科学研究院研制的C波段双偏振多普勒雷达、北京敏视达公司在WSR-98D基础上改造而成的能同时发射同时接收的双偏振天气雷达、中国电子科技集团第14研究所研制的双偏振天气雷达、安徽四创电子股份有限公司对C波段C型号的新一代多普勒天气雷达进行改造而成的C波段双偏振多普勒天气雷达以及成都中电锦江信息产业有限公司

(原国营784厂)研制的X、C及S波段“双发双收”体制的双线偏振多普勒雷达<sup>[14-15]</sup>。以上雷达大部分采用了与美国WSR-88D双线偏振雷达改造类似的“双发双收”体制<sup>[10]</sup>。这些雷达参加了暴雨、台风等灾害天气的外场试验,获取到了大量的外场试验数据,利用这些数据,开展了双线偏振雷达测试定标方法研究<sup>[16-17]</sup>;双线偏振雷达质量控制方法研究,包括偏振量的滤波和平滑处理、C和X波段双线偏振雷达的衰减订正、非气象回波识别等工作<sup>[18-24]</sup>;双线偏振雷达降水估测方法研究和效果分析<sup>[25-28]</sup>;降水粒子相态识别方法研究<sup>[29-30]</sup>等。

目前,我国的双线偏振雷达经过近30年的探索研究,偏振雷达体制、探测技术、数据分析方法不断完善和进步,其探测能力得到初步的验证,该技术逐步从科研外场试验应用,发展为业务应用。如杭州市气象局已经建设了业务用双线偏振雷达,珠海气象局与澳门气象局合作建设了S波段双线偏振雷达,上海的WSR-88D进行了双线偏振雷达升级改造,X波段双线偏振雷达正在山洪地址灾害监测等方面得到广泛的应用。广东省气象局的新一代天气雷达也开始进行双线偏振雷达功能改造。但双线偏振雷达技术在广泛推广前,双线偏振雷达技术标准、探测能力的综合验证、雷达应用培训等亟待进行。

## 2 相控阵天气雷达技术应用

强对流过程中龙卷、下击暴流、冰雹和大风等中小尺度系统尺度小,生消迅速,是产生局地气象灾害的重要原因,强对流过程中尺度结构高时空分辨率的探测对中小尺度研究、预警和预报有重要作用。现有业务运行的天气雷达,如美国的160余部WSR-88D天气雷达、我国158部新一代天气雷达等雷达系统,均采用了机械扫描方法,即通过改变雷达天线的方位和仰角实现对天气过程的三维扫描。这种扫描方法在保证雷达资料精度基础上最快在6min内完成14层的扫描,在这种扫描方式下取得的雷达资料可以满足对大范围过程如台风、暴雨等天气的探测、预警和临近预报及其雷达资料同化要求,对提高灾害性天气监测和预测水平起到了较大的作用。但业务运行的体积扫描模式在垂直方向的分辨率比较差,扫描周期(5~6min)比较长,对快速变化的小尺度天气过程,如龙卷、微下击暴流、中尺度涡旋的监测、识别和研究能力有待提高。相控阵天气雷达就是一种能在保证雷达资料质量的前提下,进行更快速扫描的雷达技术。在保证资料精度基础上,实现快速扫描,在更短的时间内完成一个扫描过程;减小方位脉冲平均时

因天线转动产生的雷达资料在方位上的“污染”;减小了维护成本,提高了雷达的稳定性。

### 2.1 相控阵天气雷达的发展

相控阵天气雷达快速而精确地转换波束指向的能力使该雷达能够在1min内完成全空域的扫描,同时获取大量的气象信息。与传统的天气雷达相比,该种雷达采用阵列天线由大量相同的辐射单元组成,每个单元在相位和幅度上是独立控制的,能得到精确波束指向,以实现任意指向的回波的观测。该技术2002年被美国国家雷达技术委员会推荐为将来取代美国WSR-88D系统的技术,2006年美国联邦气象工作办公室的工作报告也推荐同时服务于天气过程监测、空管和飞机跟踪的相控阵天气雷达技术<sup>[31]</sup>。为了分析相控阵天气雷达这些优势,评估其应用价值,同时,为进一步发展替代WSR-88D的技术,美国建立了国家气象雷达试验平台,将退役的宙斯盾(SPY-1)相控阵雷达进行改造建立了两维相扫体制的相控阵天气雷达系统,安装在Oklahoma州的Norman市,并进行了观测试验<sup>[32]</sup>。该雷达由4352个T/R组件构成,阵面法向 $\pm 45^\circ$ 内的区域均可使用电扫描,并在一维水平基座的控制下完成全方位的观测。在试验过程中,NWRT-PAR既可使用类似WSR-88D的单波束做旋转体扫描,在258s内完成以VCP12分布的14层仰角观测。同时,NWRT-PAR还可通过波束复用技术(Beam Multiplexing)降低气象信息的积累时间,在短时间内完成体积或垂直剖面扫描。通过与附近WSR-88D多普勒天气雷达的大量对比观测试验表明,NWRT-PAR的快速扫描能力对于强对流天气过程的预警非常有用,较常规天气雷达能更快、更准确地获取天气过程的详细信息<sup>[33]</sup>,对于龙卷过程的分辨时间仅需20~30s<sup>[34]</sup>。

另外,美国也发展了一维相扫体制的可移式的X波段相控阵天气雷达(MWR-05XP),并用于2007—2008年外场试验,观测龙卷、超级对流单体、线状回波过程等,其观测资料质量与其他雷达相当,但扫描速度远远高于WSR-88D雷达<sup>[35]</sup>。该雷达波瓣宽度为 $2.0^\circ$ ,最大脉冲重复频率为10K,距离分辨率为75m,采用了垂直方向电扫描、有限的方位电扫和快速的方位机械扫描的工作模式。观测时,采用了两种工作模式:一种是与常规多普勒雷达类似的工作模式,但扫描速度比WSR-88D快10倍,25s完成一个规定扇面的体扫,在天线快速转动时,方位上的电扫描方向和天线的机械扫描方向相反,保证在一定时间段内扫描方向不变,这样就避免了方位上的雷达波束平均造成的“污染”;另外一种模式为规定扇面上的联

系方位变化的垂直扫描模式,先扫垂直方向,然后改变方位,用13s就可以完成90°扇面,垂直方向10层的扫描。

对于MWR-05XP,其采用垂直方向的一维阵列天线与水平方向的机械伺服结合的方式。在移相器的控制下,雷达通过阵面单元相位的变化实现俯仰方向的电扫描,大大提高了观测资料的时间分辨率。同时,频率捷变技术的运用使得MWR-05XP还可通过不同脉冲之间频率的固定的变化实现6°~8°有限方位角的电扫描,在单位时间内能够获取更多的独立样本,减少了雷达的积累时间。在扫描模式方面,MWR-05XP不仅可完成常规雷达的VPPI体扫,还可由不同方位角RHI组成VRHI形式的扫描数据,两种扫描模式下获取360°方位角的观测资料用时仅需40~62s,以75m的距离分辨率覆盖1°~55°仰角,达到了很高的时空分辨率。

除此之外,美国还讨论了在相控阵天线上实现双极化技术<sup>[36]</sup>,并制定了实现气象和导航等多任务功能(MPAR)的相控阵雷达可行性及性能指标。根据此前的计划,美国将采用有近20000个T/R组件组成的4个面阵的两维相扫技术体制,波瓣宽度为1°,满足气象探测的要求;采用3个通道,2个通道为气象观测和导航,另一个为跟踪飞行目标,采用偏振体制,以提高降水估测和协同识别能力。同时,美国的协同适应性大气遥感观测计划(the collaborative adaptive sensing of the atmosphere, CASA)计划也采用了“相控阵小雷达”,以提高低空探测能力。在2025年完成对目前机械扫描多普勒天气雷达的替换。

## 2.2 相控阵天气雷达在龙卷监测和预警中的应用

Newman等<sup>[37]</sup>利用可移式X波段相控阵天气雷达与WSR-88D雷达以及机场用于探测下击暴流和风切变的TDWR-OKC窄波束雷达同时观测数据,分析了一次线状对流系统中龙卷的演变过程,表明2min时间间隔和更等层扫描的相控阵天气雷达能够分析得到龙卷特征TVS和下击暴流的演变过程,以及与之有关的中尺度气旋、中层辐合和出流的演变等,有助于理解龙卷的形成过程,而WSR-88D雷达只能观测到下击暴流的存在,对其演变的观测非常困难,对中气旋的增强过程和风切变的探测也比较粗糙,对龙卷演变的观测更加困难。利用X波段可移式相控阵天气雷达观测的4个龙卷个例分析了超级单体内龙卷涡旋特征(TVS)的强度、位置时间—高度变化,结果表明,TVS的强度和位置的变化非常大,即使在龙卷的成熟期也是如此,并分析了TVS的消亡和新的TVS的生成,两个TVS的

合并等现象<sup>[38]</sup>。一次超级单体产生的龙卷过程的分析<sup>[39]</sup>表明,快速更新的相控阵天气雷达数据对预报员准确掌握风暴过程的快速组织化、中气旋突然增强和入流的增强、龙卷涡流的位置和移动有很大的帮助,有助于预报员准确和更早发布龙卷预警信息。

在龙卷的预警改进方面,为了分析相控阵天气雷达在龙卷预警中的作用,分析龙卷识别和预警时间的提高程度,美国利用多年的相控阵天气雷达观测的龙卷个例,组织了2010相控阵天气雷达对龙卷预警时间的创新感知试验(2010 PARISE)<sup>[40]</sup>,本试验中的一个内容是,6名预报员分为两组,分别使用43s更新的、4.5min更新的相控阵天气雷达数据给出了5次龙卷和1次强雷暴预警,其中2次龙卷和1次强雷暴得到了验证,快速更新的相控阵天气雷达数据对这3次的龙卷预警时间为6min(强雷暴)、11.5min和18.6min,而采用慢更新的数据,预警时间为0min(包括一次龙卷和一次强雷暴)和4.6min。为了验证以上结果,在2012 PARISE试验中,12名预报员分析更多的龙卷个例<sup>[41]</sup>,结果表明,采用快速更新的相控阵天气雷达数据,龙卷的预警时间可延长到20min,而基于业务平台的预警时间为13.5min。

相控阵天气雷达技术在美国已经应用到外场试验中,并通过这些外场试验资料分析,进一步研究更详尽的中尺度系统的发展和演变过程。相控阵天气雷达快速扫描资料对理解和预警快速变化的天气过程非常有用,如分辨龙卷过程需要扫描周期为20~30s的雷达资料<sup>[34]</sup>,美国两维相扫的相控阵天气雷达最新的观测资料分析表明,与WSR-88D相比,该雷达能够更好和更准确探测快速变化的天气系统<sup>[33,42]</sup>。这一研究分析了3个对流过程的高时间分辨率资料,包括重新加强的超级单体、冰雹过程和微下击暴流过程。58s时间分辨率的相控阵天气雷达资料,诊断出了低空辐合、中气旋、上层的旋转过程等发展和演变的细微过程,34s的分辨率资料完整描述了微下击暴流的生命史和出流的最大值,快速的扫描资料(26s)可以更详细描述冰雹的快速增强、强回波的发展和出流的形成和演变等特征。

Snyder等<sup>[43]</sup>和Zhang等<sup>[44]</sup>的研究表明,利用EnKF方法,同化6~8次完整的雷达资料后才能产生比较合理的分析场,同化时间为30~40s,显然同化时间有点过长。Yussouf等<sup>[45]</sup>的研究进一步表明,比较同化15min的6min周期的常规WSR-88F雷达资料和1min周期的相控阵天气雷达,并预报50min,相控阵天气雷达资料对超级单体的过程描述和预报要明显优于常规

多普勒雷达。另外，快速扫描资料能够减小降水估测中的降水累积误差，特别是需要高空间分辨率的降水资料情况，如城区降水估测，以提高流量估测、洪峰预报能力<sup>[46]</sup>。

### 2.3 我国相控阵天气雷达技术的发展和應用

在我国，由于价格等原因，相控阵雷达技术主要用于军事和航天等领域，并已经掌握了相控阵雷达的关键技术，同时具备了向气象领域发展的经济实力。为了追踪国际气象雷达技术领域前沿，为我国未来天气雷达网建设做好技术储备，我国也开展了相控阵天气雷达技术的探讨工作，2007年，在气象行业专项的支持下，中国气象科学研究院与14所等单位合作，攻克了军用相控阵雷达向相控阵天气雷达转化的关键技术，研制成功了一部S波段相控阵天气雷达原理样机，获得了部分资料，并开展了相控阵天气雷达方面的研究，证明了相控阵天气雷达技术的可行性<sup>[47]</sup>，因其波瓣宽度较宽（垂直波束宽度 $3.12^\circ$ 、水平波瓣宽度 $1.57^\circ$ ），该相控阵天气雷达不能用于实际的强对流天气过程精细结构的观测和研究。

2009年，中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与四创公司合作，研发专门应用于快速变化的中尺度对流系统的车载X波段相控阵天气雷达系统，这一雷达采用了垂直方向电控扫描、水平方向机械扫描的方式，而且该雷达采用有源数字TR组件、收发DBF体制、超低副瓣波导裂缝平面阵列天气、直接数字合成（DDS）波形技术、数字脉冲压缩技术等先进技术，波束控制灵活，并利用数字波束合成技术，可以在垂直方向形成多种不同宽度的波形，使用多波束多路的同时接收，提高相控阵天气雷达的观测速度。研究了相控阵天气雷达的测试和定标方法<sup>[48]</sup>，并利用该雷达与C波段双线偏振雷达（CPOL）于2013年4—6月在广东省江门市鹤山站进行了对比观测试验，以检验该雷达观测模式及其对快速变化的对流云演变过程的观测能力，为进一步改进雷达观测模式提供了依据<sup>[49]</sup>。

另外，在863项目的支持下，我国也研制了机载X波段相控阵天气雷达，2012年，X波段二维机载相控阵雷达与一部X波段多普勒天气雷达在相同位置进行了地面试验，并于2003年6月进行了首次空中观测，该雷达数据与常规的X波段多普勒雷达和SA雷达进行了对比分析<sup>[50]</sup>。

### 3 结语

自从1998年我国在安徽合肥建设了第一部新一代天气雷达以来，新一代天气雷达已经在灾害天气监测和预警工作中应用了16年，双线偏振雷达技术经过多

年的发展，已经开始从大气科学外场试验逐步走向业务化应用，应用结果表明：与多普勒雷达相比，双线偏振雷达技术在提高雷达非气象回波识别能力，大到暴雨的降水估测能力、降水粒子相态和冰雹区识别能力等方面有明显优势，对提高灾害天气监测和预警能力、人工影响天气指挥和效果有重要意义。但双线偏振雷达在我国气象探测中的应用需要尽快制订相关的双线偏振雷达功能需求书、双线偏振雷达测试方法，开展业务应用效果的评估，并开发相关的应用软件。

相控阵天气雷达与多普勒雷达相比，能快速获取探测数据，运行更稳定可靠。同时，可实现一部相控阵天气雷达同时服务于气象探测、民航和军用飞机的导航等目的。目前，我国的相控阵天气雷达还在研究中，离业务应用尚有很大距离。另外，Ka波段和W波段云雷达、连续波雷达等技术也在外场试验中得到广泛应用，有望在云降水物理观测和人工影响天气工作中首先得到应用。

#### 参考文献

- [1] Seliga T A, Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarization for measuring precipitation. *J Appl Meteor*, 1976, 15: 69-76.
- [2] Seliga T A, Bringi V N. Differential reflectivity and differential phase shift. *Radio Sci*, 1978, 13: 271-275.
- [3] Brunkow D, Kennedy P, Rutledge S, et al. CSU-CHILL radar status and comparison of available operating model. *Prints 28th conf. On Radar Meteorology*. Austin, TX, Amer Meteor Soc, 1997.
- [4] Zrnic D S, Ryzhkov A V. Polarimetry for weather surveillance radars. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 389-406.
- [5] Doviak R J, Bringi V, Ryzhkov A, et al. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars. *J Atmos Oceanic Technol*, 2000, 17: 257-278.
- [6] Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al. The joint polarization experiment: polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86: 809-824.
- [7] Luciana K C, Smith J A, Baeck M L, et al. An early performance evaluation of the NEXRAD dual-polarization radar rainfall estimates for urban flood applications. *Wea Forecasting*, 2013, 28: 1478-1497.
- [8] Daniel S B, Schultz J A, Vasiloff S, et al. Status of dual pol QPE in the WSR-88D network. 93th AMS, 27th Conference on Hydrology, Austin, TX, 2013.
- [9] Xu BaoXiang, Wang Zhijun, Cai Qiming, et al. Study on applications of C-band dual linear polarization radar in meteorology. *Acta Meteo Sinica*, 1991, 5: 285-292.
- [10] 王致君, 楚荣忠. X波段双通道同时收发式多普勒偏振天气雷达. *高原气象*, 2007, 26(1): 135-140.
- [11] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布. *气象学报*, 1996, 54(5): 590-599.
- [12] 张鸿发, 郝秀书, 王致君, 等. 偏振雷达观测强对流电暴云. *大气科学*, 2001, 25(1): 38-47.
- [13] 楚荣忠, 王致君, 刘黎平, 等. 双线偏振雷达降雨估测分析. *气象学报*, 1997, 55(1): 103-109.
- [14] 曹俊武, 刘黎平, 葛润生, 等. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究. *大气科学*, 2005, 29(5): 827-836.
- [15] 何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布. *大气科学*, 2010, 34(1): 23-34.
- [16] Liu Liping, Hu Zhiquan, Fang Wengui, et al. Calibration and data quality analysis with mobile C band polarimetric radar. *Acta*

- Meteorologica Sinica, 2010, 24(4): 501-509.
- [17] 孟庆春, 沈永海, 苏德斌, 等. 双线偏振雷达双通道一致性及其测试方法研究. 高原气象, 2014, 33(5): 1440-1447.
- [18] 胡志群, 刘黎平, 楚荣忠, 等. X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. 气象学报, 2008, 66(2): 251-261.
- [19] 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. X波段双线极化雷达反射率的衰减订正. 大气科学, 2009, 33(5): 1027-1037.
- [20] 毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正. 大气科学, 2012, 36(3): 495-506.
- [21] 肖艳姣, 王斌, 陈晓辉, 等. 移动X波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制. 高原气象, 2012, 31(1): 223-230.
- [22] 杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 双线偏振多普勒雷达资料质量分析. 气象学报, 2013, 71(1): 146-158.
- [23] Hu Zhiqun, Liu Liping, Wu Linlin, et al. A comparison of de-noising methods for differential phase shift and associated rainfall estimation. Journal of Meteorological Research, 2015, 29: 315-327.
- [24] 吴林林, 刘黎平, 袁野, 等. C波段车载双偏振雷达ZDR资料处理方法研究. 高原气象, 2015, 34(1): 279-287.
- [25] 刘黎平, 葛润生, 张沛源. 双线偏振多普勒天气雷达遥测降水强度和液态含水量的方法和精度研究. 大气科学, 2002, 26(5): 709-720.
- [26] 赵果, 楚荣忠, 张彤, 等. 偏振多普勒雷达定量测量降雨精度的改进. 高原气象, 2011, 30(2): 498-507.
- [27] 胡明宝, 赵景志, 夏文梅, 等. 双偏振多普勒天气雷达和CINRAD-SA对比分析. 现代雷达, 2012, 34(1): 5-8.
- [28] 高玉芳, 陈耀登, David Gochis, 等. JOPL算法结合双偏振雷达在不同降水过程中的测雨效果分析. 热带气象学报, 2014, 30(2): 361-367.
- [29] 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究. 大气科学, 2002, 26(6): 761-772.
- [30] 郭凤霞, 马学谦, 王涛, 等. 基于X波段双线偏振天气雷达的雷暴云粒子识别. 气象学报, 2014, (6): 1231-1244.
- [31] Weber M E, Cho J Y N, Herd J S, et al. The next-generation multimission U.S. surveillance radar network. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88: 1739-1751.
- [32] Weadon M, Heinselman P, Forsyth D, et al. Multifunction phased array radar. Bull Amer Meteor Soc, 2009, 90: 385-389.
- [33] Zrnić D S, Kimpel J F, Forsyth D E, et al. Agile-beam phased-array radar for weather observations. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88: 1753-1766.
- [34] Rasmussen E N, Richardson S, Straka J M, et al. The association of significant tornadoes with a baroclinic boundary on 2 June 1995. Mon Wea Rev, 2000, 128: 174-191.
- [35] Bluestein H B, French M M, PopStefanija I, et al. A Mobile, Phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms. Bull Amer Meteor Soc, 2010, 91: 579-600.
- [36] Zhang G, Doviak R J, Zrnic D S, et al. Phased array radar polarimetry for weather sensing: a theoretical formulation for bias corrections. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2009, 47(11): 3679-3689.
- [37] Newman J F, Heinselman P L. Evolution of a quasi-linear convective system sampled by phased array radar. Mon Wea Rev, 2012, 140: 3467-3486.
- [38] French M M, Bluestein H B, PopStefanija I, et al. Mobile, phased-array, Doppler radar observations of tornadoes at X band. Mon Wea Rev, 2014, 142: 1010-1036.
- [39] Kuster C M, Heinselman P L, Austin M. 31 May 2013 El Reno Tornadoes: Advantages of rapid-scan phased-array radar data from a warning forecaster's perspective. Wea Forecasting, 2015, 30: 933-956.
- [40] Heinselman P L, LaDue D S, Lazrus H. Exploring impacts of rapid-scan radar data on NWS warning decisions. Wea Forecasting, 2012, 27: 1031-1044.
- [41] Bowden K A, Heinselman P L, Kingfield D M, et al. Impacts of phased-array radar data on forecaster performance during severe hail and wind events. Wea Forecasting, 2015, 30: 389-404.
- [42] Heinselman P L, Priegnitz D L, Manross K L, et al. Rapid sampling of severe storms by the National Weather Radar Testbed phased-array radar. Wea Forecasting, 2008, 23: 808-824.
- [43] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. Mon Wea Rev, 2003, 131: 1663-1677.
- [44] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1238-1253.
- [45] Yussouf N, Stensrud D J. Impact of phased-array radar observations over a short assimilation period: observing system simulation experiments using an ensemble Kalman filter. Monthly Weather Review, 2010, 138(2): 517-538.
- [46] Anagnostou E N, Krajewski W F. Real-time radar rainfall estimation. part I: algorithm formulation. J Atmos Oceanic Technol, 1999, 16: 189-197.
- [47] 张志强, 刘黎平. S波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析. 气象学报, 2011, 69(4): 729-735.
- [48] 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 等. X波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析. 大气科学, 2014, 38(6): 1079-1094.
- [49] 吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响. 应用气象学报, 2014, 25(4): 406-414.
- [50] Wu Chong, Liu Liping. Comparison of the observation capability of an X-band phased-array radar with an X-band Doppler radar and S-band operational radar. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(4): 814-824.