朱怡杰，李泓，骆婧瑶，2024. 毫米波雷达在台风外围云系研究中的应用[J]. 气象，50(5)：577-590. Zhu Y J，Li H，Luo J Y，2024. Application of millimeter-wave radar in the study of typhoon outer rainbands[J]. Meteor Mon，50(5)：577-590(in Chinese).

毫米波雷达在台风外围云系研究中的应用*

朱怡杰[1,2] 李 泓[1,2] 骆婧瑶[1,2]

1 中国气象局上海台风研究所，上海 200030

2 中国气象局台风数值预报重点实验室，上海 200030

提 要： 为评估台风条件下毫米波雷达的探测表现，利用上海2018年和2019年4个台风影响期间的毫米波雷达数据，结合雨滴谱仪、静止卫星、S波段天气雷达等资料，探讨了利用毫米波雷达研究台风外围云系的可能性。结果表明：毫米波雷达探测台风外围区域具有良好的性能，对于云降水结构的垂直探测具有一定应用潜力；在降水强度低于5 mm·h^{-1}时雷达对于云顶高度的探测较为准确；提出一种融化层亮带判别方法，亮带识别结果与探空观测一致。对比毫米波雷达与S波段天气雷达降水强度反演，结果显示利用毫米波雷达衰减特征能够实现降水强度廓线的反演，但需要对存在显著雨滴碰并增长的降水进行识别并订正，可为毫米波雷达探测台风外围云系提供参考依据。

关键词： 毫米波雷达，台风，云顶高度，融化层亮带，降水强度

中图分类号： P412 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.063001

Application of Millimeter-Wave Radar in the Study of Typhoon Outer Rainbands

ZHU Yijie[1,2] LI Hong[1,2] LUO Jingyao[1,2]

1 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

2 Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclones, CMA, Shanghai 200030

Abstract: In order to evaluate the performance of millimeter-wave radar in the case of typhoon, the millimeter-wave cloud radar data of Shanghai during the four typhoons in 2018 and 2019, and the data of disdrometer, satellite and S-band weather radar are studied to explore the feasibility of using the millimeter-wave radar to study the outer rainbands of typhoon. It is shown that the millimeter-wave radar has a good detection performance, and has certain application potential for detecting vertical structure of cloud and precipitation. Determination of cloud top height is more accurate when the rainfall rate is lower than 5 mm·h^{-1}. A method for bright band determination is proposed, and the results of application are found to be in good agreement with the sounding. Comparison of the retrieval of rainfall intensity by millimeter-wave radar and S-band radar shows feasibility of retrieving rainfall rate profile by taking advantage of the millimeter-wave radar attenuation. In the situation of significant growth of raindrops, it is necessary to revise the retrieval algorithm. This research could provide a reference for millimeter-wave radar detection of typhoon outer rainbands.

* 国家重点研发计划(2021YFC3000800)、上海市“科技创新行动计划”优秀学术/技术带头人计划(21XD1404500)、国家自然科学基金面上项目(41575107)和上海市气象局台风科技创新团队共同资助

2022年11月20日收稿； 2024年3月1日收修定稿

第一作者：朱怡杰，主要从事雷达气象工作. E-mail：zhuyj@typhoon.org.cn

通讯作者：李泓，主要从事资料同化工作. E-mail：lih@typhoon.org.cn

Key words: millimeter-wave radar, typhoon, cloud top height, melting layer, rainfall intensity

引 言

台风是发生在热带海洋上的一种具有深厚暖心结构的强烈气旋性涡旋，其中心气压极低，风速极大，伴有暴雨，常给受影响地区造成严重灾害。近年来国内外出现了大量对于台风形成、结构以及预报等方面的研究（Montgomery，2016；Fritz et al，2016；钱传海等，2012），其中对于台风外围云系的研究较少。台风外雨带具有与内雨带不同的运动学结构和微物理特征（Houze，2010），其降水以冰相为主且更具有对流性（Yu and Tsai，2013），雨滴谱也与内雨带存在差异（Bao et al，2020）。研究表明，外雨带通过风暴动力学的复杂相互作用影响台风结构、强度和降水（Wang，2009；Zhu and Zhu，2014；Eastin et al，2012），深入了解其中机理是十分有必要的。目前数值模式基于大尺度环流场的模拟已经可以对台风路径作出合理的预报，而对于台风强度以及风雨的预报则依赖于更为复杂的多尺度动力和热力过程（马雷鸣，2014）。研究表明热带气旋风雨分布与台风精细结构变化关系密切（Marks，2014），而地基雷达探测时空分辨率高，可以直接探测云降水粒子回波强度、径向速度以及风场。近年来我国多普勒天气雷达组网的布设使得探测台风中尺度三维结构成为可能。随着高分辨率模式的广泛应用，更为精细的云降水结构将是提高台风数值预报能力的关键（Rogers et al，2006）。厘米波长的天气雷达主要探测雨滴，难以探测尺寸较小的云滴，毫米波雷达的出现为研究云探测提供了更精确的技术手段（Kollias et al，2007）。毫米波雷达的工作波长介于1～10 mm（频率范围为30～300 GHz），可穿透云层进行持续的剖面探测，利用云滴对电磁波的散射特性获得粒子信息。现在普遍采用的全相参、脉冲压缩等技术使毫米波雷达具有高灵敏度与高分辨率的探测能力（刘黎平，2021）。相比于其他天气雷达，毫米波雷达可利用的频带较宽，测速精度较高（仲凌志等，2009），被广泛应用于水云（Fox and Illingworth，1997）、冰云（Austin et al，2009）、混合相云（Silber et al，2019；朱怡杰等，2019）的宏微观物理特征的研究。早期研究多利用毫米波雷达反射率因子反演云微物理量（Liu and Illingworth，2000），随着大量科学试验的开展，结合径向速度（Delanoë et al，2007）、退偏振比（Sato and Okamoto，2006）、功率谱（Luke et al，2010），或是联合其他遥感探测仪器（Austin and Stephens，2001；Saavedra et al，2012；Cazenave et al，2019）的研究方法逐渐出现。目前在这些研究中有关台风云系的研究还比较少，为了将来实现更为全面的组网探测，有必要对台风条件下毫米波雷达的探测表现进行评估，对利用毫米波雷达资料分析台风外围降水系统特征的可能性进行探讨。本研究基于毫米波雷达观测，结合其他探测资料研究了毫米波雷达对台风外围云系的探测能力，为毫米波雷达在台风中的应用积累经验，为将来更广泛的应用提供参考。

1 资料与处理

所用资料包括毫米波雷达、激光雨滴谱仪、静止卫星、探空资料。毫米波雷达资料观测时段为2018年7—8月、2019年8—10月，雷达以30 m库距以及1 min间隔的高时空分辨率对云降水进行持续垂直探测。雨滴谱、卫星、探空作为验证资料与毫米波雷达资料进行对比。

1.1 毫米波雷达

本研究所使用的毫米波雷达型号为中国航天科工二院研制的HMB-KPS（单通道），位于上海世博园观测站（以下简称世博站）内，扫描模式为THI（时间垂直高度扫描），具有针对不同云类设计的4种探测模式：边界层模式（BL）、降水模式（PR）、中云模式（MI）、卷云模式（CI），雷达主要参数见表1（张志坚等，2020）。不同探测模式的融合使得雷达探测距离达到15 km，可满足绝大多数台风的垂直探测需求，近地面盲区也较小，能够精确完整地探测台风云降水结构。分析台风摩羯（第1814号，2018年8月）、温比亚（第1818号，2018年8月）、利奇马（第1909号，2019年8月）、米娜（第1918号，2019年10月）外围雨带影响上海期间的毫米波雷达数据，这些台风的外围雨带在探测地点上空均形成了较为完整且连续的雷达回波。结合卫星与S波段雷达图像选取登陆之前台风外围雨带影响上海期间的毫米波雷达资料，利用K-邻域频数法进行杂波去除

(梁海河等,2002),并采用分级逐步订正法(黄兴友等,2013)进行回波衰减订正。

1.2　激光雨滴谱仪

研究所用雨滴谱仪同样位于上海世博站内,型号为 OTT Parsivel,运用红外激光测量原理,计算降水粒子的大小和速率,能够提供雨滴谱、降水强度、天气类型、反射率因子(根据雨滴谱基于瑞利散射计算得到)、能见度等产品,时间分辨率为 1 min。

1.3　卫星资料

本研究主要使用 Himawari-8 卫星亮温资料以及云参数产品,空间分辨率为 0.05°×0.05°,时间分辨率为 10 min。

表 1　HMB-KPS 型毫米波雷达主要参数

Table 1　Main parameters of HMB-KPS millimeter-wave radar

观测参数	性能指标
雷达体制	脉冲多普勒,全固态,脉冲压缩
工作频率	Ka 波段,35 GHz±500 MHz
动态范围	≥80 dB
探测量	回波强度,径向速度,速度谱宽
探测范围	高度:120 m～15 km,回波强度:－45～30 dBz, 径向速度:－18～18 m·s^{-1},速度谱宽 0～4 m·s^{-1}
分辨率	距离:30 m,时间:1 min
天线形式	卡塞格伦
脉冲宽度	0.2、8、24 μs
峰值功率	20 W
脉冲重复周期	60～180 μs

1.4　探空资料

高空 L 波段探空仪设置在上海宝山国家级气象观测站,于每日 03:00、15:00(北京时,下同)各有一次观测。观测获取多个高度层的气温、气压、湿度、风向、风速、海拔高度等气象要素数据。

2　云降水参数算法

2.1　云顶高度判定

毫米波雷达判定云顶高度的方法为:从上往下,若连续 5 个库有回波,第一个库的高度即为云顶高度。卫星云顶高度采用 Himawari-8 云顶高度产品,为了便于对比,将时间分辨率由 10 min 线性插值为 1 min,并删除云顶高度超过雷达最大探测高度 15 km 的时次以及持续时间少于 5 min 的孤立回波。

2.2　融化层亮带算法

本文基于雷达反射率因子和径向速度的垂直梯度来判断融化层亮带:首先根据气候统计选取一个包含融化层的高度区域(本文选择 3.5～6.5 km),然后对廓线进行 5 点中值滤波,最后在此区域从上向下进行搜索,当某个库满足以下条件,此库高度便为融化层亮带顶高度(刘黎平和周淼,2016):(1)此库反射率因子大于－10 dBz,此库以下连续 5 个库反射率因子增大值高于 0.5 dBz,且向下 1.5 km 内最高反射率因子高于 5 dBz;(2)此库或此库以下 3 个库内存在某库满足径向速度小于 3 m·s^{-1},并且向下连续 5 个库平均速度增大值高于 0.1 m·s^{-1}。从亮带顶 1.5 km 高度向上进行搜索,当某个库满足以下条件,此库高度便为融化层亮带底高度:径向速度大于 4 m·s^{-1},向上连续 5 个库平均速度增大值高于 0.05 倍此库速度值。

2.3　降水强度廓线反演算法

参考 Matrosov et al(2006)的算法,利用毫米波雷达反射率因子反演降水强度廓线。基本原理为:选定一个滑动窗口,假设在窗口内反射率因子的变化主要由雨滴衰减造成,而衰减系数与降水强度成正比,因此可以利用最小二乘法拟合反射率因子(Z)随高度(h)变化的斜率,从而得到某高度的降水强度(R)廓线:

$$R(h) = -\frac{k(h)}{2c} \times \frac{\sum_i Z[h(i)]h(i) - \left\{\sum_i Z[h(i)]\sum_i h(i)\right\}N^{-1}}{\sum_i h(i)^2 - \left[\sum_i h(i)\right]^2 N^{-1}}$$

式中:c 为衰减系数与降水强度关系的系数,N 代表

窗口的雷达库数，无量纲系数 k 与空气密度 ρ 变化引起的雨滴下落速度变化有关：

$$k(h) \approx 1.1\rho(h)^{-0.45}$$

本文通过探空数据计算不同高度空气密度，选取1 km为窗口大小(反演结果从0.5 km开始)，取 $c=0.28\ \mathrm{dB \cdot km^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot h}$。

3 台风外围影响期间毫米波雷达探测能力分析

3.1 雷达探测回波

由于采用全固态体制，所以雷达运行稳定，数据获取率高。在2018年7月、8月以及2019年8月、9月这4个月的数据获取率达到99%，在4个台风外围影响上海期间达到了100%。图1为台风利奇马影响上海期间毫米波雷达回波图。可以发现从2019年8月9日06:00开始，毫米波雷达探测到台风最外围的冰云及非降水低云。14:20外围雨带主体开始影响世博站点，雷达回波在大部分时间出现了融化层亮带，结合地面雨滴谱降水强度，可以判断外围雨带主要由深厚的层状云降水以及少量对流降水组成(图1a)。相态变化导致降水粒子通过融化层时径向速度迅速增大(图1b)，此特征有助于融化层亮带高度的判断。融化层以上的高速度谱宽往往提示过冷水的存在(Shupe,2007)(图1c)，此特征在利用雷达进行水凝物相态识别的过程中尤为重要，但是由于脉冲压缩技术距离旁瓣副作用的影响(曾正茂等,2022)，图1c中融化层亮带以上3 km内产生了虚假的高谱宽区。为了解释这一现象，图2展示了2019年8月9日18:22毫米波雷达4种探测模式的雷达功率谱，可以发现在卷云模式中除了对应降雪的低速度强信号区外，还有一个高速度弱信号区，与融化层以下降水的速度一致。考虑到卷云模式脉宽为24 μs，脉冲长度为7200 m，与弱信号影响高度一致，而在未采用脉冲压缩的边界层模式与降水模式中则没有出现这一现象。因而，此弱信号为降雨回波的距离旁瓣，其对于反射率因子以及径向速度(反射率因子权重)影响较小，但是对于速度谱宽的影响较大，因此在应用谱宽进行相态识别等研究前需要对距离旁瓣进行去除。10日12:00雷达探测到台风内核区高强度降水，强降水造成雷达回波严重衰减，信号无法穿透雨区探测云区。对比8月10日16:15后台风内核区的弱降水云可以发现台风外围的云顶高度相对较高，验证了眼墙云顶部径向出流会限制内核区云顶高度(Hence and Houze,2012)。

基于所有台风外围期间雷达数据得到的雷达回波-高度联合概率密度分布(图3a～3c)以及降水云的信噪比-高度联合概率密度分布(图4)，反映了毫米波雷达对台风外围云降水系统的探测识别能力。图3a中给出了3种模式的最小可测反射率因子廓线(根据2个月数据统计得出，左侧彩色实线)和最大可测反射率因子廓线(根据最小可测反射率因子和动态范围计算得出，右侧黑色实线)，可以看出实际最小可测反射率因子廓线和理论廓线(根据雷达理论参数计算得出，左侧彩色虚线)基本吻合，近地面反射率因子的探测范围为－40～40 dBz，这说明雷达在台风期间工作正常，接收机噪声和理论估计一致，检测弱气象目标的能力达到设计预期，且能够满足探测台风云系强回波的要求。在1.2 km以下毫米波雷达采用窄脉冲的边界层模式以及降水模式来探测近地面气象目标，其中边界层模式通过相干积累提高信噪比与灵敏度，从而提升了低反射率因子目标的检测率，降水模式则具有较高的最大可测回波强度，降水的信噪比在1 km处能达到15～25 dB(图4d)。可以发现2 km以下有－30～－20 dBz以及20～30 dBz的2个高频区，分别对应了水云和降水。卷云模式(3.6 km以上)则通过脉冲压缩技术提高灵敏度以及探测距离，在15 km的高度上仍然能够探测到－20 dBz的云，8～10 km为冰云所在高度，反射率因子集中在－20～0 dBz。得益于大脉宽，卷云模式探测10 km以上高云的信噪比集中在－10 dB左右，最大能达到10 dB(图4c)，这对于台风降水云云顶的探测研究至关重要。图3b中径向速度的范围为$-2\sim10\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$，最大值超过边界层模式最大不模糊速度，降水模式采用长脉冲重复周期且未采用相干积累，具有较高的不模糊速度，在台风降水情况下没有出现速度模糊的现象。中云模式(1.2～3.6 km)采用了适中的工作参数，能较好地满足中云探测的要求，探测降水的信噪比随高度减小缓慢，在3 km处仍大于20 dB。径向速度在融化层(5 km左右)显著增大，并且随着高度降低有所减小，这是由雨滴蒸发与上升气流造成的。速度谱宽(图3c)在融化层以上低于$0.5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$，在雨区则集中在$1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$且随高度有所降低，而融化层内混合

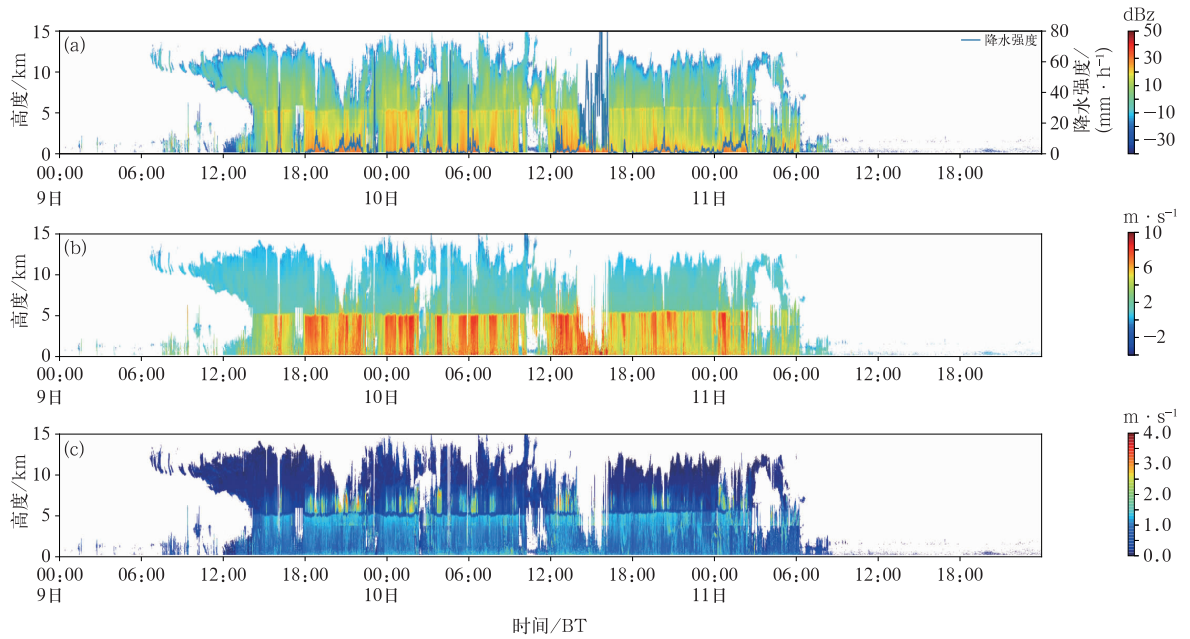


图 1　2019 年 8 月 9—11 日毫米波雷达探测台风利奇马的时间-高度回波

(a)反射率因子(填色)和降水强度,(b)径向速度,(c)速度谱宽

Fig. 1　Time-height of millimeter-wave radar for Typhoon Lekima from 9 to 11 August 2019

(a) reflectivity (colored) and R, (b) radial velocity, (c) spectral width of velocity

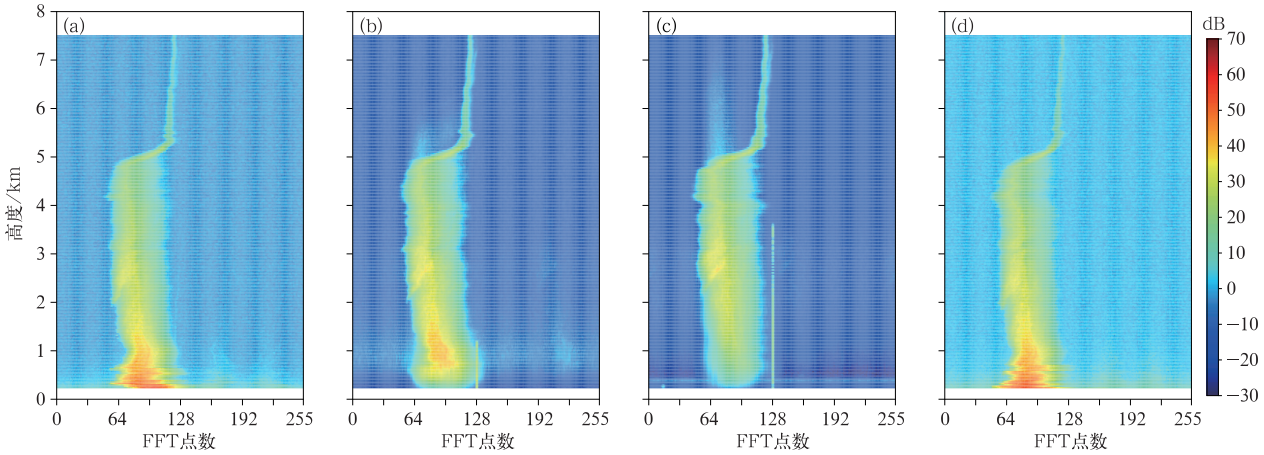


图 2　2019 年 8 月 9 日 18:22 毫米波雷达 4 种探测模式功率谱

(a)边界层模式,(b)中云模式,(c)卷云模式,(d)降水模式

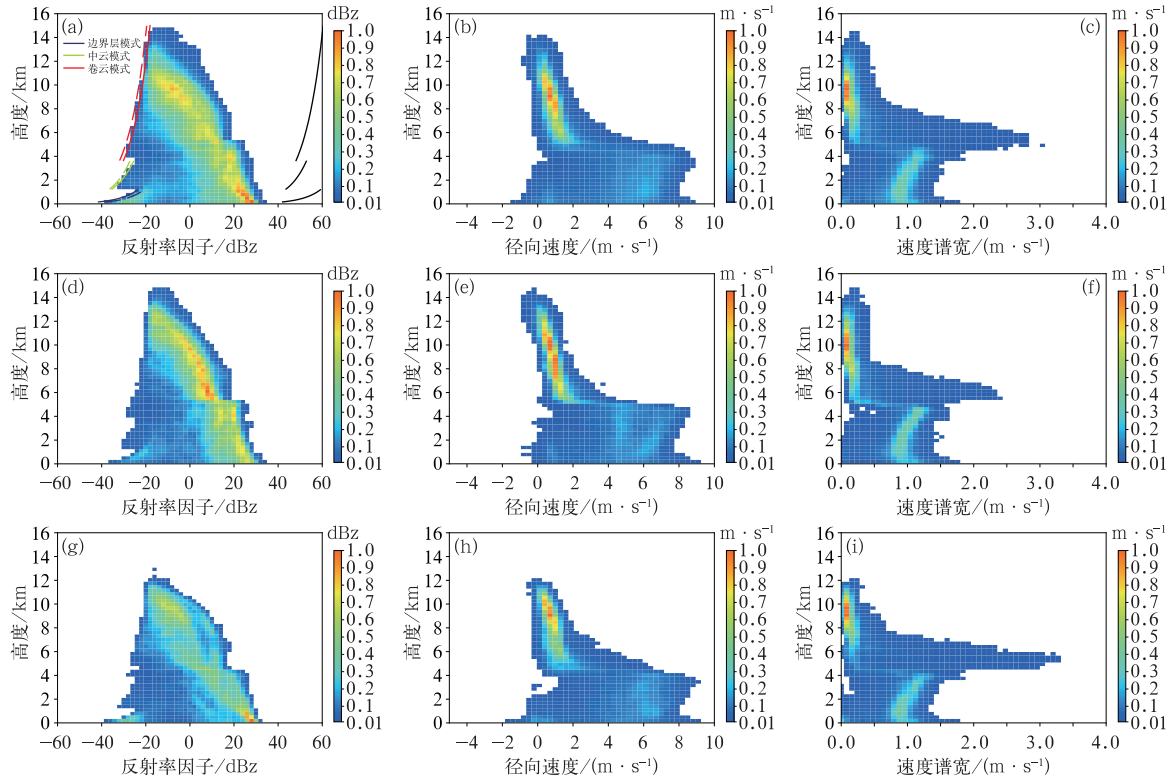
Fig. 2　Millimeter-wave radar spectrum of four detection modes at 18:22 BT 9 August 2019

(a) boundary layer mode, (b) mid-level cloud mode, (c) cirrus mode, (d) precipitation mode

相粒子呈现出较大的速度谱宽。此外,台风个例利奇马(图 3d～3f)、米娜(图 3g～3i)的反射率因子分布在高度上存在台风个体差异,“利奇马”的云顶高度以及融化层高度较高,径向速度和谱宽的分布特征则比较一致。

总体来看,雷达运行状态稳定,探测高度能够达到 15 km,反射率因子、径向速度与速度谱宽的探测范围能够满足不同类型气象目标的探测,回波分布合理,不同模式间的转换较为平滑。表明毫米波雷达在台风外围影响期间具有稳定的工作性能,在不同台风环境下探测表现良好,能够提供高时空分辨率的台风探测数据。

为研究毫米波雷达在降雨情况下的探测准确性,将雷达反射率因子与雨滴谱仪计算的反射率因子进



注：图 a 中彩色虚线为理论计算的最小可测反射率因子廓线，彩色实线为根据统计结果拟合得到的实际最小可测反射率因子廓线，黑色实线为最大可测反射率因子廓线。

图 3 (a～c)基于 4 个台风总体，以及(d～f)台风利奇马和(g～i)台风米娜的台风外围毫米波雷达回波-高度联合概率密度分布
(a,d,g)反射率因子，(b,e,h)径向速度，(c,f,i)速度谱宽

Fig. 3 Distribution of millimeter-wave radar echo and height with probability density of typhoon periphery for (a－c) all the four typhoons, (d－f) Typhoon Lekima and (g－i) Typhoon Mitag
(a, d, g) reflectivity, (b, e, h) radial velocity, (c, f, i) spectral width of velocity

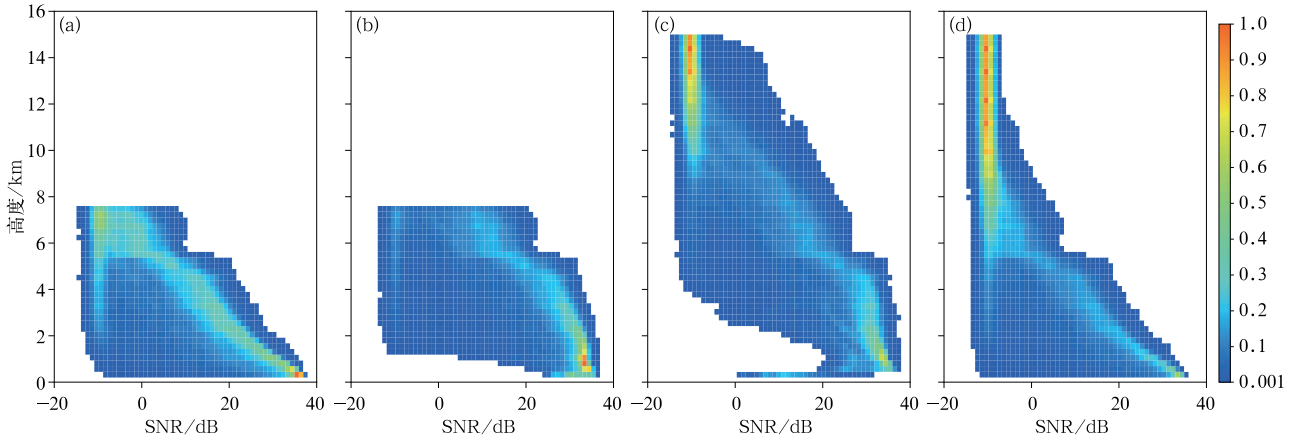


图 4 台风外围降水云的毫米波雷达信噪比(SNR)-高度联合概率密度分布
(a)边界层模式，(b)中云模式，(c)卷云模式，(d)降水模式

Fig. 4 Distribution of millimeter-wave radar signal-to-noise ratio (SNR) and height with probability density of precipitation clouds in typhoon periphery
(a) boundary layer mode, (b) mid-level cloud mode, (c) cirrus mode, (d) precipitation mode

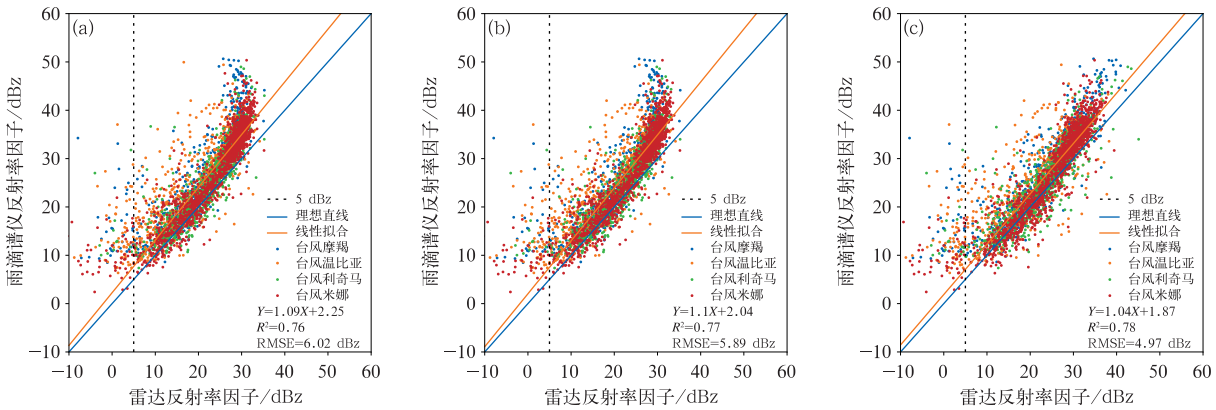


图 5　毫米波雷达反射率因子与雨滴谱仪计算 4 个台风的反射率因子散点分布
(a)210 m 高度,(b)去除雷达饱和廓线,(c)线性插值到地面

Fig. 5　Scatter diagram of the reflectivity of millimeter-wave radar and the reflectivity calculated by disdrometer for four typhoons
(a) the 210 m height, (b) after removing saturated profiles, (c) ground reflectivity by linear interpolation

行对比。图 5a 为 210 m 高度处雷达反射率因子与雨滴谱仪计算反射率因子散点图。毫米波雷达能探测到降雨的最大反射率因子为 35 dBz,最低为−10 dBz。在低于 5 dBz 的区间,雷达反射率因子偏低且数据离散度大,这是因为台风降水强度变化大,降水强度低时粒子较小,容易受空气运动影响(冯婉悦等,2021),此时 2 种仪器取样空间的不同会导致反射率因子的差异(Klepp et al,2018)。当雷达反射率因子大于 25 dBz 时,该值明显小于雨滴谱计算的反射率因子,原因包括:米散射作用使得毫米波雷达反射率因子比粒子的反射率因子低(Benedetti et al,2003);210 m 高度下雨滴碰并增长;降水强度较高时毫米波雷达接收的瞬时信号功率有时会超过雷达最大可测功率,发生饱和现象(White et al,2000)。对雷达反射率因子大于 5 dBz 的点进行线性拟合(图 5a),相关系数(R^2)为 0.76,均方根误差(RMSE)为 6.02 dBz。通过设置最大反射率因子阈值廓线,去除雷达饱和的廓线(约占总廓线数 1%)之后,线性拟合度有所提高(图 5b)。为了模拟真实地面的雷达反射率因子,将反射率因子线性插值至地面(图 5c),处理之后两者的线性拟合度进一步提高,RMSE 也有所降低。图 5 中 2 种仪器在高反射率区间的差异可以用米散射作用来解释:雨滴谱仪计算的是瑞利散射假设下的反射率因子,毫米波对于半径小于 0.6 mm 的球形粒子满足此假设。当雨滴半径大于 1.24 mm(相对于 8.5 mm 波长)时,米散射后向散射截面相比瑞利散射假设明显偏小(郑佳锋,2016)。因此强降水时毫米波雷达反射率因子低于雨滴谱仪的计算值,且反射率因子越高两者差异越大。此外从图 5 中可以发现,半径在 0.6～1.24 mm 的米散射偏强区粒子对于增大反射率因子的作用相对有限。由以上可见,通过与雨滴谱计算反射率因子对比,毫米波雷达探测降雨反射率因子总体较为准确,但强降水时近地面信号易饱和,反射率因子大于 25 dBz 时米散射作用显著,且毫米波雷达探测能力显著下降。

3.2　云顶高度

毫米波雷达灵敏度与分辨率较高,非常适合用于确定云顶高度。研究表明对于非降水云,毫米波雷达与激光云高仪结果具有较高的一致性(宗蓉等,2016)。但在强降水情况下,当回波信号功率衰减到低于最小可辨功率时,接收机无法辨别信号,会造成探测云顶高度降低。为研究台风外围不同降水强度下雷达探测云顶高度的表现,将雷达识别云顶高度与卫星云顶高度产品进行比较。图 6 展示了 2019 年 10 月 1 日 10:00—16:00 雷达与 Himawari-8 探测的云顶高度,在 11:50 之前降水强度低,卫星探测云顶高度较雷达探测云顶高度低 1 km 左右,11:50 后则相反。图 7 为卫星与雷达探测非降水云云顶高度差(卫星云顶高度减雷达云顶高度)的频率分布,对于 80%的非降水云,毫米波雷达云顶高度大于卫星反演高度,其中有 45%的云顶高度差位于−2～0 km。雷达云顶高度最大能比卫星云顶高度高 8 km,这是因为卫星难以探测并反演卷云的云顶高度。而对于降水云,台风降水对于毫米波雷达信号的衰减作用与雨滴谱、雨滴形状等因素有关。为了量化这种关系,本文统计了云顶高度差与降水的关

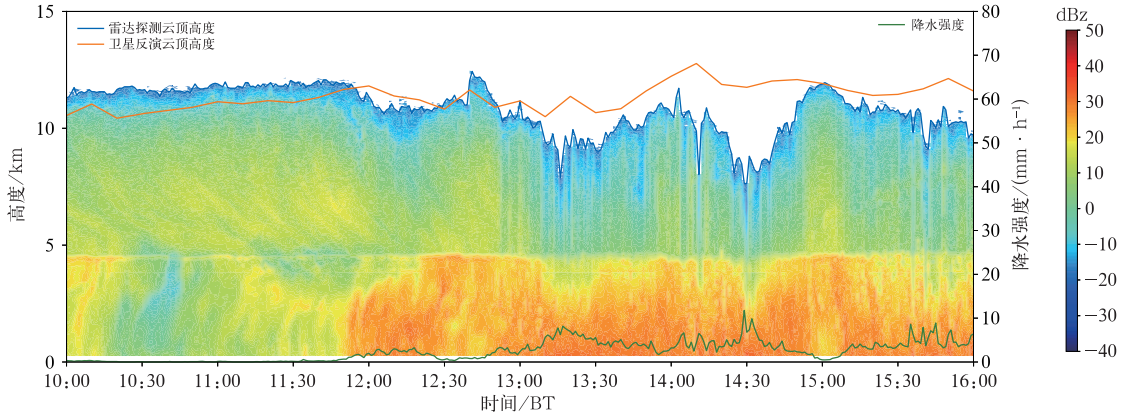


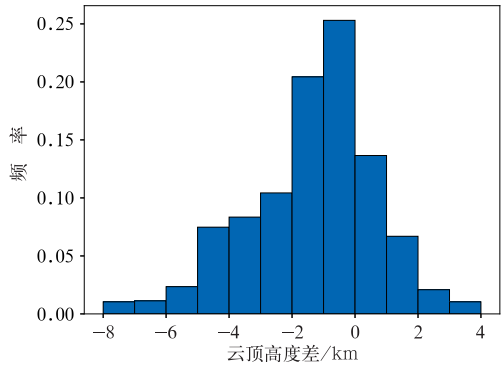
图 6 2019 年 10 月 1 日 10:00—16:00 毫米波雷达与 Himawari-8 探测云顶高度、降水强度和反射率因子(填色)

Fig. 6 Comparison of cloud top height, rainfall intensity and reflectivity (colored) detected by millimeter-wave radar and Himawari-8 satellite from 10:00 BT to 16:00 BT 1 October 2019

系(图 8)。当降水强度小于 1 mm·h^{-1}时雷达探测云顶高度较高,这说明在非降水或低降水强度情况下毫米波雷达能够探测到云顶低反射率因子区域并准确判断出云顶高度。当降水强度大于 1 mm·h^{-1}时,由于雷达信号衰减,雷达探测云顶高度均值低于卫星云顶高度。随着降水强度增大,云顶高度差进一步增大,当降水强度大于 5 mm·h^{-1}时,云顶高度差中值大于 2 km,离散度也迅速增大,此时利用毫米波雷达探测云顶高度的准确性较低,这与 Zhou et al(2019)的研究结果一致。

3.3 融化层亮带识别

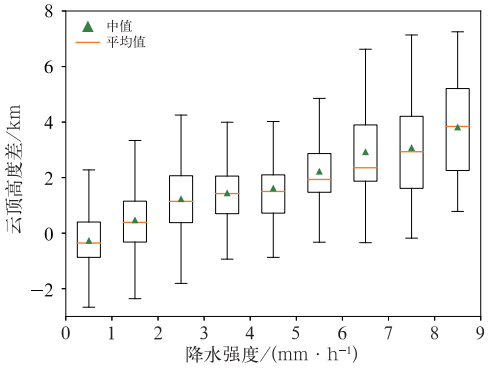
融化层亮带指融化层下出现的回波强度大于上下部分的条状回波亮带,反映了降水云中存在明显的冰水转换区。其成因为:固态粒子降落到融化层以下表面发生融化以及碰并聚合而使雷达反射率因子突然增大,当固态降水粒子完全融化成球形水滴后下落速度增加,且大雨滴易破碎,导致反射率因子降低。基于以上变化特征可以利用雷达回波廓线识别融化层亮带(Zhang et al,2008)。雷达线性退偏振因子(L_{dr})对融化粒子很敏感,能够提高亮带识别准确率(Sandford et al,2017)。但由于本研究使用的是单通道雷达,无 L_{dr} 观测量,因此提出一种结合反射率因子和径向速度的亮带识别方案。方案基于亮带顶部反射率因子和亮带内部径向速度迅速增大的特征,计算其垂直方向梯度,并利用阈值对融化层亮带高度进行判断。图 9 为台风利奇马外围层状云



注:云顶高度差为卫星云顶高度减雷达云顶高度。

图 7 非降水云云顶高度差频率分布

Fig. 7 Frequency distribution of cloud top height difference between satellite and radar for non-precipitation clouds



注:云顶高度差为卫星云顶高度减雷达云顶高度。

图 8 云顶高度差与降水强度箱线图

Fig. 8 Box plot for cloud top height difference and rainfall intensity

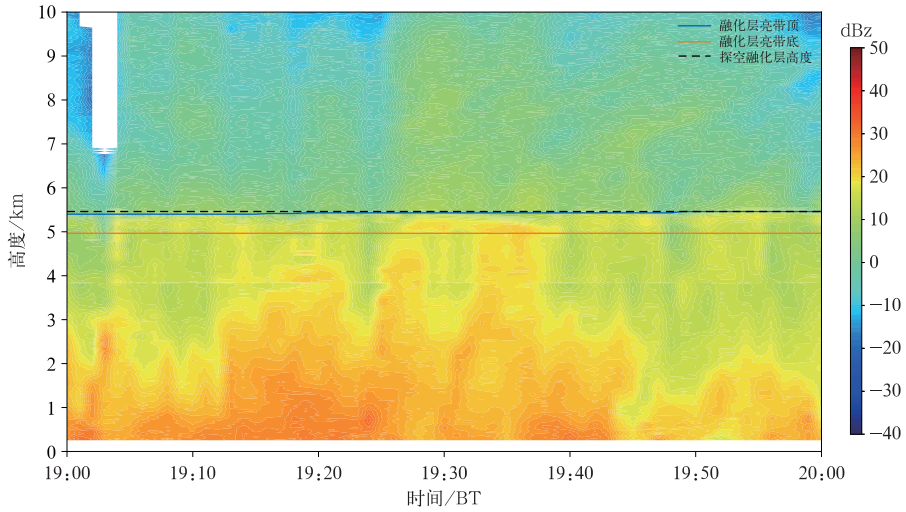


图 9　2019 年 8 月 9 日 19:00—20:00 台风利奇马外围层状云降水期间融化层亮带高度(线形)和反射率因子(填色)

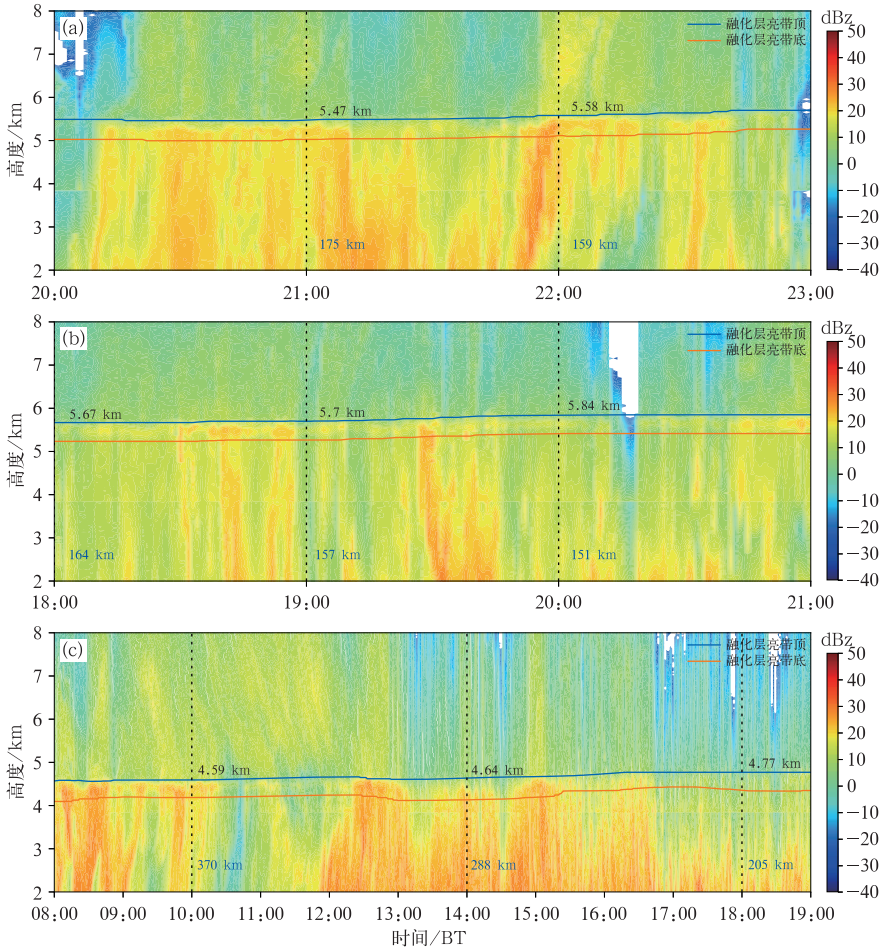
Fig. 9　Melting layer (line) and reflectivity (colored) during the stratiform precipitation in the periphery of Typhoon Lekima from 19:00 BT to 20:00 BT 9 August 2019

降水期间算法识别的亮带结果,与 2019 年 8 月 9 日 19:15 探空 0℃线高度进行对比可见,毫米波雷达识别亮带顶高度略低,这是因为由于粒子融化需要时间,因此会在 0℃线下一定高度产生亮带特征(Austin and Bemis,1950)。为了进一步探究毫米波雷达探测融化层亮带高度的能力,选取 3 个台风层状云降水个例进行识别(图 10)。由于气温较低,10 月台风米娜的融化层亮带明显低于其他 2 个 8 月台风,而融化层亮带厚度则没有明显差异。3 个个例中,雷达均能探测到融化层亮带高度随着台风靠近逐渐升高的现象。根据探测时间段可以排除太阳辐射影响,因此初步推测此现象是由于台风在 500 hPa 左右(约 5 km)具有显著的暖心结构,融化层高度向台风中心逐渐升高(Kim et al,2013;Wu et al,2021),导致雷达探测到的融化层亮带高度升高。

3.4　基于衰减的降水强度反演

天气雷达的低仰角数据常被用于定量降水量估计,传统方法一般基于反射率因子(本文反射率因子为等效反射率因子)与降水强度的关系(Z-R)反演降水强度(Zhang et al,2011)。这一反演关系对降水粒子谱分布较为敏感,而不同类型降水的粒子谱分布具有显著差异,利用雷达双偏振探测参数减少反演不确定性是一种较为常见的解决办法(Testud et al,2000)。研究表明,在毫米波段衰减系数 a 与降水强度 R 呈现更为稳定的线性关系,并且得益于毫米波雷达垂直探测的工作方式以及高分辨率特征,毫米波雷达能够用于高分辨率降水强度垂直廓线的反演(Matrosov,2005)。已有研究表明,基于衰减的反演算法(详见 2.3 节)在非台风条件下应用于 MMCR 雷达和 CloudSat 毫米波雷达时的表现良好(Matrosov,2007)(降水强度大于4 mm·h^{-1}时反演相对误差小于 40%,降水强度大于 10 mm·h^{-1}时反演相对误差小于 20%),因此本研究利用该算法反演降水强度廓线,并与 S 波段双偏振天气雷达反演结果进行对比,评估台风期间毫米波雷达反演降水的表现。对于双偏振天气雷达,本文采用经验公式 $R=0.0109\times10^{0.087Z_H-0.35Z_{DR}}$ 反演降水强度(Z_H 为天气雷达的水平反射率因子,单位:dBz;Z_{DR} 为差分反射率因子,单位:dB)(Matrosov et al,2016)。首先将上海南汇 S 波段双偏振雷达体扫数据插值到直角坐标系格点上(水平分辨率 500 m,垂直分辨率 500 m),然后通过反演得到每个高度层的降水强度,最后得到毫米波雷达所处位置的天气雷达反演降水廓线。为了便于对比,以某一时刻 1～3 km 高度层的平均降水强度 R_N 代表 S 波段雷达反演廓线结果,以 R_C 代表毫米波雷达反演,另外以 R_D 代表地面雨滴谱仪降水强度。

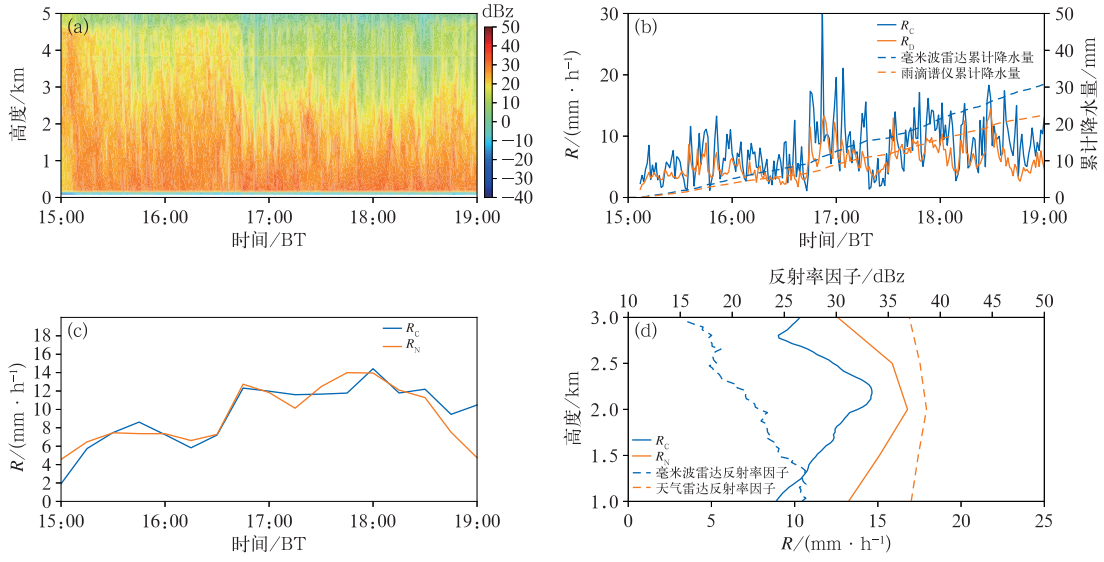
图 11 为 2019 年 10 月 1 日 15:00—19:00 台风米娜上海世博站毫米波雷达和南汇天气雷达反演降



注：蓝色数字为雷达离台风中心距离，黑色数字为亮带高度。

图 10 台风(a)温比亚，(b)利奇马，(c)米娜融化层亮带高度(线形)和反射率因子(填色)

Fig. 10 Melting layer height (line) and reflectivity (colored) during the typhoons (a) Rumbia, (b) Lekima, and (c) Mitag



注：R_N 为 S 波段雷达反演降水强度，R_C 为毫米波雷达反演降水强度，R_D 为地面雨滴谱仪降水强度，下同。

图 11 2019 年 10 月 1 日 15:00—19:00 台风米娜(a)毫米波雷达反射率因子，(b)R_C、R_D 与累计降水量和(c)15 min 平均 R_C 与 R_N，(d)18:15 反射率因子与降水强度廓线

Fig. 11 (a) Millimeter-wave radar reflectivity, (b) R_C, R_D and accumulated precipitation and (c) 15 min averaged R_C and R_N during Typhoon Mina from 15:00 BT to 19:00 BT, (d) reflectivity and rainfall intensity profile at 18:15 BT 1 October 2019

水强度结果以及世博站雨滴谱仪降水强度。降水反射率因子较为均匀且不倾斜,且 4.5～5.0 km 存在融化层亮带(图 11a),说明该时间段为层状云降水。云雷达反演的降水强度廓线以及 15 min 平均的 R_C 与天气雷达反演结果呈现出较高的一致性,R_C 与 R_N 的过程平均值分别为 9.2 mm·h^{-1} 与 9.5 mm·h^{-1}(图 11c,11d),这表明该方法可用于定量计算一定时间段内的平均降水强度。图 11b 为 1 min 分辨率的 R_C、R_D 及其累计降水量,其中毫米波雷达取 0.5～1.5 km 高度区间内的平均值。2 种仪器的降水强度变化趋势基本一致,而雨滴蒸发造成毫米波雷达反演结果略高于雨滴谱仪,相对偏差为 27%。

为了探究基于衰减的降水强度反演方法在不同台风降水情况下的表现,对 3 个台风(“摩羯”“利奇马”“米娜”)外围平均降水强度大于 4 mm·h^{-1} 的时期进行反演,并将反演结果分别与 S 波段雷达和雨滴谱仪进行对比(图 12a,12b)。由图可见,毫米波雷达与雨滴谱仪的降水强度相关性较高,但是由于蒸发作用,毫米波雷达的反演结果整体偏大,存在系统性正偏差,RMSE 也较高(图 12b)。相比之下,毫米波雷达与 S 波段雷达反演的降水强度相关性(图 12a)较低,除了时空匹配问题,还有一部分原因是存在于“利奇马”的毫米波雷达反演降水强度普遍偏大的现象。为了进一步探究造成此现象的原因,对 3 个台风相应降水期间的天气雷达反射率因子廓线以及地面雨滴谱分别进行平均(图 13),可以看出

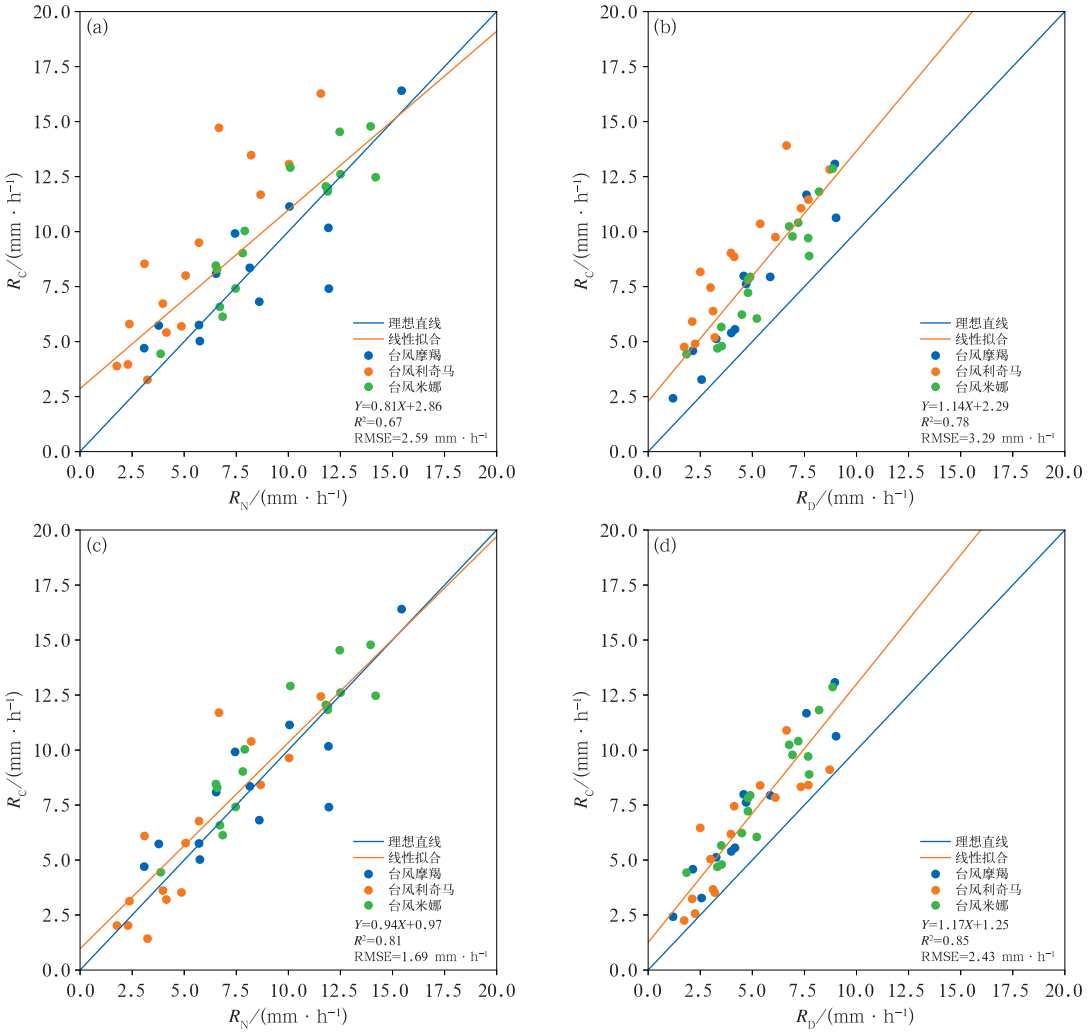


图 12　(a,b)订正前与(c,d)订正后毫米波雷达反演 3 个台风 15 min 平均的(a,c)R_C 与 R_N,(b,d)R_C 与 R_D

Fig. 12　Three typhoons retrieved by millimeter-wave radar (a, b) before correction and (c, d) after correction 15 min averaged (a, c) R_C and R_N, and (b, d) R_C and R_D

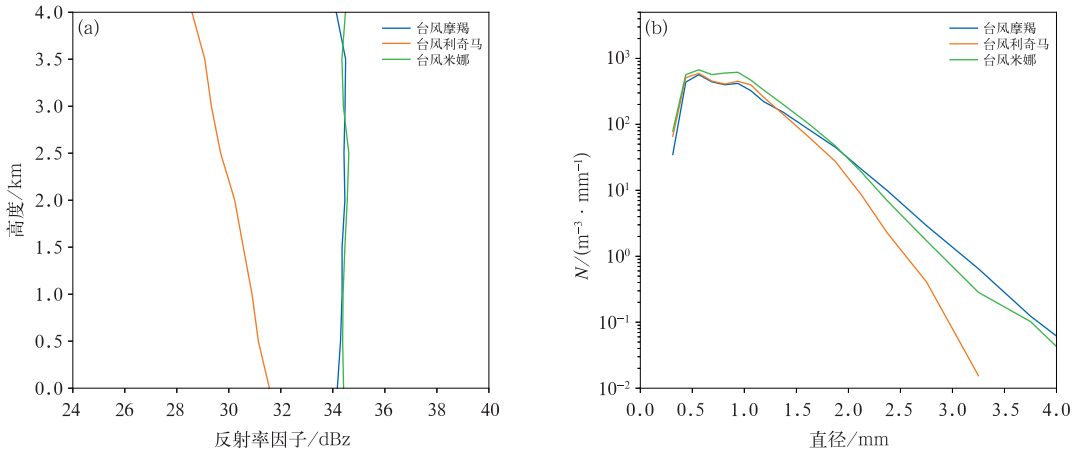


图 13 3 个台风降水期间(a)天气雷达平均反射率因子廓线,(b)平均雨滴谱

Fig. 13 (a) Profile of average reflectivity of S-band radar, and (b) average raindrop spectrum distribution during the precipitation of three typhoons

“利奇马”的反射率因子整体偏低,且随高度降低逐渐增大,而其他 2 条廓线(台风摩羯和米娜)则基本不随高度变化。这表明“利奇马”降水在雷达反演区间存在显著的雨滴增长,反射率因子随高度下降而增大,若当做层状云降水进行反演会将这部分的增量解释为衰减作用而修正,导致毫米波雷达反演降水结果偏高。从图 13b 的平均雨滴谱分布来看,“摩羯”降水的大粒子浓度高于“米娜”与“利奇马”,小粒子浓度低于“米娜”,“利奇马”降水的大粒子浓度明显低于其他 2 个台风。毫米波雷达对于大尺度雨滴的米散射作用能够有效地提高反演精度,因此对于缺少大粒子的“利奇马”降水,反演结果在高降水强度区间存在较大误差。为解决这一问题,尝试利用 Matrosov et al(2006)的算法对初始廓线进行订正(图 12c,12d),该算法假设雨滴在下落时反射率因子增速为一常数。订正后的结果显示 R^2 增大,RMSE 降低,反演结果有所改善,这说明利用常数订正能够较好地减小雨滴增长对降水反演结果的影响。

4 结论与讨论

利用上海世博站毫米波雷达对 2018 年、2019 年影响上海的台风外围云系进行研究。并结合其他资料,分析了毫米波雷达资料在台风外围云系研究中的潜力。主要结论如下:

(1)毫米波雷达在台风外围影响期间具有良好的探测性能,反射率因子、径向速度与速度谱宽的探测范围能够满足一定强度的云雨回波探测,但在降水具有高反射率因子时(>25 dBz)米散射作用明显,雷达回波强度容易发生饱和。

(2)对于非降水云,毫米波雷达的云顶高度探测结果略高于卫星探测。对于降水云,在降水强度不大的情况下(<5 mm·h^{-1})毫米波雷达能够较为准确地探测云顶高度。强降水对毫米波雷达的衰减较为严重,导致难以探测真实云顶高度。

(3)利用毫米波雷达反射率因子与径向速度变化特征成功识别出融化层亮带,垂直探测的特性使得毫米波雷达能用于研究亮带高度变化。初步分析结果显示,随着台风靠近融化层亮带有升高的趋势。

(4)基于衰减的降水强度反演方法在平均降水强度大于 4 mm·h^{-1}的台风降水期间表现良好,由于台风降水雨滴谱差异显著,此方法的反演结果比传统 Z-R 关系更为稳定,因此更适用于反演降水强度较高的层状云降水。此外,当存在非衰减廓线随高度变化的情况时,需要对该类降水进行识别并订正。

由于毫米波雷达在台风期间的应用较少,一些探测结果以及反演参数仍需其他资料的验证,不同仪器间分辨率以及取样空间的差异也会影响验证结果。毫米波雷达对于台风非对流性降水的探测有较大的潜力,进一步结合其他探测仪器有助于未来对于台风螺旋雨带三维结构特征的研究。

参考文献

冯婉悦,施丽娟,王智敏,等,2021. 雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降

水估测中的应用探究[J]. 气象，47(4)：389-397. Feng W Y，Shi L J，Wang Z M，et al，2021. Application of raindrop disdrometer data in rainfall estimation of Typhoon Rumbia[J]. Meteor Mon，47(4)：389-397(in Chinese).

黄兴友，樊雅文，李峰，等，2013. 地基 35 GHz 测云雷达回波强度的衰减订正研究[J]. 红外与毫米波学报，32(4)：325-330. Huang X Y，Fan Y W，Li F，et al，2013. The attenuation correction for a 35 GHz ground-based cloud radar[J]. J Infrared Millim Waves，32(4)：325-330(in Chinese).

梁海河，张沛源，葛润生，2002. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究[J]. 应用气象学报，13(5)：591-599. Liang H H，Zhang P Y，Ge R S，2002. Study of data processing of wind fields from Doppler radar[J]. J Appl Meteor Sci，13(5)：591-599(in Chinese).

刘黎平，2021. 毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展[J]. 暴雨灾害，40(3)：231-242. Liu L P，2021. Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar[J]. Torr Rain Dis，40(3)：231-242(in Chinese).

刘黎平，周淼，2016. 垂直指向的 Ka 波段云雷达观测的 0℃层亮带自动识别及亮带的特征分析[J]. 高原气象，35(3)：734-744. Liu L P，Zhou M，2016. Characteristics of bright band and automatic detection algorithm with vertical pointed Ka band cloud radar [J]. Plateau Meteor，35(3)：734-744(in Chinese).

马雷鸣，2014. 国内台风数值预报模式及其关键技术研究进展[J]. 地球物理学进展，29(3)：1013-1022. Ma L M，2014. Research progress on China typhoon numerical prediction models and associated major techniques[J]. Progr Geophys，29(3)：1013-1022(in Chinese).

钱传海，端义宏，麻素红，等，2012. 我国台风业务现状及其关键技术[J]. 气象科技进展，2(5)：36-43. Qian C H，Duan Y H，Ma S H，et al，2012. The current status and future development of China operational typhoon forecasting and its key technologies[J]. Adv Meteor Sci Technol，2(5)：36-43(in Chinese).

曾正茂，郑佳锋，吕巧谊，等，2022. 毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估[J]. 气象，48(6)：760-772. Zeng Z M，Zheng J F，Lv Q Y，et al，2022. Quality control and effect evaluation of range sidelobe echo of millimeter wave cloud radar[J]. Meteor Mon，48(6)：760-772(in Chinese).

张志坚，张静，蔡英琪，2020. 毫米波云雷达系统观测试验结果分析[J]. 气象水文海洋仪器，37(3)：17-20. Zhang Z J，Zhang J，Cai Y Q，2020. Analysis of observation test results for millimeter wave cloud radar system[J]. Meteor Hydrol Mar Instrum，37(3)：17-20(in Chinese).

郑佳锋，2016. Ka 波段-多模式毫米波雷达功率谱数据处理方法及云内大气垂直速度反演研究[D]. 北京：中国气象科学研究院. Zheng J F，2016. Doppler spectral data proccessing methods of Ka-band multi-mode mm-wave radar and air vertical speed retrieval in clouds[D]. Beijing：Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).

仲凌志，刘黎平，葛润生，2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. 地球科学进展，24(4)：383-391. Zhong L Z，Liu L P，Ge R S，2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad[J]. Adv Earth Sci，24(4)：383-391(in Chinese).

朱怡杰，邱玉珺，陆春松，2019. 青藏高原那曲夏季云中水成物分布特征的毫米波雷达观测[J]. 气象，45(7)：945-957. Zhu Y J，Qiu Y J，Lu C S，2019. Millimeter wave radar observation of hydrometeor distribution characteristics of cloud in summer in Nagqu，Qinghai Tibet Plateau[J]. Meteor Mon，45(7)：945-957(in Chinese).

宗蓉，郭伟，仲凌志，2016. 毫米波雷达和激光雷达探测云边界的对比分析[J]. 激光技术，40(2)：171-177. Zong R，Guo W，Zhong L Z，2016. Comparison analysis of cloud boundary detection by means of millimeter wavelength cloud radar and lidar[J]. Laser Technol，40(2)：171-177(in Chinese).

Austin P M，Bemis A C，1950. A quantitative study of the "Bright Band" in radar precipitation echoes[J]. J Atmos Sci，7(2)：145-151.

Austin R T，Heymsfield A J，Stephens G L，2009. Retrieval of ice cloud microphysical parameters using the CloudSat millimeter-wave radar and temperature[J]. J Geophys Res Atmos，114(D8)：D00A23.

Austin R T，Stephens G L，2001. Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat：1. Algorithm formulation [J]. J Geophys Res：Atmos，106(D22)：28233-28242.

Bao X W，Wu L G，Zhang S，et al，2020. A comparison of convective raindrop size distributions in the eyewall and spiral rainbands of Typhoon Lekima (2019)[J]. Geophys Res Lett，47(23)：e2020GL090729.

Benedetti A，Stephens G L，Haynes J M，2003. Ice cloud microphysics retrievals from millimeter radar and visible optical depth using an estimation theory approach[J]. J Geophys Res Atmos，108(D11)：4335.

Cazenave Q，Ceccaldi M，Delanoë J，et al，2019. Evolution of DARDAR-CLOUD ice cloud retrievals：new parameters and impacts on the retrieved microphysical properties[J]. Atmos Meas Tech，12(5)：2819-2835.

Delanoë J，Protat A，Bouniol D，et al，2007. The characterization of ice cloud properties from Doppler radar measurements[J]. J Appl Meteor Climatol，46(10)：1682-1698.

Eastin M D，Gardner T L，Link M C，et al，2012. Surface cold pools in the outer rainbands of Tropical Storm Hanna (2008) near landfall[J]. Mon Wea Rev，140(2)：471-491.

Fox N I，Illingworth A J，1997. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar[J]. J Appl Meteor，36(5)：485-492.

Fritz C，Wang Z，Nesbitt S W，et al，2016. Vertical structure and contribution of different types of precipitation during Atlantic tropical cyclone formation as revealed by TRMM PR[J]. Geophys Res Lett，43(2)：894-901.

Hence D A, Houze Jr R A, 2012. Vertical structure of tropical cyclone rainbands as seen by the TRMM precipitation radar[J]. J Atmos Sci, 69(9): 2644-2661.

Houze R A, 2010. Clouds in tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 138(2): 293-344.

Kim D K, Kim Y H, Chung K Y, 2013. Vertical structure and microphysical characteristics of Typhoon Kompasu (2010) at landfall [J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 49(2): 161-169.

Klepp C, Michel S, Protat A, et al, 2018. OceanRAIN, a new in-situ shipboard global ocean surface-reference dataset of all water cycle components[J]. Sci Data, 5: 180122.

Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al, 2007. Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bull Am Meteor Soc, 88(10): 1608-1624.

Liu C L, Illingworth A J, 2000. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds[J]. J Appl Meteor, 39(7): 1130-1146.

Luke E P, Kollias P, Shupe M D, 2010. Detection of supercooled liquid in mixed-phase clouds using radar Doppler spectra [J]. J Geophys Res: Atmos, 115(D19): D19201.

Marks F D Jr, 2014. Advancing tropical cyclone forecasts using aircraft observations[M]// Mohanty U C, Mohapatra M, Singh O P, et al. Monitoring and Prediction of Tropical Cyclones in the Indian Ocean and Climate Change. Dordrecht: Springer.

Matrosov S Y, 2005. Attenuation-based estimates of rainfall rates aloft with vertically pointing Ka-band radars[J]. J Atmos Ocean Technol, 22(1): 43-54.

Matrosov S Y, 2007. Potential for attenuation-based estimations of rainfall rate from CloudSat [J]. Geophys Res Lett, 34(5): L05817.

Matrosov S Y, Cifelli R, Neiman P J, et al, 2016. Radar rain-rate estimators and their variability due to rainfall type: an assessment based on hydrometeorology testbed data from the southeastern United States[J]. J Appl Meteor Climatol, 55(6): 1345-1358.

Matrosov S Y, May P T, Shupe M D, 2006. Rainfall profiling using atmospheric radiation measurement program vertically pointing 8-mm wavelength radars[J]. J Atmos Ocean Technol, 23(11): 1478-1491.

Montgomery M T, 2016. Recent advances in tropical cyclogenesis [M]// Mohanty U C, Gopalakrishnan S G. Advanced Numerical Modeling and Data Assimilation Techniques for Tropical Cyclone Predictions. Dordrecht: Springer: 561-587.

Rogers R, Aberson S, Black M, et al, 2006. The intensity forecasting experiment: a NOAA multiyear field program for improving tropical cyclone intensity forecasts[J]. Bull Am Meteor Soc, 87(11): 1523-1538.

Saavedra P, Battaglia A, Simmer C, 2012. Partitioning of cloud water and rainwater content by ground-based observations with the Advanced Microwave Radiometer for Rain Identification (ADMIRARI) in synergy with a micro rain radar[J]. J Geophys Res: Atmos, 117(D5): D05203.

Sandford C, Illingworth A, Thompson R, 2017. The potential use of the linear depolarization ratio to distinguish between convective and stratiform rainfall to improve radar rain-rate estimates[J]. J Appl Meteor Climatol, 56(11): 2927-2940.

Sato K, Okamoto H, 2006. Characterization of Ze and LDR of nonspherical and inhomogeneous ice particles for 95-GHz cloud radar: its implication to microphysical retrievals[J]. J Geophys Res Atmos, 111(D22): D22213.

Shupe M D, 2007. A ground-based multisensor cloud phase classifier [J]. Geophys Res Lett, 34(22): L22809.

Silber I, Fridlind A M, Verlinde J, et al, 2019. Persistent supercooled drizzle at temperatures below −25℃ observed at McMurdo Station, Antarctica[J]. J Geophys Res: Atmos, 124(20): 10878-10895.

Testud J, Le Bouar E, Obligis E, et al, 2000. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar[J]. J Atmos Ocean Technol, 17(3): 332-356.

Wang Y Q, 2009. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? [J]. J Atmos Sci, 66(5): 1250-1273.

White A B, Jordan J R, Martner B E, et al, 2000. Extending the dynamic range of an S-band radar for cloud and precipitation studies[J]. J Atmos Ocean Technol, 17(9): 1226-1234.

Wu Z H, Huang Y B, Zhang Y, et al, 2021. Precipitation characteristics of Typhoon Lekima (2019) at landfall revealed by joint observations from GPM satellite and S-band radar[J]. Atmos Res, 260: 105714.

Yu C K, Tsai C L, 2013. Structural and surface features of arc-shaped radar echoes along an outer tropical cyclone rainband [J]. J Atmos Sci, 70(1): 56-72.

Zhang J, Howard K, Langston C, et al, 2011. National mosaic and multi-Sensor QPE (NMQ) system: description, results, and future plans[J]. Bull Am Meteor Soc, 92(10): 1321-1338.

Zhang J, Langston C, Howard K, 2008. Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D[J]. J Atmos Ocean Technol, 25(10): 1859-1872.

Zhou Q, Zhang Y, Li B, et al, 2019. Cloud-base and cloud-top heights determined from a ground-based cloud radar in Beijing, China [J]. Atmos Environ, 201: 381-390.

Zhu Z D, Zhu P, 2014. The role of outer rainband convection in governing the eyewall replacement cycle in numerical simulations of tropical cyclones[J]. J Geophys Res: Atmos, 119(13): 8049-8072.

（本文责编：何晓欢）