

基于多模式雷达遥感的陆表降雨反演研究进展

戴强¹, 刘超楠¹, 张亚茹¹, 朱净萱¹, 张林²

1. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023;

2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘要: 降雨是地球系统水循环的核心组成要素, 也是水文模型和陆面模式最重要的输入项之一。基于雷达遥感的降雨观测作为区域降雨监测的有效手段, 为陆表过程模拟、灾害性天气探测和防洪减灾决策提供了良好的数据支撑。近年来, 在不同观测需求和降雨应用场景下, 雷达所获取的信息逐渐向双偏振、多角度、多频率、多分辨率与多天线等多模式方向发展。由于雷达观测的间接性, 以及气象和水文研究对降雨观测时空尺度需求的多样性, 从雷达观测的空中水汽到陆表降雨需要经历一系列转换过程, 其中产生的大量不确定性, 需要进行系统的偏差校正与数据处理, 从而提高雷达陆表降雨反演的精度。基于此, 本文总结了当下国内外多模式雷达遥感观测技术特点, 对多模式雷达陆表降雨反演过程及方法进行了系统梳理, 对此过程中的误差因子和校正方法进行了对比分析, 最后展望了多模式雷达遥感在降雨观测领域的未来研究趋势。

关键词: 天气雷达, 降雨观测, 雷达遥感, 多模式, 城市洪涝

中图分类号: P2

引用格式: 戴强, 刘超楠, 张亚茹, 朱净萱, 张林. 2023. 基于多模式雷达遥感的陆表降雨反演研究进展. 遥感学报, 27(7): 1574-1589

Dai Q, Liu C N, Zhang Y R, Zhu J X and Zhang L. 2023. Development of precipitation retrieval based on multimode radar remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1574-1589 [DOI: 10.11834/jrs.20231768]

1 引言

降雨作为水文循环的核心要素, 以及陆地生态系统的重要水分输入, 具有复杂的时空变异性, 其在陆表的时空分布与转化规律一直是地理、水文、生态、灾害等学科研究的核心问题。天气雷达遥感可以观测大气环流场与水滴粒子场, 获取大尺度大气水汽含量及其径向速度, 是目前降雨观测的主要途径。

天气雷达观测的是空中近地面的三维离散降水, 需要进行一系列转换才能获取陆地水文过程与生态系统模拟等应用需要的陆表降雨量。传统研究与数据生产过程往往将雷达最底层光束的扫描信息通过简单的垂直投影变换用于陆表降雨反演, 存在显著偏差 (Kumjian 和 Ryzhkov, 2010; Bringi 等, 2011; Dai 等, 2013; Xie 等, 2016)。近年来, 随着多普勒和相控阵等技术的发展, 雷

达所获取的信息向双偏振、多角度、多频率、多分辨率与多天线等多模式方向发展。因此, 在多模式雷达降雨观测数据的基础上, 构建更加精准的陆表降雨观测产品, 有望为雷达降雨反演带来新的机遇 (Dai 和 Han, 2014; Testik 和 Rahman, 2017; Pallardy 和 Fox, 2018; Dai 等, 2019; Yang 等, 2020b)。

在天气雷达的发展过程中, 多模式化一直是其重要的发展趋势。该趋势首先表现为由固定仰角向多仰角方向发展, 以应对观测目标因遮挡产生的信号衰减问题。其次, 为发挥不同波段的探测优势, 获取气象目标的多个后向散射信息, 雷达逐渐往多波段组合趋势发展, 展现出多频率的特点。再次, 考虑到单偏振方式的局限性, 国内外相继对单偏振雷达网络进行了偏振升级。升级后的双偏振雷达网络在雷达非降水回波识别能力、暴雨的预估能力、降水粒子相态识别能力等方面

收稿日期: 2021-11-30; 预印本: 2023-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41871299)

第一作者简介: 戴强, 研究方向为遥感水文与灾害水文。E-mail: q.dai@njnu.edu.cn

有明显提高 (Yin 等, 2019; Wang 等, 2019)。此外, 天气雷达也在不断朝着多天线的方向发展。传统的雷达机械扫描需要一定的扫描周期, 无法准确监测和识别快速变化的小尺度天气过程, 为此, 具备多天线特性的相控阵雷达随之出现 (Zrníc 等, 2015; Li 等, 2021), 在保证数据观测精度的基础上实现了三维降水的快速扫描。

结合不断发展的雷达技术, 本文将围绕雷达遥感的陆表降雨反演过程, 综述当前国内外在此领域的最新理论、技术与方法研究, 特别关注多模式新型雷达技术在解决传统雷达降雨反演问题中提供的新思路与新方法。文章总结了多模式雷达遥感技术的发展特点, 梳理了雷达观测的空中降雨到水文模型和陆面模式所需陆表降雨的转换流程, 从空中降雨反演、空间格网映射与时空尺度转换、雨滴演化偏差与误差校正方法 4 个方面详细阐述了雷达陆表降雨反演的研究进展, 最后就目前的研究趋势进行了展望。

2 多模式雷达遥感观测技术

2.1 多仰角

雷达仰角描述被观察物体相对于观测点的角度。多仰角观测常见于地基雷达, 尤其是地基多普勒天气雷达。美国的多普勒天气雷达 WSR-88D (Weather Surveillance Radar 88 Doppler) 按其天线方位转速的高、低可分为 3 种工作模式: 降雨模式 1、降雨模式 2、晴空模式 3。以降雨模式 2 为例, 其天线转速居中, 包括 VCP (Volume Cover Pattern) 21 及其变体 VCP121、VCP221 (约 6 min 完成 9 个仰角的观测) 3 种体扫模式, 常用于浅薄降水的观测。中国业务雷达主要使用 VCP21 模式 (徐八林等, 2012; Matrosov, 2015; Gingrey 等, 2018)。当前雷达体扫模式多以 0.5° 作为扫描的起始层, 存在探测不到近地面低层回波、中低层仰角比较稀疏等问题。为提升天气雷达的探测能力, 中国新一代天气雷达中的 CINRAD (China New Generation Weather Radar) 增加了负仰角扫描 (刘晓阳等, 2018; 柳云雷等, 2020)。对于高山雷达, 可以使用负仰角来监测正仰角无法探测到的近地面回波, 提升雷达探测能力。日本的通信实验室和京都大学分别研制了沿切线轨道方向 -40° — $+95^\circ$ 方位扫描的 3.2 mm 机械毫米波云雷达

系统和 360° 方位扫描的 8.6 mm 扫描多普勒云雷达系统 (Shimada 等, 2016)。

2.2 多波段

雷达波段是指雷达发射电波的频率范围, 按照工作频率可将雷达划分为若干波段, 由低到高的顺序为: HF 波段 (3—30 MHz)、VHF 波段 (30—300 MHz)、UHF 波段 (0.3—3 GHz)、L 波段 (1—2 GHz)、S 波段 (2—4 GHz)、C 波段 (4—8 GHz)、X 波段 (8—12 GHz)、Ku 波段 (12—18 GHz)、K 波段 (18—27 GHz)、Ka 波段 (27—40 GHz)、U 波段 (40—60 GHz)、V 波段 (60—80 GHz) 和 W 波段 (80—100 GHz), 不同波段雷达对不同目标物探测能力不同。早期天气雷达多集中使用 S、C 波段, 因为降水对其造成的信号衰减较小, 是中雨和大雨观测的主要选择 (He 等, 2012; Wang 等, 2020); 近年来, X 波段气象雷达的广泛应用, 使得对复杂地形流域和城市流域的降水进行连续高精度、高分辨率监测成为可能 (Xu 等, 2020)。尽管雨滴对 X 波段的衰减效应更为严重, 但仍可以引入偏振方法来校正信号衰减问题 (Junyent 和 Chandrasekar, 2016)。

鉴于不同波段雷达探测降雨的优势不同, 为提升天气雷达探测目标的能力, 当前雷达遥感逐渐向多波段方向发展, 依据搭载平台和各波段探测优势部署雷达。地基雷达通常使用的波长是厘米波, 主要包括 K、X、C、S 共 4 个波段, S 波段雷达主要部署在沿海地区及主要降水流域, C 波段雷达主要分布在内部地区。近些年, 中国地基 W/Ka、Ka/Ku 双波段云降水雷达的建设, 极大地增强了对云转化为降水的过程以及降水的观测 (刘黎平等, 2021)。

机载气象雷达能够穿透中雨, 但无法探测云或雾, 常在 C 波段和 X 波段工作 (Wang 等, 2015; Durden 等, 2020)。较为典型的机载气象雷达有 WXR 系列、TWR 系列、RTA 系列、ART 系列、Primus 系列、RDR 系列以及 IntuVue 系列等。其中, RDR-4000 是三维自动气象脉冲雷达, 具备脉冲压缩能力和三维气象探测能力; GWX-80 是性能先进的多普勒气象雷达, 能够提供完整的垂直天气视图。

星载天气雷达中热带降雨测量任务 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星搭载的降

水雷达 PR (Precipitation Radar) 探测波段为 Ku 波段, 具有较高的径向分辨率。然而在雨速很大时, Ku 波段信号衰减效果明显 (Adhikari 和 Nakamura, 2002; Chen 等, 2020)。新一代全球卫星降水计划 GPM (Global Precipitation Measurement) 主卫星上搭载的双频降水雷达 DPR (Dual-frequency Precipitation Radar), 在 Ku-PR 的基础上新增一个波长更短的 Ka 波段, 大大提高了对强度更小的降雨和降雪过程的监测能力 (Mahmud 等, 2020; Yang 等, 2020b)。然而这些低地球轨道星载测雨雷达在运行的时候也存在一些不足, 如对某一气旋系统完整采样时采样频次低、采样时间过长。美国国家航空航天局提出的地球同步轨道星载 Ka 波段降雨雷达 GDWR (Geostationary Doppler Weather Radar) 能够提供较宽空间区域内降水的垂直分布, 具有较高的时间分辨率 (30 min 或更短), 十分有利于对飓风和强风暴进行监测 (Li 等, 2017; 唐顺仙等, 2017)。

2.3 双偏振

偏振用于描述电磁波电场矢量在传播截面上随时间变化的轨迹特征 (Eliseev 和 Kozlov, 2018)。早期单偏振天气雷达只能实现水平发射水平接收或者垂直发射垂直接收, 获取信息有限, 限制了粒子相态识别和分类。与单偏振雷达相比, 双偏振雷达使用两种偏振模式, 能够获取降水粒子在两个方向偏振的差异信息, 如差分反射率因子 Z_{DR} (Differential Reflectivity)、差分相位 φ_{DP} (Differential Phase)、差分相移率 K_{DP} (Specific Differential Phase)、相关系数 CC (Cross-Correlation) 等偏振参量。对这些参数进行分析、反演, 可以进一步识别降水粒子的形状大小、相态分布以及降水类型等更为具体的信息 (Beauchamp 和 Chandrasekar, 2015)。

目前天气雷达逐渐向双偏振方向发展, 各国陆续开展了双偏振雷达的研究。美国在 2013 年完成对 S 波段多普勒天气雷达 NEXTRAD (Next Generation Weather Radar) WSR-88D 网络的偏振升级工作, 显著改进了降雨估测效果 (Cunha 等, 2013)。中国也开始逐步新建双偏振雷达系统并对业务多普勒天气雷达进行双偏振升级。2017 年气象雷达发展专项规划指出将对已建的新一代天气雷达技术升级 112 部、双偏振技术改造 103 部并增

补 37 部双偏振新一代天气雷达。目前为止, 中国研制的双偏振多普勒雷达具备在 X、S 和 C 波段的“双发双收”体制, 在气象现代化研究中得到广泛应用 (Wang 等, 2016; Zhao 等, 2019)。

2.4 多天线

现有业务运行的天气雷达多采用机械扫描的方法, 通过改变雷达天线的方位角和仰角实现对天气过程的三维扫描。该扫描方式周期较长, 垂直分辨率较差, 无法准确识别和监测快速变化的小尺度天气过程。鉴于此, 具备多天线特性的相控阵天气雷达应运而生, 在保证观测精度的基础上实现了三维大气的快速扫描。

相控阵天气雷达能够快速而精确地转换波束指向, 使雷达能够在 1 min 完成全空域的扫描, 快速获取大量气象信息。美国最早将 SPY-1 相控阵雷达改造成为二维相扫体制的相控阵雷达系统。试验表明其快速扫描能力对于强对流天气过程预警十分有效, 较常规天气雷达能够更快、更准确地完成监测 (Zrnicek 等, 2015; Liou 等, 2018; Li 等, 2021)。近些年, 国内也相继开展了相控阵雷达的研发工作。2009 年, 中国气象科学研究院与四创公司研发了车载 X 波段相控阵天气雷达, 可应用于快速变化的中尺度对流系统的检测 (刘黎平等, 2014)。为进一步提高相控阵天气雷达的探测能力和对快速移动型天气过程的反应能力, 2015 年珠海纳睿达公司成功研制了 X 波段双偏振相控阵天气雷达。广东省气象局联合广东省珠海纳睿达科技有限公司等对广州中心城区的 4 部 X 波段双偏振相控阵天气雷达开展了组网测试, 结果表明相控阵雷达网在监测小尺度对流单体生消上有明显优势 (程元慧等, 2020)。张蔚然等 (2021) 提出了对广州 X 波段双偏振相控阵天气雷达反射率的订正方案, 为相控阵雷达的业务应用提供了保障。目前, 相控阵天气雷达陆续在广东省、北京市、上海市、湖南省等地开始实验和应用, 未来将为冰雹、龙卷以及短时强降水等小尺度天气系统的观测提供强大助力。

3 基于多模式雷达遥感的陆表降雨反演

天气雷达直接接收的是云、雨等气象目标的回波信号, 在反演陆表降雨时, 首先需要基于雷

达反射率 (Z) 与降雨强度 (R) 的转换关系, 将雷达回波信号转换为降雨强度信息。此外, 由于雷达原始数据以三维锥体极坐标的形式进行空间离散, 使得与雷达距离越远, 空间离散单元越大, 此离散方式显然不利于实际地学应用。因此, 为满足不同地学应用需求, 需要同时对雷达数据进行格网映射和时空升降尺度变换。再次, 雷达观测的空中降雨在降落到陆表的过程中, 会因雨滴

的蒸发、漂移等微物理过程造成降雨的质量变化和空间重分配, 需要进行雨滴的演化偏差计算。最后, 由于雷达观测的间接性与复杂性, 以及不同工作模式雷达之间的测量差异性, 雷达遥感观测降雨过程中存在着诸多误差, 基于地面参考雨量 (如雨量计观测雨量) 对雷达反演降雨进行对比校正是提升雷达降雨产品精度的必要步骤。基于雷达的陆表降雨反演整体过程见图1。

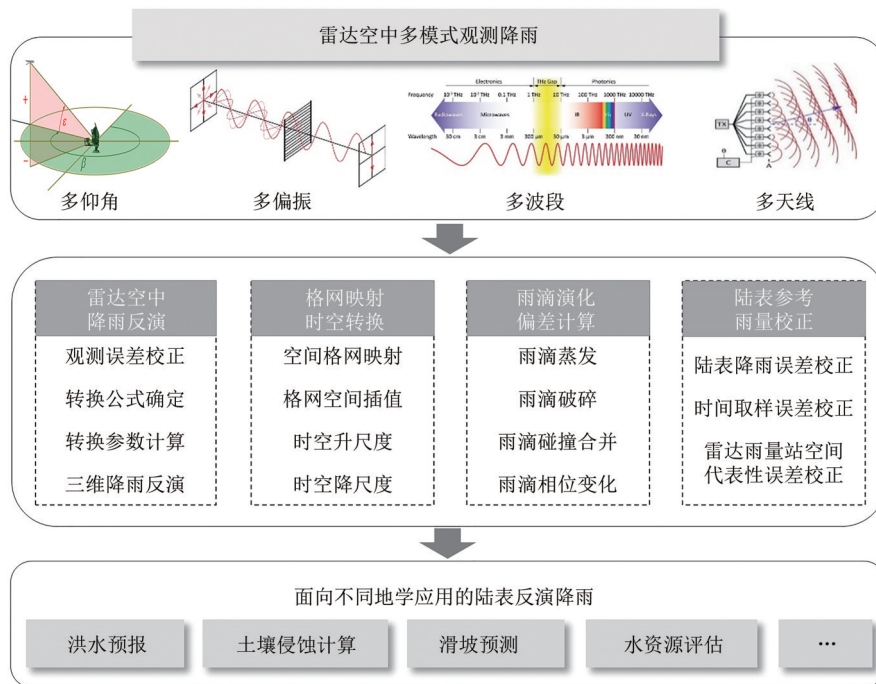


图1 多模式雷达数据的陆表降雨反演框架

Fig. 1 Rainfall retrieval framework based on multi-mode radar observation data

3.1 雷达空中观测降雨反演

利用雷达回波反演降雨的关键步骤之一是建立雷达反射率与降雨强度的转换公式。表1总结了目前常用的雷达降雨反演方法。其中, 最经典的雷达降雨反演方式是由 Marshall 和 Palmer (1948) 提出的指数型公式: $Z=aR^b$ 。由于不同地区、不同季节、不同降水类型的雨滴谱具有较大的时空异质性, 导致 a 、 b 数值地区差异较大, 研究人员相继对公式进行了本地化处理, 并在地区固定 $Z-R$ 关系的基础上, 逐步发展为分型 $Z-R$ (庄薇等, 2013)、动态 $Z-R$ 关系 (陈静等, 2015)、动态分型 $Z-R$ 关系 (Wu 等, 2018), 依据不同降雨类型、回波大小、降雨强度下 $Z-R$ 的统计关系以及降水性质的延续性改进固定 $Z-R$ 公式的不足 (庄薇等, 2013; 陈静等, 2015; Fang 等, 2018)。其

中, 分型 $Z-R$ 关系在业务系统中应用较为广泛, 如美国的全国拼图和多途径定量降水估算系统 NMQ (National Mosaic and Multi-Sensor Quantitative Precipitation Estimation) 以及美国海洋及大气管理局国家强风暴实验室研发的 StageIV 系统, 采用的均是典型降水的分型 $Z-R$ 关系 (Kitzmilller 等, 2013)。动态分型 $Z-R$ 关系综合了分型与动态 $Z-R$ 的优势, 拟合前一时刻的降水回波资料的分型 $Z-R$ 关系, 用于下一时刻的降水估计。但是由于天气类型划分困难、需要频繁更新, 故而在业务中难以应用 (汪瑛等, 2011)。

然而, 相同强度的雷达回波可能对应不同的降水特性, 基于单偏振雷达信息得到的 $Z-R$ 关系, 忽略了雨滴谱变化而导致降水估计误差, 估测精度也因雨滴谱型变化而普适度不高。而双偏振雷

达参数能够反映降水粒子的相态、形状、大小等特征,组合多个偏振参数的定量降水估计算法可以有效降低雨滴谱变化导致的 $Z-R$ 关系不确定性。基于双偏振雷达估算降雨的方法一般可以分为4类,即基于水平反射率因子的 $R(Z_H)$ 、组合水平反射率因子和差分反射率因子的 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、差分相移率 $R(K_{DP})$ 、组合差分反射率因子和差分相移率的 $R(Z_{DR}, K_{DP})$ 。Seliga和Bringi(1976)最早提出使用 Z_H 和 Z_{DR} 估测降水。研究发现 $R(Z_H, Z_{DR})$ 的组合比 $R(Z_H)$ 更能体现雨滴谱特征,降低降水估测误差(Chandrasekar等,1990)。 K_{DP} 在降水强度较大时估测降水能力较强,且不受粒子相态影响,可以有效估测混合型降水,同时提高对小到中雨的测量准确率(Ryzhkov等,1994)。Ryzhkov和Zrnić(1995)指出 $R(Z_{DR}, K_{DP})$ 关系在中到大雨中的表现优于 $R(Z_H, Z_{DR})$ 。 K_{DP} 在降水强度较大时不受粒子相态影响,估测降水能力较强,可以有效估测混合型降水,提高小到中雨的测量准确率(Ryzhkov等,2005)。为了充分发

挥不同算法的优势,研究人员提出了一系列复合定量降水估算算法,如Ryzhkov(2005)根据 Z_H 计算的降雨强度划分公式的使用范围,并提出经典的JPOLE(Joint Polarization Experiment)算法。Cifelli(2011)在降水相态识别的基础上,根据 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 的大小划分公式的使用范围,提出了CSU-HIDRO(Colorado State University-Hydrometeor Identification Rainfall Optimization Algorithm)算法,在大多数的定量降水估算中有良好的性能。Ryzhkov(2013)基于雷达各距离库的衰减率 A_H 提出了 $R(A_H)$ 衰减率算法,该算法不受雷达校准、波束遮挡等因素的影响,在反演混合态降水时,结合 $R(K_{DP})$ 可有效解决降水高估问题,被应用于美国多雷达多遥感分析系统MRMS(Multi-Radar/Multi-Sensor)中。Chen等(2017)和Guo等(2021)划分了 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 组合公式的最佳阈值,其降水估测精度优于传统的 $Z-R$ 关系、CSU-HIDRO算法,在中国东部和南部季风降雨估算中有较大潜力。

表1 雷达降雨反演方法对比

Table 1 Comparison of Radar Rainfall Inversion Methods

雷达降雨反演方法	具体分类	特点	参考文献
单偏振雷达定量降水估测方法	固定 $Z-R$	基于大量历史降水资料拟合 $Z=aR^b$ 公式中的 a 、 b 系数,计算简单,但不同降水场景 a 、 b 变化范围较大,固定 $Z-R$ 关系无法适应不同降水系统的变化	(张玉欣等,2021)
	分组 $Z-R$	综合考虑了雷达回波大小、降水类型和降水强度的变化对 $Z-R$ 关系的影响,有效提高了雷达降雨反演的精度,但尚未考虑到降雨可能的时空变化	(刘娟等,1999; 马慧等,2008; Fang等,2018)
	动态 $Z-R$	基于短时间内降水性质的延续性,能够适应天气形势的演变,有效改进对短时强降水的估测,较固定 $Z-R$ 关系更为合理	(陈静等,2015)
	动态分型 $Z-R$	综合了分型与动态 $Z-R$ 的优势,但因业务中难以划分天气类型,应用受限	(Wu等,2018)
双偏振雷达定量降水估测方法	JPOLE算法	综合多个雷达偏振参数优势,有效降低了雨滴谱变化导致的 $Z-R$ 关系不确定性,提升了雷达对中大雨的反演精度	(Ryzhkov等,2005)
	CSU-HIDRO算法	将相态识别算法加入到降水反演过程	(Cifelli等,2011)
双偏振雷达定量降水估测方法	$R(A_H)$ 衰减率算法	衰减率 A_H 对雨滴谱的不确定性不敏感,不受雷达衰减、波束遮挡的影响。结合 K_{DP} ,可有效估算混合态降水	(Ryzhkov等,2013)
机器学习	神经网络	可有效提高降水估算精度,具有较好的自适应性,但学习时间长,在训练时容易陷入局部最小值,在测试中容易造成过拟合	(Chen等,2020)
	回归树	计算简单,但对缺失降雨数据处理困难,忽略属性之间的相关性	(Kusiak等,2013)
	支持向量机	不依赖模型选择,空间泛化能力好,在解决小样本、过学习和局部最小点上有优势,但对大规模训练样本难以实施	(汪海燕等,2014) (Kusiak等,2013)
	深度学习	较浅层神经网络,具有较强的特征学习能力,在解决降雨这种影响因素众多的复杂非线性随机问题上有较大潜力	(方巍等,2020)

机器学习是雷达降雨反演方法中,除拟合降水和雷达偏振参量间非线性经验公式方法外的另一关键手段。Chen等(2020)依据雷达偏振参数与深度神经网络计算的降雨量与基于雨滴谱计算的结果几乎一致。Kusiak等(2013)对比了神经网络、深度学习、支持向量机、K值最邻近、回归树5种机器学习方法获取的雷达降雨,发现神经网络方法计算出的降雨精度最高。Shin等(2021)将回归树和随机森林用于双偏振雷达降雨反演,结果表明机器学习算法优于传统Z-R关系,且有效避免固定经验公式参数实时性低的问题。此外,多模式降雨观测也为机器学习模型训练提供了更多元参数,为获取高精度多模式组合降水产品提供了可能。Chen等(2020)以低轨卫星被动微波降水产品PMW(Passive Microwave)和地球同步卫星红外亮温作为输入,以地面双偏振雷达降水产品作为目标构建降雨多层感知器模型,该模型能够观测到较低强度的降水,运行效果优于美国气候预测降水中心的融合技术产品CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)。相较于传统的数据融合方法,机器学习模型在组合多模式数据源上具有较强的灵活性。

3.2 雷达空间格网映射与时空尺度转换

地基雷达原始数据以极坐标形式存储,为便于雷达组网、气象数据融合以及水文模型的输入,通常将其转换为相应的陆表网格数据(薛湛彬等,2017;高玉芳等,2018;韩静等,2019)。一般在将雷达极坐标数据转换为地理坐标数据后,以雷达位置作为坐标中心,以研究区东南角顶点为原点,建立相应网格数和网格距的网格系统(赵瑞金等,2005),将雷达反射率插值到划分的格点上。其中涉及多种插值方法,包括基于空间域的最邻近法、线性内插法、Cressman插值法、Barnes指数权重插值法等(Potvin等,2012;Liou等,2012),以及基于频率域谱分析的傅里叶谱插值法(焦鹏程等,2016)、小波分析(Nourani等,2020;寇蕾蕾等,2019)等。插值方法的选择取决于具体应用的目标和尺度。对于多仰角雷达数据,构建三维网格时,可以使用混合插值法来提升插值效果。如肖艳姣和刘黎平(2006)采用径向和方位上的最邻近法和垂直方向的线性内插法相结合的方法,较好地保留了体扫资料反射率的连续结构特征。周海光(2013)对三线性插值法

进行改进,提出最邻近法和双线性插值算法相结合的三维混合插值法,显著减弱了雷达网格化数据的空洞区域和棋盘效应。

此外,为使雷达格网产品与其他降水观测资料、水文模型以及陆面模式的时空分辨率相匹配,需要对其进行时空尺度转换(韩静等,2019;高玉芳等,2018;Acquaotta等,2019)。在对高分辨率地基雷达降水数据升尺度时,常使用局部平均法、最邻近法、双线性内插法等重采样方法。杨梦溪(2015)对比了最邻近法与普通克里金、反距离权重、三次样条插值法降水升尺度结果,发现最邻近法方法在各个分辨率的准确性都比较好。空间降尺度主要通过各类插值算法实现,可将其分为:基于网格的插值(网格面积权重法、最大面积法、网格均值法等)和基于网格格点的插值法(反距离加权法、反指数加权法、固定半径距离加权法、最小二乘法等)。Teegavarapu等(2012)对比了前6种方法降尺度的效果,其中反距离加权法误差最小、表现效果最好。目前普遍的降尺度统计方式是多元线性回归,然而降雨与解释因子间并非是简单的线性关系。非线性模型虽能拟合非线性关系,但使用时需要提前假定变量间的函数关系。为能快速拟合出降水和降水解释因子间的非线性关系,国内外学者相继将机器学习结合多模式数据用于降尺度研究(Sharifi等,2019)。黎玥君和郭品文(2017)利用反向传播神经网络构建浙江地区空间降尺度的预报模型,对降雨降尺度取得了较好的效果。Min等(2020)发现支持向量机模型较反向传播神经网络和多元线性回归模型,在降尺度时具有更好的性能和空间纹理特征。综合来看,空间尺度转换方法种类繁多,同一区域不同方法下的降尺度结果往往有着较大差异,需进一步对地基雷达降雨观测的降尺度方法开展对比研究。

3.3 雨滴演化偏差计算

雷达测量的是其波束有效照射面积内的空中降水,即使设置在 0° 仰角,也会受地球曲率和大气折射的影响,随着探测距离的增大(可达几千米),波束逐渐远离陆表(戚友存,2012)。在此过程中,雨滴从高空坠落会产生蒸发、漂移、破碎等一系列微物理变化,使得降水到达陆表前特性发生改变。为了提高雷达测雨精度,模拟雨滴物理过程,确定雷达—陆表降雨偏差十分重要。

3.3.1 雨滴蒸发

雨滴在蒸发过程中耗散质量,造成地面雨量计缺测情况,影响雷达反射率与降雨强度关系的构建,从而引起地面降水反演的显著不确定性(Kumjian和Ryzhkov,2010)。例如,Borowska等(2011)研究发现,蒸发引起的最小雨滴浓度降低会导致 Z_{dr} 轻微增加和 K_{dp} 值显著减小。因此,量化降雨蒸发、降低雨滴蒸发过程对雷达降雨估测的影响显得尤为重要。

国内外学者对降雨蒸发进行了大量研究,发现雨滴蒸发与相对湿度、温度、雨滴直径等因素密切相关。在相对湿度因素上,雨滴蒸发会降低陆表的降雨量,尤其是在干燥环境或干旱半干旱地区雨滴蒸发更加明显(Rosenfeld和Mintz,1988;Cao和Qi,2014)。为了量化降雨的蒸发量,Song等(2017)模拟了三维大气场,提出了湿度和降雨量之间的线性模型。蒋强等(2020)基于Maxwell理论建立了考虑蒸发过程的雨滴下落模型,针对相对湿度开展了敏感性实验,发现环境的相对湿度变小会显著加快小雨滴的蒸发。在温度因素上,随着近陆表温度的升高,双偏振雷达探测的 Z_{dr} 呈现减小趋势(Xie等,2016)。Pallardy和Fox(2018)计算了从雷达扫描层到地面的不同大小雨滴的蒸发量,结果表明随着降雨强度减小,雨滴之间的相互作用将为较大的雨滴谱带来不确定性,是导致雷达降雨测量中雨滴质量变化的重要因素。在雨滴直径方面,蒸发对小雨滴的耗散更大,导致陆表对小雨滴的缺测情况,对大雨滴的蒸发作用也更明显(吴兑,1991;贾星灿和牛生杰,2008;张宇等,2013;黄一民等,2018)。总的来说,基于多模式雷达数据,构建温度、湿度等雨滴蒸发影响因素与雷达偏振参数以及雨滴谱偏差的定量关系,是计算降雨蒸发偏差的一个重要思路。

3.3.2 雨滴漂移

雷达观测到的高空降雨并非总是与雷达采样点正下方的地面降雨相对应(Lack和Fox,2007),这是由于雨滴从雷达观测高度下降到陆表的过程中,在三维大气中风场的影响下会产生位置偏移,这样的现象被称为雨滴漂移。雨滴漂移会对雷达降雨预测产生重大影响,尤其是当雷达降雨用于小范围地区的雨洪预报时,几公里的漂移结果会

产生巨大误差(Liguori等,2012;Lauri等,2012)。

国内外研究学者针对雨滴漂移开展了诸多研究。Lack和Fox(2007)研究发现风引起的降雨误差对对流雨具有更显著的影响。随后,Lauri等(2012)提出了一种采用平流格式计算雨滴水平位移量的方法。Dai等(2013)利用三维运动方程计算了雨滴从雷达波束高度至地面的运动轨迹和位移;之后又基于数值计算,模拟了雨滴在三维风场的运动过程,提出了一种不同风速场景下的雷达降雨不确定性计算模型(Dai和Han,2014)。在此基础上,为了进一步改善雷达的降水估算精度,为水文模拟提供更准确的陆表降雨数据,一些学者尝试耦合大气变量,建立综合的雨滴微物理过程模型。例如,Dai等(2019)基于双偏振雷达数据,对雨滴蒸发和雨滴漂移进行数值模拟,开发了一种兼顾漂移和蒸发的雷达测雨全物理校正方法,重构了雷达和雨量计之间更为准确的空间对应关系。Yang等(2020a)耦合多种大气变量与多模式雷达数据,并利用LSTM(Long Short-Term Memory)神经网络,对处于高湿度高风速地区的雨滴实现校正且效果良好。

3.3.3 雨滴破碎

关于雨滴破碎的演变过程,有两种不同的观点。一种观点支持二元雨滴碰撞(Low和List,1982;Barros等,2010),即当两个雨滴由于自身大小或其他因素(例如风)的差异而以不同的速度落在同一作用线时,会进行合并、碰撞或分裂而发生雨滴破碎;另一种看法则支持雨滴自发破碎,即当大雨滴在空气动力学中不稳定时,会分裂成大量小尺寸雨滴,即产生自发性的破裂(Pruppacher和Pitter,1971)。雨滴破碎作用会造成雨滴谱的谱型变化,造成降雨强度变大,为此必须进行雨滴破碎的模拟与预测,以减小其对雷达降雨产生的不确定性误差。

针对雨滴破碎的研究,一类基于数值模型计算(McFarquhar,2004;Prat和Barros,2009);另一类则通过使用大量实验室和计算流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)研究来模拟过往十几年的碰撞结果,进行雨滴碰撞的预测(包括状态和破碎雨滴大小分布)(Low和List,1982;Testik和Barros,2007;Straub等,2010;Testik等,2011)。虽然上述模型与研究结果具有一定的可信

度, 但均为理论层面的碰撞率研究, 没有进行实际观测评估。基于此, Testik 和 Rahman (2017) 针对雨滴微物理过程开发了一种高速光学偏差计 HOD (High-speed Optical Disdrometer), 首次对降雨事件中的二元雨滴碰撞进行了观测, 结果表明碰撞率随着降雨强度增加呈上升趋势, 在雨滴谱演化中具有明显的控制作用。

3.4 陆表参考雨量校正

3.4.1 陆表降雨误差校正

地面雨量计是直接、有效且精度高的陆表降雨信息获取方法, 为获取更可靠的雷达降雨数据, 很多学者提出了利用雨量计测量的“陆表真实”雨量值对雷达降雨数据进行偏差校正的统计模型, 以降低雷达—雨量计的不一致性 (Bringi 等, 2011; Dai 等, 2015)。

为将地面雨量计与雷达相结合以实现雷达陆表降雨误差校正, 现今已经发展出诸多方法。以往的研究多集中体现在将雨量计数据应用于雷达降雨估算中, 常见的两种方法为平均场偏差校正 (Chumchean 等, 2006) 和局部偏差校正 (Seo 和 Breidenbach, 2002; Seo, 2013)。如今多通过使用雷达—雨量计合并方法, 结合地面雨量计订正雷达降水数据中的系统误差、随机误差、观测误差等, 获得高质量高时空分辨率的雷达降雨产品。

3.4.2 代表性误差校正

地面雨量计在校正雷达降雨的过程中存在代表性误差, 表现为关联地面雨量计的点降雨测量与雷达的面降雨测量所产生的不确定性, 可进一步划分为不同的误差类型, 包括总体误差、条件误差和随机误差等 (Habib 等, 2008; Bringi 等, 2011)。很多研究针对雷达—雨量计的测量不一致性问题, 提出多种方法以降低代表性误差对雷达降雨的影响 (Dai 和 Han, 2014; Villarin 等, 2014; Kirstetter 等, 2015; Seo, 2013)。

代表性误差校正方案一般存在两类思路。一种强调用一定密度的雨量站网观测作为误差校正的标准, 诸如自适应最优插值法 (李建通等, 2000)、卡尔曼滤波法 (Dinku 等, 2002)、云分类法 (陈小华和段旭, 2013) 等方法。另一思路是基于气候统计资料, 将雷达反射率因子转换为降雨强度的 $Z-R$ 关系作为订正标准 (史锐等, 2005;

Cole 和 Moore, 2008; Gerstner 和 Heinemann, 2008), 并在气候因素的基础上进一步扩展, 将复杂地形因素考虑在内, 利用多种方法进行定量降水估测的方案 (王丽荣和王立荣, 2017)。

3.4.3 时间取样误差校正

大多雨量计观测结果在时间上是连续的 (即时间上基本没有间隔), 与之相比, 地基雷达的时间分辨率不高, 在同一采样点存在时间扫描间隔。因此需要对雷达雨场进行实时插值, 才能得到连续的降水场。所谓时间采样误差是指基于稳定采样间隔进行插值所估算的降水场与实际降水场之间存在的误差 (Piccolo 和 Chirico, 2005)。

针对时间采样误差, 研究人员提出诸多方法, 力求减少其影响, 提高降雨估测精度。Shapiro 等 (2010) 研究了一种对流层平流分量在空间上变化的反射率场的平流校正方法。Atencia 等 (2011) 通过改进滑窗概率匹配法, 计算了新的对流和冠状降水的 $Z-R$ 关系, 进而实现降雨估计改善。Seo 和 Krajewski (2015) 提出一种对雷达时间采样误差进行校正的平流方法, 即利用两次雷达采样间歇前后观测到的静态暴雨位置的线性插值来估算错过的降雨积累量。除以上误差校正方法外, 雷达观测模式的改进同样能够有效减小此类误差, 如相控阵雷达能够在 1 min 内完成 1 个体扫, 较传统雷达 5—6 min 的采样间隔, 可有效降低雷达时间采样误差 (杨金红等, 2009; 刘黎平等, 2014)。

卫星测雨雷达也会因为较长的采样周期和以瞬时降雨强度估计连续降雨的模式而产生严重的时间采样误差 (Tang 等, 2015)。依据星地雷达时间匹配最邻近原则, 尽可能挑选与卫星飞过时间最邻近的地基雷达体扫数据 (韩静等, 2019), 融合多源雷达遥感数据及地面站点观测数据, 为提高雷达时空分辨率、减少时间误差提供可能 (张旻祺和傅云飞, 2018; 任英杰等, 2019)。

4 研究趋势与展望

4.1 多尺度陆表降雨反演

各类水文、地质、灾害等应用对降雨时空尺度的要求不同, 并非都需要最高时空分辨率的数据, 因此构建多尺度、多要素降雨产品对增强地

学模拟的效率、准确性和延长预见期有重要意义。降雨升降尺度方法作为大气科学和水文科学连接的纽带,得到了许多气象学者和水文学者的广泛研究。然而通过文献对比发现,各类升降尺度方法,如插值方法、动力降尺度法、统计降尺度法等各有优缺点,在不同区域不同场景下,使用不同升降尺度方法会造成不同的模拟效果。目前并没有系统的实验证明某种方法更加适合所有情况,较为理想但复杂的举措往往是通过多次实验,选择适合研究区域特点及研究目的的最优方法。以气象卫星资料统计降尺度方法为例,现有方法多基于降水和降水解释因子之间的统计关系建立回归模型,但这种方法一方面缺乏物理基础,另一方面降尺度效果也会因为降水解释因子和回归模型的选取产生差异。因此,升降尺度需要进一步结合降水形成机制,增加对降雨统计时空尺度转换的对比研究,不断深化和完善降雨时空尺度转换方法。

4.2 基于多模式数据融合的陆表降雨反演

受数据采样模式、测量误差、仪器误差等影响,单一观测模式获取的降雨数据会存在较大误差,严重影响其在地学研究中的应用。在过去的20年里,诸多集成多仰角、多天线、多波段雷达数据和数值天气预报结果的降雨产品在解决地形和非地形要素遮挡及雷达采样周期长造成的降雨观测不连续的问题上取得了良好的效果(胡启元等,2021),充分证明了多模式数据结合的显著优势。然而,针对多模式数据融合,还应关注以下几点:(1)要注意不同观测模式的时空尺度联系并进行误差分析。由于不同观测模式采样时间间隔、采样面积和区域有所不同,常导致时空误差和时空尺度不匹配问题,增大了数据融合的难度。(2)发展对于不同模式降雨观测资料误差的定量分析,是多模式数据融合的基础。此外,针对融合多模式数据的算法和生产分钟级降水产品还有待更深入的研究。

4.3 顾及雨滴微物理偏差的陆表降雨反演

传统雷达—雨量计的差异通常被直接视作雷达测雨误差,忽略了雷达—雨量计采样区域(空中—陆表)的偏差。将雷达测雨通过坐标变换直接作为陆表降雨,显然未考虑雨滴下降过程中发

生的蒸发、漂移、破碎等微物理变化过程。因此,雨滴从空中到陆表的演变,仍是目前基于地基天气雷达和星载雷达反演陆表降雨的重要误差源,在近几年受到了广泛关注。除了借助雨量计校正雷达空中降雨的传统方法外,通过建立雨滴演化模型,联合风速廓线或其他相关气象因子,模拟雨滴下落过程滴谱变化和时空漂移,对于定量研究雨滴演化偏差,获取雷达—陆表降雨转换关系具有重要意义。

4.4 基于机器学习的多模式雷达数据挖掘

多模式观测产生的海量气象数据,一方面有助于提高降水估计精度,另一方面也为数据处理、数据计算和模型训练带来了新的挑战,这是因为传统的降水估计方法和数据融合手段在处理海量数据时存在局限性。如何有效挖掘和利用海量雷达数据,对于进一步提高降水估计精度具有重要意义。以降水估计算法为例,传统的回归模型($Z-R$)并不能准确描述出降雨和雷达反射率、偏振参数等关联因子之间高度的非线性关系,且存在参数固定、空间泛化能力弱的问题。而机器学习算法(如随机森林)通过数据和模型驱动,较传统统计模型,在描述降雨这种高度非线性和复杂性的问题上表现出强大优势。目前,降雨反演与机器学习技术相结合还处于探索阶段,在许多方面需要进一步深化研究:首先,需要提升各类人工智能算法对气象大数据的挖掘能力,综合利用多模式观测资料以及数值预报产品,开展人工智能技术对陆表降雨反演预报中的偏差订正研究,改善降水估计的精度;另外,亟待强化人工智能和气象大数据在灾害性天气预报预警等方面的研究,增强对城市内涝、中小型流域山洪地质灾害的预报预警的准确性。

5 结 语

过去几十年,多模式天气雷达遥感在灾害性天气探测、强对流天气预报等应用中发展迅速。融合多模式雷达的降雨产品也为陆表过程模拟和防洪减灾决策提供了良好的数据支撑。本文深入分析了目前多模式雷达遥感观测技术的特点,系统总结了基于多模式雷达的陆表降雨反演方法,最后展望了多模式雷达遥感在降雨观测上的未来研究趋势。

总体来看, 不同模式的雷达测雨方式有其各自的观测优势和误差特性。为了充分发挥不同模式测雨的优势, 需要进一步探索处理海量雷达数据的方法, 提高算法的精度和效率, 生成高精度、长序列且连续的陆表降雨产品, 以满足陆表过程模拟和环境监测的需求。同时, 对于不同 $Z-R$ 关系、时空升降尺度方法、雨量偏差校正方法得到的结果各有差异, 在构建不同区域降雨反演方法时需要更多的对比研究。

参考文献 (References)

- Acquaotta F, Baronetti A, Bentivenga M, Fratianni S and Piccarreta M. 2019. Estimation of rainfall erosivity in Piedmont (Northwestern Italy) by using 10-minute fixed-interval rainfall data. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 123(1): 1-18 [DOI: 10.28974/idojaras.2019.1.1]
- Adhikari N B and Nakamura K. 2002. Detectable rain range of spaceborne Ka-band radar estimated from TRMM precipitation radar data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(11): 1878-1885 [DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<1878:DRROSK>2.0.CO;2]
- Atencia A, Mediero L, Llasat M C and Garrote L. 2011. Effect of radar rainfall time resolution on the predictive capability of a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12): 3809-3827 [DOI: 10.5194/hess-15-38092011]
- Barros A P, Prat O P and Testik F Y. 2010. Size distribution of raindrops. *Nature Physics*, 6(4): 232 [DOI: 10.1038/nphys1646]
- Beauchamp R M and Chandrasekar V. 2015. Real-time noise estimation and correction in dual-polarization radar systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(11): 6183-6195 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2434880]
- Borowska L, Zrnić D, Ryzhkov A, Zhang P and Simmer C. 2011. Polarimetric estimates of a 1-month accumulation of light rain with a 3-cm wavelength radar. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5): 1024-1039 [DOI: 10.1175/2011JHM1339.1]
- Bringi V N, Rico-Ramirez M A and Thurai M. 2011. Rainfall estimation with an operational polarimetric C-Band radar in the United Kingdom: comparison with a gauge network and error analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5): 935-954 [DOI: 10.1175/JHM-D-10-05013.1]
- Cao Q and Qi Y C. 2014. The variability of vertical structure of precipitation in Huaihe River Basin of China: implications from long-term spaceborne observations with TRMM precipitation radar. *Water Resources Research*, 50(5): 3690-3705 [DOI: 10.1002/2013WR014555]
- Chandrasekar V, Bringi V N, Balakrishnan N and Zrnić D S. 1990. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: specific differential phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(5): 621-629 [DOI: 10.1175/1520-0426(1990)007<0621:ESOMRA>2.0.CO;2]
- Chen G, Zhao K, Zhang G F, Huang H, Liu S, Wen L, Yang Z L, Yang Z W, Xu L L and Zhu W J. 2017. Improving polarimetric C-band radar rainfall estimation with two-dimensional video disdrometer observations in eastern China. *Journal of Hydrometeorology*, 18(5): 1375-1391 [DOI: 10.1175/JHM-D-16-0215.1]
- Chen H N, Chandrasekar V, Cifelli R and Xie P P. 2020. A machine learning system for precipitation estimation using satellite and ground radar network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(2): 982-994 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2942280]
- Chen J, Qian W M, Han J C and Lian Z L. 2015. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on Z-I relations varying with time and space. *Meteorological Monthly*, 41(3): 296-303 (陈静, 钱伟妙, 韩军彩, 连志鸾. 2015. 基于动态Z-I关系雷达回波定量估测降水方法研究. *气象*, 41(3): 296-303) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0516.2015.03.004]
- Chen X H and Duan X. 2013. Studies on the precipitation estimation in central Yunnan based on satellite and radar data. *Meteorological Monthly*, 39(2): 203-209 (陈小华, 段旭. 2013. 基于卫星和雷达资料估测滇中地区降水量方法研究. *气象*, 39(2): 203-209) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.02.009]
- Cheng K H, Fu P L, Hu D M, Bao X J, Zhang Y, Li H W and Huang H. 2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test. *Meteorological Monthly*, 46(6): 823-836 (程元慧, 傅佩玲, 胡东明, 包晓军, 张羽, 李浩文, 黄辉. 2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其实地观测. *气象*, 46(6): 823-836) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.009]
- Chumchean S, Seed A and Sharma A. 2006. Correcting of real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach. *Journal of Hydrology*, 317(1/2): 123-137 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.013]
- Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, Kennedy P C, Wang Y and Rutledge S A. 2011. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(3): 352-364 [DOI: 10.1175/2010JTECHA1488.1]
- Cole S J and Moore R J. 2008. Hydrological modelling using rain-gauge- and radar-based estimators of areal rainfall. *Journal of Hydrology*, 358(3/4): 159-181 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.025]
- Cunha L K, Smith J A, Baeck M L and Krajewski W F. 2013. An early performance evaluation of the NEXRAD dual-polarization radar rainfall estimates for urban flood applications. *Weather and Forecasting*, 28(6): 1478-1497 [DOI: 10.1175/WAF-D-13-00046.1]
- Dai Q and Han D W. 2014. Exploration of discrepancy between radar and gauge rainfall estimates driven by wind fields. *Water Resources Research*, 50(11): 8571-8588 [DOI: 10.1002/2014WR015794]
- Dai Q, Han D W, Rico-Ramirez M A and Islam T. 2013. The impact of

- raindrop drift in a three-dimensional wind field on a radar-gauge rainfall comparison. *International Journal of Remote Sensing*, 34(21): 7739-7760 [DOI: 10.1080/01431161.2013.826838]
- Dai Q, Han D W, Rico-Ramirez M A, Zhuo L, Nanding N & Islam T. 2015. Radar rainfall uncertainty modelling influenced by wind. *Hydrological processes*, 29(7): 1704-1716 [DOI: 10.1002/hyp.10292]
- Dai Q, Yang Q Q, Han D W, Rico-Ramirez M A and Zhang S L. 2019. Adjustment of radar-gauge rainfall discrepancy due to raindrop drift and evaporation using the weather research and forecasting model and dual-polarization radar. *Water Resources Research*, 55(11): 9211-9233 [DOI: 10.1029/2019WR025517]
- Dinku T, Anagnostou E N and Borga M. 2002. Improving radar-based estimation of rainfall over complex terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 41(12): 1163-1178 [DOI: 10.1175/1520-0450(2002)041<1163:IRBEOR>2.0.CO;2]
- Durden S L, Tanelli S and Sy O O. 2020. Comparison of GPM DPR and airborne radar observations in OLYMPEX. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(10): 1707-1711 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2952287]
- Eliseev B P and Kozlov A I. 2018. On polarization selection of electromagnetic waves and its realizability. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 63(1): 17-20 [DOI: 10.1134/S1064226918010035]
- Fang W, Pang L, Wang N and Yi W N. 2020. Survey on the application of artificial intelligence in precipitation nowcasting. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition)*, 12(4): 406-420 (方巍, 庞林, 王楠, 易伟楠. 2020. 人工智能在短临降水预报中应用研究综述. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 12(4): 406-420) [DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.04.002]
- Fang X, Shao A M, Yue X J and Liu W C. 2018. Statistics of the Z-R relationship for strong convective weather over the Yangtze-Huaihe River basin and its application to radar reflectivity data assimilation for a heavy rain event. *Journal of Meteorological Research*, 32(4): 598-611 [DOI: 10.1007/s13351-018-7163-1]
- Gao Y F, Chen Y D and Peng T. 2018. Influence of radar rainfall horizontal resolution on hydrological simulation-a case study of Xitaxi watershed. *Journal of Tropical Meteorology*, 34(3): 347-352 (高玉芳, 陈耀登, 彭涛. 2018. 雷达估测降雨水平分辨率对径流模拟的影响——以西苕溪流域为例. *热带气象学报*, 34(3): 347-352) [DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2018.03.008]
- Gerstner E M and Heinemann G. 2008. Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis. *Journal of Hydrology*, 352(3/4): 296-308 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.01.016]
- Gingrey A, Varble A and Zipser E. 2018. Relationships between extreme rain rates and convective intensities from the perspectives of TRMM and WSR-88D Radars. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(6): 1353-1369 [DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0240.1]
- Guo Z Y, Hu S, Liu X T, Chen X D, Zhang H H, Qi T and Zeng G Y. 2021. Improving S-band polarimetric radar monsoon rainfall estimation with two-dimensional video disdrometer observations in South China. *Atmosphere*, 12(7): 831 [DOI: 10.3390/atmos12070831]
- Habib E, Aduvala A V and Meselhe E A. 2008. Analysis of radar rainfall error characteristics and implications for streamflow simulation uncertainty. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3): 568-587 [DOI: 10.1623/hysj.53.3.568]
- Han J, Chu Z G, Wang Z H, Xu F, Leng L and Zhu Y Q. 2019. Consistency analysis between ground-based radars and TRMM PR. *Journal of the Meteorological Sciences*, 39(1): 93-103 (韩静, 楚志刚, 王振会, 徐芬, 冷亮, 朱艺青. 2019. 地基雷达与 TRMM/PR 的一致性分析. *气象科学*, 39(1): 93-103) [DOI: 10.3969/2018jms.0009]
- He G X, Li G, Zou X L and Ray P S. 2012. A velocity dealiasing scheme for synthetic C-Band data from China's new generation weather radar system (CINRAD). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(9): 1263-1274 [DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00010.1]
- Hu Q Y, Qi Y C, Wang N and Zhu Z W. 2021. A radar electro magnetic beam non-standard blockage compensated technology based on SRTM terrain data. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 11(3): 135-144 (胡启元, 戚友存, 王楠, 朱自伟. 2021. 基于 SRTM 地形数据的天气雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术研究. *气象科技进展*, 11(3): 135-144) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.016]
- Huang Y M, Song X F, He Q H and Zhang X P. 2018. Study of sub-cloud evaporation in the Dongting lake basin. *Scientia Geographica Sinica*, 38(8): 1364-1369 (黄一民, 宋献方, 何清华, 章新平. 2018. 洞庭湖流域下落雨滴蒸发研究. *地理科学*, 38(8): 1364-1369) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.019]
- Jia X C and Niu S J. 2008. Observational analysis of raindrop size distributions measured at surface and cloud. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 31(6): 865-870 (贾星灿, 牛生杰. 2008. 空中、地面雨滴谱特征的观测分析. *南京气象学院学报*, 31(6): 865-870) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2008.6.014]
- Jiang Q, Bian J C and Li Y. 2020. Establishment of model prototype of raindrop dropping process. *Plateau Meteorology*, 39(3): 609-619 (蒋强, 卞建春, 李艳. 2020. 雨滴下落过程模型雏形的建立. *高原气象*, 39(3): 609-619) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00004.]
- Jiao P C, Wang Z H, Chu Z G, Han J, Zhang S and Zhu Y Q. 2016. An interpolation method for weather radar data based on Fourier spectrum analysis. *Plateau Meteorology*, 35(6): 1683-1693 (焦鹏程, 王振会, 楚志刚, 韩静, 张帅, 朱艺青. 2016. 基于傅里叶谱分析的天气雷达图像插值方法. *高原气象*, 35(6): 1683-1693) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00108]
- Junyent F and Chandrasekar V. 2016. An examination of precipitation

- using CSU-CHILL dual-wavelength, dual-polarization radar observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(2): 313-329 [DOI: 10.1175/JTECH-D-14-00229.1]
- Kirstetter P E, Gourley J J, Hong Y, Zhang J, Moazamigoodarzi S, Langston C and Arthur A. 2015. Probabilistic precipitation rate estimates with ground-based radar networks. *Water Resources Research*, 51(3): 1422-1442 [DOI: 10.1002/2014WR015672]
- Kitzmiller D, Miller D, Fulton R and Ding F. 2013. Radar and multi-sensor precipitation estimation techniques in National Weather Service hydrologic operations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(2): 133-142 [DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000523]
- Kou L L, Wang Z H, Shen F F and Chu Z G. 2019. High resolution interpolation for weather radar data based on Gaussian-scale mixtures model in wavelet domain. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(1): 142-153 (寇蕾蕾, 王振会, 沈菲菲, 楚志刚. 2019. 基于小波域高斯尺度混合模型的天气雷达图像高分辨率插值. *气象学报*, 77(1): 142-153) [DOI: 10.11676/qxxb2019.001]
- Kumjian M R and Ryzhkov A V. 2010. The impact of evaporation on polarimetric characteristics of rain: theoretical model and practical implications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6): 1247-1267 [DOI: 10.1175/2010JAMC2243.1]
- Kusiak A, Wei X P, Verma A P and Roz E. 2013. Modeling and prediction of rainfall using radar reflectivity data: a data-mining approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4): 2337-2342 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2210429]
- Lack S A and Fox N I. 2007. An examination of the effect of wind-drift on radar-derived surface rainfall estimations. *Atmospheric Research*, 85(2): 217-229 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2006.09.010]
- Lauri T, Koistinen J and Moisseev D. 2012. Advection-based adjustment of radar measurements. *Monthly Weather Review*, 140(3): 1014-1022 [DOI: 10.1175/MWR-D-11-00045.1]
- Li J T, Yang W S, Guo L and Chen Z M. 2000. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 24(2): 263-270 (李建通, 杨维生, 郭林, 陈泽面. 2000. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨. *大气科学*, 24(2): 263-270) [DOI: 10.1007/s10011-000-0335-3]
- Li N, Wang Z H, Xu F, Chu Z G, Zhu Y Q and Han J. 2017. The assessment of ground-based weather radar data by comparison with TRMM PR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(1): 72-76 [DOI: 10.1109/LGRS.2016.2626320]
- Li Y J and Guo P W. 2017. Application of downscaling forecast for the north of Zhejiang precipitation in summer based on the BP neural network model. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 40(3): 425-432 (黎明君, 郭品文. 2017. 基于BP神经网络的浙北夏季降尺度降水预报方法的应用. *大气科学学报*, 40(3): 425-432) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140324001]
- Li Z, Zhang Y, Borowska L, Ivić I R, Mirković D, Perera S, Zhang G F and Zrnić D S. 2021. Polarimetric phased array weather radar data quality evaluation through combined analysis, simulation, and measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(6): 1029-1033 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.2990334]
- Liguori S, Rico-Ramirez M A, Schellart A N A and Saul A J. 2012. Using probabilistic radar rainfall nowcasts and NWP forecasts for flow prediction in urban catchments. *Atmospheric Research*, 103: 80-95 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.05.004]
- Liou Y C, Bluestein H B, French M M and Wienhoff Z B. 2018. Single-Doppler velocity retrieval of the wind field in a tornadic supercell using mobile, Phased-Array, Doppler radar data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(8): 1649-1663 [DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0004.1]
- Liou Y C, Chang S F and Sun J Z. 2012. An application of the immersed boundary method for recovering the three-dimensional wind fields over complex terrain using multiple-Doppler radar data. *Monthly Weather Review*, 140(5): 1603-1619 [DOI: 10.1175/MWR-D-11-00151.1]
- Liu J, Song Z Z, Liu D F, Jia C M and Xu S. 1999. Classified Z-I relationship and its application to the measurement of rainfall by weather radar over the Huaihe river basin. *Scientia Meteorologica Sinica*, 19(2): 213-220 (刘娟, 宋子忠, 刘东风, 贾昌明, 徐胜. 1999. 分组 Z-I 关系及其在淮河流域雷达测雨中应用. *气象科学*, 19(2): 213-220)
- Liu L P, Wu L L, Wu C, Wang X D, Chen X H, Cao J W and Zhuang W. 2014. Field experiment on convective precipitation by X-Band phased-array radar and preliminary results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 38(6): 1079-1094 (刘黎平, 吴林林, 吴翀, 汪旭东, 陈晓辉, 曹俊武, 庄薇. 2014. 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*, 38(6): 1079-1094) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13253]
- Liu L P, Zhang Y and Ding H. 2021. Vertical air motion and raindrop size distribution retrieval using a Ka/Ku dual-wavelength cloud radar and its preliminary application. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45(5): 1099-1113 (刘黎平, 张扬, 丁晗. 2021. Ka/Ku 双波段云雷达反演空气垂直运动速度和雨滴谱方法研究及初步应用. *大气科学*, 45(5): 1099-1113) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20200]
- Liu X Y, Li H, He P, Li D Y and Zheng Y Y. 2018. Comparison on the precipitation measurement between GPM/DPR and CINRAD radars. *Journal of Applied Meteorological Science*, 29(6): 667-679 (刘晓阳, 李郝, 何平, 李丹杨, 郑媛媛. 2018. GPM/DPR 雷达与 CINRAD 雷达降水探测对比. *应用气象学报*, 29(6): 667-679) [DOI: 10.11898/1001-7313.20180603]
- Liu Y L, Li C X, Zhang L J, Wen H and Wang S D. 2020. Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(4): 705-720 (柳云雷, 李昌兴, 张乐坚, 文浩, 王曙东. 2020. 基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响. *气象学报*, 78(4): 705-720) [DOI: 10.11676/qxxb2020.037]
- Low T B and List R. 1982. Collision, coalescence and breakup of raindrops. Part I: experimentally established coalescence efficiencies

- and fragment size distributions in breakup. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39(7): 1591-1606 [DOI: 10.1175/1520-0469(1982)039<1591:CCABOR>2.0.CO;2]
- Ma H, Wan Q L, Chen Z T, Lin Z M, Chen Z H and Wu J H. 2008. Improving rainfall estimation by radar based on Z-I relation and variation-calibration method. *Journal of Tropical Meteorology*, 24(5): 546-549 (马慧, 万齐林, 陈子通, 林振敏, 陈桢华, 吴嘉豪. 2008. 基于Z-I关系和变分校正法改进雷达估测降水. *热带气象学报*, 24(5): 546-549) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4965.2008.05.016]
- Mahmud M R, Yusof A A M, Reba M N M and Hashim M. 2020. Mapping the daily rainfall over an ungauged tropical Micro Watershed: a downscaling algorithm using GPM data. *Water*, 12(6): 1661 [DOI: 10.3390/w12061661]
- Marshall J S and Palmer W M K. 1948. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5(4): 165-166 [DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2]
- Matrosov S Y. 2015. The use of *Cloud Sat* data to evaluate retrievals of total ice content in precipitating cloud systems from ground-based operational radar measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(7): 1663-1674 [DOI: 10.1175/JAMC-D-15-0032.1]
- McFarquhar G M. 2004. A new representation of collision-induced breakup of raindrops and its implications for the shapes of raindrop size distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61(7): 777-794 [DOI: 10.1175/1520-0469(2004)061<0777: AN-ROCB>2.0.CO;2]
- Min X X, Ma Z Q, Xu J T, He K, Wang Z G, Huang Q L and Li J. 2020. Spatially downscaling IMERG at daily scale using machine learning approaches over Zhejiang, southeastern China. *Frontiers in Earth Science*, 8: 146 [DOI: 10.3389/feart.2020.00146]
- Nourani V, Farshbaf A and Adarsh S. 2020. Spatial downscaling of radar-derived rainfall field by two-dimensional wavelet transform. *Hydrology Research*, 51(3): 456-469 [DOI: 10.2166/nh.2020.165]
- Pallardy Q and Fox N I. 2018. Accounting for rainfall evaporation using dual-polarization radar and mesoscale model data. *Journal of Hydrology*, 557: 573-588 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.12.058]
- Piccolo F and Chirico G B. 2005. Sampling errors in rainfall measurements by weather radar. *Advances in Geosciences*, 2: 151-155 [DOI: 10.5194/adgeo-2-151-2005]
- Potvin C K, Wicker L J and Shapiro A. 2012. Assessing errors in variational dual-Doppler wind syntheses of supercell thunderstorms observed by storm-scale mobile radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(8): 1009-1025 [DOI: 10.1175/JTECH-D-11-00177.1]
- Prat O P and Barros A P. 2009. Exploring the transient behavior of Z - R relationships: implications for radar rainfall estimation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(10): 2127 -2143 [DOI: 10.1175/2009JAMC2165.1]
- Pruppacher H R and Pitter R L. 1971. A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(1): 86-94 [DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<0086:ASEDOT>2.0.CO;2]
- Qi Y C. 2012. Improving Radar-Based Precipitation Estimation through VPR Correction. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (戚友存. 2012. 通过VPR订正技术提高雷达定量降水估计能力. 南京: 南京信息工程大学)
- Ren Y J, Yong B, Lu D K and Chen H Q. 2019. Evaluation of the Integrated Multi-satellite Retrievals (IMERG) for Global Precipitation Measurement (GPM) mission over the Mainland China at multiple scales. *Journal of Lake Sciences*, 31(2): 560-572 (任英杰, 雍斌, 鹿德凯, 陈汉清. 2019. 全球降水计划多卫星降水联合反演IMERG卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估. *湖泊科学*, 31(2): 560-572) [DOI: 10.18307/2019.0224]
- Rosenfeld D and Mintz Y. 1988. Evaporation of rain falling from convective clouds as derived from radar measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 27(3): 209-215 [DOI: 10.1175/1520-0450(1988)027<0209:EORFFC>2.0.CO;2]
- Ryzhkov A V and Zrnić D S. 1995. Comparison of dual polarization radar estimators of rain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12(2): 249-256 [DOI: 10.1175/1520-0426(1995)012<0249:CODPRE>2.0.CO;2]
- Ryzhkov A V, Zrnić D S. Precipitation observed in Oklahoma meso-scale convective systems with a polarimetric radar. 1994. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33(4): 455-464 [DOI: 10.1175/1520-0450(1994)033<0455:POIOMC>2.0.CO;2]
- Ryzhkov A V, Giangrande S E and Schuur T J. 2005. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D. *Journal of Applied Meteorology*, 44(4): 502-515 [DOI: 10.1175/JAM2213.1]
- Ryzhkov A V, Kumjian M R, Ganson S M and Zhang P F. 2013. Polarimetric radar characteristics of melting hail. Part II: practical implications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(12): 2871-2886 [DOI: 10.1175/JAMC-D-13-074.1]
- Seliga T A and Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 15(1): 69-76 [DOI: 10.1175/1520-0450(1976)015<0069:PUOR-DR>2.0.CO;2]
- Seo D J. 2013. Conditional bias-penalized kriging (CBPK). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(1): 43-58 [DOI: 10.1007/s00477-012-0567-z]
- Seo D J and Breidenbach J P. 2002. Real-time correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 3(2): 93-111 [DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0093:RTCOSN>2.0.CO;2]
- Seo B C and Krajewski W F. 2015. Correcting temporal sampling error in radar-rainfall: effect of advection parameters and rain storm characteristics on the correction accuracy. *Journal of Hydrology*, 531: 272-283 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.018]
- Shapiro A, Willingham K M and Potvin C K. 2010. Spatially variable advection correction of radar data. Part I: theoretical consider-

- ations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(11): 3445-3456 [DOI: 10.1175/2010JAS3465.1]
- Sharifi E, Saghafian B and Steinacker R. 2019. Downscaling satellite precipitation estimates with multiple linear regression, artificial neural networks, and spline interpolation techniques. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(2): 789-805 [DOI: 10.1029/2018JD028795]
- Shi R, Cheng M H, Cui Z H and Liu C H. 2005. Estimation amount of summer regional heavy rainfall using the averages of radar VPRs together with rain gauge adjustment. *Journal of Applied Meteorological Science*, 16(6): 737-745 (史锐, 程明虎, 崔哲虎, 刘朝晖. 2005. 用反射率因子垂直廓线联合雨量计校准估测夏季区域强降雨水. *应用气象学报*, 16(6): 737-745) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2005.06.004]
- Shimada U, Sawada M and Yamada H. 2016. Evaluation of the accuracy and utility of tropical cyclone intensity estimation using single ground-based Doppler radar observations. *Monthly Weather Review*, 144(5): 1823-1840 [DOI: 10.1175/MWR-D-15-0254.1]
- Shin K, Song J J, Bang W and Lee G. 2021. Quantitative precipitation estimates using machine learning approaches with operational dual-polarization radar data. *Remote Sensing*, 13(4): 694 [DOI: 10.3390/rs13040694]
- Song Y, Han D W and Zhang J. 2017. Radar and rain gauge rainfall discrepancies driven by changes in atmospheric conditions. *Geophysical Research Letters*, 44(14): 7303-7309 [DOI: 10.1002/2017GL074493]
- Straub W, Beheng K D, Seifert A, Schlotke J and Weigand B. 2010. Numerical investigation of collision-induced breakup of raindrops. Part II: parameterizations of coalescence efficiencies and fragment size distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(3): 576-588 [DOI: 10.1175/2009JAS3175.1]
- Tang L, Tian Y D, Yan F and Habib E. 2015. An improved procedure for the validation of satellite-based precipitation estimates. *Atmospheric Research*, 163: 61-73 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.12.016]
- Tang S X, Lü D R, He J X, Li R and Wang H. 2017. Research of weather radar technology and application on Chinese weather observation. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(1): 1-13 (唐顺仙, 吕达仁, 何建新, 李睿, 王皓. 2017. 天气雷达技术研究进展及其在我国天气探测中的应用. *遥感技术与应用*, 32(1): 1-13) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.1.0001]
- Teegavarapu R S V, Meskele T and Pathak C S. 2012. Geo-spatial grid-based transformations of precipitation estimates using spatial interpolation methods. *Computers and Geosciences*, 40: 28-39 [DOI: 10.1016/j.cageo.2011.07.004]
- Testik F Y and Barros A P. 2007. Toward elucidating the microstructure of warm rainfall: a survey. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2003 [DOI: 10.1029/2005RG000182]
- Testik F Y, Barros A P and Bliven L F. 2011. Toward a physical characterization of raindrop collision outcome regimes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(5): 1097-1113 [DOI: 10.1175/2010JAS3706.1]
- Testik F Y and Rahman M K. 2017. First in situ observations of binary raindrop collisions. *Geophysical Research Letters*, 44(2): 1175-1181 [DOI: 10.1002/2017GL072516]
- Villarini G, Seo B C, Serinaldi F and Krajewski W F. 2014. Spatial and temporal modeling of radar rainfall uncertainties. *Atmospheric Research*, 135-136: 91-101 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.09.007]
- Wang H J, Shao N and Ran Y B. 2019. Identification of precipitation-clouds based on the dual-polarization Doppler weather radar echoes using deep-learning method. *IEEE Access*, 7: 12822-12831 [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2867546]
- Wang H Y, Li J H and Yang F L. 2014. Overview of support vector machine analysis and algorithm. *Application Research of Computers*, 31(5): 1281-1286 (汪海燕, 黎建辉, 杨风雷. 2014. 支持向量机理论及算法研究综述. *计算机应用研究*, 31(5): 1281-1286) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.001]
- Wang J, Zhou S D, Yang B, Meng X and Zhou B H. 2016. Nowcasting cloud-to-ground lightning over Nanjing area using S-band dual-polarization Doppler radar. *Atmospheric Research*, 178-179: 55-64 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.007]
- Wang L, Liu P, Heng Z W and Wang H. 2020. Improving C-band weather radar reflectivity attenuation based on two-dimensional video disdrometer data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(2): 024521 [DOI: 10.1117/1.JRS.14.024521]
- Wang L, Wei M, Yang T and Liu P. 2015. Effects of atmospheric refraction on an airborne weather radar detection and correction method. *Advances in Meteorology*, 2015: 407867 [DOI: 10.1155/2015/407867]
- Wang L R and Wang L R. 2017. Influence of horizontal distance and altitude on radar rainfall estimation and its correction. *Meteorological Monthly*, 43(9): 1152-1159 (王丽荣, 王立荣. 2017. 水平距离和海拔高度对雷达估测降水影响及订正. *气象*, 43(9): 1152-1159) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.012]
- Wang Y, Feng Y R, Cai J H and Hu S. 2011. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on categorical Z-I relations. *Journal of Tropical Meteorology*, 27(4): 601-608 (汪瑛, 冯业荣, 蔡锦辉, 胡胜. 2011. 雷达定量降水动态分级 Z-I 关系估算方法. *热带气象学报*, 27(4): 601-608) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.018]
- Wu D. 1991. The numerical test on evaporation of raindrop beneath cloud. *Acta Meteorologica Sinica*, 49(1): 116-121 (吴兑. 1991. 关于雨滴在云下蒸发的数值试验. *气象学报*, 49(1): 116-121)
- Wu W X, Zou H B, Shan J S and Wu S S. 2018. A dynamical Z-R relationship for precipitation estimation based on radar echo-top height classification. *Advances in Meteorology*, 2018: 8202031 [DOI: 10.1155/2018/8202031]
- Xiao Y J and Liu L P. 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics. *Acta Meteorologica Sinica*, 44(1): 116-121 (肖永杰, 刘立平. 2006. 天气雷达网络数据插值到 3-D 网格和镶嵌的方法研究. *气象学报*, 44(1): 116-121)

- ologica Sinica, 64(5): 647-657 (肖艳姣, 刘黎平. 2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究. 气象学报, 64(5): 647-657)
- Xie X X, Evaristo R, Troemel S, Saavedra P, Simmer C and Ryzhkov A. 2016. Radar observation of evaporation and implications for quantitative precipitation and cooling rate estimation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(8): 1779-1792 [DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0244.1]
- Xu B L, Liu L P, Wu C D, Wang G L and Xie L Y. 2012. Typhoon detection of radar improved using ultra low elevation angle. *Plateau Meteorology*, 31(1): 251-257 (徐八林, 刘黎平, 吴昌明, 王改利, 解莉燕. 2012. 超低仰角扫描改进雷达观测台风的探讨. 高原气象, 31(1): 251-257)
- Xu Z X, Yang L, Lei B, Li X H and Zhen X Q. 2020. An automatic framework of region-of-interest detection and classification for networked X-Band weather radar system. *Earth and Space Science*, 7(4): e2020EA001181 [DOI: 10.1029/2020EA001181]
- Xue C B, Chen X, Wu Y, Xu X S and Gao Y. 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 41(4): 673-690 (薛谡彬, 陈娴, 吴俞, 徐星生, 高勇. 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用. 大气科学, 41(4): 673-690) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1608.15288]
- Yang J H, Gao Y C, Cheng M H and Chai X M. 2009. Beam characteristics analysis on phased array weather radar. *Journal of Applied Meteorological Science*, 20(1): 119-123 (杨金红, 高玉春, 程明虎, 柴秀梅. 2009. 相控阵天气雷达波束特性. 应用气象学报, 20(1): 119-123)
- Yang M X. 2015. Evaluating Rainfall Interpolation over the Netherlands. Xi'an: Chang'an University (杨梦溪. 2015. 降雨插值方法在荷兰地区的评估. 西安: 长安大学)
- Yang Q Q, Dai Q, Han D W, Zhu Z Z and Zhang S L. 2020a. Uncertainty analysis of radar rainfall estimates induced by atmospheric conditions using long short-term memory networks. *Journal of Hydrology*, 590: 125482 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125482]
- Yang X Y, Lu Y, Tan M L, Li X G, Wang G Q and He R M. 2020b. Nine-year systematic evaluation of the GPM and TRMM precipitation products in the Shuaishui river basin in East-Central China. *Remote Sensing*, 12(6): 1042 [DOI: 10.3390/rs12061042]
- Yin J P, Unal C and Russchenberg H. 2019. Object-orientated filter design in spectral domain for polarimetric weather radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5): 2725-2740 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2876632]
- Zhang A Q and Fu Y F. 2018. The structural characteristics of precipitation cases detected by dual-frequency radar of GPM satellite. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(1): 33-51 (张稟祺, 傅云飞. 2018. GPM 卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析. 大气科学, 42(1): 33-51) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16220]
- Zhang W R, Wu C, Liu L P, Zhang X, Biao X J and Huang H. 2021. Research on quantitative comparison and observation precision of dual polarization phased array radar and operational radar. *Plateau Meteorology*, 40(2): 424-435 (张蔚然, 吴翀, 刘黎平, 张羽, 包晓军, 黄辉. 2021. 双偏振相控阵雷达与业务雷达的定量对比及观测精度研究. 高原气象, 40(2): 424-435) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00056]
- Zhang Y, Niu S J and Jia X C. 2013. Spectrum evolution in the raindrop falling process: numerical simulation. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 36(6): 699-707 (张宇, 牛生杰, 贾星灿. 2013. 雨滴下落过程谱分布演变的数值模拟. 大气科学学报, 36(6): 699-707) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2013.06.006]
- Zhang Y X, Han H B, Guo S Y, Tian J B and Tang W T. 2021. Statistical characteristics of raindrop size distribution and its Z-R relationship for different precipitation clouds in summer in the Qilian Mountains. *Arid Zone Research*, 38(4): 1048-1057 (张玉欣, 韩辉邦, 郭世钰, 田建兵, 唐文婷. 2021. 祁连山南麓夏季不同降水云系雨滴谱特征及其 Z-R 关系. 干旱区研究, 38(4): 1048-1057) [DOI: 10.13866/j.azr.2021.04.16]
- Zhao K, Huang H, Wang M J, Lee W C, Chen G, Wen L, Wen J, Zhang G F, Xue M, Yang Z W, Liu L P, Wu C, Hu Z Q and Chen S. 2019. Recent progress in dual-polarization radar research and applications in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(9): 961-974 [DOI: 10.1007/s00376-019-9057-2]
- Zhao R J, Yang H P and Guo Y T. 2005. Display and application of CINRAD product in MICAPS. *Meteorological Monthly*, 31(2): 31-34 (赵瑞金, 杨洪平, 郭亚田. 2005. 新一代天气雷达产品在 MICAPS 中的显示与调用. 气象, 31(2): 31-34) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0526.2005.02.007]
- Zhou H G. 2013. Data comparison software system for new generation Doppler weather radar network. *Journal of Computer Applications*, 33(1): 270-275 (周海光. 2013. 新一代多普勒天气雷达网探测数据对比分析系统. 计算机应用, 33(1): 270-275) [DOI: 10.3724.SP.j.1087.2013.00270]
- Zhuang W, Liu L P, Wang G L and Cui Z H. 2013. Radar-derived quantitative precipitation estimation in complex terrain area in Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 32(5): 1224-1235 (庄薇, 刘黎平, 王改利, 崔哲虎. 2013. 青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究. 高原气象, 32(5): 1224-1235) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00118]
- Zrnich D S, Melnikov V M, Doviak R J and Palmer R. 2015. Scanning strategy for the multifunction phased-array radar to satisfy aviation and meteorological needs. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(6): 1204-1208 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2388202]

Development of precipitation retrieval based on multimode radar remote sensing

DAI Qiang¹, LIU Chaonan¹, ZHANG Yaru¹, ZHU Jingxuan¹, ZHANG Lin²

1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023;

2. Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: Rainfall is a key link in the earth's water cycle and one of the most important inputs to hydrological and land surface models. Thus far, radar-based rainfall information has been widely used in global surface hydrology process simulation, disastrous weather forecast, flood control, and disaster relief because it provides data with a high spatial and temporal resolution that improves rainfall representation. In recent years, precipitation radar has gradually developed in a multiangle, multifrequency, dual-polarization, multiresolution, and multiantenna direction under different meteorological observation requirements and rainfall application scenarios. The radar observes rainfall in the air. Meteorological and hydrological research have different requirements for rainfall observation on the temporal and spatial scales. Thus, a series of conversion processes from radar rainfall observation in the air to the land surface generates considerable uncertainties. Thus, the accuracy of radar precipitation must be improved by systematic deviation corrections and data processing.

In this study, a comprehensive review of the process of radar rainfall inversion aims to provide a general picture of the current state of multimode radar technology. First, the development characteristics of multimode radar remote sensing technology were summarized. Afterward, the basic process of converting aerial rainfall observed by radar to the surface of the land surface was sorted out. Furthermore, we reviewed and summarized the major progress and methods of precipitation radar rainfall inversion. The upscaling and downscaling applications in hydrological and land surface models were compared in the literature review. Then, we analyzed the factors causing the air-land surface rainfall deviation in the radar, such as raindrop evaporation, drift, and fragmentation. The calculation method of raindrop evolution deviation was also summarized. Moreover, we summarized the current methods for correcting radar rainfall based on ground-based reference rainfall, such as the rainfall observed by rain gauges. Finally, on the basis of this review, we discussed the existing major challenges and prospects in multimode radar precipitation, including developing multiscale inversion of surface rainfall, multimodel surface rainfall data fusion, surface rainfall inversion considering microphysical deviation of raindrops, and multimode radar data mining based on machine learning.

Key words: weather radar, radar precipitation estimation, radar remote sensing, multi-mode, urban waterlogging

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871299)