

文章编号: 2096-1618(2024)01-0061-11

深圳 X 波段双偏振相控阵雷达降水估测算法效果评估

余本超^{1,2}, 郑佳锋¹, 张 扬², 刘黎平²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 四川 成都 610225 ;2. 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:为验证 X 波段双偏振相控阵雷达的降水估测能力,利用 2020 年深圳市 X 波段双偏振相控阵雷达探测资料和广州市 S 波段双偏振雷达探测资料,建立基于双偏振雷达参量强弱(即 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP})的本地化混合降水反演方法,对不同降水使用最优的雷达参量进行定量降水估测,统计广东龙门县 2016 年雨滴谱观测资料,得到降水估测公式中的系数,分析不同时间、空间和降水强度下降水个例,利用本地化降水反演方法产生的定量降水估计结果与雨量计观测资料对比。结果表明,高时空分辨率的 X 波段相控阵雷达可以提高降水估测精度。X 波段相控阵雷达在高时间分辨率下,其估测降水强度变化趋势和自动站观测的降水强度变化趋势一致,并且对降水强度小于 40 mm/h 的降水估测较为准确。在最大观测范围内,X 波段相控阵雷达能观测到低层的气象信息,其降水估测的评估结果优于 S 波段雷达。X 波段相控阵雷达对暴雨以下的降水估测更加准确,对暴雨以上的降水估测结果误差较大,可信度不高。

关键词:X 波段相控阵雷达;S 波段双偏振雷达;定量降水估测

中图分类号:P463.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.01.011

0 引言

在中国与降水相关的灾害占较高比例,因此在灾害预警上降水也越来越引起大家重视^[1]。现代洪水和暴雨预警系统以及水资源的有效管理要求改进定量降水估测的时间尺度和空间尺度,对降雨产品的分辨率要求越来越高。然而基于 S 波段双偏振雷达估测的降雨量具有精细度不够等问题^[2],已经不能满足目前城市对定量降水估测的时间尺度和空间尺度要求。X 波段双偏相控阵雷达不仅能够提供更高的时间分辨率和空间分辨率,而且在中小降水过程中,能够弥补 S 波段双偏振雷达的差分相位对降水敏感性较低等缺点,在雷达定量降水估测方面具有较大的优势^[3]。因此如何实现 X 波段双偏振相控阵雷达业务降水估测是重点研究的问题。

早期人们对单偏振天气雷达定量降水估测方法主要集中在概率配对法、变分校准法、卡尔曼滤波校准法和 Z-R 关系法,这些单偏振雷达估测降水有严重的定量限制^[4]。近些年随着双偏振多普勒天气雷达技术的成熟,双偏振天气雷达能够对雨滴进行形状、大小、方向等数据的测定,在降水过程中对估测降雨强度、降雨范围和累计降雨量具有重要的作用,也大大提高了定量估测降水精度^[5]。S 波段双偏振雷达不仅可以测量雷达回波反射率因子 Z_H 、差分反射率因子 Z_{DR} 、差

分相移率 K_{DP} 、差分相位 φ_{DP} 和退极化比 LDR,还能提供有关水凝物形状和相态等信息。在过去 20 年里有关 S 波段双偏振雷达定量估测降水方法主要来源于 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 的不同组合^[6]和雷达联合雨量计估测降水分布。20 世纪 80~90 年代国外学者做了很多有关 S 波段双偏振雷达定量降水估测的研究,Bringi 等^[7]使用了 Z_H 和 Z_{DR} 组合估测降水,也是最早提出和使用 Z_{DR} 参量估测降水的,研究发现 Z_H 和 Z_{DR} 的组合估测降水相较于 Z_H 能有效降低降水估测的误差;Illingworth 等^[8]分析发现利用 ZDR 估测降水能提高弱降水的估测能力;Seliga 等^[9]研究发现在降水过程中, K_{DP} 不受混合相态的影响,在降水强度较大时具有较好的降水估测能力。中国对 S 波段双偏振雷达降水估测研究属于起步晚发展快,刘黎平等^[10]指出在降水估测算法中 $R(Z_H, Z_{DR})$ 的估测效果比 $R(Z_H)$ 要好;王建林等^[11]研究发现,当 Z_H 小于 20 dBz 时使用 $R(Z_H)$ 估测降水更好,且在小雨阶段由于 K_{DP} 容易受到噪声影响,其时空变化较大,降水估测易产生较大的误差;楚荣忠等^[12]发现 Z_H 对雨滴谱的变化十分敏感, K_{DP} 其低敏感性使得 $R(Z_{DR}, K_{DP})$ 的降水估测最为准确。雷达联合雨量计估测降水是以自动站精确测量降雨量为提前,同时在空间和时间上提取校准场,从而进行定量估测降水,这些研究对中国双偏振天气雷达定量降水估测算法有着极强的指导作用。

基于传统的 S 波段双偏振雷达定量降水估测方法虽然估测相对准确,但时间分辨率较低,很难精确估测局部降水大小,也不能随着雨强的不同作出自适应的

收稿日期:2023-02-18

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1507401);国家自然科学基金资助项目(U2142210)

变化。针对这些实际问题,X 波段相控阵雷达具有高时间分辨率和空间分辨率,并且其仰角的分辨率较低,因此对于尺度较小的降水过程较 S 波段降水过程有一个更加明显的变化。采用 X 波段相控阵雷达估测降水算法本质和 S 波段一样,目前降水估测算法主要有 4 种:JPOLE 算法、CSU-HIDRO 算法、DROPS 算法和基于衰减率(A_H)的算法。JPOLE 是一套综合降水估测算法,避开在不同降水强度下雷达参量较差的参量,在不同的降水强度下使用不同的雷达参量来估测降水,从而获得较好的降水估测结果^[13-15]。CSU-HIDRO 算法主要是采用 HCS-R(hydrometeor classification system for rainfall estimation)系统进行降水粒子的相态识别,再根据 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 的阈值来进行降水估测^[16]。DROPS 算法是基于不同降水粒子相态的降水估测算法^[17-19],由于其低效率和复杂的相态识别算法,并不适合在业务上广泛使用。衰减率估测不同降水,主要是根据 A_H - R 的对应关系来反演降水^[20],由于 A_H 不受雷达部分波速遮挡和雷达校准等影响,因此在降水估测方面具有较大的优势。

本文在前人研究的基础上,利用 X 波段双偏振相控阵雷达资料对 2020 年深圳地区的降水进行估测,建立适合 X 波段相控阵雷达降水估测算法,并利用雨滴谱和 S 波段双偏振雷达降水估测来验证其算法的可靠性,讨论 X 波段双偏振相控阵雷达在时间、空间和降水量大小上的估测优势,为 X 波段双偏振相控阵雷达在降水估测中的应用提供借鉴经验。

1 设备及资料简介

研究使用的数据包括深圳市求雨坛 X 波段双偏振

相控阵雷达(下简称 X-PAR)基数据、广州市 S 波段双偏振雷达(下简称 S-POL)基数据、广东龙门县的一台雨滴谱仪 1 min 观测数据和华南地区国家级和区域级雨量计降水量观测数据。设备在广东省的分布见图 1。

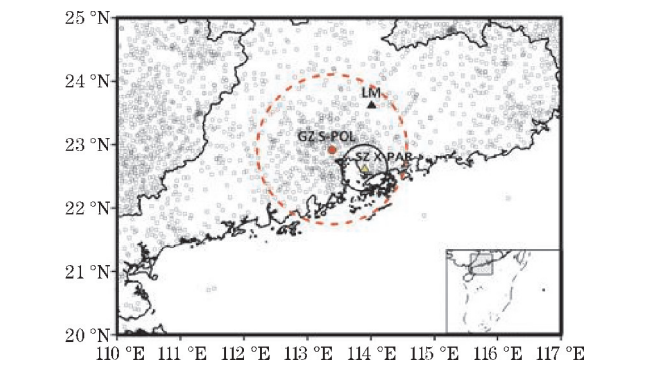


图 1 深圳 X-PAR(黄色三角形)和广东 S-POL(红色圆形),龙门雨滴谱仪(黑色三角形),广东省雨量计自动站(灰色圆圈)的分布情况(右下角灰色矩形为图示区域在华南地区的范围)

X-PAR 位于深圳求雨坛(113.8°E,22.6°N),由珠海纳睿达雷达公司研发,雷达峰值功率为 256 kW,最大探测距离为 42 km,最小距离分辨率为 30 m,最小时间分辨率为 92 s,阵面预仰角为 15°,在雷达软件内使用“ZPHI”降水廓线订正算法对 Z_H 、 Z_{DR} 进行衰减订正^[21]。S-POL 位于广州(113.6°E,23.0°N),是由广州新一代多普勒雷达(CINRAD/SA)双偏振升级改造而成,峰值功率 ≥ 650 kW,最大探测距离为 460 km,最小距离分辨率为 250 m,最小时间分辨率为 360 s,通常 S 波段雷达电磁波在探测过程中衰减较弱。胡明东等^[22]和陈超等^[23]对这部 S-POL 数据进行评估检验,评估结果表明雷达的反射率因子(Z_H)误差在 1 dB 以内,其观测资料可靠性高,没有明显的误差问题存在,数据可作为准确值使用。两部雷达主要技术参数见表 1。

表 1 深圳 X-PAR 和广州 S-POL 雷达参数

设备名称	工作频率/GHz	峰值功率/kW	观测用时/s	最大探测距离/km	最小距离分辨率/m	仰角扫描范围/(°)	波束宽度/(°)
X-PAR	9.4	256	92	42	30	0.9~20.7	3
S-POL	2.8	≥ 650	360	460	250	0.5~19.5	0.95

激光雨滴谱仪位于广东省惠州市龙门县(114.2°E,23.7°N),是德国 OTT 公司研制的第 2 代 parsivel 激光雨滴谱仪(下简称雨滴谱仪),是以光电技术为基础的雨滴谱测量传感器,采样面积为 54 cm²,采样时间分辨率为 60 s,雨滴直径 0.312~25 mm,下落速度为 0.25~20.8 m/s,可直接获取地面雨滴的下落速

度和等效粒子直径。Löffler-Mang 等^[24]对雨滴谱仪的测量精度进行评估检验,结果表明其对雨滴直径和降落速度的测量精度为 $\pm 5\%$,资料可信度高。本文使用的雨滴谱仪观测数据时间段为 2016 年 4 月 16 日~8 月 21 日。雨滴谱仪主要技术参数见表 2。

表 2 龙门县激光雨滴谱仪参数

设备名称	采样面积/cm ²	时间分辨率/min	粒子直径范围/mm	速度通道数	下落速度范围/(m/s)
激光雨滴谱仪	54	1	0.312~25	32	0.25~20.8

华南地区雨量计降水观测资料包括 1 h 和 1 min 的雨量观测数据,主要用于雷达定量降水估测算法性能评

估,由于 X-PAR 和 S-POL 覆盖范围不一致,为保证降雨样本的一致性和 X-PAR 雷达数据可靠性,本文选取距

离 X-PAR 3 ~40 km 的雨量子资料用于降水评估。

2 雷达降水估测反演方法

利用雷达参量估测降水的方法流程如图 2 所示。在使用雷达降水估测前,首先对雷达基数据进行预处理,对 S-POL 雷达数据(除 Z_H)进行必要的质量控制^[2],消除不必要的系统误差。

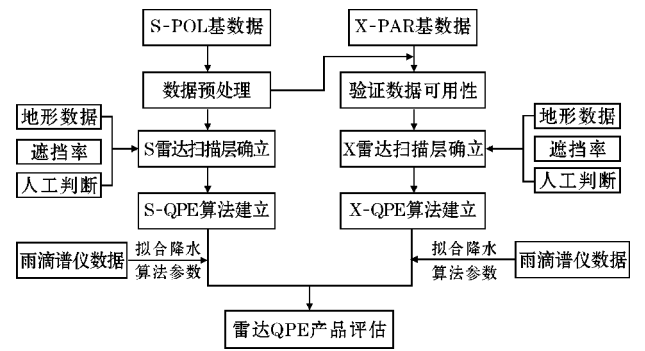


图2 双偏振雷达降水估测流程图

2.1 X-PAR 雷达参量可靠性验证

为验证 X-PAR 雷达参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 数据精度^[25],将 S-POL 数据资料作为对比准确值,首先匹配相同位置观测资料,对匹配后的 Z_H 、 Z_{DR} 等作对比分析,计算 X-PAR 与 S-POL 雷达参量的相关性。

基于不同方位角和仰角的雷达数据匹配方法(图 3),利用已知的 X-PAR 经度、纬度和高度方位信息($\lambda_x, \varphi_x, H_x$)与 X-PAR 探测的方位角、仰角和斜距极坐标信息(a_x, e_x, L_x),将每一个得到的数据点方位信息记为(λ, φ, H)。同样的 S-POL 的经度、纬度和高度方位信息($\lambda_s, \varphi_s, H_s$)与 S-POL 探测的方位角、仰角和斜距极坐标信息(a_s, e_s, L_s),最后 S-POL 每一个数据点都可以找到 X-PAR 观测该点时的极坐标信息,建立一一对应关系。

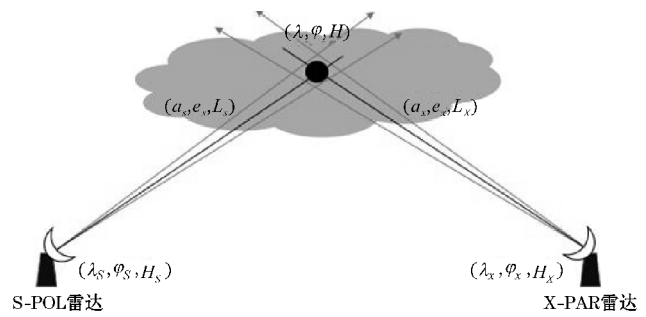


图3 基于不同仰角和方位角雷达数据空间匹配法示意图

为确保 X-PAR 雷达参量系统偏差统计过程中数据在降水估测应用时具有代表性和可信性,只统计零度层以下的数据点,确保雷达底层数据点不被高层数据点所影响。选取深圳 2020 年 8 月 5 日 00:00-04:00 X-PAR 雷达参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 与 S-POL 进行对比(图4)。统计结果显示,当 $Z_H > 10$ dBZ 时, X-PAR

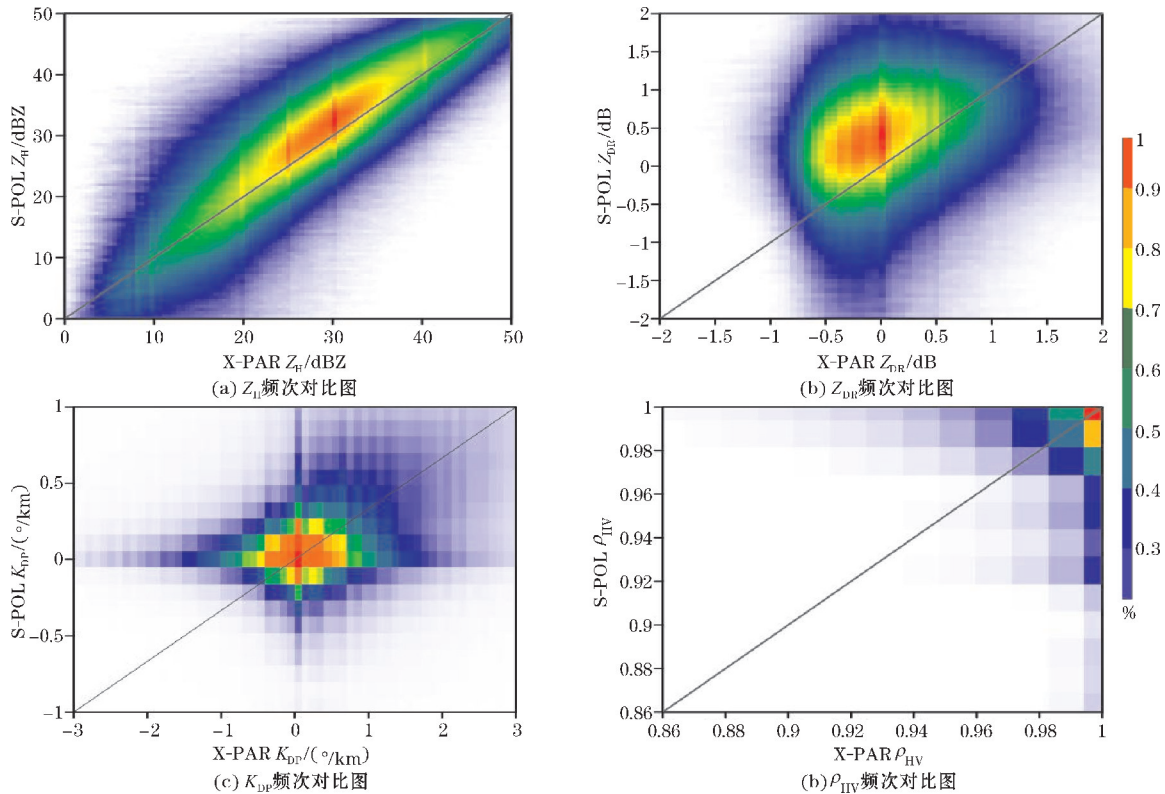


图4 2020 年 8 月 5 日 00:00-04:00 X-PAR 和 S-POL 的雷达参量的频次对比图

Z_H 弱于 S-POL 1 ~ 2 dBZ, 散点沿着 $y=x$ 两侧分布, 相关性较好, 当 $Z_H < 10$ dBZ 时, 散点主要集中于 $y=x$ 下方, 初步认为是 X-PAR 宽波速采样导致; 从 Z_{DR} 频散分布图来看, $Z_{DR} > 0$ dB 时, 散点集中分布在 $y=x$ 上方, X-PAR 的 Z_{DR} 弱于 S-POL, 且偏差较大, $Z_{DR} < 0$ dB 时, X-PAR 的 Z_{DR} 集中在 $-0.5 \sim 0$ dB 附近, 散点集中在 $y=x$ 下方, 线性关系较弱, X-PAR 的 Z_{DR} 系统偏差较大, 可信度不高, 准确度较低; 从 K_{DP} 和 ρ_{HV} 频散分布图来看, 散点较为均匀的分布在 $y=x$ 两侧, X-PAR 的 K_{DP} 弱于 S-POL 约 $0.01 \sim 0.03^\circ/\text{km}$, X-PAR 的 ρ_{HV} 统计结果与 S-POL 差别不大, 能满足降水估测的精度要求。

由零度层以下统计结果来看, 虽然 X-PAR 和 S-POL 的各种雷达参量都存在一定的系统偏差, 但是 X-PAR 的 Z_H 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 平均系统偏差小, 分别为 1 dBZ、 $0.025^\circ/\text{km}$ 和 0.03, 能够满足降水估测对 Z_H 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 要求的精度变化, 但 X-PAR 的 Z_{DR} 精度差, 0 dB 以上的数据统计平均系统偏差已经超过了 1 dB, 误差较大, 在后面 X-PAR 降水估测算法建立中, 本文考虑对 X-PAR 的 Z_{DR} 雷达参量剔除, 以此保证 X-PAR 降水估测的准确性。

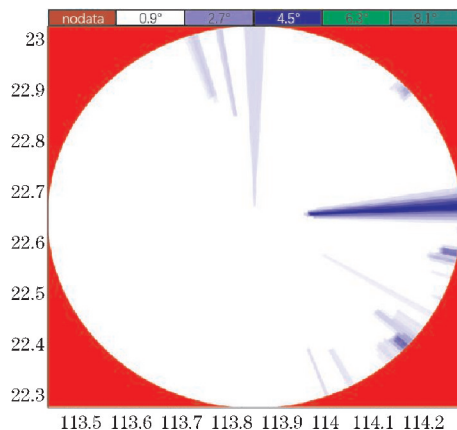
2.2 双偏振雷达降水估测层的选取

由雷达探测的基本原理可知, 雷达与探测目标物越接近, 其探测信息准确度越高。雷达定量降水估测是针对地面降水情况, 因此降水估测中使用离地面最近的仰角获取的降水估量最为准确, 但雷达在探测过程会受到建筑物、地形等阻挡导致最低仰角层部分距离信号缺失。因此不能仅使用雷达最低仰角进行降水估测, 需要采用复合仰角信息, 即雷达观测信息不被遮挡的各个方位角上的最低仰角。

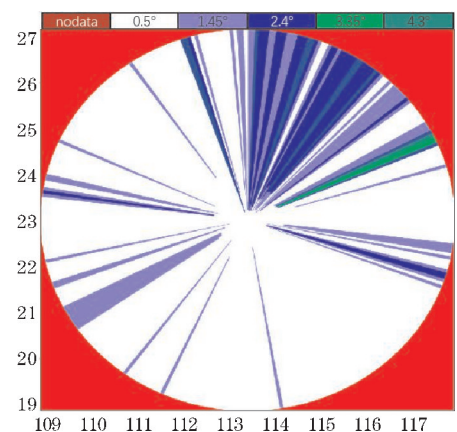
对于各方位角上复合仰角的选取, 首先对地形数据极坐标网格化, 让其与雷达的扫描方式匹配, 在不同的方位角上, 计算雷达在不同的探测距离上波束底部和顶部的高度, 与相对应的地面海拔高度进行比较。如果雷达波束底部低于地面海拔高度, 为完全遮挡; 如果雷达波束底部超过地面海拔高度, 则为无遮挡; 其他情况为部分遮挡。然后计算各方位上仰角的遮挡率, 由于雷达波束能量在垂直方向上满足一维高斯分布, 因此可以计算由垂直方向上波束受地物遮挡的高度以及波束的横截半径计算被地物遮挡的电磁波能量占总能量的百分比, 即遮挡率。计算出每个探测距离上的遮挡率与前一个探测距离上的遮挡率相比, 取两者中较大值作为该探测距离上的遮挡率。重复在每个仰角上计算, 得到不同方位角上雷达不同探测距离各仰角的遮挡率, 选取遮挡率低于 50% 的最低仰角作为复合平面扫描仰角。最后, 在城市中雷达还会受到高大的

建筑物等遮挡, 而且无法在地形数据上体现, 因此对雷达的复合平面仰角扫描还需人为观测判定进行人为修正和调整。

经过处理前后的 X-PAR 和 S-POL 的复合平面扫描仰角信息如图 5 所示。可知, X-PAR 遮挡较少, 主要使用第一层和第二层仰角观测信息。S-POL 在东北方向受遮挡较多, 需要使用到第三层和第四层仰角观测信息, 其他方位角上受遮挡一般, 主要使用第一层和第二层仰角观测信息。



(a) X-PAR



(b) S-POL

图5 X-PAR 和 S-POL 雷达复合扫描仰角层

2.3 双偏振雷达降水估测算法建立及算法参数确立

一般来说利用雷达参量估测降水公式有 5 种:

$$R(Z_H) = a_1 Z_H^{b_1}$$

$$R(K_{DP}) = a_2 K_{DP}^{b_2}$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = a_3 Z_H^{b_3} Z_{DR}^{c_3}$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = a_4 K_{DP}^{b_4} Z_{DR}^{c_4}$$

$$R(K_{DP}, Z_H) = a_5 K_{DP}^{b_5} Z_H^{c_5}$$

其中 a 、 b 和 c 分别表示不同系数, 式中 R 的单位是 mm/h , Z_H 的单位是 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, K_{DP} 单位是 $^\circ/\text{km}$, Z_{DR} 的单位是 dB, 即 Z_H 和 Z_{DR} 分别是反射率因子 Z_H 和差分

反射率因子 Z_{DR} 的指数形式, $Z_H = 10^{0.1Z_H}$, $Z_{DR} = 10^{0.1Z_{DR}}$ 。

由于 X-PAR 的衰减问题 Z_{DR} 可靠性不高,在 X-PAR 雷达 QPE 算法中考虑对的 Z_{DR} 剔除。本文 X-PAR 雷达 QPE 算法参考 Diederich^[24] 的算法,为使得 X-PAR 雷达降水估测适应本地化降水情况,加入对含冰雹等混合态降水的识别处理,利用 X-PAR 雷达参量 Z_H 、 K_{DP} 进行降水估测,算法结构如图 6 所示。

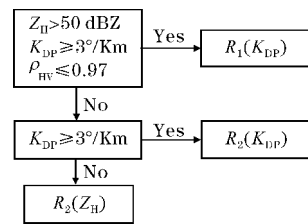


图 6 X-PAR 降水估测算法结构图

S-POL 雷达 QPE 算法的建立参考张扬^[2] 广州 S-POL 波段算法,算法流程图如图 7 所示。

采用 $Z_H > 50$ dBZ、 $K_{DP} \geq 1^\circ/\text{km}$ 和 $\rho_{HV} \leq 0.97$ 的条件判断是否有冰雹等固态降水区存在,因为降水过程中当霰或者冰雹等固态降水粒子出现时,使得 Z_H 和 Z_{DR} 会出现较大误差,因此不能用来估测冰雹等固态降水区,但冰雹对 K_{DP} 的影响较小,所以采用 K_{DP} 来估测含有冰雹等固态降水区的降水。对于其他降水类型估测所需的雷达参量的选取参考 CSU-HIDRO 算法。

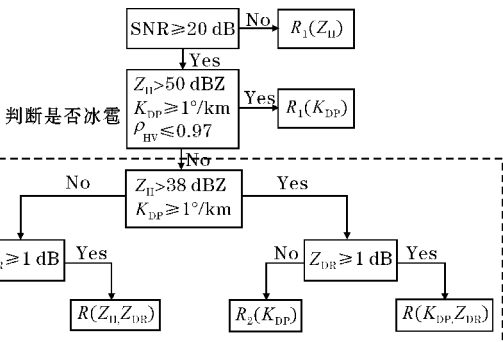


图 7 S-POL 降水估测算法结构图

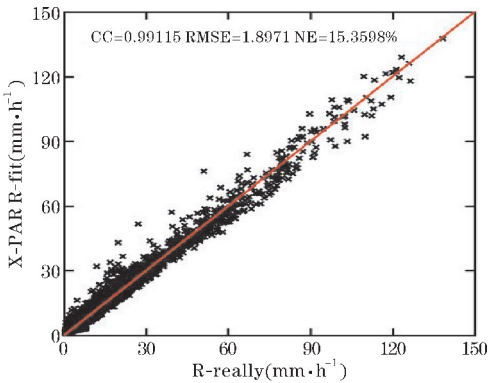
雷达降水公式系数是利用广东龙门县的雨滴谱数据根据分段拟合得到的,即根据 QPE 算法阈值,分别采用不同的雨滴谱数据样本拟合公式。X-PAR 雷达的 QPE 和 S-POL 雷达的 QPE 的降水估测系数值如表 3 所示。

把拟合得到的降水估测系数值分别代入 X 波段和 S 波段雷达降水估测算法中,利用雨滴谱仪观测的 1 min 等效 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 计算 1 h 降雨量,并与雨滴谱仪实际观测得到的 1 h 降雨量进行对比分析。图 8 是 X 波段和 S 波段雷达降水估测与雨滴谱仪观测等到的 1 h 降雨量评估散点图,可以看出 X 波段和 S 波段雷达的降水估测结果与雨滴谱观测雨量结果的相关性

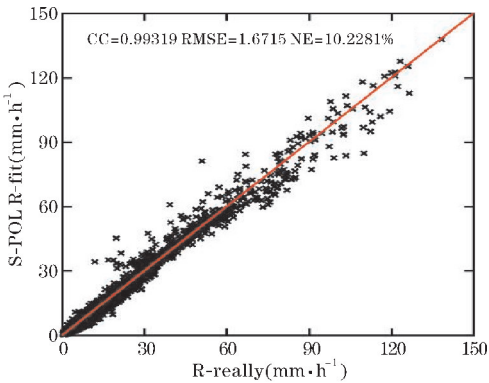
(CC) 都超过 0.99,均方根误差 (RMSE) 和规范化绝对误差 (NE) 都较小,这也表明 X 波段和 S 波段雷达 QPE 算法可靠性高。

表 3 利用雨滴谱数据拟合得到 X-PAR 和 S-POL 的雷达降水估测系数值

雷达	反演关系	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
S 波段	$R_1(Z_H)$	0.0082	0.749	—
	$R_2(Z_H)$	0.0154	0.7681	—
	$R_1(K_{DP})$	30.30	0.9298	—
	$R_2(K_{DP})$	34.56	0.9496	—
	$R(Z_H, Z_{DR})$	0.0084	0.9284	-0.4055
	$R(K_{DP}, Z_{DR})$	51.16	0.9311	-0.0852
X 波段	$R(Z_H)$	0.2152	0.3369	—
	$R_1(K_{DP})$	9.189	0.9683	—
	$R_2(K_{DP})$	11.6	0.89	—



(a) X-PAR



(b) S-POL

图 8 X 波段和 S 波段雷达降水估测与雨滴谱仪观测得到的 1 h 降雨量评估散点图

2.4 双偏振雷达降水估测性能评估

雷达参量计算得到的降水估测值需要对其准确性进行评估,需要雷达资料与地面单点雨量站测量值进行配对,由于雨滴在下落过程中会受到重力方向和风的垂直切变等影响,使得雷达资料探测值在垂直方向上分布不均,从而地面雨量站容易产生与正上方的雷达资料探测值不对应的情况。为消除上述情况对评估

结果的影响,选取自动站正上方的距离库和周围的 8 个距离库,总共 9 个距离库对应的雨量平均值作为雷达的估测值进行评估。由于雨量站观测的 0.1 mm 雨量数据较多,会对降水估测的平均值造成误差,因此对 1 h 降水量进行评估时,仅选取雨量站大于 0.2 mm 的观测雨量参与评估。评估指标包括相关系数(CC)、规范化相对误差(NB)、规范化绝对误差(NE)、均方根误差(RMSE)、雷达估测雨量与自动站雨量计观测雨量比率(Bias Ratio)和平均标准差(σ)。各个评估参量定义式如下:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}_i)(G_i - \bar{G}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}_i)^2 \sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G}_i)^2}}$$

$$NB = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%$$

$$NE = \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - G_i|}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - G_i)^2}{n}}$$

$$BiasRatio = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n G_i}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - G_i)^2}}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%$$

其中, n 为样本个数, R_i 表示雷达 1 h 累计估测雨量, G_i 表示自动站 1 h 累计观测雨量。CC 为线性关系指标,CC 越接近 1,说明降水估测和实际观测的降水量一致性越高;NB 表示降水的高低估,NB 大于零时表示高估,小于零时表示低估,越接近零降水估测的误差越小;NE、RMSE 和 σ 都是非负值,三者都是越接近零,说明误差越小,估测降水的离散度也越低,但 RMSE 受到降水强度大小的影响,NE 则不受影响;Bias Ratio 可以用于评估某一自动站的降水估测误差,其大于 1 时表示高估,小于 1 时表示低估,用于降水估测结果的平面分析。

3 雷达降水估测性能评估结果

3.1 X-PAR 雷达在不同时间分辨率下的降水估测优势

基于 X-PAR 和 S-POL 降水估测产品(以下简称

QPE 产品),该产品主要通过雷达数据,分别提供每 6 分钟和 92 秒更新一次的实时降雨量,基于雨量计的 QPE,该产品主要通过雨量计提供每 1 分钟更新一次的实时降雨量。

为检验利用降水估测算法得到的雷达 QPE 和雨量计观测得到的降雨量在不同时间分辨率下的一致性。选取 2020 年 9 月 15 日 3:00–6:00 深圳的降水个例作为研究,所选站点为地方站雨量计(站号:713502,图 9 黑色五角星),雨量计站点距离深圳 X-PAR 雷达 5 km,距离广州 S-POL 雷达 67.5 km。图中 GZ S-POL 和 SZ X-PAR 分别表示广州 S 波段双偏振雷达(23.01 °N,113.36 °E)和深圳 X 波段双偏振相控阵雷达(22.65 °N,113.85 °E),AWS 表示所选个例雨量计站点位置(22.65 °N,113.89 °E)。

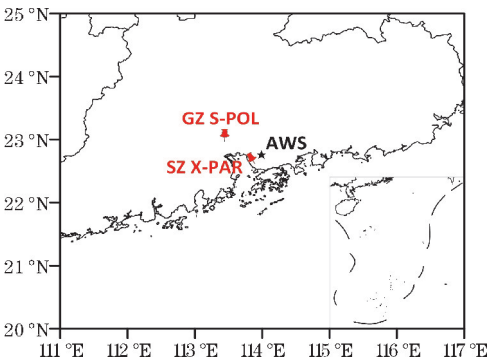


图 9 用于对比模拟效果的雨量自动站(黑色五角星)和雷达(红色标记)的分布图

图 10 是雨量计自动站、X-PAR 和 S-POL 在各自的最高时间分辨率下得到的降水强度图,以雨量计得到的降水强度作为真值,对根据 S 波段和 X 波段雷达数据计算的降水强度进行评估。S 波段雷达由于时间分辨率较低,无法反映降水强度的精细变化,甚至在 4:30–4:45 表现出与自动站相反情况。X 波段雷达的降水强度变化趋势与自动站比较一致,相比 S 波段雷达能更准确地反映降水的精细变化。但在降水强度大于 40 mm/h 时,X-PAR 的 QPE 产品出现明显低估,初步猜想是因为雷达不同波段衰减不同,从而使得雷达参量出现误差,导致这种情况的出现。

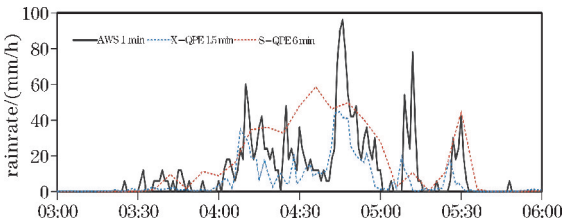


图 10 2020 年 9 月 15 日雨量计自动站 AWS、X-PAR、S-POL 在最高时间分辨率下的降水强度分布图

图 11 是雨量计自动站和两部雷达 QPE 产品在不

同时间分辨率的降水强度分布图。对比两部雷达 QPE 产品,X 波段雷达降水强度在时间分辨率高的时候降水强度变化趋势与自动站一致性较高,且在部分时间内出现降水强度吻合,随着时间分辨率的降低,X 波段雷达降水强度低估越明显,在时间分辨率为60 min时,X 波段雷达降水强度呈现完全低估。S 波段雷达降水强度变化趋势则与 X 波段雷达不同,随着时间分辨率的降低 S 波段雷达降水强度变化趋势与自动站越发一致,S 波

段雷达降水强度高估越明显,在时间分辨率为60 min 时,S 波段雷达降水强度呈现完全高估。

图 12、13 分别为 X-PAR 和 S-POL 在不同时间分辨率的估测累积降水量评估 RMSE 和 σ 结果。总体来说,X 波段雷达和 S 波段雷达的 QPE 产品都随着时间分辨率的降低,降水估测结果越差,呈指数变化,且 X 波段雷达的 QPE 产品不论在什么时间分辨率,其降水估测评估结果 RMSE 和 σ 都优于 S 波段雷达的 QPE 产品。

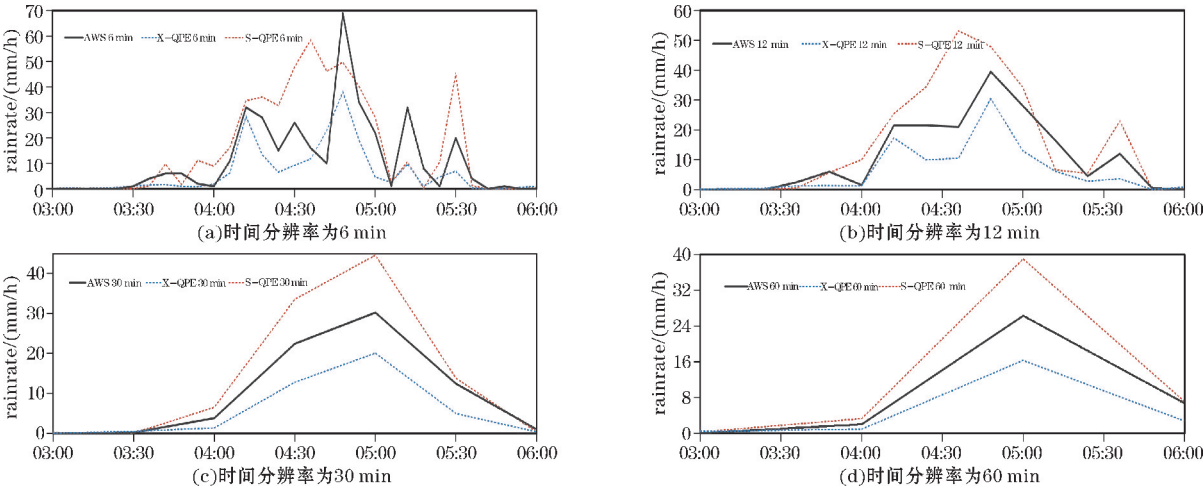


图 11 2020 年 9 月 15 日雨量计自动站 AWS、X-PAR、S-POL 在不同时间分辨率的降水强度分布图

度上选取 X 波段雷达探测数据低于 S 波段雷达探测数据(图 14),1 h 有效雨量站点个数为 ($\geq 0.2 \text{ mm}$) 1237 个,总降雨量为4126.8 mm。

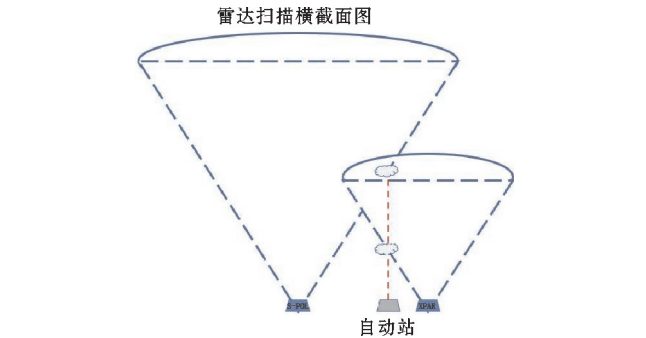


图 14 X 波段雷达和 S 波段雷达与雨量计自动站配对示意图

图 15 为 X 波段和 S 波段雷达降水估测1 h降水量的评估结果,结果表明 X 波段雷达和 S 波段雷达 QPE 产品 CC 表现都超过了0.9,与雨量站观测降雨量相关性较好;X 波段雷达 QPE 产品 RMSE 和 NE 比 S 波段雷达分别减少了0.73 mm和3.5%,表明 X 波段雷达 QPE 产品误差更小,并且 X 波段受降水强度影响更小;NB 和 Ratio 来看,X 波段雷达 QPE 产品的降水估测低估率小于 S 波段雷达; σ 的表现 X 波段雷达略低于 S 波段雷达。总的看来,在雷达最大探测范围内,X 波段雷达能够探测到离地更近的降水粒子信息,其降水估测产品也优于 S 波段雷达降水估测产品。

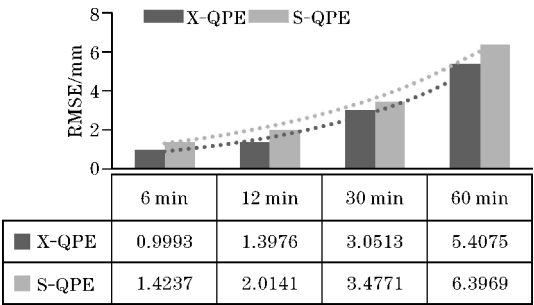


图 12 时间分辨率不同情况下的 X 波段雷达和 S 波段雷达的 QPE 产品 RMSE 评估结果

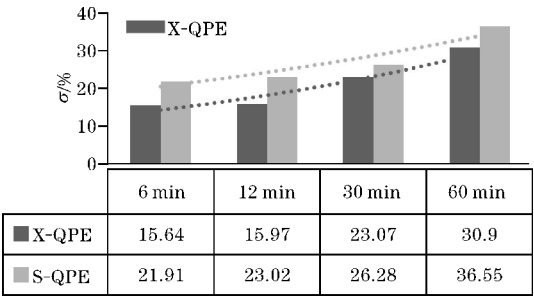


图 13 时间分辨率不同情况下的 X 波段雷达和 S 波段雷达的 QPE 产品 σ 评估结果

3.2 X-PAR 雷达低空观测的降水估测优势

为验证 X-PAR 雷达相较于 S-POL 雷达在最大距离探测范围内,能够获得更底层的降水信息。选取深圳 2020 年 6 月 6 日和 8 月 5 日的降水数据,降水类型包含层积混合云降水、飑线降水和对流云降水,垂直高

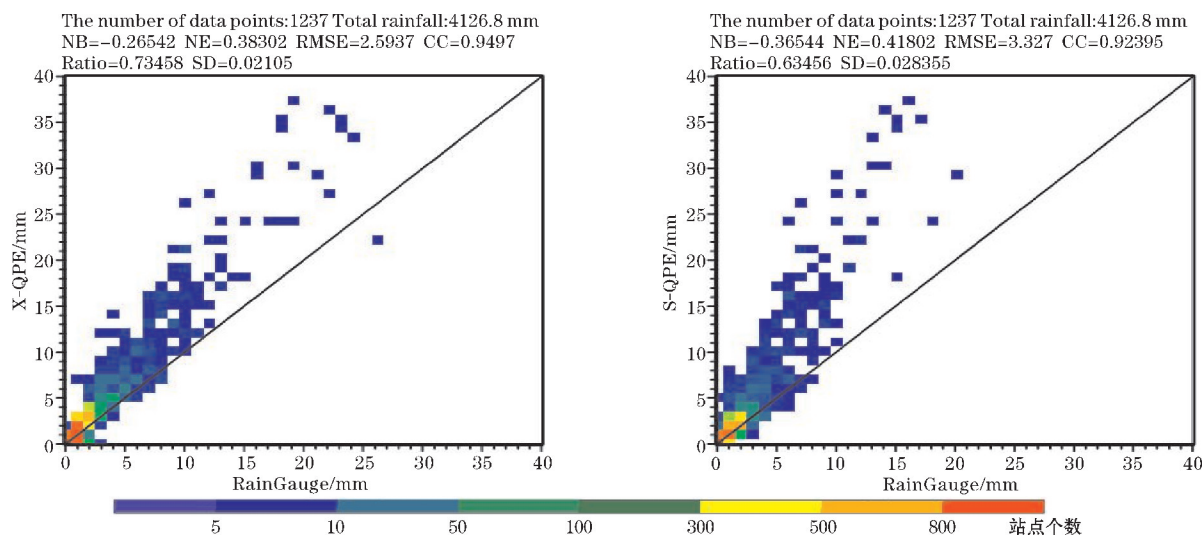


图 15 深圳市 2020 年 6 月 6 日和 8 月 5 日 X 波段和 S 波段 1 h 降水估测雨量和雨量计自动站 1 h 雨量评估频散图

为进一步分析 X-PAR 雷达低空观测的优势,将降水估测的时间分辨率提升至6 min,选取上面总站点中的一个雨量计站点进行分析,深圳市 2020 年 6 月 6 日 22:00-23:00 的一次对流云降水过程,所选站点距离 X 波段雷达中心大约36 km,距离 S 波段雷达中心大约 98 km,在1 h内该雨量计站点总降水量达37 mm。图 16 为此次降水过程中,所选雨量计站点和雷达的每 6 min降雨量随时间的变化图,降水强度最大过程在 22:24-22:35,10 min 累计降雨量超过20 mm,降水类型属于暴雨范畴。表 4 列出了本次降水过程的 S 波段雷达 QPE 产品和 X 波段雷达 QPE 产品评估结果,与 S 波段雷达 QPE 产品相比,X 波段雷达的降水估测算法得到的 QPE 产品结果 RMSE 和 NE 都明显减小,X 波段雷达 QPE 产品相关系数 CC 比 S 波段雷达 QPE 产品相关系数更加接近 1,说明 X 波段雷达的降水估测雨量和雨量计站点测得降雨量更加接近线性关系。总之,X 波段雷达比 S 波段雷达估测降水结果更加精确,这反映了在一定情况下 X 波段双偏振相控阵雷达在降水估测方面比 S 波段双偏振雷达更具优势。

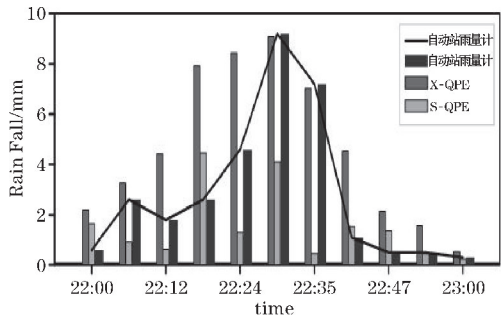


图 16 2020 年 6 月 6 日 X 波段和 S 波段 6 min 降水估测雨量和雨量计自动站 6 min 雨量随时间的变化图

表 4 2020 年 6 月 6 日 X 波段和 S 波段 6 min 降水估测雨量和雨量计自动站 6 min 雨量的评估结果

Radar	CC	RMSE/mm	NB	NE
X-QPE	0.8759	1.2474	0.7781	0.8749
S-QPE	0.5274	1.4999	-0.2292	0.9908

3.3 X-PAR 雷达综合降水估测优势

选取 2020 年 4-9 月深圳降水期间观测到的 7 次降水过程,见表 5,这些降水个例包含了对流云降水、层积混合云降水和飢线,总有效雨量计站点数目为 3106 个,总降水量14840.6 mm,小时最大降雨量为86.7 mm。

表 5 深圳地区 2020 年 4-9 月 7 次降水过程列表

序号	时间	有效自动站点数目	自动站总雨量/mm	自动站最大雨量/mm	降水类型
1	2020.4.22	284	872.6	15.3	层积混合云降水
2	2020.5.11	269	1012.95	32.6	对流云降水
3	2020.6.5	248	393.56	46.3	层积混合云降水
4	2020.6.6	786	464.03	30.4	层积混合云降水
5	2020.8.5	867	785.6	69.9	飢线降水
6	2020.9.12	325	350.07	70.7	对流云降水
7	2020.9.15	327	411	86.7	飢线降水

图 17 为 7 次降水案例 1 h 估测降水评估结果,总评估来看,图 17(a)X 波段雷达和 S 波段雷达 CC 和 RMSE

波段趋势一致,就 NB 和 NE 来看,X 波段雷达 NE 在 30.289% ~ 47.087% 变化,NB 在-19.519% ~ -43.841%

变化,表现均优于 S 波段雷达,说明 X-QPE 的准确度更佳,系统偏差更小。图 17(b)降雨量<16 mm时,X 波段雷达 CC 和 RMSE 更加接近于 1 和 0,且 NB 最高为-5.5%,X-QPE 此时表现出超高的稳定性和准确性,NE 对不同类降水估测波动变化较小,表现出 X

波段雷达降水估测算法稳定性相比于 S 波段雷达更高。图 17(c)降雨量≥16 mm时,X 雷达 CC 和 RMSE 波动幅度较大,甚至还出现负相关性,说明其稳定性和准确性表现不佳,此时 S-QPE 表现优于 X-QPE。

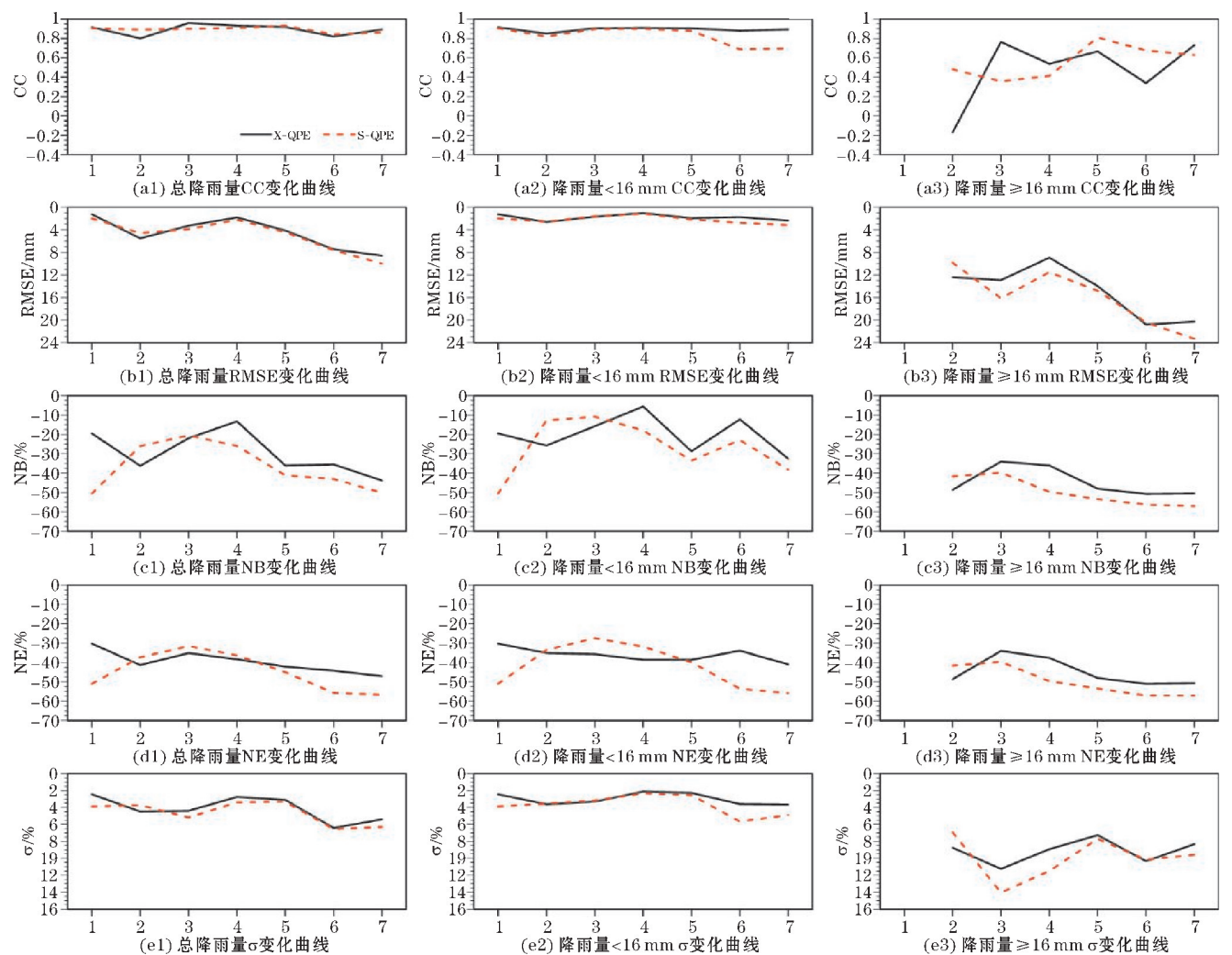


图 17 深圳地区 2020 年 4-9 月 7 次降水案例 1 h 降雨估测评估结果

表 6 和表 7 分别为 X-PAR 和 S-POL 7 次降水过程的综合评估结果,7 次降水估测总的评估结果表明:X 波段雷达 NB 和 NE 分别为 29.49% 和 39.82%,而 S 波段雷达 NB 和 NE 分别为-36.79% 和 44.80%,CC 和 RMSE 两部雷达相差不大,X 波段的降水估测算法优于 S 波段雷达。对于小时雨量小于 16 mm 的降水进行评估,X 波段雷达 NB 和 NE 分别降低了 5.69% 和 6.69%,且对于 CC 和 RMSE 来说,X 波段雷达均优于 S 波段雷达,此时 X 波段雷达降水估测的准确性大,可信度高。对于小时雨量大于 16 mm 的降水进行评估,即暴雨阶段,X 波段雷达相关系数 CC 仅为 0.48,算法误差较大,可信度不高。

表 6 深圳地区 2020 年 4-9 月 X-PAR 7 次降水过程 1 h 降雨估测综合评估结果				
X 波段小时降雨量	CC	RMSE/mm	NE/%	NB/%
总	0.89	4.58	39.82	29.49
<16 mm	0.90	1.82	36.19	-20.01
≥16 mm	0.48	14.88	45.02	-44.67

表 7 深圳地区 2020 年 4-9 月 S-POL 7 次降水过程 1 h 降雨估测综合评估结果				
S 波段小时降雨量	CC	RMSE/mm	NE/%	NB/%
总	0.89	4.97	44.80	-36.79
<16 mm	0.82	2.21	41.88	-26.70
≥16 mm	0.56	16.01	49.79	-49.65

4 结论

建立了考虑冰雹影响的本地化双偏振雷达降水估测算法。通过统计对比相同位置处 X 波段和 S 波段雷达偏振参量,得到 X-PAR 雷达参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 数据精度及可信度,实验表明,对 X 波段双偏振相控阵雷达而言,降雨衰减问题造成 Z_{DR} 测值误差较大,相应的降雨估算结果会出现偏差,应消除较差的 Z_{DR} 对降水估测的影响;利用地形数据和雷达经纬度坐标等分析了两部雷达的遮挡情况,形成了雷达降水估测所需的复合平面扫描仰角;利用雨滴谱仪数据,统计得到了适用于深圳地区的 X 波段和 S 波段雷达降水反演参数,基于 2020 年深圳不同类型的天气过程,统计分析了本地化雷达降水估测评估结果,并与广州 S-POL 雷达降水估测结果进行对比分析,可以得到以下结论:

(1)通过分析不同时间分辨率,X 波段和 S 波段雷达的降水估测产品与雨量计真实雨量对比,在高时间分辨率下,X 波段雷达降水强度变化趋势与自动站一致性较高,降水估测产品更加准确,随着时间分辨率的降低,降水估测产品准确性下降。

(2)在最大观测范围内,X 波段相控阵雷达能观测到低层的气象信息,其降水估测的评估结果优于 S 波段雷达,X 波段雷达规范化相对误差和规范化绝对误差分别降低了 10% 和 3.5%,X 波段雷达均方根误差也比 S 波段雷达降低了 0.733 mm,相关系数 X 波段雷达为 0.9497 也优于 S 波段雷达 0.92395,因此 X 波段相控阵雷达低空观测的降水估测相较于 S 波段雷达更加准确。

(3)X 波段相控阵雷达综合降水估测总体优于 S 波段雷达,其对于降雨量小于 16 mm 的降水估测优势明显,与自动站雨量计相比表现出高相关性和低离散性,但 X 波段雷达对 16 mm 以上的降水估测结果误差较大,可信度不高,准确性低于 S 波段雷达。

参考文献:

- [1] 林琳. 近 30 年我国主要气象灾害影响特征分析 [D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [2] 张杨. 业务双偏振雷达网与自动站联合定量降水估测方法及效果分析研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院,2019.
- [3] 张哲,戚友存,朱自伟,等. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用 [J]. 气象学报,2021,79(5):786-803.
- [4] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学 [M]. 北京:气象出版社,262.
- [5] 马学谦,董万胜,楚荣忠,等. X 波段双偏振多普勒天气雷达降雨估算试验 [J]. 高原气象,2008,27(2):382-391.
- [6] 冀春晓,陈联寿,徐祥德,等. 多普勒雷达资料动态定量估测台风小时降水量的研究 [J]. 热带气象学报,2008(2):147-155.
- [7] Seliga T A, Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. Appl. Meteor, 1976, 15: 69-76.
- [8] Illingworth AJ, Thompson RJ. The estimation of moderate rain rates with operational polarization radar [C]. In Preprints 32nd Conference on Radar Meteorology, Albuquerque, NM, American Meteorological Society. 2005.
- [9] Seliga T A, Bringi V. N. Differential reflectivity and differential phase shift: Applications in radar meteorology [J]. Radio Science, 1978, 13(2): 271-275.
- [10] 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 [J]. 气象学报, 1996, 54(5): 590-599.
- [11] 王建林,刘黎平,曹俊武. 双线偏振多普勒雷达估算降水方法的比较研究 [J]. 气象, 2005, 31(8): 25-30.
- [12] 楚荣忠,王致君,刘黎平,等. 双线偏振雷达降雨估测分析 [J]. 气象学报, 1997(1): 104-110.
- [13] Gao YF, Chen YD, Gochis D, et al. Analysis of jpole algorithm with a dual polarization radar in different precipitation processes [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30: 361-366.
- [14] Noh SJ, Lim S, Choi SW, et al. Comparison of quantitative precipitation estimation algorithms using dual polarization radar measurements in Korea [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 14: 105-116.
- [15] Scharfenberg KA, Miller DJ, Schuur TJ, et al. The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Radar in Forecasting and Warning Decision Making [J]. Weather and Forecasting, 2005, 20(5): 775-788.
- [16] Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al. A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events [J].

- Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(3):352–364.
- [17] Chen H, Chandrasekar V, Bechini R. An Improved Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm (DROPS2.0): Application in NASA IFloodS Field Campaign[J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(4):917–937.
- [18] Petersen WA, Carey LD, Rutledge SA, et al. Mesoscale and Radar Observations of the Fort Collins Flash Flood of 28 July 1997[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(2):191–216.
- [19] Bringi VN, Liu L, Kennedy PC, et al. Dual multiparameter radar observations of intense convective storms: The 24 June 1992 case study[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1996, 59(1–2):3–31.
- [20] Ryzhkov A, Diederich M, Zhang P, et al. Potential Utilization of Specific Attenuation for Rainfall Estimation, Mitigation of Partial Beam Blockage, and Radar Networking[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(3):599–619.
- [21] Testud J, Oury S, Amayenc P. The Concept of “Normalized” Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Hydrometeor Remote Sensing[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2000, 25(10–12):897–902.
- [22] 胡东明, 张羽, 傅佩玲, 等. CINRAD/SA 雷达双偏振升级数据质量分析评估[J]. 气象科技, 2019(2):7.
- [23] 陈超, 胡志群, 胡胜, 等. CINRAD-SA 双偏振雷达资料在降水估测中的应用初探[J]. 气象, 2019(1):13.
- [24] Löffler-Mang M, & Joss J. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(2):130–139.
- [25] 张蔚然, 吴翀, 刘黎平, 等. 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[J]. 高原气象, 2021, 40(2):424–435.

Effect Evaluation on Radar Quantitative Precipitation Estimation using X-band Polarimetric Radars in Shenzhen

YU Benchao^{1,2}, ZHENG Jiafeng¹, ZHANG Yang², LIU Liping²

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to verify the precipitation estimation ability of X-band dual-polarized phased array radar, using the X-band dual-polarized phased array radar detection data of Shenzhen in 2020 and the S-band dual-polarized radar detection data of Guangzhou in 2020, a localized hybrid precipitation retrieval method based on the strength of dual-polarized radar parameters (ZH, ZDR and KDP) is proposed, and the optimal radar parameters are used for quantitative precipitation estimation of different precipitation. Using the raindrop spectrum observation data of Longmen County, Guangdong in 2016, the coefficients in the precipitation estimation formula are statistically obtained. The precipitation cases under different time, space and precipitation intensity are analyzed, and the quantitative precipitation estimation results generated by the local precipitation inversion method are compared with the rainfall gauge observation data. The results show that the X-band phased array radar with high spatial and temporal resolution can improve the accuracy of precipitation estimation. At high time resolution, the change trend of precipitation intensity estimated by X-band phased array radar is consistent with that observed by automatic station, and the precipitation estimation with precipitation intensity less than 40 mm/h is more accurate. In observation range, the X-band phased array radar can observe the meteorological information in the lower layer, and its precipitation estimation results are better than the S-band radar. The X-band phased array radar is more accurate in estimating the precipitation below rainstorm, but it has a large error in estimating the precipitation above rainstorm so the reliability is not high.

Keywords: X-band phased array radar; S-band Dual polarization radar; quantitative precipitation estimation