荀爱萍,张伟,黄惠镕,等. 厦门市 S 波段双偏振雷达测雨效果分析[J]. 气象与环境科学,2019,42(4):103-110. Xun Aiping, Zhang Wei, Huang Huirong, et al. Analysis of Rainfall Measuring Errors of S-band Dual Polarization Weather Radar in Xiamen [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(4):103-110.

doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.04.015

厦门市 S 波段双偏振雷达测雨效果分析

荀爱萍^{1,2}、张 伟^{1,2}、黄惠镕^{1,2}、陈德花^{1,2}

(1. 海峡气象开放实验室, 福建 厦门 361012; 2. 厦门市气象台, 福建 厦门 361012)

摘 要: 选取 2016 年 7 月-2017年 12 月 16 次降水过程,利用厦门双偏振雷达的偏振参量资料及区域自动站 小时雨强资料,统计分析不同降水强度下的偏振参量的值分布,并且对5种测雨方程的测雨效果及误差进行分析, 主要得到以下结论:1)ZDR、Kdp 只与粒子形状、取向和相态有关,随着雨强的增大,雨滴粒子增大,ZbR、Kdn 总体 趋势均是不断增大的, ρ_{hv} 相差不大,基本在 0.9以上;2)测雨方程 $R(Z_h)$ 、 $R(Z_h,Z_{DR})$ 的估测降水对实况降水严重 低估,而方程 R(K_{dp},Z_{DR})会高估实況降水,方程 R(K_{dp})与 R(Z_h,K_{dp},Z_{DR})的估测降水与实况降水最为接近;3)方 程 R(Z_b)、R(Z_b,Z_{DR})对小/中雨量级的降水估测效果较好,方程 R(K_{do})、R(K_{do},Z_{DR})、R(Z_b,K_{do},Z_{DR})对小/中雨 量级及大雨量级的降水估测误差较大,而对暴雨以上量级降水的估测效果则有明显的改善,特别是方程 R(K_{in}); 4)从5种测雨方程的稳定性来看,在小/中雨量级的降水中测雨方程的稳定性均较差,而在大雨以上量级的降水中 稳定性明显改善,其中方程 R(Zh)、R(Zh,ZDR)更加稳定一些,但与其他3组方程相差不大。

关键词:双偏振雷达:偏振参量:测雨方程:误差分析 中图分类号: P412

文献标识码:A

文章编号:1673-7148(2019)04-0103-08

引 言

雷达资料已被广泛应用于短时临近预报及天气 过程分析中[1-4],其中定量估测降雨是其应用的重 要方向之一。国内外的专家从事了大量的雷达定量 估测降水研究工作^[5-8],采用适合的 Z-I 关系进行降 水率估计是雷达定量估测降水准确性的一个重要因 素,许多前人的工作都是围绕优化不同区域的 Z-I 关系来展开^[9-13]。双偏振多普勒天气雷达交替发射 和接受水平及垂直的极化脉冲,双通道的一致性对 其测量性能的优劣有至关重要的影响。魏洪峰[14] 介绍了双通道幅度及相位一致性的基本要求,并对 影响双通道一致性的因素和关键器件进行了研究和 分析。双偏振雷达能够提供更多的偏振参量,包括

差分反射率因子 Z_{DR} 、差分传播相移 Φ_{dp} 、差分传播 相移率 K_{dn} 、相关系数 ρ_{hv} 等。由于获得了有关降水 粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向等的信 息,双偏振雷达在定量降水估测方面比传统雷达具 有更大的优势^[15-16]。早在 1976 年 Seliga 等^[17]就提 出通过同时探测水平和垂直偏振雷达波的反射率因 子,可以提高降水估测的精度,并提出利用偏振参量 K_{dp} 和 Z_{DR} 联合探测降水强度的方法^[18]。Gorgucci 等[19-20]利用雨量计数据对双偏振雷达降水估测进 行检验发现其结果是可靠的,并用数值模拟发展了 不受雨滴谱影响的测雨方法, Petersen 等^[21]也通过 一次暴洪研究证实双偏振多普勒雷达有更好的估算 精度。国内有关定量降水估测除了对 X 波段及 C 波段双偏振雷达的研究之外^[22-23],多数集中在对 S

收稿日期:2018-04-19;修订日期:2019-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41705045);福建省自然科学基金项目(2016J01182);厦门市科学技术局科技惠民项目(3502Z20164083); 福建省气象局开放基金项目(2016K02);福建省气象局新录用研究生基层专项(2017G01)

作者简介: 荀爱萍(1990-), 女, 江苏兴化人, 工程师, 硕士, 从事短时临近天气预报和海洋灾害性天气研究. E-mail: 937101995@ qq. com 通讯作者:陈德花(1977-),女,福建南平人,高级工程师,硕士,从事天气预报和海洋灾害性天气研究. E-mail:497075676@qq. com

波段双偏振雷达的分析。刘黎平等^[24]评估了不同 雨强下双偏振雷达和单偏振雷达降水估测效果,发 现双偏振雷达测雨方程在小雨高估和大雨低估方面 有所改善。胡明宝等^[25]比较了南京 S 波段双偏振 雷达与 CINRAD-SA 雷达估测降雨量的效果,发现利 用双偏振雷达观测的 K_{dp} 数据计算的降雨量与雨量 计观测值最为接近。郑佳锋等^[26]利用北京 2011 年 12 次降雨过程的 C 波段双偏振雷达资料统计了不 同雨强下的偏振参量的值分布及重点对 4 种雷达测 雨方程的测雨效果和误差进行了分析,发现 $I-K_{dp} Z_{DR}$ 方程的估测效果最优,稳定性最好。

厦门地处福建南部沿海,暴雨是影响厦门的主 要灾害性天气之一,多次造成厦门大范围的城市积 涝,因此对厦门雷达定量降水估测的研究就显得尤 为重要,但是至今却少有涉及。Ryzhkov 等^①通过试 验总结出一组针对 WSR-88D 雷达测雨方程的公式, 测雨效果较好。厦门双偏振雷达于 2016 年 4 月安 装调试,在确保其可靠性与稳定性尤其是雷达双通 道的一致性的前提下,于6月开始业务运行。本文 对厦门市 2016 年7月-2017年 12 月 16 次降水过程 120个区域自动观测站数据及双偏振雷达在不同雨 强下的偏振参量的值分布进行统计,给出分类表格, 为在业务工作中对雨强大小的判断提供一定的参 考,并对5种测雨方程的效果进行对比分析,从而找 出不同雨强下最为合适的测雨方程,提高厦门双偏 振雷达估测降水的效果,为测雨方程参数的本地化 打下基础。

1 资料和方法

本文选取了 2016 年 7 月-2017 年 12 月厦门市

$$R(Z_{\rm h}, K_{\rm dp}, Z_{\rm DR}) = \begin{cases} R(Z_{\rm h})/(0.4+5.05(Z_{\rm DR}-1)^{1.17}) \\ R(K_{\rm dp})/(0.4+3.48(Z_{\rm DR}-1)^{1.72}) \\ R(K_{\rm dp}) \end{cases}$$

为了对以上 5 种测雨方程(公式1-5)的效果进行检验,利用雷达估测降水及自动站小时降水资料计算 平均误差 ME、相对误差 RE、均方根误差 RMSE、标 准差 STD、相关系数 ρ 等统计信息(公式6-10),式 中 R_i 代表雷达估测降水, R_{ave} 代表所有雷达估测降 水样本的平均值, G_i 代表自动站观测小时雨量, G_{ave} 代表所有实况小时雨强样本的平均值, n 为总的样 本数。平均误差、相对误差及均方根误差反映了雷

16次降水过程,每次降水时长1h,参照福建省业务 规定按照小时雨强的大小将其分为小/中雨(0.1~ 6.9 mm/h)、大雨(7.0~14.9 mm/h)及暴雨(>15 mm/h)。所用资料包括厦门市双偏振多普勒天气 雷达测量的偏振参量数据和区域自动站小时累计降 水量数据,偏振参量包括:雷达反射率因子 Z_b;差分 反射率因子 Z_{DB},它反映粒子的形状、可能取向及相 态;差分传播相移率 K_{du},它不依赖于雷达本身的系 统标定误差,也不受电磁波的衰减影响,对雨滴谱的 分布不敏感,只与粒子形状、取向和相态有关;相关 系数 ρ_{hv} 反映了回波水平偏振参量与垂直偏振参量 之间的相关程度。其中,最重要的偏振参量是 Z_{DR}。 为了保证定量降水估测的精度,Z_{DB}的估计误差必 须控制在 0.1~0.2 dB,小到中雨的估计误差必须控 制在 0.1 dB,大雨可以放宽到 0.2 dB^[27]。目前,绝 大多数双偏振雷达采用外界目标标定 Z_{DB}。主要方 法是在小雨的天气条件下,天线垂直指向天空且方 位旋转 360°,因为该方法假定雨滴是球形的,产生 的水平和垂直极化后向散射功率几乎相等,Z_{DB}值 应该为0dB,则此时的Z_{DR}测量值即为雷达硬件造 成的系统偏差。

Ryzhkov 等^①通过试验总结出的一组针对 WSR-88D 雷达测雨方程的公式分别为:

$$R(Z_{\rm h}) = 0.017 Z_{\rm h}^{0.714}$$
(1)

$$R(Z_{\rm h}, Z_{\rm DR}) = 0.0142 Z_{\rm h}^{0.77} Z_{\rm DR}^{-1.67}$$
(2)

$$R(K_{\rm dp}) = 45.3K_{\rm dp}^{0.786}$$
(3)

$$R(K_{\rm dp}, Z_{\rm DR}) = 136 K_{\rm dp}^{0.968} Z_{\rm DR}^{-2.86}$$
(4)

$$R(Z_{\rm h})$$
 < 6 mm/h

6 mm/h<
$$R(Z_{\rm h})$$
<50 mm/h (5)
 $R(Z_{\rm h})$ >50 mm/h

达估测降水与实况值之间的偏差,其中,平均误差会 出现样本正偏差和负偏差相抵消的现象,相对误差 则会消除这种现象,均方根误差能够很好地反映出 样本的精密度。标准差能衡量一组样本自身的离散 程度,可以用来评估测雨方程误差的稳定性,相关系 数的取值范围为-1~1,当其值为1(-1)时,表示雷 达估测值和自动站观测值完全正(负)相关,当其值 为0时,表示雷达估测值和自动站观测值没有相

①Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of the operational WSR-88D radar[C]//31st Conference on Radar Meteorology. Seattle. 1999:208-210.

关性。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (R_i - G_i)$$
 (6)

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |R_i - G_i|}{\sum_{i=1}^{n} G_i} \times 100\%$$
(7)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (R_i - G_i)^2}$$
(8)

STD =

反射率因子Z_/(mm⁶/m³

程差分传播相位常数K_a(°/km)

25 20 15

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{|R_{i} - G_{i}|}{G_{i}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{|R_{i} - G_{i}|}{G_{i}} \right)^{2}} \times 100\%$$
(9)

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n} (R_i - R_{ave}) (G_i - G_{ave})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (R_i - R_{ave})^2 \sum_{i=1}^{n} (G_i - G_{ave})^2}}$$
(10)

2 不同雨强下的偏振参量值分布

为了研究在不同的雨强下偏振参量的值分布, 统计2016年7月-2017年 12 月厦门市 16 次降水过

程。具体的统计方法是在小时雨量相应时段内,从 体扫数据中读取出区域自动站位置处反射率因子最 强时的偏振参量值。图1给出了不同的小时雨强下 的反射率因子 Z_b、差分反射率因子 Z_{DB}、程差分传播 相位常数 K_{dp} 及相关系数 ρ_{hv} 的值分布。由图 1 可 以看出,随着雨强的增大, $Z_{\rm h}$ 、 $Z_{\rm DB}$ 、 $K_{\rm dn}$ 、 $\rho_{\rm hv}$ 总体趋势 均是不断增大的。Z_{DR}是水平偏振反射率因子与垂 直偏振反射率因子之比,其值直接与粒子的形状有 关,小雨滴在下落的过程中接近球形,Z_{DR} 很小;大 雨滴在下落过程中偏向于扁椭球形,其中垂直方向 上为短轴,故Z_{DR}值较大。K_{dp}反映的是双程差分传 播相位变化值 ϕ_{d_0} 随距离的变化程度,与雨区长度 无关, \phi dp 是由于电磁波在非球形降水粒子区中传 播时,水平偏振与垂直偏振的传播常数不相同造成 的相位差,从小雨滴到大雨滴,粒子形状从球形转变 为扁椭球形, K_{dp} 逐渐增大。ρ_{hv} 是指相隔时段内先 后接收到的回波其水平偏振分量与垂直偏振分量之 间的相关程度,降水回波的 ρ_{hv} 通常都较大,而一些 情况下 $\rho_{\rm hv}$ 值变得较小,如扁旋转椭球或锥球状大 冰雹、尺度较小的外包水膜冰雹、雨滴与小冰雹共 存等。



图 1 不同自动站观测的小时雨强对应的 $Z_{h}(a) \ Z_{DR}(b) \ K_{dp}(c)$ 和 $\rho_{hv}(d)$ 的散点图

表 1 具体给出了不同降水类型中的平均 Z_h 、 Z_{DR} 、 K_{dp} 、 ρ_{hv} 。表 2 给出了偏振参量值的区间分布: 当降水类型为小/中雨时,平均 Z_h 为 36 dBZ,77.8% 的 Z_h 在 20~40 dBZ 区间;平均 Z_{DR} 为 1.0 dBZ, 86.0%的 Z_{DR} 在 0.0~1.5 dBZ 区间;平均 K_{dp} 为 0.28,88.6%的 K_{dp} 在 0.0~0.5°/km 区间。当降水 类型为大雨时,平均 Z_h 为 44 dBZ,90.3%的 Z_h 在 35~50 dBZ 区间;平均 Z_{DR} 为 1.4 dBZ,91.4%的 Z_{DR} 在 0.5~2.5 dBZ 区间;平均 K_{dp} 增大到 0.63, 89.5%的 K_{dp} 在 0.2~2.0°/km 区间。当降水类型达 到暴雨时,平均 Z_h 增大到 49 dBZ,98.9%的 Z_h 在 40~60 dBZ 区间;平均 Z_{DR} 增大到 1.7 dBZ,92.3% 的 *Z*_{DR} 在 1.0~4.0 dBZ 区间;平均 *K*_{dp} 突增到 1.32, 60.8%的 *K*_{dp} 在 1.0~4.0°/km 区间。总体来看,对 于 *Z*_h、*Z*_{DR}、*K*_{dp},雨强越大,雨滴粒子越大,其平均值 和大部分雨滴对应的区间范围也越大;对于 ρ_{hv} ,不同雨强相差不大,平均 ρ_{hv} 在 0.98 左右,区间也为 0.9~1.0。

表 1 三种降水类型(小/中雨、大雨、暴雨)分别对应的平均 $Z_h, Z_{DR}, K_{dp}, \rho_{hv}$

类型	小时雨强/(mm/h)	平均 $Z_{\rm h}/{ m dBZ}$	平均 Z _{DR} /dBZ	平均 K _{dp} /(°/km)	平均 $\rho_{\rm hv}$
小/中雨	0.1~6.9	36.328	1.008	0.278	0.978
大雨	7.0~14.9	43.987	1.357	0.633	0.981
暴雨	>15.0	48.524	1.707	1.320	0.978

表 2 三种降水类型(小/中雨、大雨、暴雨)分别对应的 $Z_h, Z_{DR}, K_{dp}, \rho_{hv}$ 范围

类型	小时雨强/(mm/h)	Z _h 范围/dBZ(%)	Z _{DR} 范围/dBZ(%)	$K_{\rm dp}$ 范围/(°/km)(%)	$ ho_{ m hv}$ 范围(%)
小/中雨	0.1~6.9	20~40(77.8)	0.0~1.5(86.0)	$0.0 \sim 0.5(88.6)$	0.90~1.00(97.9)
大雨	7.0~14.9	35~50(90.3)	0.5~2.5(91.4)	0.2~2.0(89.5)	0.92~1.00(98.8)
暴雨	>15.0	40~60(98.9)	1.0~4.0(92.3)	$1.0 \sim 4.0(60.8)$	0.94~1.00(97.2)

注:括号中数字 77.8 代表雨量为小/中雨时 Z_h 落在 20~40 区间的百分比,其他括号中数字以此类推

3 测雨方程雨强估测效果及误差分析

为了对比 Ryzhkov 等¹⁰总结的 5 种测雨方程(公式1-5)的测雨效果,对厦门地区 16 次降水过程 120 个区域自动站的小时累积降水量和对应时段的 5 种测雨方程的雷达估测降水进行统计分析。图 2 给出了 5 种测雨方程估测降水与自动站小时雨强对比散 点图。由图 2 可以看到,*R*(*Z*_h)与 *R*(*Z*_h,*Z*_{DR})测雨 方程的计算结果大部分样本都在对角线以下,且距 离对角线较远,说明测雨方程估测降水远远小于实况小时雨强,对实况降水严重低估。R(K_{dp},Z_{DR})测雨方程则是大部分样本点分布在对角线上方,表明对实况降水高估。只有 R(K_{dp})测雨方程样本点基本是均匀地分布在对角线两侧,表明估测降水与实况降水最为接近,R(Z_h,K_{dp},Z_{DR})测雨方程结果与 R(K_{dp})类似,但是不同的是存在部分样本估测降水远远小于实况降水的情况。



图 2 5种雷达测雨方程估测的小时雨强与实况小时雨强的对比散点图

为进一步分析 5 种测雨方程的误差特征,计算 其平均误差 ME、相对误差 RE、均方根误差 RMSE、 标准差 STD、相关系数 ρ 等统计信息(图 3)。由图 3 可以看到,方程 R(Z_h)、R(Z_h,Z_{DR})的平均误差均为 负数,雷达估测降水均低估实况降水,其他 3 组方程 则是对实况降水的高估;从相对误差及均方根误差 来看,方程 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 的误差明显偏大,方程 $R(K_{dp})$ 的误差最小。从测雨方程的稳定性来看,方 程 $R(Z_{h})$ 、 $R(Z_{h}, Z_{DR})$ 的标准差较小,稳定性最好, 另外 3 组方程的稳定性偏差一点。5 种方程的相关 系数相差不大。



标准差 STD(d)和相关系数 $\rho(e)$

为了研究 5 种测雨方程在不同降水量级下的测 雨效果,图4给出方程在三种不同雨强下的误差分 析。由图4可看出,方程 $R(Z_h)$ 、 $R(Z_h, Z_{DR})$ 对小/ 中雨量级的降水估测效果较好,平均误差接近于0, 相对误差在 60% 左右,均方根误差在 5 mm/h 左右; 对大雨量级的降水估测效果次之,平均误差及均方 根误差均稍微加大;对暴雨以上量级的降水估测效 果最差,平均误差达到-15 mm/h 左右,均方根误差 则是突增到 20 mm/h 以上。方程 $R(K_{dp})$ 、 $R(K_{dp})$, $Z_{\rm DR}$)、 $R(Z_{\rm h}, K_{\rm dp}, Z_{\rm DR})$ 对小/中雨量级及大雨量级的 降水误差较大,而对于暴雨以上量级降水的估测效 果则有明显的改善,特别是方程 R(K_{dn})在暴雨以上 量级的降水中估测效果很好,其平均误差为-0.91 mm/h,相对误差仅为 34.6%,均方根误差也较其他 方程明显下降,为15.82 mm/h。从5种测雨方程的 稳定性来看,在小/中雨量级的降水中测雨方程的稳 定性均较差,而在大雨以上量级的降水中稳定性明 显改善,其中方程 R(Z_h)、R(Z_h,Z_{DR})更加稳定一些,但与其他3组方程相差不大。分析测雨方程估测降水与实况降水的相关性来看,小/中雨量级降水的相关性最小,大雨量级降水的相关性有所增大,基本在0.2 左右,而暴雨以上量级降水的相关性则明显改善,基本在0.5 左右。

综合考虑误差效果及测雨方程稳定性,对小/中雨及大雨量级的降水使用方程 R(Z_h,Z_{DR}),在暴雨及以上量级的降水中使用方程 R(K_{dp})。为了检验 其误差,选择 2016 年 9 月 14 日19-20时的小时降水 过程来进行检验。图 5 给出了过程的实况降水量分 布(图 5a)、使用该方法的雷达估测降水量分布(图 5b)及实况降水与雷达估测降水的差值(图 5c)。由 图可以发现,雷达估测降水能够较好地模拟出实况 降水不同降水量级的分布特征,小时雨强达到 40 mm 及以上的地区主要在厦门西南部,而小/中雨 及大雨量级的降水主要集中在中东部。从图 5(c) 两者的差值来看,对于 40 mm 及以上的降水,雷达 对实况降水以低估为主,最大低估值达到 20 mm 以 上;而15-40 mm 的降水雷达对实况降水则是高估 与低估情况并存,15 mm 及以下的降水雷达估测与 实况最为接近。总体来看,实况降水与雷达估测降 水之间还是存在明显的误差,要真正分析雷达估测 降水误差,应该将其与封闭流域内洪水流量进行对 比,但由于资料获取限制,本文中实况降水采用的是 自动站雨量计数据,测量的是点雨量,而雷达估测降 水提供的是面雨量数据,点雨量资料和面雨量资料 是有误差的,这也是实况降水与雷达估测降水误差 明显的一个原因。



标准差 STD(d)和相关系数 $\rho(e)$





4 小 结

本文选取2016年7月-2017年12月厦门市16次 降水过程,利用厦门双偏振雷达的偏振参量资料及 区域自动站小时雨强资料,统计分析不同降水强度 下的偏振参量的值分布,并且对5种测雨方程的测雨 效果及误差进行分析,得到的主要结论如下:

(1) Z_{DR}、K_{dp} 只与粒子形状、取向和相态有关, 随着雨强的增大, Z_h、Z_{DR}、K_{dp} 总体趋势均是不断增 大的。暴雨以上量级的降水 Z_h范围为 40~60 dBZ, Z_{DR}范围为1.0~4.0 dBZ, K_{dp}范围大部分为1.0~
 4.0°/km, 不同强度的降水 ρ_{bv}差别不大。

(2) 测雨方程 $R(Z_h)$ 、 $R(Z_h, Z_{DR})$ 的估测降水 对实况降水严重低估,而方程 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 会高估实 况降水,方程 $R(K_{dp})$ 与 $R(Z_h, K_{dp}, Z_{DR})$ 的估测降水 与实况降水最为接近。

(3) 方程 $R(Z_h) \ R(Z_h, Z_{DR})$ 对小/中雨量级的 降水估测效果较好, 方程 $R(K_{dp}) \ R(K_{dp}, Z_{DR})$ 、 $R(Z_h, K_{dp}, Z_{DR})$ 对小/中雨量级及大雨量级的降水估 测误差较大, 而对于暴雨以上量级降水的估测效果 则有明显的改善, 特别是方程 $R(K_{dp})$ 。

(4) 从 5 种测雨方程的稳定性来看,在小/中雨 量级的降水中测雨方程的稳定性均较差,而在大雨 以上量级的降水中稳定性明显改善,其中方程 *R*(*Z*_h)、*R*(*Z*_h,*Z*_{DR})更加稳定一些,但与其他 3 组方 程相差不大。

综合考虑测雨效果及方程稳定性,对小/中雨及 大雨量级的降水使用方程 R(Z_h,Z_{DR}),在暴雨及以 上量级的降水中使用方程 R(K_{dp})。经检验,发现有 一定效果,但还有较大提升空间,这主要是因为公 式来源于美国 WSR-88D 雷达,一些参数适合美国 气候环境,并不一定适合厦门。接下去希望在本 文误差分析的基础上,重点对方程 R(Z_h,Z_{DR})及 R(K_{dp})的参数进行本地化配置,以提高双偏振雷 达的测雨效果。

参考文献

- [1]方标,张逸,严小冬.雷达资料在黔东北雷电预警中的应用研究[J].气象与环境科学,2017,40(3):139-143.
- [2]吴紫煜,姚雯,李超,等.京津冀地区中α尺度飑线过程中大风特 征分析及成因初探[J].气象与环境科学,2016,39(2):90-98.
- [3]张一平,孙景兰,牛淑贞,等.河南区域暴雨的若干雷达回波特征 [J].气象与环境科学,2015,38(3):25-36.
- [4]丁建芳,杜春丽,鲍向东,等.一次冰雹云过程及其冰雹形成机制的模拟研究[J].气象与环境科学,2014,37(2):49-57.
- [5]伍志方,戴铁丕,张培昌.天气雷达定量测量区域降水量的校准 技术及误差分析[J].气象,1991,17(10):9-14.
- [6]李建通,郭林,杨洪平.雷达-雨量计联合估测降水初值场形成方 法探讨[J].大气科学,2005,29(6):1010-1020.
- [7]陈秋萍,余建华,杨林增,等.闽中北前汛期多普勒雷达定量估测 降水分析[J]. 气象,2006,32(4):56-61.
- [8]赵培娟,张霞,吴蓁,等.7·13郑州大暴雨成因与可预报性分析

[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(4):1-7.

- [9]刘娟,徐胜,宋子忠,等.分组 Z-I 关系及其在淮河流域雷达测雨 中应用[J].气象科学,1999,19(2):213-220.
- [10] 郑媛媛,谢亦峰,吴林林,等.多普勒雷达定量估测降水的三种 方法比较试验[J].热带气象学报,2004,20(2):192-197.
- [11] 姚燕飞,程明虎,杨洪平,等.优化 Z-I 关系及其在淮河流域面雨 量测量中的应用[J]. 气象,2007,33(6):37-43.
- [12]王丽荣,裴宇杰,王立荣,等. 概率配对法在雷达定量估测降水 中的应用[J]. 气象与环境科学,2008,31(增刊):195-199.
- [13]谷秀杰,牛淑贞,介玉娥,等.2007年8月2日郑州大暴雨过程 分析[J].气象与环境科学,2010,33(2):53-58.
- [14]魏洪峰.双线偏振多普勒天气雷达的双通道一致性[J]. 气象科 技,2007,35(5):732-735.
- [15]张培昌. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 2001.
- [16]李忱,张越.偏振多普勒天气雷达原理和应用[M].北京:气象 出版社,2010.
- [17] Seliga T A, Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(15):69-76.
- [18] Seliga T A, Bringi V N. Differential reflectivity and differential phase shift: Applications in radar meteorology [J]. Radio Science, 1978, 13(2):271-275.
- [19] Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V. Error structure of radar rainfall measurement at C-band frequencies with dual polarization algorithm for attenuation correction [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101 (D21):26461-26472.
- [20] Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, et al. Rainfall estimation from polarimetric radar measurements: Composite algorithms immune to variability in raindrop shape size relation [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2001, 18(11):1773-1786.
- [21] Petersen W A, Carey L D, Rutledge S A, 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.
- [22]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.
- [23]张杰,田密,朱克云,等.双偏振雷达基本产品和回波分析[J]. 高原山地气象研究,2010,30(2):36-41.
- [24] 刘黎平, 王致君. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析[J]. 大气 科学, 1996, 20(5): 615-619.
- [25] 胡明宝,赵景志,夏文梅,等.双偏振多普勒天气雷达和 CINRAD-SA 对比分析[J]. 现代雷达,2012,34(1):5-8.
- [26]郑佳锋,张杰,朱克云,等.双偏振天气雷达测雨误差及水凝物 识别分析[J]. 气象科技,2014,42(3):364-372.
- [27] Ryzhkov A V, Giangrande S E, Melnikov V M, et al. Calibration issues of dual-polarization radar measurements [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2004, 22(8):1138-1155.

Analysis of Rainfall Measuring Errors of S-band Dual Polarization Weather Radar in Xiamen

Xun Aiping^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Huang Huirong^{1,2}, Chen Dehua^{1,2}

(1. Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012, China;

2. Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012, China)

Abstract: The Xiamen S-band dual polarization weather radar data and the hourly precipitation data from the regional automatic weather stations during 16 rainfall processes from July 2016 to November 2017 are used for the value distribution calculation of polarization parameters under different rainfall intensities and the analysis on effectiveness and errors of rainfall measuring by means of five radar rainfall estimation equations. The major conclusions are as follows: 1) $Z_{\rm DR}$ and $K_{\rm dp}$ are related to the shape, orientation and phase of raindrops. $Z_{\rm h}$, $Z_{\rm DR}$ and $K_{\rm dp}$ are in an increasing trend in general with the increase of rainfall intensity and raindrop size. $\rho_{\rm hy}$ is over 0.9 basically, no clear differences. 2) The estimated results of precipitation by the rainfall estimation equations $R(Z_{\rm h})$ and $R(Z_{\rm h}, Z_{\rm DR})$ are far below the observed precipitation. Conversely, the equation of $R(K_{dp}, Z_{DR})$ tends to overestimate the actual situation. Only the equations of $R(K_{dp})$ and $R(Z_{h}, K_{dp}, Z_{DR})$ perform better in the estimating calculation of rains. 3) The effects of equations $R(Z_h)$ and $R(Z_h, Z_{DR})$ are better in estimating light and moderate rains, while the equations $R(K_{dp})$, $R(K_{dp}, Z_{DR})$ and $R(Z_{h}, K_{dp}, Z_{DR})$ perform poorly in estimating light, moderate and heavy rains, but their estimation to precipitation above the magnitude of rainstorm is outstanding, especially the equation $R(K_{dp})$. 4) The stabilities of the five rainfall estimating equations are not so good for light and moderate rains, but get obviously improved for precipitation above the magnitude of heavy rain, of which the equations $R(Z_h)$ and $R(Z_h, Z_{DR})$ are more stable, with a little difference from the other three.

Key words: dual polarization weather radar; polarization parameter; rainfall estimating equation; error analysis