

汪舵, 刘黎平, 吴翀, 2017. 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J]. 气象, 43(9): 1041-1051.

## 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达 最优化定量降水估测方法研究<sup>\*</sup>

汪 舵<sup>1,2</sup> 刘黎平<sup>2</sup> 吴 翀<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 10008

**提 要:** 为了提高雷达定量降水估测的精度, 本文利用雨滴谱数据、实际雨量以及不同偏振参量建立起的降水估测公式, 参考 CSU-ICE 算法降水估测模型, 建立了一种基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优化定量降水估测算法 (简称 HCA-LIQ)。利用广东珠海 S 波段双线偏振雷达数据和华南密集的地面自动站网的雨量, 以两次华南夏季典型的降水过程为例, 对该最优化算法的估测效果进行了统计分析, 并进一步与 CSU-ICE 方法、传统的  $R(Z_H)$  方法进行了比较。结果表明: 以地面雨量为标准, HCA-LIQ 最优化算法表现出与雨量计较强的相关性且有着较好的稳定性。雷达相对地面雨量计小时雨量估测的偏差分布与离雷达的距离关系不大。按过程分类的结果显示, 强对流云降水时, 两种最优化算法要明显优于传统的  $R(Z_H)$  方法; 混合云降水时, 最优化算法的效果并不比  $R(Z_H)$  方法好; HCA-LIQ 最优化算法比 CSU-ICE 算法效果更佳。按雨强分类统计时发现, 与传统的  $R(Z_H)$  方法相比, HCA-LIQ 最优化算法对小雨的估测偏差降低了 23%, 对中雨的估测偏差相当, 对大雨、暴雨的估测偏差分别降低了 71%、68%。

**关键词:** 双线偏振雷达, 定量降水估测, 最优化, 测雨精度

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.002

## An Optimization Rainfall Algorithm of S-Band Dual-Polarization Radar Based on Hydrometeor Identification

WANG Duo<sup>1,2</sup> LIU Liping<sup>2</sup> WU Chong<sup>1,2</sup>

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

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

**Abstract:** To improve the radar quantitative precipitation estimation, an optimization rainfall algorithm of S-band dual-polarization radar, named HCA-LIQ, based on hydrometeor identification is developed by referring to the Colorado State University (CSU)-ICE algorithm in this study. The radar estimator  $R(Z_H)$ ,  $R(Z_H, Z_{DR})$ ,  $R(K_{DP})$  calculated from the raindrop size distribution data collected in South China are used in this algorithm. Both the data collected from the S-band dual-polarization radar in Zhuhai, Guangdong Province and a network of rain gauges are used to evaluate the performance of the new algorithm. Comparison is also performed between the HCA-LIQ and CSU-ICE optimization algorithms and the traditional  $R(Z_H)$  method. The results show that the HCA-LIQ optimization algorithm is well correlated with gauges and presents high stability. In addition, the distribution of hourly accumulation bias has light relation with the distance from the radar. The estimation results of the precipitation events show that two kinds of optimization algorithms are obviously superior to the traditional  $R(Z_H)$  method for convective precipitation;

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41675023)资助

2016 年 9 月 18 日收稿; 2017 年 3 月 29 日收修定稿

第一作者: 汪舵, 主要从事雷达气象研究. Email: wangduo1214@qq.com

the  $R(Z_H)$  method is better than the two optimization algorithms for mixed cloud precipitation; the three errors statistics of the HCA-LIQ optimization algorithm are superior to the CSU-ICE algorithm. According to the bias statistics of the classification of rainfall intensity, the new HCA-LIQ optimization algorithm bias decreases by 23% for light rain 71% for heavy rain and 68% for torrential rain respectively in comparison to the traditional  $R(Z_H)$  method.

**Key words:** dual polarization radar, quantitative precipitation estimate, optimization, measurement accuracy

## 引 言

降水过程与人民的生活和工业生产息息相关,因此对降水进行定量评估有着非常重要的意义。天气雷达作为我国定量估测地区降水量的主要工具之一,如何不断提高天气雷达的定量降水估测(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)精度,一直是研究人员需要不断突破的重要课题。与传统多普勒雷达  $Z$ - $R$  关系方法(简称 PPS)相比,双线偏振雷达定量降水估测(简称 DP-QPE)有着明显的优势(Bringi and Chandrasekar, 2001; Ryzhkov et al, 2003)。双线偏振雷达不仅可以使基本反射率因子  $Z_H$  来计算降水强度,还增加了差分反射率因子  $Z_{DR}$ 、比差分传播相移  $K_{DP}$  等偏振参量,能获得比常规天气雷达更多有关降水粒子形状和相态等微观物理信息,对进一步提高灾害性天气的监测和预报能力具有显著意义。过去 30 年,利用  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  不同组合的降水估测公式被相继提出,如  $R(Z_H)$ 、 $R(Z_{DR})$ 、 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$  等。20 世纪 80、90 年代国外做了很多关于偏振雷达定量降水估测方法的研究。在我国,对比常规雷达  $R(Z_H)$  方法,人们对单个双极化雷达测雨公式  $R(Z_H)$ 、 $R(Z_{DR})$ 、 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$  的优势做了大量的比较研究。刘黎平等(1996)分析发现  $R(Z_H, Z_{DR})$  的估测效果要优于  $R(Z_H)$ 。王建林等(2005)指出,在小雨阶段  $K_{DP}$  存在比较大的系统误差,当反射率因子小于 20 dBz 时可采用  $R(Z_H)$  进行估测降水。但都没有考虑雨滴谱的变化对降水估测的影响。殷秀良和张培昌(2002)研究发现,雷达反射率因子  $Z_H$  对降雨谱各谱参量的变化也非常敏感,而差分传播相位变化率  $K_{DP}$  对雨滴谱变化不敏感,  $R(K_{DP}, Z_{DR})$  的测雨效果最佳。赵果等(2011)利用黑河流域观测雨滴谱数据得到的本地雷达测雨公式以及三参数方法  $R(K_{DP}, Z_{DR}, Z_H)$  改进了双极化雷达测量降水精度。以上研究对

我国双线偏振雷达降水估测的业务发展有着重要的指导意义,但都是基于科研用途的双极化雷达以及单个的测雨关系式。国外的双线极化雷达降水估测算法已经比较成熟和系统化,在国外,Chandrasekar et al(1993)探讨了把几种单个的降水估测公式联合起来进行降水估测,即对每一组测定值的偏振参量  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ ,选择一个最优的方法,这里我们称之为最优化算法(Optimization Algorithm, OA)。Cifelli et al(2003)研究提出了 CSU-ICE 最优化算法,通过设置冰晶系数和偏振参量  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  阈值来建立降水强度估测公式选择机制。Ryzhkov et al(2005)在美国联合偏振试验(JPOLE)的基础上提出了 JOPLE 最优化算法,对于不同类型的降水强度使用不同降水估测公式。Giangrande and Ryzhkov(2008)将相态识别算法加入到降水估测中。相较而言,国内虽然也进行了双线偏振雷达相态识别方法的研究(曹俊武等,2005;刘亚男等,2012),但是并没有将其运用到定量降水估测方法中来。

双线偏振雷达是下一代天气雷达发展趋势。我国双线偏振雷达经过近 30 年的探索研究也逐步从科研外场试验发展为业务应用(刘黎平等,2016)。2013 年底广东珠海和澳门市象局合作共建的 S 波段双偏振多普勒天气雷达进入了业务试运行阶段。2014 年上海市气象局完成了对引进 WSR-88D 雷达的双偏振升级改造步骤和程序。2015 年一部 X 波段双线偏振多普勒天气雷达在广东佛山市南海国家气象观测基地正式试用。在双偏振雷达的全国业务推广和偏振技术改造的过程中,也提出了更多亟待开展的研究课题。比如,双线偏振雷达业务资料的质量控制、其相态识别效果的评估、其业务探测降水能力的评估等。针对我国业务使用的双线偏振雷达降水估测能力的研究,本文利用华南地区雨滴谱数据计算得到的降水估测公式  $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{DP})$ ,参考 CUS-ICE 的液态降水类估测模型,建立了一种基于相态识别的 S 波段双线偏振最优化定

量降水估测算法(简称 HCA-LIQ)。该方法主要有两个特点,一是基于业务使用的双线偏振雷达,二是将相态识别方法运用到降水估测中。为了评估该最优化算法的估测效果,本文选取广东珠海业务使用的 S 波段双线偏振雷达和华南地面密集的自动站网络雨量资料,对该最优化算法的估测效果进行了统计分析,并且进一步与 CUS-ICE 算法、传统的  $R(Z_H)$  方法进行了比较研究。

1 数据来源

本文选取 2014 年 5 月 9 日以及 11 日珠海地区的两次降雨观测数据。据当地气象报道,从 8—11 日,珠海出现持续强降雨天气,历史上首次连续 3 天(9—11 日)发布暴雨红色预警信号。11 日是一次强对流降水过程,9 日是一次大范围的混合云降水过程。该数据包括两部分:一部分是珠海 S 波段双线偏振雷达的观测数据,另一部分是华南自动雨量站

网分钟级和小时级实测降雨量数据。降水过程信息统计如表 1 所示。

1.1 双线偏振雷达资料

珠海雷达资料共 38 个时段 411 个体扫数据样本。雷达的主要性能指标如下:偏振类型为双发双收,扫描方式为 PPI 体积扫描,雷达波长 10.3 cm,雷达工作频率 2.901 GHz,发射脉冲宽度  $1.57\ \mu\text{s}$ ,峰值功率 650 kW,天线增益 $\geq 45\ \text{dB}$ ,天线海拔高度为 257 m,波束宽度 $\leq 0.99^\circ$ ,其波束库长为 250 m,方位角分辨率为  $1^\circ$ ,探测半径为 230 km。雷达的中心坐标位于  $22.026^\circ\text{N}$ 、 $113.370^\circ\text{E}$ ,雷达体扫数据为  $6\ \text{min}\cdot\text{次}^{-1}$ ,雷达基数据除了包含水平反射率因子、多普勒速度、谱宽,还包括差分反射率因子  $Z_{\text{DR}}$ 、差分传播相移率  $K_{\text{DP}}$  等偏振参量。所取资料仰角皆为  $0.5^\circ$ ,查阅探空数据发现零度层高度为 4.7 km 左右,考虑到仰角较低和雷达探测半径,所以不考虑零度层亮带的影响(庄薇等,2013)。

表 1 降水过程的信息统计

Table 1 Information of precipitation processes

| 降水过程日期/年.月.日 | 过程时间段       | 过程总时间/h | 平均小时雨量/mm | 最大小时雨量/mm | 降水类型  |
|--------------|-------------|---------|-----------|-----------|-------|
| 2014.5.9     | 00:04—22:59 | 23      | 3.0       | 81.3      | 混合云降水 |
| 2014.5.11    | 01:01—15:56 | 15      | 7.8       | 96.1      | 对流云降水 |

1.2 自动站雨量资料

自动站雨量资料来自于我国华南密集的地面雨量计网络,其降雨量分辨率为 0.1 mm。其中能够

提供与雷达形成对应的降水数据的雨量站数目为 739 个,这里我们选取逐小时雨量资料。其中雷达和雨量计的分布情况如图 1 所示。

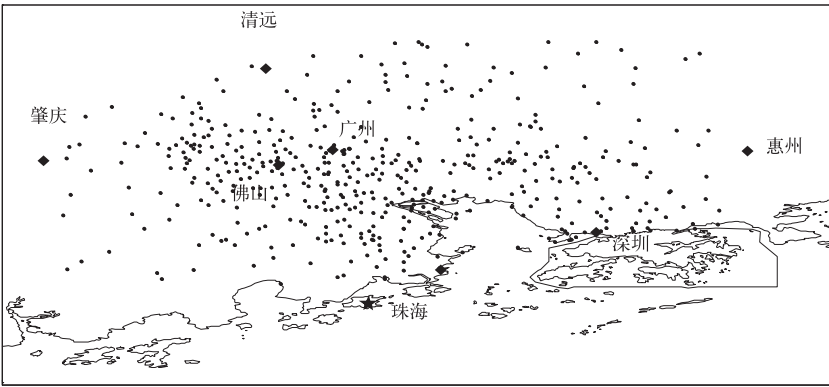


图 1 珠海偏振雷达位置与地面自动站分布  
(★表示雷达,黑色的点表示雨量计)

Fig. 1 Geographical distribution of radar stations (star) and gauges (black dots) in Zhuhai

## 2 数据质量分析、预处理与评估指标

### 2.1 数据质量分析

雷达的数据质量是使用雷达数据之前必须考虑的问题,它与雷达是否准确定标有关。通过中国气象局大气探测中心的硬件测试和日常观测数据的分析,认为珠海雷达在 2014 年得到了较为准确的标定,数据可靠。对于 10℃ 层以下回波强度 15~20 dBz 的小雨回波和 0℃ 层以上 15~25 dBz 的干雪回波,其  $Z_{DR}$  在 0 dB 左右、 $\rho_{hv}$  接近 1,均在合理的范围内。根据 Liu et al(2010)对双偏振雷达资料质量的分析发现,信噪比偏低时噪声对差分反射率因子  $Z_{DR}$  有着明显影响。因此,为了进一步提高可靠性,本文只选用信噪比大于 20 dB 时的雷达参数进行降水估测。

### 2.2 数据预处理

在使用雷达资料之前,首先对数据进行质量控制。本文使用中值滤波方法(魏庆等,2016)对数据进行平滑预处理,中值滤波是一种非线性数据滤波技术,能够有效地处理脉冲噪声。取中值滤波窗口  $M=13$ ,即采用 13 点滑动平均的方法对偏振雷达径

向数据进行平滑处理。然后反演出逐 6 min 雷达降水强度估计,再经过时间累积,将每小时内的 10 次连续的逐 6 min 雷达降水强度估计累加为雷达小时雨量估计,当小时雨量小于 0.1 mm 时用 0.1 代替。接着将 1 h 雷达降水强度估计值与单点雨量站逐小时雨量测量值进行配对,雷达估计值与地面实际测量的空间不一致性是影响雷达定量降水估测精度的重要因素之一。高晓荣等(2012)指出,对于任一单个雷达,雨量计降水强度与其上空 9 点平均的雷达回波强度的关系最为密切。因此这里我们选取雨量计站点正上方及周围共 9 个雷达观测数据进行算术平均,将平均值作为该点的雷达估测值与地面雨量计测量值对应进行匹配。

按以上准则对雷达与雨量计的小时雨量数据匹配完成以后,5 月 9 日和 11 日两次过程分别获取了 15651 组和 11063 组雷达-雨量计配对样本资料。然后按雷达与雨量计小时雨量的不同将配对样本分成四类,分别为雷达有值、雨量计空值,雷达空值、雨量计空值,雷达空值、雨量计有值和雷达有值、雨量计有值。结果如表 2 所示,可以看到匹配样本中主要为雷达有值、雨量计有值和雷达空值、雨量计空值的情况,因此在对数据资料进行筛选时,只保留雷达有值、雨量计有值和雷达空值、雨量计空值的数据进行降水估测误差统计。

表 2 两次过程的雷达-雨量计小时雨量匹配样本统计

Table 2 Sample statistics of radar-gauge hourly accumulation in two rainfall events

| 降水过程日期/<br>年.月.日 | 雷达有值、雨量<br>计有值(组) | 雷达有值、雨量<br>计空值(组) | 雷达空值、雨量<br>计有值(组) | 雷达空值、雨量<br>计空值(组) |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 2014. 5. 11      | 4168              | 1523              | 454               | 4918              |
| 2014. 5. 9       | 7386              | 1087              | 882               | 6298              |

### 2.3 误差评估指标

为了对降水估测的效果进行定量分析,本文选取了均方根误差(RMSE)、归一化偏差(NB)、皮尔逊相关系数(CORR)作为误差评估指标。其中均方根误差(RMSE)反映了雷达估测值和雨量计实测值之间的离散程度,其值越小离散程度也就越低,误差越小,单位为 mm。归一化偏差(NB)的绝对值越低表示误差越小,单位为%。皮尔逊相关系数(CORR)表示了估测值和实测值之间相关关系密切程度,其值越接近于 1 表示相关程度越高,无量纲。

三个指标的具体定义如下:

均方根误差:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RA_i^R - RA_i^G)^2 \right]^{1/2}$$

$$\text{归一化偏差: } NB = \left( \frac{\overline{RA^R} - \overline{RA^G}}{\overline{RA^G}} \right) \times 100$$

$$\text{相关系数: } CORR = \frac{Covar(RA^R, RA^G)}{\sigma^G \cdot \sigma^R}$$

式中,  $RA^R$ 、 $RA^G$  分别表示雷达估测小时雨量和对应的雨量计实测小时雨量,  $i$  表示第  $i$  组雷达-雨量小时雨量匹配样本,上划线表示平均值。  $Covar()$  表示协方差,  $\sigma$  为标准差。

### 3 最优化定量降水估测方法

#### 3.1 Colorado State University (CSU)-ICE 最优化算法

由于高原地区特殊的地理和气候条件,夏季的降水过程常伴有霰或者冰雹的出现。如果不能准确地分辨出非液态降水类,会使降水估测造成比较大的偏差。于是对高原地区的定量降水估测提出了更高的要求。美国科罗拉多州立大学利用世界先进的偏振雷达系统S波段CSU-CHILL雷达研究提出了Colorado State University (CSU)-ICE最优化算

法,算法的流程图如图2所示。根据差分反射率定义了一个冰晶因子(Ice Fraction, Golestani et al, 1989),利用冰晶因子来区分出雷达扫描体积中的液态降水和冰雹混合区降水。然后基于 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 阈值,分别对液态降水和冰雹混合区降水选择最优的降水估测公式,公式如下:

$$R(Z_H) = 0.0170(Z_H)^{0.143} \quad (1)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0067(Z_H)^{0.927} \times (10)^{-0.343Z_{DR}} \quad (2)$$

$$R(K_{DP}) = 40.5 \times (K_{DP})^{0.85} \quad (3)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 90.8 \times K_{DP}^{0.93} \times (10)^{(-0.169Z_{DR})} \quad (4)$$

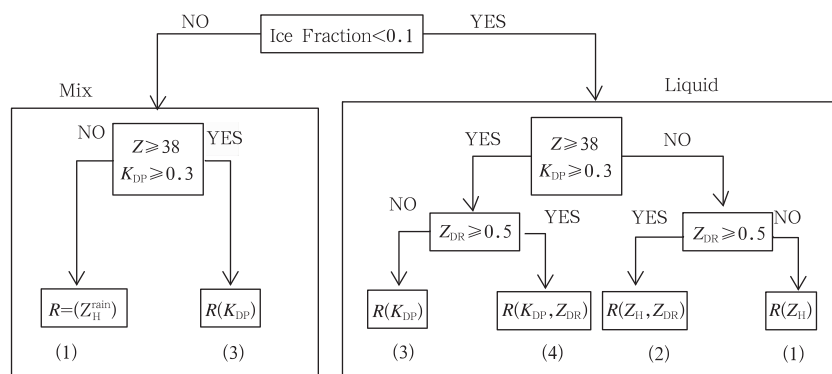


图2 CSU-ICE最优化算法流程图

Fig. 2 Flow chart describing the CSU-ICE optimization algorithm logic

#### 3.2 基于相态识别的HCA-LIQ最优化算法的实现

水凝物分类算法(HCA),又称相态识别算法,是通过偏振雷达回波信息对雷达扫描体积中的水凝物进行分类识别的方法。目前最常用的是基于模糊逻辑的相态识别算法。模糊逻辑识别粒子相态的原理主要是,由于不同降水粒子时各偏振参量存在差异性,利用 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{hv}$ 等双偏振产品,根据不同相态降水粒子的散射和空间取向等特征建立模糊逻辑识别的隶属函数,可以判断目标粒子的形状、尺寸大小和相态等气象信息,从而得到降水粒子类型。这里的相态识别方法参考Park et al(2009)。将主要的降水粒子相态分为:地物回波(包括异常传播)(GC)、生物回波(BI)、干雪(DS)、湿雪(WS)、各相冰晶(IC)、霰(GR)、大雨滴(BD)、小到中雨(RA)、大雨(HR)、冰雹(HA)。作为本文方法的需要,在

降水估测时我们将大雨滴(BD)、小到中雨(RA)、大雨(HR)归液态降水类。

本文的HCA-LIQ最优化方法选用基本估测公式 $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{DP})$ 来定量评估地面降水,并且用相态识别来指导降水估测公式的选择,而不是使用冰晶因子。双线偏振雷达定量降水估测中一个最主要的问题就是,对雷达基数据中每一组测定的偏振参量 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ ,如何选择合适的降水强度估测公式。本文通过两个部分实现,(1)对任一组雷达测定的 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{hv}$ 等参量,首先用相态识别的结果来区分液态降水类和其他相态。(2)当相态识别的结果为液态降水类(雨、大雨、大滴)时,根据设置的 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 阈值作为判别条件,来选择对应的最优降水强度估测公式(图3)。其中 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 阈值参考Cifelli et al(2003)里的设定。

当相态识别的结果为其他冷冻水凝(如雪、雹、霰等)时,则直接选用相应的降水强度估测公式,如

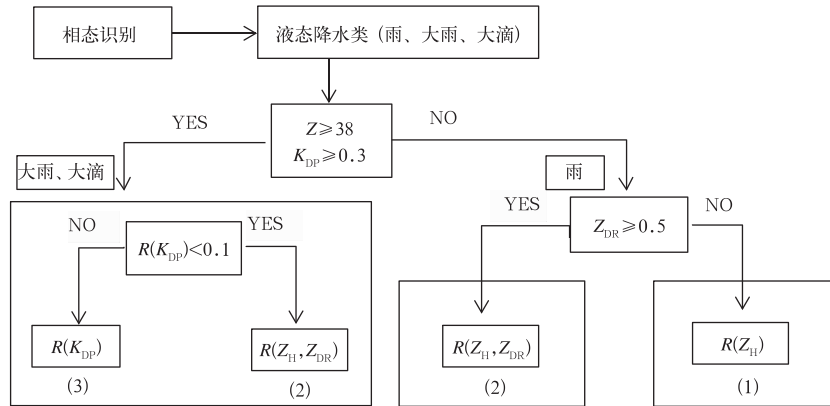


图 3 最优化定量降水估测算法流程图

Fig. 3 Flow chart describing part of the HCA-LIQ optimization algorithm logic

表 3 所示。

由于不同地区降水类型、粒子相态、雨滴谱参数存在差异,导致雷达参量与地面降水之间的统计关系也存在地区特性。因此,本文利用广东阳江的雨滴谱数据,观测起止时间为 2014 年 4 月 27 日至 6 月 11 日,在考虑不同降水强度采用不同偏振参量进行降水估测的情况下,采用非线性回归拟合和分段式拟合方法拟合出广东地区 S 波段双线偏振雷达降水估测公式,拟合结果如下:

$$R(Z_H) = 0.0362(Z_H)^{0.687} \quad (5)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.00786(Z_H)^{0.967} \times (Z_{DR})^{-4.98} \quad (6)$$

$$R(K_{DP}) = 65.3 |K_{DP}|^{0.806} \times \text{sign}(K_{DP}) \quad (7)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 136 \times |K_{DP}|^{0.968} \times (Z_{DR})^{-2.86} \times \text{sign}(K_{DP}) \quad (8)$$

$R()$  表示降雨强度,单位为  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 $Z_H$  表示水平反射率因子,单位为  $\text{dBz}$ 。 $Z_{DR}$  为差分反射率。 $K_{DP}$  为差分传播相移率,单位为  $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

表 3 不同的相态识别结果使用不同的降水估测方法

Table 3 Rainfall estimation method for each echo classification

| 相态识别结果 | 降水估测                |
|--------|---------------------|
| 地物     | 0                   |
| 湍流     | 0                   |
| 湿雪     | $0.6 \times R(Z_H)$ |
| 干雪     | $R(Z_H)$            |
| 冰晶     | $2.8 \times R(Z_H)$ |
| 霰      | $R(Z_H)$            |
| 雹      | $R(K_{DP})$         |
| 雨      |                     |
| 大雨     | 如图 3                |
| 大滴     |                     |

#### 4 HCA-LIQ 最优化算法测雨效果评估和时空变化分析

由表 1 可知,5 月 11 日降水过程的平均雨量计小时雨量为 7.8 mm,其中最大小时雨量达到了 96.1 mm。这里以地面雨量计为标准,得到了该过程各时段的雨量计平均小时雨量,同时给出了雷达相对地面雨量计小时雨量估测的均方根误差(RMSE)、归一化偏差(NB)和相关系数(CORR)的误差评估结果,如图 4 所示。由于 01、02 时有效匹配样本数据较少,故将其剔除。图 5 给出了 05、08、13 时的雷达以及对应地面雨量计小时雨量估测的等直线图。由图 4 得,03—15 时,其均方根误差均小于 9.4 mm,最小值达到了 3.8 mm。相关系数在 0.79~0.95,说明 HCA-LIQ 最优化算法估测结果与地面自动雨量站有着较好的相关性。并且,在图 5 中,雷达估测结果相对于雨量计在雨量较多的区域以及雨量较少的区域都能较好的对应,进一步说明 HCA-LIQ 最优化算法的估测结果和地面雨量计具有较好的一致性。从归一化偏差来看,05 时的归一化偏差最大为 36.1%,此时雨量计平均小时雨量最小为 4.9 mm。此外其他时段均小于 20.9%,且当雨量计平均小时雨量  $\geq 7.1$  mm(09 时),其归一化偏差均小于 10.1%,估测效果较为稳定。在 13 时其归一化偏差达到最小值只有 2.3%,而此时对应的雨量计平均小时雨量达到最大为 10.9 mm。为了初步分析偏差与雨强的关系,于是,给出了 03—15 时归一化偏差随雨量计平均小时雨量的变化,结

果如图6所示。随着雨量计平均小时雨量的增大,归一化偏差总体有变小的趋势。综上可知,整体上,HCA-LIQ最优化算法表现出与地面雨量计较强的相关性且有着较好的稳定性,随着雨量计平均小时雨量的增大,归一化偏差总体有变小的趋势。

如图5a、5c中的黑圈显示,与雨量计相比雷达更能观测到该区域强降水中心的极值降水,这可能

和该区域雨量计分布较为稀疏有关。在图5c<sub>1</sub>中,雷达的估测效果明显较弱,可能是雷达观测的边缘回波较弱造成的。图7显示了雷达-雨量计小时雨量估测的偏差分布情况(杨杰等,2014;陈静等,2015)。从图7偏差的空间分布来看,偏差与离雷达的距离没有明显的分布关系,但是在雷达探测距离的边缘地带往往会出现负的偏差。图5b<sub>2</sub>、5c<sub>2</sub>也可

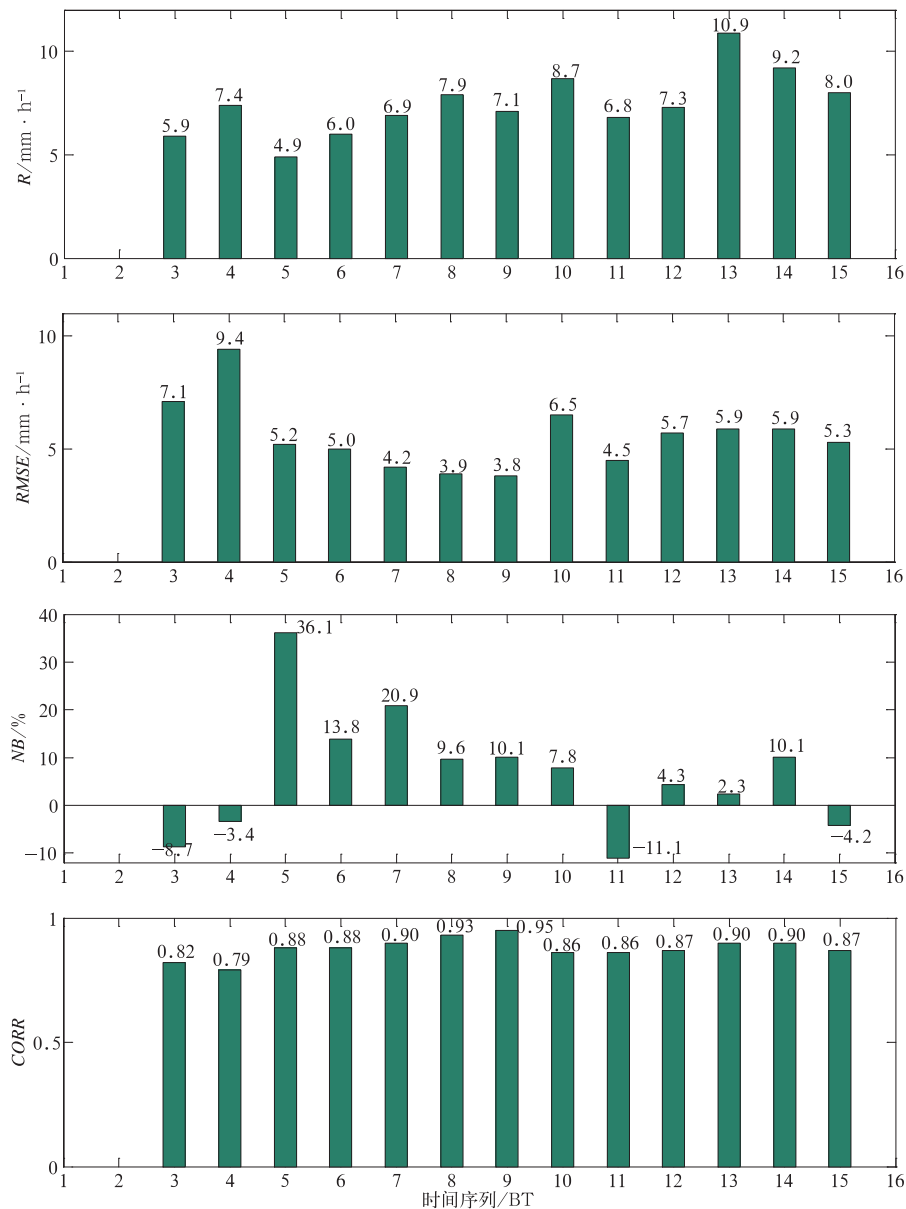


图4 2014年5月11日降水过程从03—15时各时段雷达-雨量计小时雨量估测的误差统计  
(a)雨量计平均小时雨量( $R$ ), (b)均方根误差( $\text{RMSE}$ ), (c)归一化偏差( $\text{NB}$ ),  
(d)相关系数( $\text{CORR}$ )

Fig. 4 Error statistics of hourly radar-gauge rainfall accumulation  
from 03:00 BT to 15:00 BT 11 May 2014

(a) average hourly gauge accumulation, (b) RMSE, (c) NB, (d) CORR

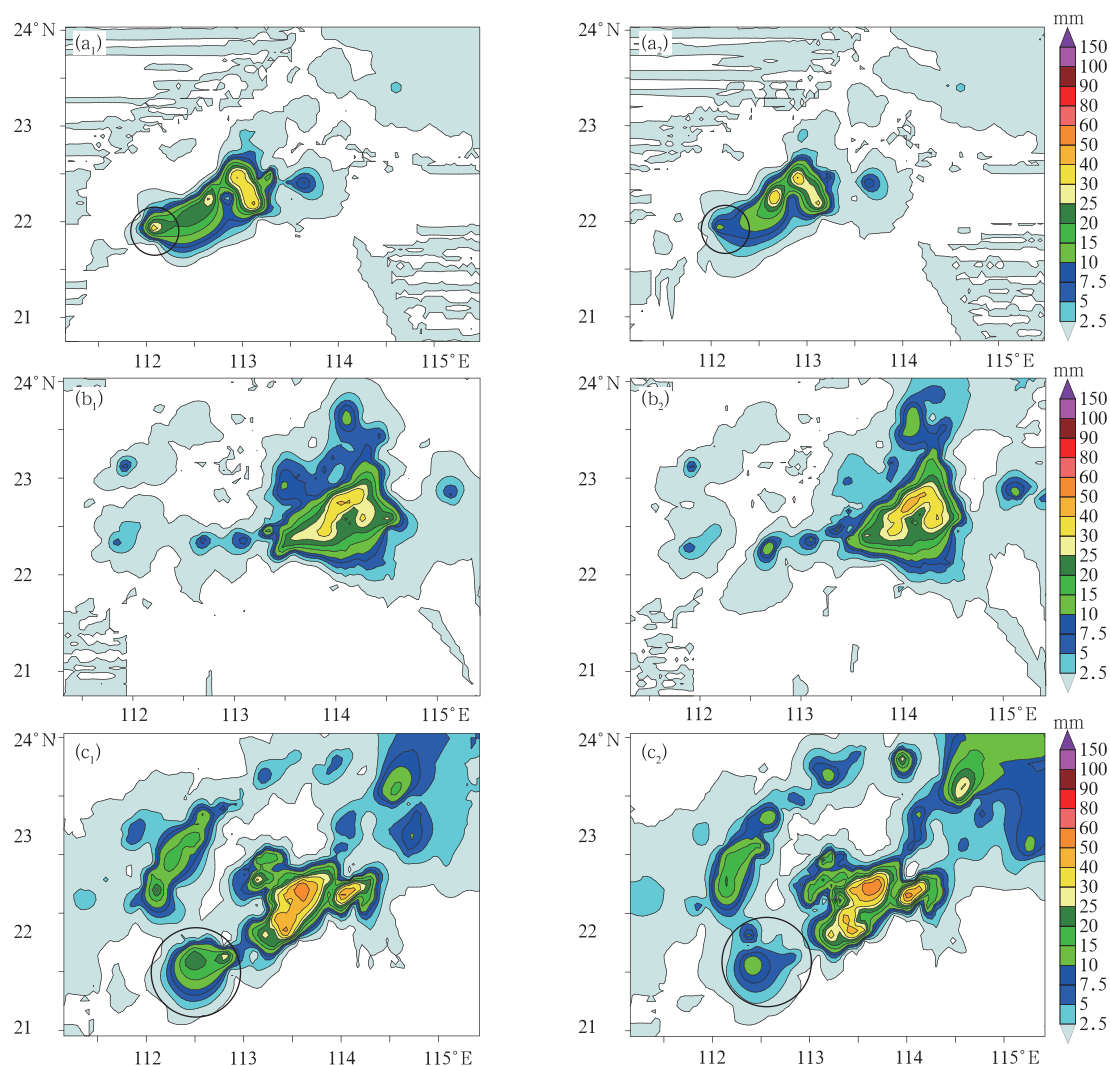


图 5 2014 年 5 月 11 日降水过程小时雨量雷达估测结果( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ )和  
对应的雨量计实测结果( $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$ )

( $a_1$ ,  $a_2$ ) 05 时, ( $b_1$ ,  $b_2$ ) 08 时, ( $c_1$ ,  $c_2$ ) 13 时

Fig. 5 Contour line graph of the hourly radar ( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ) and  
gauge ( $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$ ) accumulation for the 11 May 2014

( $a_1$ ,  $a_2$ ) 05:00 BT, ( $b_1$ ,  $b_2$ ) 08:00 BT, ( $c_1$ ,  $c_2$ ) 13:00 BT

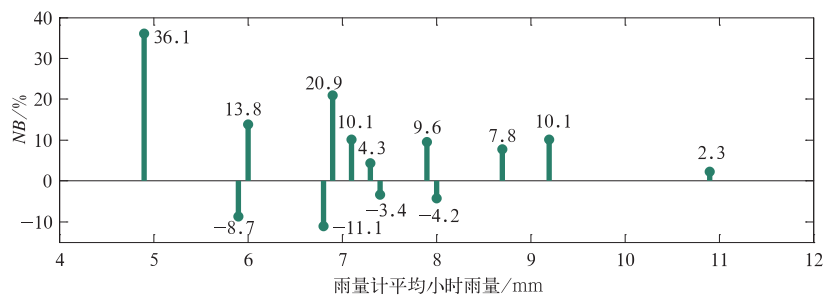


图 6 归一化偏差随雨量计平均小时雨量的变化

Fig. 6 Variation of NB with the average gauge  
hourly rainfall

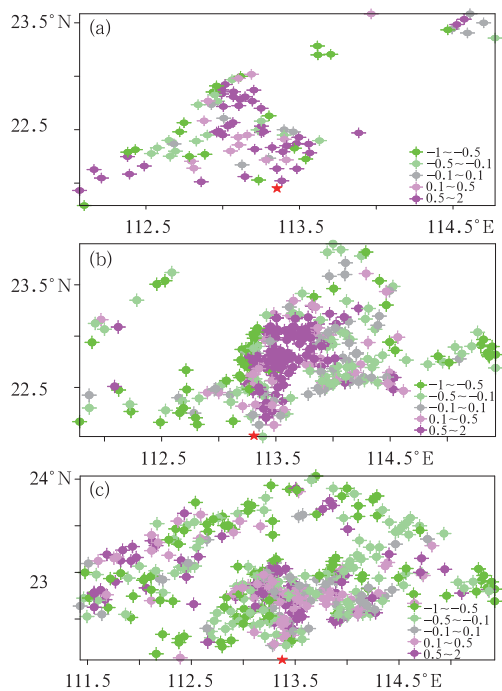


图 7 2014 年 5 月 11 日 (a)05 时, (b)08 时, (c)13 时雷达-雨量计小时雨量估测的偏差分布 (★表示雷达位置)

Fig. 7 NB distribution of hourly radar-gauge rainfall accumulation at (a) 05:00 BT, (b) 08:00 BT, (c) 13:00 BT 11 May 2014 (★ represents radar position)

以明显地看到这种情况,其原因可能是远距离回波的衰减造成的。

5 对比 HCA-LIQ 方法与 CSU-ICE 方法、 $R(Z_H)$  方法

5.1 过程样本的整合分析

对两个降水过程分别使用两种最优化算法、传统  $R(Z_H)$  方法(简称 PPS)进行定量降水估测,并对三种方法的误差评估结果进行了统计,如表 4 所示。图 8 给出了对应的雷达-雨量计小时雨量的概率密度分布。表 4 表明,对 05 月 11 日过程,与传统的  $R(Z_H)$  方法相比两种最优化方法的估测效果明显更佳。尤其是 HCA-LIQ 方法,其均方根误差降低了 11%,归一化偏差降低了 67%,相关系数提高了 4%。对比图 8 也可以发现,两种最优化算法的概率

密度图更集中于目标直线,而传统的  $R(Z_H)$  方法则更多的偏向目标直线的下方。在对 5 月 9 日的过程进行估测时,三种方法的估测效果差别不大,  $R(Z_H)$  方法要略好于最优化方法,图 8 也可以看出这种情况。就两种最优化算法而言,HCA-LIQ 方法在两个过程中 RMSE、NB、CORR 的统计表现均要优于 CSU-ICE 方法。综合以上分析可得,对强对流云降水,两种最优化算法要明显优于传统的  $R(Z_H)$  方法;对混合云降水,最优化算法的效果则不如  $R(Z_H)$  方法;HCA-LIQ 最优化算法比 CSU-ICE 算法效果更佳。

表 4 两次降雨过程分别使用三种降水估测方法的误差统计结果

Table 4 Error statistic results of three rainfall estimation methods used for the two events

| 降水日期        | 方法      | RMSE/mm | NB/%  | CORR  |
|-------------|---------|---------|-------|-------|
| 2014. 5. 11 | HCA-LIQ | 5. 4    | 3. 1  | 0. 89 |
|             | CSU-ICE | 5. 6    | 7. 6  | 0. 88 |
|             | PPS     | 6. 1    | −9. 6 | 0. 85 |
| 2014. 5. 9  | HCA-LIQ | 3. 8    | 7. 2  | 0. 72 |
|             | CSU-ICE | 4. 1    | 9. 2  | 0. 70 |
|             | PPS     | 3. 6    | 6. 5  | 0. 70 |

5.2 按雨强分类统计

根据气象标准规范:定义 1 h 内雨量  $\leq 2.5$  mm 的降水为小雨;1 h 内雨量为 2.6~8.0 mm 的降水为中雨;1 h 内雨量为 8~16 mm 的降水为大雨;1 h 内雨量  $>16$  mm 的降水为暴雨(表 5)。为了更详细地分析在不同降雨强度情况下不同方法的估测精度。我们以雨量计小时雨量为标准,综合两个过程的数据,按降水强度大小进行分类统计(表 5)。

由归一化偏差可以看出,在小到中雨时,三种估测方法均高估了降水强度,在大到暴雨时均出现了低估。与传统的  $R(Z_H)$  方法相比,两种最优化算法对大到暴雨的估测偏差显著降低。特别是大雨时, HCA-LIQ 最优化方法的归一化偏差达到最小值。对小雨和暴雨的估测结果显示,CSU-ICE 方法的效果最佳。统计分析来看,与传统的  $R(Z_H)$  方法相比,HCA-LIQ 最优化算法对小雨的估测偏差降低了 23%,中雨时的估测偏差相当,对大雨、暴雨的估测偏差分别降低了 71%、68%。

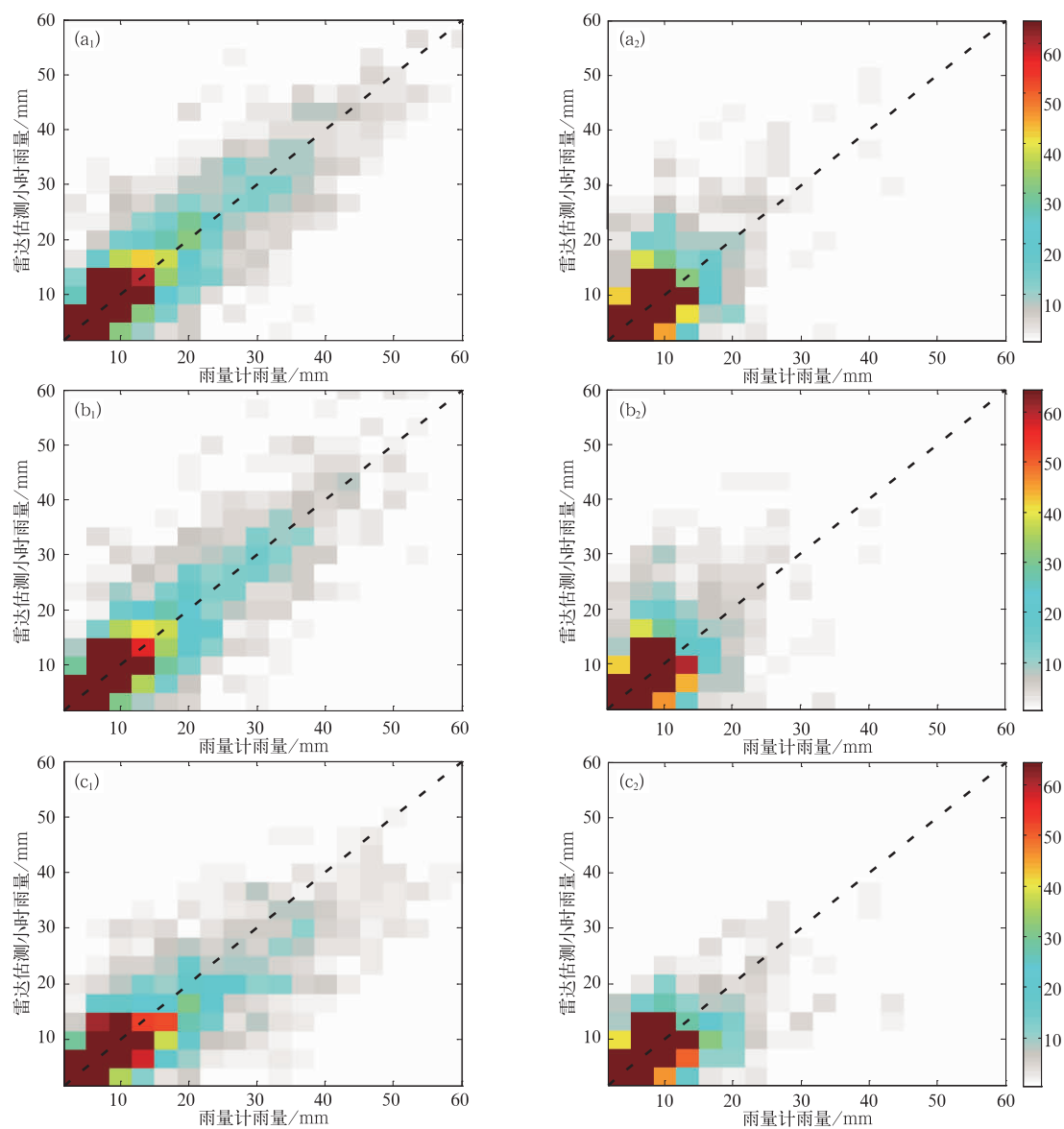


图 8 2014 年 5 月 11 日(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>)和 5 月 9 日(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>)雷达-雨量计小时雨量估测的概率密度图  
(a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>)HCA-LIQ 方法, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>)CSU-ICE 方法, (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)传统  $R(Z_H)$  方法  
Fig. 8 Probability density plots of hourly radar-gauge rainfall accumulation for  
the 11 May event (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) and the 9 May event (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>)  
(a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) HCA-LIQ, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) CSU-ICE, (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)  $R(Z_H)$

表 5 不同方法按雨强分类统计的结果

| 估测方法    |         | 降水强度               |                            |                           |                |
|---------|---------|--------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|
|         |         | 小时雨量 $\leq 2.5$ mm | 8.0 $\geq$ 小时雨量 $> 2.5$ mm | 16 $\geq$ 小时雨量 $> 8.0$ mm | 小时雨量 $> 16$ mm |
| PPS     | RMSE/mm | 1.7                | 3.3                        | 6.2                       | 13.6           |
|         | NB/%    | 58.9               | 22.9                       | -20.9                     | -27.2          |
|         | CORR    | 0.49               | 0.26                       | 0.23                      | 0.60           |
| CSU-ICE | RMSE/mm | 2.1                | 4.3                        | 6.6                       | 12.4           |
|         | NB/%    | 44.4               | 25.2                       | -6.4                      | -5.6           |
|         | CORR    | 0.37               | 0.29                       | 0.26                      | 0.65           |
| HCA-LIQ | RMSE/mm | 2.1                | 3.9                        | 6.5                       | 11.3           |
|         | NB/%    | 45.0               | 22.9                       | -6.0                      | -8.5           |
|         | CORR    | 0.37               | 0.32                       | 0.27                      | 0.67           |

## 6 结 论

本文利用广东珠海业务应用的S波段双线偏振雷达资料,以及华南自动站网络雨量资料,结合双线偏振雷达在相态识别和降水估测中的优势,建立了一种基于相态识别的S波段双线偏振雷达最优化定量降水估测算法,为我国双偏振雷达估测降水业务提供了有价值的参考,所得结论如下:

(1) 以地面雨量计实测雨量为标准,对HCA-LIQ最优化算法的效果和估测结果的时空变化进行了评估、分析。整体上,HCA-LIQ最优化算法表现出与地面雨量计较强的相关性且有着较好的稳定性;随着雨量计平均小时雨量的增大,归一化偏差总体有变小的趋势;偏振雷达估测降水的偏差与离雷达的距离没有明显的分布关系。

(2) 对过程的估测结果显示,强对流云降水时,两种最优化算法要明显优于传统的 $R(Z_H)$ 方法;混合云降水时,最优化算法的效果则不如 $R(Z_H)$ 方法;HCA-LIQ最优化算法比CSU-ICE算法效果更佳。

(3) 按雨强进行分类统计的结果表明,在小到中雨时,两种最优化算法和传统 $R(Z_H)$ 方法均高估了降水强度,在大到暴雨时均出现了低估。与传统的 $R(Z_H)$ 方法相比,两种最优化算对大到暴雨的估测偏差显著降低,同时提高了对小雨的估测精度。与传统的 $R(Z_H)$ 方法相比,HCA-LIQ最优化算法对小雨的估测偏差降低了23%,中雨时的估测偏差相当,对大雨、暴雨的估测偏差分别降低了71%、68%。

## 参考文献

- 曹俊武,刘黎平,葛润生,2005. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究[J]. 大气科学,29(5):827-836.
- 陈静,铃伟妙,韩军彩,等,2015. 基于动态 $Z-I$ 关系雷达回波定量估测降水方法研究[J]. 气象,41(3):296-303.
- 高晓荣,梁建茵,李春晖,2012. 雷达定量降水估计技术及效果评估[J]. 热带气象学报,28(1):77-88.
- 刘黎平,胡志群,吴翀,2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和运用[J]. 气象科技进展,6(3):28-33.
- 刘黎平,钱永甫,王致君,等,1996. 双线偏振雷达测雨效果的对比分

- 析[J]. 大气科学,20(5):615-619.
- 刘亚男,肖辉,姚振东,等,2012. X波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别[J]. 气候与环境研究,17(6):925-936.
- 王建林,刘黎平,曹俊武,2005. 双线偏振多普勒雷达估算降水方法的比较研究[J]. 气象,31(8):25-30,41.
- 魏庆,胡志群,刘黎平,等,2016. C波段偏振雷达数据预处理及在降水估计中的应用[J]. 高原气象,35(1):231-243.
- 杨杰,刘黎平,勾亚彬,2014. 影响浙江地区降水估测几个因素的分析[J]. 气象,40(5):589-597.
- 殷秀良,张培昌,2000. 双线偏振雷达测雨公式的对比分析[J]. 南京气象学院学报,23(3):428-434.
- 赵果,楚荣忠,张彤,等,2011. 偏振多普勒雷达定量测量降水精度的改进[J]. 高原气象,30(2):498-507.
- 庄薇,刘黎平,胡志群,2013. 青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用[J]. 气象,39(8):1004-1013.
- Bringi V N, Chandrasekar V, 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press:635.
- Chandrasekar V, Gorgucci E, Sarchilli G, 1993. Optimization of multiparameter radar estimates of rainfall[J]. J Appl Meteor,32(7):1288-1293.
- Cifelli R, Barjenbruch D, Brunkow D, et al, 2003. Evaluation of an operational polarimetric rainfall algorithm[C]//32nd Conference on Broadcast Meteorology/31st Conference on Radar Meteorology/Fifth Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction and Processes. Seattle, WA: American Meteorological Society.
- Giangrande S E, Ryzhkov A V, 2008. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification[J]. J Appl Meteor Climatol,47(9):2445-2462.
- Golestani Y, Chandrasekar V, Bringi V N, 1989. Intercomparison of multi-parameter radar measurements[C]//Proceedings of the 24th Conference on Radar Meteorology. Boston, MA: American Meteorological Society:309-314.
- Liu Liping, Hu Zhiqun, Fang Wengui, et al, 2010. Calibration and data quality analysis with mobile C-band polarimetric radar[J]. Acta Meteor Sin,24(4):501-509.
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24(3):730-748.
- Ryzhkov A, Giangrande S, Schuur T J, 2003. Rainfall measurements with the polarimetric WSR-88D radar[R]. Norman, OK: National Severe Storms Laboratory:98.
- Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J, 2005. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D[J]. J Appl Meteor,44(4):502-515.