

李巧, 戚友存, 张哲, 等. 2022. 基于贝叶斯分类器和回波物理特征的 C 波段雷达非气象回波识别方法和性能分析[J]. 大气科学, XX(X): XXXX-XXXX. LI Qiao, QI Youcun, ZHANG Zhe, et al. 2022. Identification method and performance analysis of non-meteorological echoes of C-band radar based on Bayesian classifier and echo physical characteristics[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), XX(X): XXXX-XXXX. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2205.22003

基于贝叶斯分类器和回波物理特征的 C 波段雷达非气象回波识别方法和性能分析

李巧^{1,3} 戚友存^{1,3} 张哲² 杨毅⁴ 朱自伟^{1,3} 王楠⁵ 胡启元⁵

1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101
2. 深圳市国家气候观象台, 深圳 518040
3. 中国科学院大学, 北京 100864
4. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000
5. 陕西省气象局, 西安 710014

摘要 天气雷达在观测过程中, 通常会受到非气象因子的干扰, 产生非气象回波, 从而严重影响雷达定量降水估计的精度和短临降水预报的性能。本文使用陕西省西安、延安等 7 部 C 波段多普勒天气雷达的体扫观测, 构建了基于贝叶斯分类器和回波物理特征的质量控制方法: 首先人工提取每部雷达的降水回波、地物回波和晴空回波的反射率因子, 并基于提取的不同类型雷达回波, 分析了陕西省 7 部雷达不同类型雷达回波的反射率因子、反射率因子水平纹理、反射率因子沿径向的变化梯度、5 dBZ 回波高度、反射率垂直梯度的变化特征, 统计得到不同类型雷达回波对应特征量的概率密度分布函数; 然后基于统计的概率密度分布函数建立贝叶斯分类器, 对雷达回波进行初步识别; 在此基础上, 结合雷达回波物理特征设计了太阳尖峰识别方法、孤立点去除方法和回波空洞填补方法, 进一步识别雷达回波; 最后去除非气象回波, 得到质量控制后的降水回波数据。利用 2019 年 7-9 月陕西省 7 部雷达的体扫观测数据, 系统地分析了雷达质量控制方法的性能, 同目前陕西省业务运行的雷达数据质量控制结果进行了对比分析, 并使用 HSS 评分 (Heidke skill score) 评估了质量控制结果的准确率。结果表明, 研发的基于贝叶斯分类器和回波物理特征的雷达质量控制方法能够较好地识别降水回波和非降水回波, 识别效果优于业务使用结果, 7 部雷达数据质量控制结果的 HSS 评分均在 0.75 以上。

关键词 多普勒天气雷达 质量控制 贝叶斯分类器 回波类型识别

文章编号

中图分类号 P412.25

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2205.22003

Non-meteorological echoes identification method based on

收稿日期 2022-01-04; 网络预出版日期

作者简介 李巧, 女, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事雷达气象研究。Email: liqiao7762@igsrr.ac.cn

通讯作者 戚友存, 主要从事雷达气象研究, Email: youcun.qi@igsrr.ac.cn; 张哲, 主要从事雷达气象研究, Email: zhangzhe_ucas@163.com

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507505, 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 XDA2006040101, 中国科学院百人计划

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1507505), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA2006040101), Hundred Talent Program.

Bayesian classifier and echo physical characteristics using C-band radar and its performance

LI Qiao^{1,3}, QI Youcun^{1,3}, ZHANG Zhe², YANG Yi⁴, Zhu Ziwei^{1,3},
WANG Nan⁵, and HU Qiyuan⁵

1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China
4. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
5. Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China

Abstract Weather radars are usually interfered by non-meteorological factors during the observation, resulting in non-meteorological echoes, which will seriously affect the accuracy of the radar's quantitative precipitation estimation and the performance of short-term precipitation forecasts. This paper uses the scanning observations of C-band Doppler weather radars in Shaanxi (Xi'an, Yan'an, etc.), to construct a quality control method based on the Bayesian classifier and the physical characteristics of the echo: First, the reflectivity factors of precipitation echoes, ground clutter and clear-air echoes of each radar are manually extracted, and based on different types of radar echoes extracted, the reflectivity factor, the horizontal texture of the reflectivity factor, the gradient of the reflectivity factor along the radial direction, the height of 5 dBZ and the vertical gradient of the reflectivity of the different types of radar echoes from 7 radars in Shaanxi are analyzed. And the probability density distribution functions of corresponding characteristics of different types of radar echoes are also analyzed. Secondly, a Bayesian classifier is established based on the statistical probability density distribution function to initially identify the radar echo. Then, combined with the physical characteristics of the echo, the sun spike filter, the speckle filter and hole filling are designed to further identify the echo. Finally, non-meteorological echoes are removed to obtain precipitation echoes after quality control. Using the scanning observations data of 7 radars in Shaanxi Province from July to September 2019, the performance of the radar quality control method is systematically analyzed, and the results of the radar data quality control method of the provincial business operations were compared and analyzed, and the accuracy of the quality control results is evaluated using the HSS score (Heidke skill score). The results show that the developed radar quality control method based on Bayesian classifiers and echo physical characteristics can better identify precipitation echoes and non-precipitation echoes, the recognition effect is better than the business results, and the HSS scores of data quality control results for 7 radars are all above 0.75.

Keywords Doppler weather radar, quality control, Naïve Bayes classifier, echo type recognition

1 引言

多普勒天气雷达资料以其高时空分辨率的特点被应用于降水、冰雹等灾害性天气观测，短时临近预报、资料同化等各个方面，我国已经布设由两百多台多普勒天气雷达组成的观测网，其中东部主要以 S 波段雷达为主，中西部以 C 波段雷达为主。我国基于多普勒天气雷达的研究工作得到了大量的开展，使用天气雷达进行灾害性天气观测与分析(郑媛媛等, 2004; 孙虎林等, 2011; 张哲等, 2018)、定量降水估测(勾亚彬等, 2014; 李巧等, 2021; 张哲等, 2021)、短时临近预报(李建通等, 2011; 郭瀚阳等, 2019)、数值模式的资料同化(杨毅等, 2008; 杨雨轩等, 2018)等方面取得了不少成果。使用多普勒天气雷达开展以上工作，一个重要的基础是非气象回波的识别。这是因为在雷达探测时，天气雷达接收的回波信号除了气象回波，还有地物回波、海浪回波、生物回波、超折射回波、晴空回波等非气象回波。在利用雷达资料进行灾害性天气观测、定量降水估测、短时临近预报和资料同化时，这些非气象回波的存在会产生严重干扰和影响。研究如何识别这些非气象回波，并进一步根据实际需要进行去除，对我们更好地利用雷达资料进行观测和预报，提高气象服务水平和防灾减灾能力具有极其重要的意义。

一些学者基于天气回波的连续性特征对雷达数据质量控制方法展开了研究工作。Smith (1990) 根据降水的时空连续性，通过检查雷达回波的空间和时间连续性对雷达数据进行质量控制。Steiner and Smith (2002) 使用决策树，首先去除了低于 5 dBZ 的雷达回波，然后根据雷达回波的垂直范围进行判断，去除没有明显垂直范围的雷达回波，对保留的回波进一步检查，保留反射率空间变化较小的雷达回波，对空间变化较大的雷达回波检查反射率垂直梯度，剔除垂直梯度较大的雷达回波，能够有效地识别并去除地物回波，但对于大范围的晴空回波及雷达远距离处的降水回波难以准确识别。Zhang et al. (2004) 在 Steiner and Smith (2002) 的基础上，对反射率垂直梯度的计算进行了改进，用雷达回波实际的高度差代替了仰角差，减少了波束展宽的影响，有助于去除雷达近距离处的晴空回波和地物回波以及保留雷达远距离处的降水回波。与此同时，一些学者利用概率分析方法统计雷达回波特征，对雷达数据进行质量控制，以去除雷达非气象回波。Grecu and Krajewski (2000) 利用神经网络将雷达回波分为超折射回波和降水回波，从雷达资料中提取回波径向速度、速度变化系数、回波顶高、反射率因子等 9 个特征量用于区分两类回波，其中回波顶高是超折射回波和降水回波差异最明显的特征量。Krajewski and Vignal (2001) 使用大量的数据集对 Grecu and Krajewski (2000) 使用的神经网络方法进行了验证，对雷达数据及雨量计观测资料的分析表明，利用神经网络进行超折射回波和降水回波的识别是非常有效的。Lakshmanan et al. (2003) 选取了反射率因子、径向速度、谱宽等 22 个输入特征量使用神经网络方法对雷达数据进行了质量控制，能够较好地识别出大部分的雷达回波类型，尤其是在处理包含多种类型雷达回波的雷达数据时表现出色，但对一些弱降水回波存在误去除现象。Kessinger et al. (2003) 提出了采用模糊逻辑方法的雷达回波分类技术，从雷达资料的回波强度、径向速度和速度谱宽中提取特征量，用于区分降水回波、地物和海浪回波等不同类型的雷达回波，并

已投入业务使用，该方法能够有效识别降水回波和大面积的地物回波，然而当地物和降水回波混合时，难以识别出地物回波，且当晴空回波大于 10 dBZ 时也难以将其与降水回波分开。刘黎平等（2007）基于 Kessinger et al.（2003）的模糊逻辑方法，提出了分步式识别地物回波的方法，首先采用严格的标准设置判据和阈值，进行第一次识别地物回波和降水回波，然后调整已被识别为地物和非地物的临近区域回波点的判据，以减小地物回波的漏判和降水回波的误判。陈媛等（2007）对比分析了模糊逻辑方法、基于水平和垂直反射率结构、神经网络方法应用于雷达数据质量控制的优缺点：一定条件下，模糊逻辑方法可以有效区分超折射回波和地物回波，但当地物回波和降水回波同时存在时难以进行准确划分；基于水平和垂直反射率结构的质量控制方法能够成功识别地物回波、晴空回波等非降水回波，并且该方法只使用了反射率数据，方法相对简单，效率高，适合业务运用，但对于远距离处的超折射回波和浅层状云降水回波难以区分开；神经网络方法较模糊逻辑方法能更有效地识别多种类型回波，但是需要计算的特征量很多，方法耗时长，不适合实时性要求高的业务应用。目前国内对于雷达数据质量控制主要使用模糊逻辑方法，该方法不需要精确的数学模型，依赖于通过数据集得到的模糊控制规则，在给定阈值的情况下，对回波类型进行判断，阈值是由经验确定的。不同于模糊逻辑方法人为给定阈值，贝叶斯分类器是根据训练数据集得到不同特征量对应不同类型雷达回波的概率密度函数，通过计算比较各自的后验概率，以最大后验概率确定回波类型。有学者研究表明，贝叶斯分类器能够有效识别降水回波、地物回波、晴空回波等雷达回波类型。Peter et al.（2013）提出了基于朴素贝叶斯分类器（Naïve Bayes Classifier, NBC）的雷达回波分类技术，以识别降水回波和非降水回波。Rennie et al.（2015）在 Peter et al.（2013）的基础上，引入了回波顶高、多普勒径向速度和速度谱宽等特征量，统计了不同类型回波出现的先验概率，对澳大利亚天气雷达网的回波类型进行了有效识别，能够识别对流降水回波、层状云降水回波、昆虫回波等 12 种回波，并已投入业务使用，但是该方法本质还是通过统计的方法去识别回波类型，是逐像素点的判别方式，并没有考虑气象回波和非气象回波的空间连续性的差异而进行总体性把握，因此存在部分零星点状回波残留和把部分弱降水识别为非降水回波的现象。我国利用该方法的研究工作结论也类似，沈妍琰等（2020）分析了广东汕头 SA 波段雷达海浪回波和降水回波的回波特征，利用回波强度、径向速度和谱宽资料，借助贝叶斯分类器，对海浪回波进行了识别和去除，但同样存在误识别现象。上述研究表明，仅依靠贝叶斯分类器的概率统计结果进行雷达数据质量控制，仍存在一些不足：对于太阳尖峰回波以及一些零散的点状回波，难以进行准确识别并去除；对于一些弱降水回波存在将其识别为非降水回波的风险。

基于以上回波类型识别方法的优缺点，本文设计了一套基于朴素贝叶斯分类器和回波物理结构特征的雷达数据质量控制方法（以下简称本文方法），在利用统计方法识别回波类型的基础上，结合回波物理特征对回波进行进一步识别，识别并去除太阳尖峰回波和离散点状回波等非气象回波，同时解决弱降水回波被误识别为非降水回波的问题，得到质量控制后的

降水回波数据，利用陕西省 7 部多普勒天气雷达进行了方法的检验，以提高雷达观测数据质量。

2 资料

选取陕西省为研究区域，使用了西安、延安、榆林、商洛、安康、汉中、宝鸡 7 部 C 波段多普勒天气雷达基数据。陕西省 7 部雷达均为单偏振雷达，观测的物理量有雷达反射率因子 Z ，多普勒速度 V 和速度谱宽 W 。其最大探测距离为 400 km，径向分辨率为 500 m，方位角分辨率约为 1° ，体扫模式为 VCP21，在 6 分钟内完成 9 个不同仰角的扫描，9 个仰角分别是 0.5° ， 1.45° ， 2.4° ， 3.35° ， 4.3° ， 6.0° ， 9.9° ， 14.6° ， 19.5° 。2018 年 8 月陕西省出现了 3 次大范围强降雨过程，2019 年 7-9 月陕西省共出现了 9 次大范围降雨过程。由于这些过程出现了大范围降水，全省 7 部雷达可以从不同方位观测，精细地捕捉降水系统的时空演变特征，能够提供高质量的降水观测信息数据集。因此，选用 2018 年 8 月陕西省 7 部雷达的观测通过人工识别的方法对不同雷达回波类型（降水回波、地物回波、晴空回波）进行分类，建立高质量的数据训练集。然后，选用 2019 年 7-9 月的降水个例进行了雷达数据质量控制结果分析，并和陕西省现在业务使用的雷达数据质量控制结果进行了效果对比。陕西省目前业务使用的雷达数据质量控制方法为模糊逻辑方法。

3 基于贝叶斯分类器和回波物理特征的非气象回波识别方法

设计的非气象回波识别方法以朴素贝叶斯分类器识别雷达回波类型为基础，结合雷达回波的水平垂直特征对太阳尖峰回波和孤立点回波进行去除，并对因为误识别产生的回波空洞进行填补，最终得到去除了非气象回波的质控后雷达数据。图 1 是本文设计的非气象回波识别方法流程图。

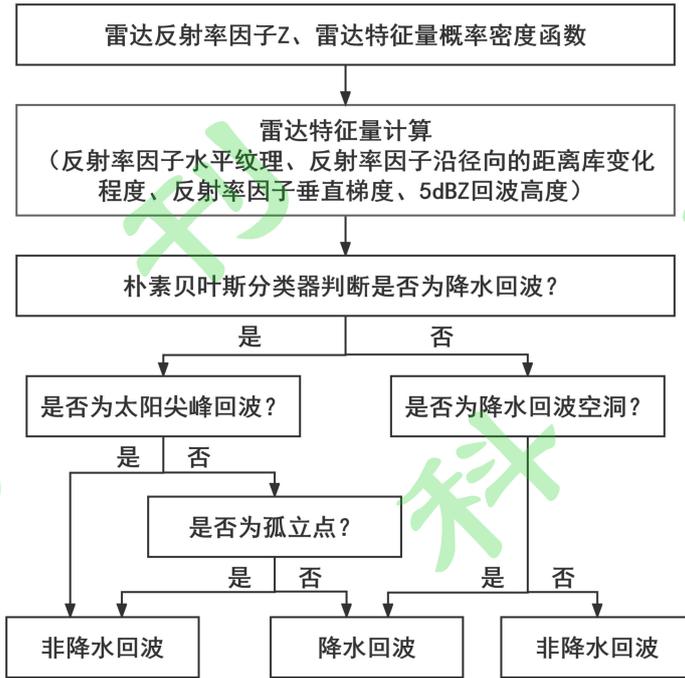


图 1 非气象回波识别方法流程图

Fig. 1 Flowchart of non-meteorological echo identification method

3.1 朴素贝叶斯分类器

贝叶斯分类方法基于贝叶斯定理，通过计算给定样本 x_1, \dots, x_n 在类别 c 上的后验概率，然后将样本判定为最大后验概率所对应的类别。条件概率可由下式计算得到：

$$P(c|x_1, \dots, x_n) = \frac{P(x_1, \dots, x_n|c)P(c)}{P(x_1, \dots, x_n)} \quad \#(1)$$

其中， $P(x_1, \dots, x_n|c)$ 为 x_i 在类别 c 中的条件概率分布(Probability Distribution Functions, PDFs)， $P(c)$ 为类别 c 的先验概率， $P(x_1, \dots, x_n)$ 为获得样本 x_i 的概率。公式(1)中的分母对所有类别都是常数，故可作为比例常数，忽略不计。

朴素贝叶斯分类器是贝叶斯分类器中应用最为广泛的一个版本，其假设样本 x_i 是条件独立的，因此有：

$$P(c|x_1, \dots, x_n) \propto P(c) \prod_{i=1}^n P(x_i|c) \quad \#(2)$$

在建立朴素贝叶斯分类器时，将回波划分为降水回波、地物回波、晴空回波三种类型，假设每种类型回波的先验概率相等，并结合前人研究(Peter et al., 2013; Rennie et al., 2015)，选择了反射率因子 Z 以及与 Z 有关的四个物理量作为朴素贝叶斯分类器的特征量：反射率因子水平纹理 $TdBZ$ ，反射率因子沿径向的变化梯度 $SPIN$ ，5 dBZ回波高度 $ETOP_5$ ，反射率因子垂直梯度 $vgdBZ$ ，其定义分别如下：

(1) 反射率因子 Z (单位: dBZ)

雷达反射率因子 Z 是雷达测量波束内所有的粒子贡献，即单位体积内所有降水粒子直

径的六次方之和，单位为： mm^6/m^3 ，在满足瑞利散射条件时：

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD \quad \#(3)$$

式中， D 为粒子直径， $N(D)$ 为粒子的滴谱分布。在实际应用中，常用 Z 的分贝数表示反射率因子（ $10 \lg Z$ ）。

(2) 反射率因子水平纹理 $TdBZ$ （单位：dBZ）

反射率水平纹理 $TdBZ$ 反映了反射率因子在水平方向上的局地变化大小， $TdBZ$ 的计算参考了 Kessinger et al. (2003) 和 Hubbert et al. (2009) 使用的方法，但在其基础上进行了开方处理：

$$TdBZ = \left[\frac{\sum_i^M \sum_j^N (Z_{i,j} - Z_{i-1,j})^2}{M \times N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \#(4)$$

式中， M 为雷达径向距离库数量， N 为雷达波束数量，参数设置 $M = 3$ ， $N = 3$ 。降水回波和片状晴空回波由于连续性和均一性较好，因此其 $TdBZ$ 一般表现为较小的值，而地物回波和点状晴空回波分布不均匀，其 $TdBZ$ 一般较高。

(3) 反射率因子沿径向的变化梯度 $SPIN$

$SPIN$ 反映了局地范围内反射率因子沿径向方向变化的一致性，其计算步骤如下：首先对给定距离库进行判断，当该距离库的反射率因子 Z 满足公式（5）（Hubbert et al., 2009）的两个条件时，对该距离库进行标记：

$$\begin{cases} \text{sign}\{Z_i - Z_{i-1}\} = -\text{sign}\{Z_{i+1} - Z_i\} \\ \frac{|Z_i - Z_{i-1}| + |Z_{i+1} - Z_i|}{2} > Z_{SPIN} \end{cases} \quad \#(5)$$

然后计算 $SPIN$ ， $SPIN$ 为 $M \times N$ 范围内所有标记距离库的数目与 $M \times N$ 的比值，参数设置 $M = 5$ ， $N = 5$ ， Z_{SPIN} 为 2.5 dBZ。降水回波和片状晴空回波由于连续性较好，其 $SPIN$ 一般表现为较小的值，而地物回波和点状晴空回波的 $SPIN$ 则一般表现为较大的值。

(4) 5 dBZ 回波高度 $ETOP_5$ （单位：km）

5 dBZ 回波高度 $ETOP_5$ 定义为 5 dBZ 的反射率因子被探测到时雷达电磁波的波束中心的最高高度。波束中心高度基于等效地球半径模型计算得到（Langston, et al., 2007; Zhang, et al., 2005）：

$$h_t = (R_e^2 + r^2 + 2R_e r \sin t)^{\frac{1}{2}} - R_e \quad \#(6)$$

$$R_e = \frac{4}{3} R_0 \quad \#(7)$$

式中： h_t 为仰角为 t （单位：度）的雷达电磁波波束中心相对于雷达站点的高度， r 为电磁波的传播距离， R_0 为地球半径， R_e 为等效地球半径。降水系统在垂直方向上具有连续性，降水回波的 $ETOP_5$ 一般在 4 km 以上，一些强对流降水回波的 $ETOP_5$ 甚至可以达到 10 km，而

非降水回波在垂直方向上不具备连续性，其 $ETOP_5$ 一般较小。

(5) 反射率因子垂直梯度 $vgdBZ$ (单位: $dBZ \cdot km^{-1}$)

反射率因子垂直梯度 $vgdBZ$ 反映了反射率因子在垂直方向上的变化大小，可由下式计算得到 (Zhang 等, 2004):

$$vgdBZ_k = (Z_k - Z_{k+1}) / (h_{k+1} - h_k) \quad (8)$$

式中, h_k 为给定距离库在第 k 层仰角的波束中心高度，可由公式 (6) 计算得到。因为降水系统在垂直方向上的连续性，上下两层仰角的反射率因子变化相对较小，因此降水回波的 $vgdBZ$ 一般表现为较小的值，片状晴空回波在垂直方向上的变化小，因此其 $vgdBZ$ 一般也较低，而地物回波的 $vgdBZ$ 则一般表现为大值。

利用朴素贝叶斯分类器对雷达回波类型进行分类的步骤如下，首先对雷达回波进行人工分类工作，分析不同类型雷达回波的特征量差异。图 2 给出了 2018 年 8 月 6 日 22:37 UTC 榆林雷达 0.5° 仰角回波类型人工分类结果 (图 2a) 以及对应的 Z (图 2b), $TdBZ$ (图 2c), $SPIN$ (图 2d), $vgdBZ$ (图 2e) 和 $ETOP_5$ (图 2f)。从图 2b 可以看到，在此次降水过程中，榆林雷达 $270^\circ \sim 315^\circ$ 方位角 $170 \sim 270$ km 范围内为对流降水， $330^\circ \sim 20^\circ$ 方位角 $150 \sim 300$ km 为零散对流降水， $60^\circ \sim 150^\circ$ 方位角 $50 \sim 250$ km 范围内主要为层状云降水，而非降水回波中的地物回波则主要分布在榆林雷达 30 km 范围内，晴空回波主要分布在榆林雷达 $150^\circ \sim 280^\circ$ 方位角， $40 \sim 140$ km 范围内。层状云降水回波呈片状分布，其反射率因子大于 10 dBZ，有明显的强度中心；回波整体局地变化较小且沿径向连续性较好， $TdBZ$ 和 $SPIN$ 较低，分别在 2 dBZ 和 10% 以下；回波在垂直方向上具有连续性， $vgdBZ$ 较小，基本在 5 dBZ \cdot km $^{-1}$ 以下， $ETOP_5$ 则较高，在 $6 \sim 9$ km 左右。对流降水回波的反射率因子更强，在 45 dBZ 以上；回波的局地变化相对于层状云降水回波较大，沿径向连续性也较弱，因此 $TdBZ$ 和 $SPIN$ 的值相对层状云降水回波分布范围更大，分别在 3 dBZ 和 20% 以下；对流降水在垂直方向上发展旺盛，连续性较好，因此 $vgdBZ$ 较小， $ETOP_5$ 较层状云降水回波更高，可以达到 10 km。片状晴空回波的反射率因子主要在 $0 \sim 15$ dBZ 范围内；局地变化特征同层状云降水相似， $SPIN$ 和 $TdBZ$ 较小；回波在垂直方向上连续性不强，且一般出现在低仰角，故 $vgdBZ$ 表现为高值， $ETOP_5$ 表现为低值。地物回波反射率因子较强，一般为离散的点状分布；由于整体一致性较差， $TdBZ$ 和 $SPIN$ 一般表现为高值；地物回波在垂直方向上不具备连续性，且一般出现在低仰角，同晴空回波相似，因此 $vgdBZ$ 也表现为高值， $ETOP_5$ 主要为低值。

整体来看，降水回波和非降水回波在特征量 Z 和 $ETOP_5$ 上的差别比较明显，降水回波的 Z 和 $ETOP_5$ 值都较高；对于特征量 $vgdBZ$ ，降水回波主要表现为低值，地物回波和片状晴空回波则主要为高值；对于特征量 $TdBZ$ 和 $SPIN$ ，片状晴空回波和降水回波的分布特征较为相似，都表现为低值，地物回波则相对较高。

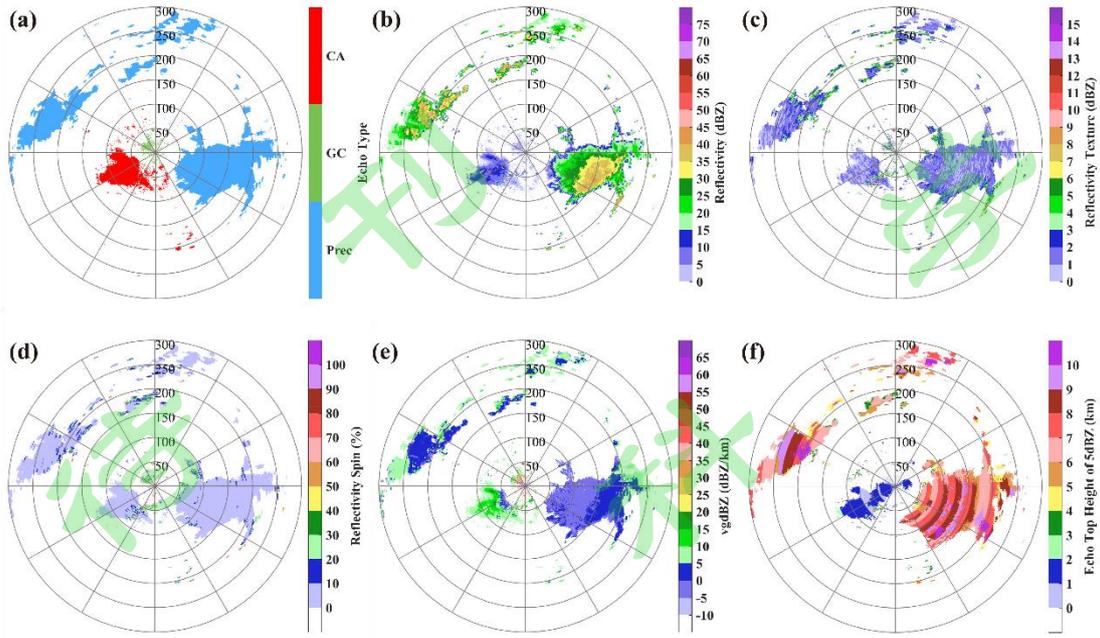


图 2 2018 年 8 月 6 日 22:37 UTC 榆林雷达 0.5° 仰角 (a) 回波类型人工分类结果 (CA、GC、Prec 分别表示晴空回波、地物回波和降水回波)、(b) Z、(c) TdBZ、(d) SPIN、(e) vgdBZ、(f) $ETOP_5$
 Fig. 2 (a) Echo types obtained by manual classification (CA, GC, and Prec represent clear-air echoes, ground clutter, and precipitation echoes, respectively), (b) Z, (c) TdBZ, (d) SPIN, (e) vgdBZ, (f) $ETOP_5$ from 0.5° tilt of Yulin radar at 22:37 UTC 6 Aug 2018

随后，基于人工分类得到的回波类型数据，统计不同类型回波对应各特征量的概率密度分布函数。使用正态分布（公式 9）、对数正态分布（公式 10）、指数分布（公式 11）三种分布函数分别对不同类型回波的特征量进行拟合，选择最贴近特征量分布状态的概率密度分布函数。

$$f_{normal}(x) = a * \exp\left[-\frac{(x - b)^2}{2c^2}\right] \#(9)$$

$$f_{log-normal}(x) = \frac{a}{x} * \exp\left[-\frac{(\ln x - b)^2}{2c^2}\right] \#(10)$$

$$f_{exponential}(x) = a * \exp(-b * x) \#(11)$$

图 3 给出了宝鸡降水回波、地物回波和晴空回波的特征量 Z（图 3a）、TdBZ（图 3b）、SPIN（图 3c）、vgdBZ（图 3d）和 $ETOP_5$ （图 3e）的概率密度分布以及所使用的分布函数类型，表 1 给出了对应的参数取值。可以看到，宝鸡降水回波的反射率因子主要集中在 5~30 dBZ 范围内，而地物回波和晴空回波的反射率因子主要集中在 0~15 dBZ 范围内；降水回波的 SPIN 值主要分布在 0%~35% 范围内，而地物回波和晴空回波的 SPIN 值分布特征较为相似，主要分布在 0%~50% 范围内；降水回波的 vgdBZ 分布范围较窄，主要集中在 -10~20 dBZ · km⁻¹ 范围内，而晴空回波和地物回波分布范围较宽，集中在 -5~40 dBZ · km⁻¹ 范围内；降水回波的 $ETOP_5$ 明显高于地物回波和晴空回波。降水回波和非降水回波的 Z、SPIN、vgdBZ 和 $ETOP_5$ 分布特征有明显差别。宝鸡降水回波和非降水回波的 TdBZ 分布情况较为相似，主

要分布在 0~5 dBZ 范围内，从 $TdBZ$ 看较难区分出降水回波和非降水回波。从这些特征量的分布来看，宝鸡降水回波和非降水回波在很多区域是重叠的，如在 $SPIN$ 值较大的区域也有相当多的降水回波。因此，利用单个特征量难以有效识别雷达回波类型，需要结合多个特征量进行识别。

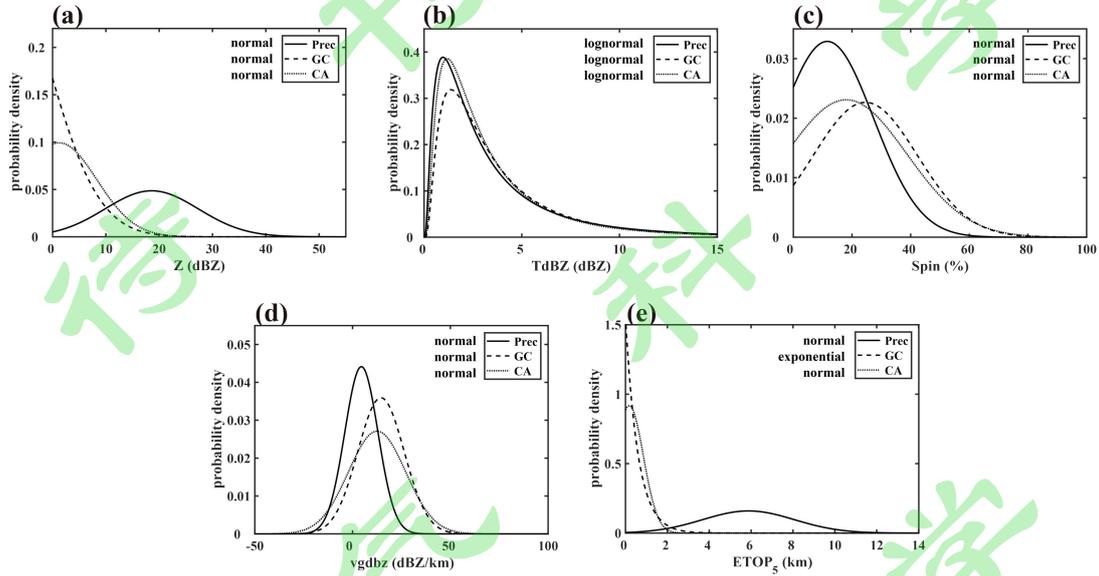


图 3 宝鸡雷达特征量 (a) Z 、(b) $TdBZ$ 、(c) $SPIN$ 、(d) $vgdBZ$ 、(e) $ETOP_5$ 分别对应三种回波类型的概率密度分布函数（实线表示降水回波，虚线表示地物回波，点线表示晴空回波）

Fig. 3 Probability density distribution functions of (a) Z , (b) $TdBZ$, (c) $SPIN$, (d) $vgdBZ$, (e) $ETOP_5$ of Baoji radar for different echo types. (Solid, dash, and dot line represent precipitation echoes, ground clutter, and clear-air echoes, respectively)

表 1 宝鸡雷达特征量使用的概率密度分布函数类型及参数取值

Table 1 The type of probability density distribution function and the value of the parameter used of Baoji radar.

特征量	回波类型	函数类型	参数		
			a	b	c
Z	降水回波	正态分布	0.0486	18.5868	8.7563
	地物回波	正态分布	0.3224	-11.2573	9.8264
	晴空回波	正态分布	0.0993	1.2326	7.0787
TdBZ	降水回波	对数正态分布	0.5934	0.8929	0.9692
	地物回波	对数正态分布	0.6226	1.0292	0.8479
	晴空回波	对数正态分布	0.6584	0.9114	0.8682
SPIN	降水回波	正态分布	0.0329	11.554	15.8257
	地物回波	正态分布	0.0227	24.5463	17.7486
	晴空回波	正态分布	0.0231	18.0359	20.6245
vgdBZ	降水回波	正态分布	0.0443	4.4970	8.5116
	地物回波	正态分布	0.0359	14.5174	11.8497
	晴空回波	正态分布	0.0271	12.5159	14.5941
ETOP ₅	降水回波	正态分布	0.1595	5.8649	-2.1915
	地物回波	指数分布	1.5219	1.6670	-
	晴空回波	正态分布	0.9166	0.1706	0.6735

最后，基于统计的概率密度分布函数建立朴素贝叶斯分类器，对雷达回波类型进行初步识别，将其划分为降水回波、地物回波和晴空回波。

下面分别用一次层状云降水为主的降水过程和一次以对流性降水为主的降水过程来分析基于朴素贝叶斯分类器的初步雷达回波分类结果。图 4 给出了 2019 年 7 月 21 日 14:11 UTC 宝鸡一次层状云降水过程的原始反射率因子（图 4a）和朴素贝叶斯分类器处理后的降水回波（图 4b）和回波类型识别结果（图 4c）。可以看到，在宝鸡雷达东南方、西南方及西北方向均为层状云降水。这些层状云降水回波基本被准确识别并保留，特别是雷达 $210^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 方位角 50 km 内的一些较弱的与地物回波混合的降水回波，也能被识别并保留。非降水回波中，宝鸡雷达 $330^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 方位角 20 km 处和 $60^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 方位角 20~50 km 处的地物回波，以及雷达 $290^{\circ} \sim 340^{\circ}$ 方位角 80 km 内的一些晴空回波，也基本能够被识别并去除。但需要注意的是，降水回波的外沿被误判为非降水回波去除，主要原因是该区域的回波强度较弱，且垂直变化较大。

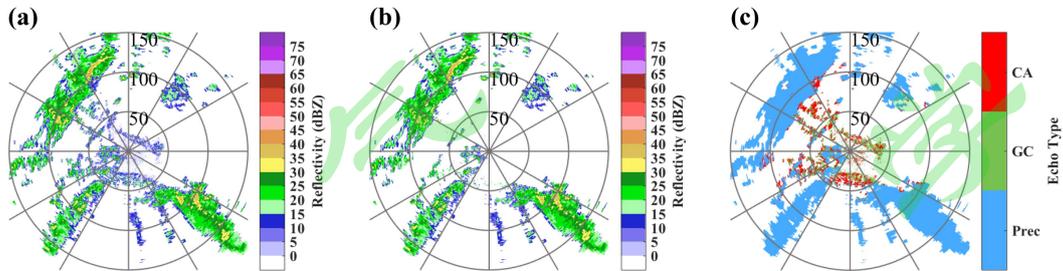


图 4 2019 年 7 月 21 日 14:11 UTC 宝鸡雷达 0.5° 仰角 (a) 原始反射率因子、(b) 经 NBC 质控后的降水回波、(c) NBC 回波类型分类结果

Fig. 4 (a) Original reflectivity, (b) precipitation echoes after NBC quality control, (c) echo type obtained by NBC from 0.5° tilt of Baoji radar at 14:11 UTC 21 July 2019

图 5 给出了 2019 年 7 月 11 日 08:14 UTC 延安一次零散对流降水过程的原始反射率因子（图 5a）、朴素贝叶斯分类器处理后的降水回波（图 5b）和回波类型识别结果（图 5c）。从图中可以看到，在延安雷达附近均为零散的对流降水，在雷达 $150^{\circ} \sim 300^{\circ}$ 方位角 5 km 及 20 km 处有明显的对流单体，而在雷达其他方位角上 30 km 范围内都表现为晴空回波。朴素贝叶斯分类器准确识别并保留对流降水回波，特别是距离雷达较近的两个对流单体，也能基本识别并保留；而雷达附近的晴空回波，也能识别并剔除。但一些小的降水系统，在低仰角被误去除，主要原因是回波垂直变化较大。

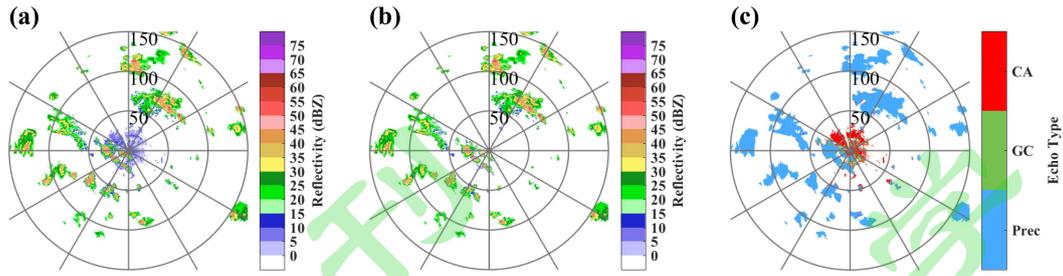


图 5 2019 年 7 月 11 日 08:14 UTC 延安雷达 1.45° 仰角 (a) 原始反射率因子、(b) 经 NBC 质控后的降水回波、(c) NBC 回波类型分类结果

Fig. 5 (a) Original reflectivity, (b) precipitation echoes after NBC, (c) echo type obtained by NBC from 1.45° tilt of Yan'an radar at 08:14 UTC 11 July 2019

通过分析以上两个个例可以发现, 仅依靠朴素贝叶斯分类器识别雷达回波类型会存在误识别现象, 主要表现为弱降水回波被误识别为非气象回波。气象回波的一个特征是回波的连续性和一致性较强, 而非气象回波连续性一般比较弱, 多呈离散状分布。因此, 在朴素贝叶斯分类器的基础上, 结合雷达回波的水平 and 垂直特征设计了太阳尖峰回波识别去除、孤立点去除、回波空洞填补等模块, 以对误识别的雷达回波进行处理。

3.2 太阳尖峰回波识别与去除

太阳尖峰回波是由太阳发出的微波产生的回波, 当雷达天线指向太阳或在其附近时, 太阳会对雷达信号产生干扰, 此时会有一到两束雷达电磁波探测到回波 (Rauber and Nesbitt, 2018)。太阳尖峰回波强度较弱, 常出现于晴朗天气的日出和日落时。太阳尖峰回波的空间特征较为一致, 表现为 1 到 2 个连续方位角波束在整个径向上基本都探测到回波, 但是在同一时刻只出现在某一特定仰角, 且基本都为低仰角, 因此在垂直方向上缺乏连续性。Tang et al. (2014) 基于太阳尖峰回波的空间特征设计了太阳尖峰回波识别算法, 该方法能够有效去除晴朗天空下的太阳尖峰回波, 但当降水回波和太阳尖峰回波混合时, 难以对其进行有效识别。

基于 Tang et al. (2014) 的太阳尖峰回波识别方法进行了改进, 考虑了反射率因子在垂直方向上的连续性。太阳尖峰回波识别方法 (Sun Spike Filter, SSF) 思路为: 当 0.5° 仰角该径向上反射率因子 $Z > 0$ dBZ 的距离库数目 N_1 大于整个径向距离库总数目的 70% 时, 标记该径向为太阳尖峰回波; 然后对该径向上每个距离库 0.5° 仰角和 1.45° 仰角的反射率因子 Z 进行比较, 若 $Z_{0.5^\circ} > 0$ dBZ 且 $Z_{1.45^\circ} < 0$ dBZ, 认为该距离库为非降水回波, 进行剔除。

图 6 给出了 2019 年 7 月 10 日 05:28 UTC 西安一次对流降水过程的原始反射率因子(图 6a)、经朴素贝叶斯分类器处理后的降水回波 (图 6b)、和经太阳尖峰回波识别方法处理后的降水回波 (图 6c)。可以看到, 在西安雷达 15° ~50° 方位角 140~250 km 范围内及 80° ~110° 方位角 100~200 km 为零散对流降水, 而在西安雷达 35° ~40° 方位角则有明显的太阳尖峰回波, 回波从雷达处延伸至 300 km 以外 (图 6a)。在此次降水过程中, 太阳尖峰回波与降水回波在 150~200 km 处混合在一起。朴素贝叶斯分类器能够较为准确地识别大部分

降水回波和雷达附近的地物回波和晴空回波，但仅能识别出雷达 150 km 范围内独立的太阳尖峰回波，150 km 以外与对流降水混合的太阳尖峰回波则基本不能被识别出来（图 6b）。太阳尖峰回波识别方法则准确识别去除了太阳尖峰回波，将与其混合的对流降水回波比较完整地保留下来（图 6c）。

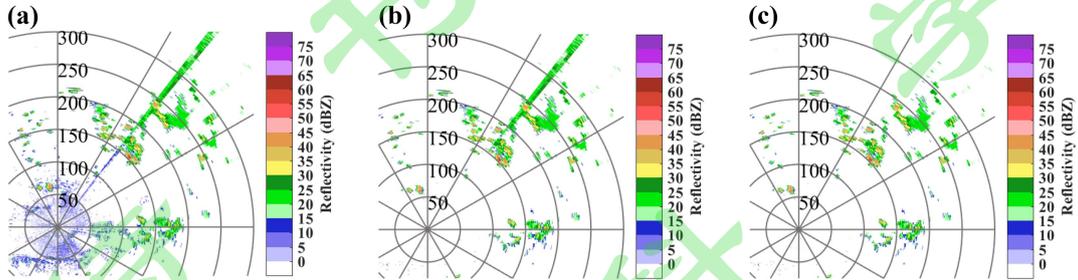


图 6 2019 年 7 月 10 日 05: 28 UTC 西安雷达 0.5°仰角 (a) 原始反射率因子、(b) 经 NBC 处理后的降水回波、(c) 经 SSF 处理后的降水回波

Fig. 6 (a) Original reflectivity factor, (b) precipitation echoes after NBC, (c) precipitation echoes after SSF from 0.5° tilt of Baoji radar at 05:28 UTC 10 July 2019

3.3 孤立点去除

雷达回波图上往往会出现一些强度较大的、零散的回波噪声，这些回波可能为鸟类回波或是电磁干扰回波，其特征量分布不完全符合统计出的两种非降水回波特征，因此难以通过朴素贝叶斯分类器识别并去除。但这些回波通常以点或微型区域存在，而降水回波则是连续的较大的区域。因此使用区域增长方法设计了孤立点去除方法（Speckle Filter, SF），将雷达回波划分为不同的回波区，通过计算这些回波区的面积与给定阈值进行比较，判断出孤立回波并将其去除。

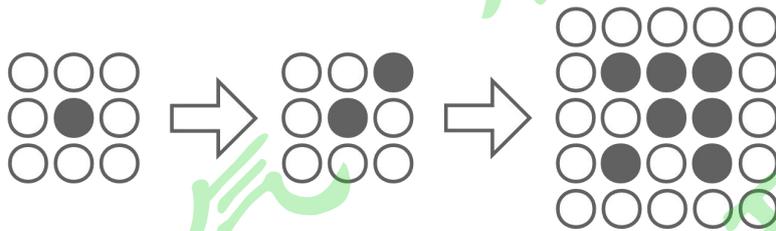


图 7 区域增长方法示意图，其中灰色格点为 $Z > 0$ dBZ 的距离库，灰圈格点为该回波点周边距离库

Fig. 7 Schematic diagram of the region growing algorithm, where the gray grid point is the distance library with $Z > 0$ dBZ, and the gray circle grid point is the distance library around the echo point

图 7 为区域增长方法示意图，区域增长方法思路如下：若某个距离库的反射率因子 $Z > 0$ dBZ，则以该距离库为中心，寻找 3×3 范围内的距离库，若其周边有满足同样条件的距离库，则继续以其为中心，寻找其周围 3×3 范围内的距离库，直到找到所有 $Z > 0$ dBZ 的距离库，将这些距离库判断为同一回波区。

对雷达的体扫数据重复这样的过程，找到 n 个不同的回波区，计算每个回波区的面积：

$$S_{area} = \sum_{k=1}^{num} S_k \#(12)$$

$$S_k = \frac{n\pi}{360^\circ} (range_k^2 - range_{k-1}^2) \#(13)$$

其中, S_k 为回波区内第 k 个距离库的面积, $range_k$ 为该距离库到雷达的距离(单位: km), n 为雷达方位角分辨率(单位: $^\circ$), S_{area} 为该回波区的面积, 当 S_{area} 小于给定阈值(设置为 10 km^2)时, 该区域内的回波被判断为孤立点噪声去除。

3.4 回波空洞填补

在利用朴素贝叶斯分类器识别雷达回波类型时, 降水回波边缘等区域由于回波强度较弱, 其特征量分布与非降水回波相似, 因此常被误识别为非降水回波而去除。这些误去除的降水回波一般和地物回波、晴空回波混合, 地物回波 vgdBZ 较大, 而晴空回波 vgdBZ 较小, 但回波强度较弱, 地物回波、晴空回波与降水回波的物理特征有明显差别。为找回这些误去除的降水回波, 设计了回波空洞填补方法(Hole Filling, HF), 通过反射率因子水平连续性和垂直梯度检查进行判断:

(1) 水平连续性判断方法为, 以前面方法中判断为降水回波的距离库为中心, 采用区域增长法, 查找其周围 3×3 的距离库, 若有被剔除的回波 Z_0 , 记录以该距离库为中心, 周围 3×3 范围内的反射率因子并求均值 \bar{Z} , 若该距离库周围超过 50% 的距离库被判断为降水回波, 并且 $Z_0 > \bar{Z} \times 25\%$, 则该点通过水平连续性检查, 对其进行垂直梯度检查;

(2) 垂直梯度检查方法为, 当给定距离库的反射率因子垂直梯度 vgdBZ 小于给定阈值(设置为 $50 \text{ dBZ} \cdot \text{km}^{-1}$) 时, 认为该距离库通过垂直梯度检查, 将其找回。

以该距离库为中心, 继续查找周围 3×3 的距离库, 直到找到所有满足条件的距离库, 则回波空洞填补完成。

图 8 给出了 2019 年 7 月 21 日 09:38 UTC 安康一次对流降水过程的原始反射率因子(图 8a)、朴素贝叶斯分类器处理后的降水回波(图 8b)、质量控制后的降水回波(图 8c)。可以看到, 安康雷达 $80^\circ \sim 150^\circ$ 方位角 $10 \sim 100 \text{ km}$ 范围内为对流降水, 安康雷达 $30^\circ \sim 150^\circ$ 方位角 20 km 范围内及 $210^\circ \sim 360^\circ$ 方位角 40 km 范围内为晴空回波(图 8a)。经朴素贝叶斯分类器处理后, 安康雷达东部的对流降水回波基本能够被识别出来, 但对流降水中部分回波被识别为晴空回波并去除, 产生了回波空洞; 同时, 安康雷达 40 km 范围内出现的晴空回波也基本能够被识别并去除, 但仍有一些零散的弱回波存在(图 8b)。而孤立点去除方法和回波空洞填补方法处理后, 对流降水中的回波空洞被成功填补上, 得到较为完整的对流降水系统; 并且安康雷达 70 km 范围内残留的一些噪声也被成功去除(图 8c)。需要注意的是, 在此次过程中, 有较强的晴空回波和对流降水混合, 而朴素贝叶斯分类器成功识别出晴空回波和降水回波, 并且回波空洞填补方法也准确判断出了降水回波边缘的晴空回波不予找回, 表明该质量控制方法能够较好地区分降水回波和非降水回波。

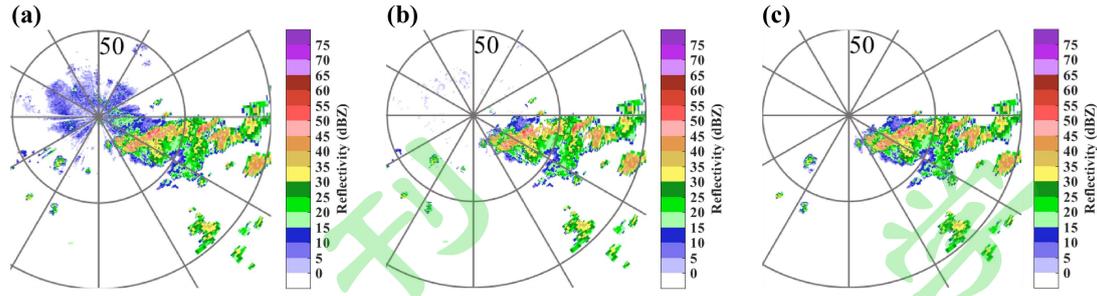


图 8 2019 年 7 月 21 日 09:38 UTC 安康雷达 2.4°仰角 (a) 原始反射率因子、(b) 经 NBC 处理后的降水回波、(c) 经本文方法处理后的降水回波

Fig. 8 (a) Original reflectivity factor, (b) precipitation echoes after NBC, (c) precipitation echoes after method in this paper from 2.4° tilt of Ankang radar at 09:38 UTC 21 July 2019

4 非气象回波识别效果检验

为对本文方法整体识别效果进行验证，将使用本文方法识别出的非气象回波进行去除，保留经过质量控制的降水回波，得到最终的质量控制结果，并与原始反射率因子和目前业务使用的质量控制结果进行了对比分析。图 9 给出了 2019 年 7 月 28 日 18:04 UTC 西安一次降水过程的原始反射率因子（图 9a）、陕西省业务使用的质量控制结果（图 9b）和本文方法质量控制结果（图 9c）。可以看到，在西安雷达北部及西南方向为范围较大的对流性降水，300°~330°方位角 30 km 处有小的对流单体，东南方向为层状云降水，降水主要集中在西安雷达 30 km 外，雷达附近的地物回波和晴空回波较为明显，0.5°仰角 40°方位角附近有明显的太阳尖峰回波（图 9a）。本文方法能够比较准确地识别并保留降水回波，西安雷达附近的地物回波、晴空回波以及太阳尖峰回波也基本被去除。需要注意的是，陕西省业务使用的质量控制结果显示，西安雷达 300°~330°方位角 30 km 处的对流单体在 0.5°仰角上被错误识别为非气象回波，进而被完全去除，而本文方法能够较为完整地识别并保留该对流单体；对于西安雷达东南方向的层状云降水，本文方法和陕西省业务使用的质量控制结果都能识别出降水系统，但陕西省业务使用的质量控制结果将降水系统中 $Z < 15$ dBZ 的回波全部去除，影响了降水系统的完整性，而本文方法能够准确识别并保留降水系统边缘反射率因子较弱的回波。

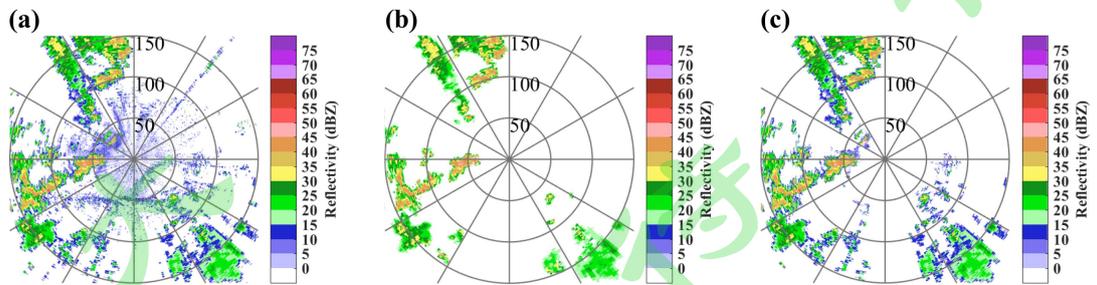


图 9 2019 年 7 月 28 日 18:04 UTC 西安雷达 0.5°仰角 (a) 原始反射率因子、(b) 陕西省业务使用的质量控制结果、(c) 本文方法质量控制结果

Fig. 9 (a) Original reflectivity, (b) precipitation echoes of Shaanxi business operation, (c) precipitation echoes

after method in this paper from 0.5° tilt of Xi'an radar at 18:04 UTC 28 July 2019

为系统性验证本文方法的质量控制效果，对陕西省 2019 年 8 月 7 部雷达的回波类型进行了人工分类工作，将雷达回波分为降水回波和非降水回波，并将本文方法的质量控制结果与人工分类得到的回波类型结果进行比较，利用 HSS 评分（Heidke skill score）进行了定量分析，HSS 的计算公式如下：

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)} \quad \#(14)$$

公式（14）中，a、b、c、d 所代表的事件如表 2 表 1 表 2 所示，
表 2 回波类型事件

Table 2 The echo type events

真实情况 (人工分类结果)	质量控制结果	
	降水回波	非降水回波
降水回波	a	c
非降水回波	b	d

HSS 评分为多分类事件的正确率的技巧评分，表示除去随机偶然事件后预报的准确率，阈值范围为 $-\infty \sim 1$ ，理想的预报 $HSS=1$ ，数值越接近 1，说明准确率越高。

图 10 给出了陕西省 7 部雷达数据质量控制结果的 HSS 评分结果，7 部雷达使用本文方法得到的质量控制结果的评分结果均在 0.75 以上，整体识别降水回波的准确率较高。

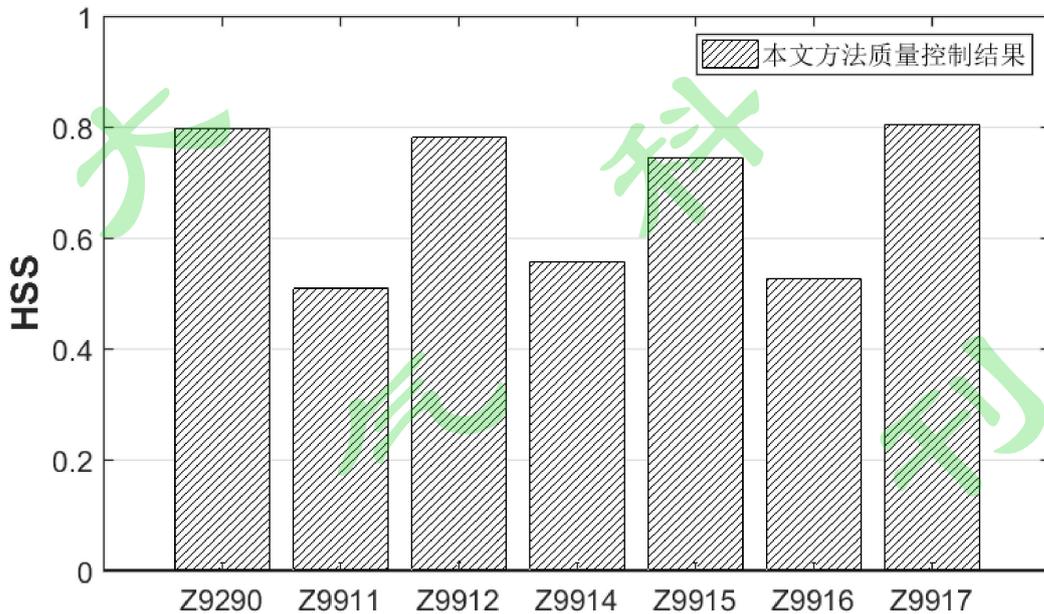


图 10 陕西省 7 部雷达数据质量控制结果 HSS 评分

Fig. 10 The HSS score of the quality control results for 7 radars in Shaanxi Province

5 结论与讨论

基于陕西省 7 部 C 波段多普勒天气雷达的探测资料，人工提取每部雷达的降水回波、地物回波和晴空回波的反射率因子，并分析了陕西省 7 部雷达不同类型雷达回波的反射率因

子、反射率因子水平纹理、反射率因子沿径向的变化梯度、5 dBZ 回波高度、反射率垂直梯度的变化特征,统计了不同类型雷达回波对应特征量的概率密度分布函数。基于上述特征值的特征分析,和统计得到各特征值的概率密度分布函数,提出了一种基于朴素贝叶斯分类器和回波物理特征的雷达数据质量控制方法,在利用朴素贝叶斯分类器识别雷达回波类型的基础上,结合雷达回波的水平 and 垂直特征,通过太阳尖峰回波识别、孤立点去除和回波空洞填补等方法,识别并去除非气象回波,对雷达数据进行质量控制,得到以下结论:

(1) 基于统计的雷达特征量的概率密度分布函数建立朴素贝叶斯分类器,能够较好地识别出降水回波和非降水回波。但仅基于统计方法,并不能完全准确地识别回波类型,需要引入回波的整体物理结构特征来进一步判断回波类型。

(2) 基于太阳尖峰回波的物理特征,设计了太阳尖峰回波识别方法,该方法能够有效识别并去除和降水回波混合的太阳尖峰回波,保留降水回波。

(3) 基于孤立点回波的物理特征,设计了孤立点去除方法,该方法能够有效去除未被朴素贝叶斯分类器识别出的零散非降水回波;基于降水回波的水平连续性和垂直梯度,设计了回波空洞填补方法,该方法能够找回被误去除的降水回波,保留降水系统的完整性。

(4) 设计的雷达数据质量控制方法能够较好地识别出降水回波,较陕西省业务使用的质量控制结果,能更为完整地保留降水信息,尤其对于雷达近距离处的对流单体,能够更为准确地识别并保留;从 HSS 评分看,本文方法质量控制结果稳定,识别降水回波的准确率较高。

基于贝叶斯分类器和回波物理特征的质量控制方法能够较好地识别出降水回波和非降水回波,方法计算量小,便于实现,其准确性和稳定性主要依赖于统计得到的概率密度分布函数,针对不同雷达可以统计出该雷达的概率密度分布函数,从而构建出适合于不同雷达的质量控制方法,得到更好的质量控制结果。

在利用选取的特征量进行回波类型识别时,由于降水回波和非降水回波的一些特征量分布特征相似,存在误识别现象,在今后的研究中考虑针对双偏振雷达,引入更多的偏振参量建立朴素贝叶斯分类器,以得到更好的识别效果。

参考文献 (References)

- 陈媛, 陈江民, 毛紫阳, 等. 2007. 天气雷达反射率基数据质量控制的几种算法 [J]. 气象与减灾研究, 30(3): 48-51. Chen Yuan, Chen Jiangmin, Mao Ziyang, et al. 2007. Algorithms on quality control of weather radar reflectivity base-data [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 30(3): 48-51.
- 勾亚彬, 刘黎平, 杨杰, 等. 2014. 基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估 [J]. 气象学报, 72(4): 731-748. Gou Yabin, Liu Liping, Yang Jie, et al. 2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(4): 731-748.
- Greco M, Krajewski W F. 2000. An efficient methodology for detection of anomalous propagation echoes in radar reflectivity data using neural networks [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic

- Technology, 17(2): 121-129.
- 郭瀚阳, 陈明轩, 韩雷, 等. 2019. 基于深度学习的强对流高分辨率临近预报试验 [J]. 气象学报, 77(4): 715-727. Guo Hanyang, Chen Mingxuan, Han Lei, et al. 2019. High resolution nowcasting experiment of severe convections based on deep learning [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(4): 715-727.
- Hubbert J C, Dixon M, Ellis S M. 2009. Weather radar ground clutter. Part II: Real-time identification and filtering [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 26(7): 1181-1197.
- Kessinger, C, Ellis S, and Andel J Van. 2003. The radar echo classifier: A fuzzy logic algorithm for the WSR-88D [C]. //Preprints, 3rd Conf on Artificial Applications to the Environmental Sciences, Long Beach, CA, Amer Meteor Soc, CDROM, P1.6.
- Krajewski W F and Vignal B. 2001. Evaluation of anomalous propagation echo detection in WSR-88D data: A large sample case study [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 18(5): 807-814.
- Lakshmanan V, Hondl K, Stumpf G, et al. 2003. Quality control of weather radar data using texture features and a neural network [C]. //5th International Conf on Adv in PattRecogn, IEEE, 522-525.
- Langston C, Zhang J, Howard K. 2007. Four-Dimensional Dynamic Radar Mosaic [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 24(5): 776-790.
- 李建通, 高守亭, 郭林. 2011. 基于雷达回波最大重叠率的一种临近降水预报方法 [J]. 大气科学, 35(3): 519-530. Li Jiantong, Gao Shouting, Guo Lin. 2011. The nowcasting method of precipitation based on the maximum overlap rate of radar echo [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(3): 519-530.
- 李巧, 戚友存, 朱自伟, 等. 2021. 复杂地形下 C 波段雷达定量降水估计算法 [J]. 气象学报, 79(4): 689-702. Li Qiao, Qi Youcun, Zhu Ziwei, et al. 2021. Quantitative precipitation estimation algorithm for C-band radar situated in complex topographical regions [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 79(4): 689-702.
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明. 2007. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析 [J]. 气象学报, 65(2): 252-260. Liu Liping, Wu Linlin, Yang Yinming. 2007. Development of fuzzy-logical two-step groundclutter detection algorithm [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 65(2): 252-260.
- Peter J R, Seed A, Steinle P J. 2013. Application of a Bayesian Classifier of Anomalous Propagation to Single-Polarization Radar Reflectivity Data [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 30(9): 1985-2005.
- Rennie S J, Curtis M, Peter J, et al. 2015. Bayesian Echo Classification for Australian Single-Polarization Weather Radar with Application to Assimilation of Radial Velocity Observations [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 32(7):1341-1355.
- Rauber R M, Nesbitt S W. 2018. Radar Meteorology: A First Course [M]. 199-200.
- 沈妍琰, 黄兴友, 黄书荣, 等. 2020. 基于贝叶斯分类器的多普勒天气雷达海浪回波识别和效果检验 [J]. 海洋科学, 44 (6): 83-90. Shen Yanyan, Huang Xingyou, Huang Shurong, et al. 2020. Identification and validation of sea-wave echoes collected by a Doppler weather radar based on a Bayes classifier [J]. Studia Marina Sinica (in Chinese), 44 (6): 83-90.
- 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2011. 2009年6月3~4日黄淮地区强对流成熟阶段特征分析[J]. 大气科学, 35(1): 105-120. Sun Hulin, Luo Yali, Zhang Renhe, et al. 2011. Analysis on the

-
- mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3-4 June 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(1): 105-120.
- Smith P L. 1990. Precipitation measurements and hydrology: Panel Report [M]. Radar in Meteorology, Boston, MA: Amer Meteor Soc, 607-618.
- Steiner M, Smith J A. 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 19(5): 673-686.
- Tang L, Zhang J, Langston C, et al. 2014. A physically based precipitation–nonprecipitation radar echo classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system [J]. *Weather & Forecasting*, 29(5): 1106-1119.
- 杨毅, 邱崇践, 龚建东, 等. 2008. 三维变分和物理初始化方法相结合同化多普勒雷达资料的试验研究 [J]. *气象学报*, 66(4): 479-488. Yang Yi, Qiu Chongjian, Gong Jiandong, et al. 2008. Three-dimensional variational combined with physical initialization for assimilation of Doppler radar data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66(4): 479-488.
- 杨雨轩, 张立凤, 张斌, 等. 2018. 多普勒天气雷达资料同化对冬季暴雨模拟的影响研究 [J]. *大气科学*, 42(5): 1096-1108. Yang Yuxuan, Zhang Lifeng, Zhang Bin, et al. 2018. Impact of Doppler radar data assimilation on the simulation of a heavy winter rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(5): 1096-1108.
- Zhang J, Wang S X, Clarke B. 2004. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure [C]. //11th conference on aviation, Range and Aerospace Meteorology. Hyannis, P5.4.
- Zhang J, Howard K, Gourley J J. 2005. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 22(1): 30-42.
- 张哲, 周玉淑, 高守亭. 2018. 一次辽东湾飚线过程的观测与数值模拟分析 [J]. *大气科学*, 42(5): 1157-1174. Zhang Zhe, Zhou Yushu, Gao Shouting. 2018. Observational and numerical analyses of a squall line occurring over Liaodong Gulf of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(5): 1157-1174.
- 张哲, 戚友存, 朱自伟, 等. 2021. 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*, 79(5): 786-803. Zhang Zhe, Qi Youcun, Zhu Ziwei, et al. 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 79(5): 786-803.
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析 [J]. *气象学报*, 62(3): 317-328. Zheng Yuanyuan, Yu Xiaoding, Fang Chong, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with doppler weather radar data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62(3): 317-328.