

夏凡,吴炜,张乐坚,等,2023.基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算法的研究[J].气象,49(2):146-156. Xia F, Wu W, Zhang L J, et al, 2023. Study of designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 49(2):146-156(in Chinese).

基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算法的研究*

夏 凡^{1,2} 吴 炜^{1,2} 张乐坚³ 文 浩³

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气象科学研究所, 济南 250031

3 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: 基于融化层识别算法(melting layer detection algorithm, MLDA)原理, 利用 2020 年 7—8 月济南、青岛两部 S 波段双偏振多普勒雷达体扫数据, 进行融化层高度信息识别试验, 根据试验结果在 MLDA 算法中引入径向连续性检验、增加扫描仰角范围与调整判别融化层出现的距离库总数阈值的改进措施, 与改进前的 MLDA 算法进行了对比分析, 得到以下结论: MLDA 对融化层顶高度有一定识别效果, 识别的融化层顶高度的平均绝对误差较大, 融化层底高度过低; 加入径向连续性检验(简称 MLDA-R1)后, 识别的融化层顶高度的平均绝对误差明显减小, 融化层底对应温度与融化层厚度分布在合理区间, 但是遗漏识别的试验数明显增加; 在 MLDA-R1 基础上, 扫描区域增加了 3.3°仰角(简称 MLDA-R2)并调整了判别融化层出现的距离库总数阈值(简称 MLDA-R3), 融化层遗漏识别的试验数明显减少, 同时提高了对融化层高度信息的识别效果; 一些降水回波与非降水回波混合的区域会被错误识别为融化层区域, 影响 MLDA 算法对融化层的识别效果, 仍需进一步改进。总体来看, 改进后的 MLDA 更适用于我国 S 波段双偏多普勒雷达, 对雷达水凝物相态分类与定量降水估测等气象现代化业务有一定支撑作用。

关键词: 双偏振多普勒雷达, 融化层, MLDA, 径向连续性检验

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.022301

Study of Designation Algorithm of the Melting Layer Based on S-Band Dual-Polarization Radar

XIA Fan^{1,2} WU Wei^{1,2} ZHANG Lejian³ WEN Hao³

1 Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031

2 Shandong Institution of Meteorological Sciences, Jinan 250031

3 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the principle of the melting layer detection algorithm (MLDA) from National Severe Storms Laboratory, some detection tests are carried out using S-band dual-polarization radar volume data from Jinan and Qingdao radar stations in July and August 2020. According to the test results, some improvement measures such as radial continuity check, increasing the range of scan elevation and adjusting the threshold of total radar bin number for identifying the melting layer are integrated into the MLDA, and the recognition effect of MLDA on the melting layer before and after improvement are compared and the conclusions are as follows. The melting layer could be identified by the MLDA, but the mean absolute

* 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD072、ZR2021QD028、ZR2020MD052、ZR2020MD053)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J034)、山东省气象局重点科研项目(2021sdqxz05、2021sdqxz09)共同资助

2021 年 12 月 9 日收稿; 2022 年 5 月 17 日收修定稿

第一作者: 夏凡, 从事多源观测资料分析应用与数值天气预报工作. E-mail: xf0718@126.com

通讯作者: 吴炜, 从事数值天气预报与海洋气象工作. E-mail: wuwei_sd@163.com

error of the top height of the melting layer is large and the melting layer bottom height is too low. After the radial continuity check is integrated into the MLDA (MLDA-R1), the mean absolute error of the top height of the melting layer gets smaller obviously, the temperature of the bottom height and the thickness of the melting layer are within a reasonable range, but the number of the test not having detected the melting layer increases markedly. On the basis of the MLDA-R1, 3.3° elevation is added to the scanning area (MLDA-R2) and the threshold of total number of radar bin for recognizing the melting layer is adjusted (MLDA-R3). Then, the number of the test not having detected the melting layer is significantly reduced, and the identification effect of the height information of the melting layer is improved. Some areas containing precipitation echo and non-precipitation echo could be falsely detected as the melting layer by MLDA after improvement so that the recognition effect of the melting layer is influenced. In general, MLDA after the improvement is more applicable to S-band dual-polarization radar in China and it can be utilized to support the radar hydrometer classification and quantitative precipitation estimation.

Key words: dual-polarization Doppler radar, melting layer, melting layer detection algorithm (MLDA), radial continuity check

引 言

融化层是大气中固、液态水凝物转换的区域,融化层顶通常是 0°C 等温线所在的最低高度 (Glickman, 2000), 融化层之上主要为固态水凝物, 之下主要为液态水凝物。融化层在很多业务应用中发挥了重要作用, 如融化层顶可用于水凝物相态的精确分类 (Park et al, 2009; 潘佳文等, 2020; Wu et al, 2018; 杨忠林等, 2019; 吴翀等, 2021; 杨吉等, 2020), 由于有些水凝物 (干雪与中、小雨) 雷达参量特征大致相同, 利用融化层顶高度可以将其有效区分。此外, 利用融化层位置可以订正雷达定量估测降水在亮带区域中的误差, Zhang et al (2008) 利用长时间序列 WSR-88D 雷达基数据计算的平均反射率因子垂直廓线与融化层位置自动识别亮带的位置, Zhang and Qi (2010)、Qi et al (2013)、张乐坚等 (2010) 进一步对此法进行改进, 有效降低了亮带区域被高估的雷达定量估测降水量。融化层还可以被用于雷达数据质量控制业务中, Tang et al (2014; 2020) 与夏凡等 (2021) 利用相关系数区分降水回波与非降水回波, 而在融化层区域两者的相关系数特征非常相似, 通过识别融化层位置可以保护其中的降水回波不被滤除。

随着我国越来越多的业务雷达升级为双偏振雷达, 利用双偏振观测参量识别融化层成为有效途径。与探空或者模式分析数据相比, 雷达数据可以给出时空分辨率更高的融化层位置信息。国际上,

Brandes and Ikeda (2004) 利用融化层中相关系数、差分反射率与线性退偏振比的观测廓线与理想廓线匹配度的来识别融化层; Matrosov et al (2007) 根据相关系数在径向上的变化程度来确定融化层; Giangrande et al (2008) 提出的融化层识别算法 (melting layer detection algorithm, MLDA) 基于相关系数、差分反射率与反射率在融化层的特征与位置关系建立, 该算法被用于美国强风暴中心实验室 (NSSL) 水凝物分类 (HCA) 业务; Boodoo et al (2010) 利用 MLDA 对两次锋面系统进行试验, 结果显示在锋面系统过境时, 与飞机报数据相比, 算法可以有效探测到融化层高度的快速变化情况; Wu et al (2018) 将 MLDA 用于我国 S 波段双偏振多普勒雷达相态分类算法中。

目前国内利用双偏振雷达识别融化层算法研究较少。孙晓光等 (2011) 基于毫米波测云雷达提出了一种融化层的识别算法; Ma et al (2020) 统计了北京顺义 X 波段双偏振多普勒雷达融化层与非融化层区域数据特征, 利用贝叶斯方法对融化层进行识别。我国双偏振雷达以 S 波段为主, 观测量没有线性退偏振比, 无法借鉴 Brandes and Ikeda (2004) 的方法, 而与 Matrosov et al (2007) 和 Ma et al (2020) 的方法相比, Giangrande et al (2008) 提出的 MLDA 可参考性更强。本文利用 MLDA 对 S 波段双偏振多普勒雷达进行融化层识别试验, 通过检验识别效果, 分析其存在的不足与成因, 并进行相应的改进试验, 设计适用于我国 S 波段双偏振多普勒雷达融化层识别算法, 以期对雷达水凝物分类与定量降水估测等业

务提供有效支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源

雷达资料选取了济南与青岛站 S 波段双偏振多普勒雷达原始体扫数据,扫描方式均为 VCP21。所用的观测参量包括反射率因子(Z_H),零滞后相关系数(CC),差分反射率(Z_{DR})。融化层通常出现在层

状云降水区域中,从济南与青岛 2020 年 7—8 月出现层状云降水时段选取对应的体扫数据。本文利用探空数据 0℃ 高度验证 MLDA 识别的融化层顶部高度,探空数据从中国气象局 MICAPS 系统获取,济南、青岛的探空站与雷达站(经纬度略)距离,分别约为 73 km、13 km,具有一定代表性。由于探空站数据每日在 08 时与 20 时(北京时)获取,为了客观检验算法识别效果,选取与探空观测时间不超过 5 min 的雷达数据进行试验,具体试验个例见表 1,共有 41 个。

表 1 2020 年检验个例时间

Table 1 The time of the verification test in 2020

站点	检验时间(月-日-时)/UTC	站点	检验时间(月-日-时)/UTC	站点	检验时间(月-日-时)/UTC
Z9531	7-02-12:02:37	Z9531	8-11-23:58:17	Z9532	8-05-12:01:11
Z9531	7-02-23:58:39	Z9531	8-12-23:59:57	Z9532	8-06-12:01:42
Z9531	7-08-23:57:41	Z9531	8-14-23:57:47	Z9532	8-06-23:59:56
Z9531	7-11-12:01:43	Z9531	8-19-23:59:59	Z9532	8-07-11:58:35
Z9531	7-19-00:00:06	Z9531	8-20-12:01:26	Z9532	8-08-23:59:36
Z9531	7-22-00:01:39	Z9532	7-02-23:59:35	Z9532	8-12-00:02:44
Z9531	7-22-12:03:07	Z9532	7-12-00:02:23	Z9532	8-13-11:58:09
Z9531	7-26-00:00:48	Z9532	7-18-23:59:57	Z9532	8-14-00:02:30
Z9531	8-01-11:58:43	Z9532	7-22-00:00:53	Z9532	8-14-12:00:47
Z9531	8-01-23:59:14	Z9532	7-22-11:59:50	Z9532	8-19-12:01:06
Z9531	8-03-12:00:21	Z9532	7-31-00:00:35	Z9532	8-21-00:02:32
Z9531	8-05-00:02:37	Z9532	7-31-11:59:20	Z9532	8-26-00:01:19
Z9531	8-05-23:59:19	Z9532	8-02-00:00:46	Z9532	8-26-11:59:55
Z9531	8-06-11:57:17	Z9532	8-04-00:00:01		

1.2 融化层识别方法

雪花经过融化层顶后开始融化,液态水含量不断增加,介电常数增大,进而使得 Z_H 增大;同时雪花在融化过程中粒子尺寸变大,形状更接近扁平,使得 Z_{DR} 增大。随着雪花进一步融化破碎,粒子尺寸的减小和导致 Z_H 与 Z_{DR} 降低。融化层顶附近主要为雪粒子,粒子属性单一,CC 较高,随着雪粒子融化,CC 降低,而融化层底部主要为完全融化的雨粒子,CC 升高。MLDA 利用三者的分布特征识别融化层边界。主要步骤如下:

(1)在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 仰角中,对所有方位的径向距离库进行检查,如果 CC 分布在 $[0.90, 0.97]$ 进行标识,当距离库高度高于 6 km,停止检查。将下限定为 0.90,是为了排除非气象回波对融化层识别的影响,上限定为 0.97,是因为非融化层区域降水回波对应的 CC 通常大于 0.97。

(2)对于 CC 符合条件的距离库,如果在其上 500 m 范围内, Z_H 分布在 $[30, 47]$ dBz, Z_{DR} 分布在 $[0.8, 2.5]$ dB,那么判定该距离库出现在融化层区域并标识。

(3)为了确定融化层边界方位变化,在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 仰角范围内依次统计每个方位角前后 10° 方位角被标识的距离库数,如果统计区域内被标识的距离库总数超过 1500 个,那么判定该方位出现融化层。

(4)被判定出现融化层的方位,将其前后 10° 方位的被标识的距离库按照高度从低到高排序,取高度序列的第 80 百分位数作为该方位融化层顶部高度,第 20 百分位数作为融化层底部高度。Giangrande et al(2008)指出,两个截取百分位数的选定,既可以避免计算的融化层顶部与底部高度误差过大,又可以消除波束展宽与径向平滑的影响。

(5)没有满足阈值条件的方位,可以通过其他满足阈值条件的最近方位来确定融化层位置,例如,如

果只有一个方位被判定出现融化层,其顶部与底部高度可用于其他所有方位。

1.3 数据前处理方法

MLDA 利用了 Z_{DR} 、CC 与 Z_H , 本文采用气象回波法(吴林林等, 2015)对 Z_{DR} 的系统误差进行订正, 小雨区域对应的 Z_{DR} 近似为零, 小雨区域 Z_{DR} 的平均值即可以作为系统误差值。图 1a, 1b 分别给出了济南雷达站 2020 年 7 月 9 日 03:58(世界时, 下同)与青岛雷达站 2020 年 8 月 8 日 23:59 小雨区域 Z_{DR} 的频率分布。从图中可以看出, 济南站 Z_{DR} 最大频率对应 0 dB, 青岛站对应 0.4 dB, 经过计算, 在小雨区, 济南站 Z_{DR} 平均值为 0.18 dB, 青岛站平均值为 0.45 dB。在进行融化层识别之前, 分别对两部雷达的 Z_{DR} 数据进行订正。两个站 CC 主要分布在 0.95~1.00(图略), 范围较为合理。Wu et al(2018)指出当信噪比低于 20 dB 时, Z_{DR} 与 CC 测量结果会有波动, 为了保证数据可靠性, 信噪比低于 20 dB 的 Z_{DR} 与 CC 不参与计算。针对 Z_H , 分别利用模糊逻辑法(刘黎平等, 2007)与连续性检验(Tang et al, 2014)滤除地物回波与电磁干扰回波。

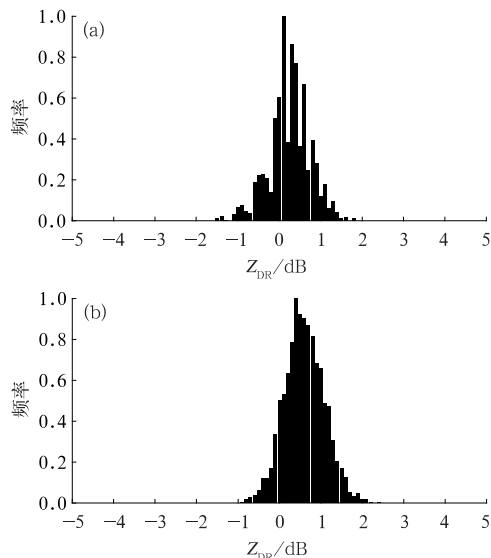


图1 2020年(a)7月9日03:58济南雷达站, (b)8月8日23:59青岛雷达站小雨区域 Z_{DR} 统计频率分布

Fig. 1 Statistical frequency distribution of Z_{DR} in light rain region from (a) Jinan Radar Station at 03:58 UTC 9 July, (b) Qingdao Radar Station 23:59 UTC 8 August 2020

1.4 检验原理及方法

检验融化层顶高度的指标包括平均绝对误差(mean absolute error, MAE)与相关系数(related coefficient, RC)(魏凤英, 2007):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ml_i - o_i| \quad (1)$$

$$RC = \frac{Cov(ml, o)}{\sqrt{Var(ml)Var(o)}} \quad (2)$$

式中: ml 为识别的融化层顶高度, o 为探空数据 0°C 高度, n 为试验数, Cov 表示协方差, Var 表示方差。

融化层底部高度变化幅度较大, 无法通过某个温度阈值来获取, 依赖于空气湿度条件与降水粒子浓度。Boodoo et al(2010)研究发现, 融化层底部高度对应的湿球温度为 2°C , 对照湿球温度与温度的转换表, 当相对湿度为 100%, 空气温度为 2°C , 随着相对湿度的降低, 对应的温度升高, 当相对湿度为 15%, 空气温度为 10°C , 本文基于探空资料, 当识别的融化层底部高度对应温度分布在 $2\sim 10^\circ\text{C}$, 即为识别准确。

2 融化层识别效果分析

从各试验探空 0°C 高度与 MLDA 识别融化层顶部高度的散点分布(图 2)可以看出, 部分观测试验明显高于或者低于探空 0°C 高度, 主要以负偏差

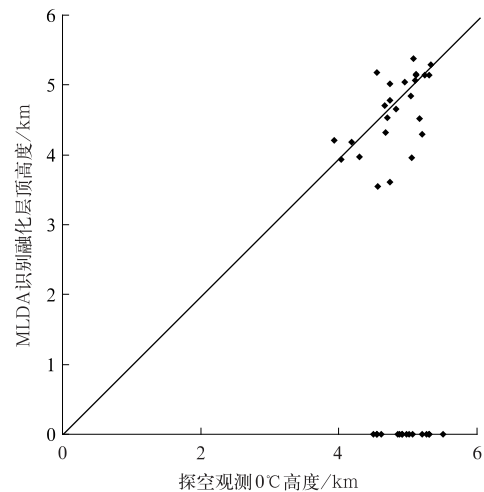


图2 各试验探空 0°C 高度与 MLDA 识别融化层顶高度散点分布

Fig. 2 Scatterplot of 0°C height from sounding observation and top height of the melting layer obtained from the MLDA for every test

为主。统计发现最大正误差是 0.623 km,最大负误差是 1.096 km,有 16 次试验 MLDA 未识别出融化层,其他 25 次试验计算的融化层顶部高度的 MAE 为 0.328 km,RC 为 0.418。

从 MLDA 识别的融化层底高度对应的探空温度(图 3a)发现,只有 6 次试验分布在 $2\sim 10^{\circ}\text{C}$,其他试验个例超过了 10°C ,有的试验超过 20°C ,温度过高,因此 MLDA 识别的融化层底高度过低。由图 3b 可以看出,MLDA 计算的融化层厚度主要分布在 $2\sim 4$ km,Fabry and Zawadzki(1995)长期统计的融化层观测厚度接近 0.5 km,Giangrande et al (2008)计算的融化层厚度在 $0.2\sim 0.6$ km,MLDA 计算的融化层厚较大。

3 MLDA 改进

由第 2 节试验结果可知,MLDA 可以识别大部分观测试验的融化层位置,但存在一定的缺陷,部分观测试验识别出的融化层顶部高度误差过大,融化层底部高度过低,并且有大量试验的融化层没有被识别。针对这些问题进行改进,以期提高 MLDA 对融化层的识别效果。

3.1 径向连续性检验

图 4 给出了 2020 年 8 月 14 日 23:57 济南雷达站 4.3° 仰角层 CC 、 Z_H 和 Z_{DR} 分布。由图 4a 可见,在黑色虚线矩形区域,降水回波与非降水回波(晴空回波与地物回波等)混合,导致不少距离库的 CC 分布在 $[0.9, 0.97]$ 区间,同时 Z_H (图 4b)与 Z_{DR} (图 4c)也满足 MLDA 判别条件,然而这些距离库并不属于

融化层区域,由于这些混合型回波不易通过质量控制被滤除,这些被错误判别为融化层的距离库使得高度序列第 20 百分位数对应的融化层底高度过低,同时也影响了融化层顶高度的准确性。

由图 4a 可以看出, CC 低值区在融化层区域径向上具有较强的连续性,而被错误识别的距离库在径向上连续性较差,基于此在 MLDA 算法第二步中加入径向连续性检验,具体步骤为:当一个方位角所有距离库被检测完成后,再次对该方位标识为融化层的距离库进行检测,如果其上、下 500 m 范围内被标识为融化层的距离库数占检测范围距离库总数的比例超过 40%,那么判定这个距离库属于融化层。将加入径向连续性检验的 MLDA 称为 MLDA-R1。将比例定为 40% 主要考虑到融化层厚度小于 500 m(Fabry and Zawadzki, 1995),而融化层区域内并不是所有距离库对应的 CC 、 Z_H 和 Z_{DR} 都满足 MLDA 中的判别条件,具有一定的主观性。

图 5 给出了 2020 年 8 月 14 日 23:57 济南雷达站 4.3° 仰角加入径向连续性检验前后,判别为融化层的距离库高度在各方位角的分布,图 5a 显示有大量非融化层区域(红色虚线矩形外)距离库被 MLDA 错误识别,而被 MLDA-R1 错误识别的距离库数明显减少(图 5b),剩余的非融化层距离库由于径向上连续性较好,MLDA-R1 无法将其有效滤除,但是数量较少,不会对融化层的识别产生较大影响。该次试验,利用 MLDA 计算得融化层底与顶高度分别为 1.196 km 和 4.847 km;MLDA-R1 计算得融化层底与顶高度分别为 4.263 km 和 5.072 km,而探空 0°C 高度为 5.045 km,不难发现,加入径向连续性检验,融化层顶高度与探空 0°C 高度偏差更小,融化层

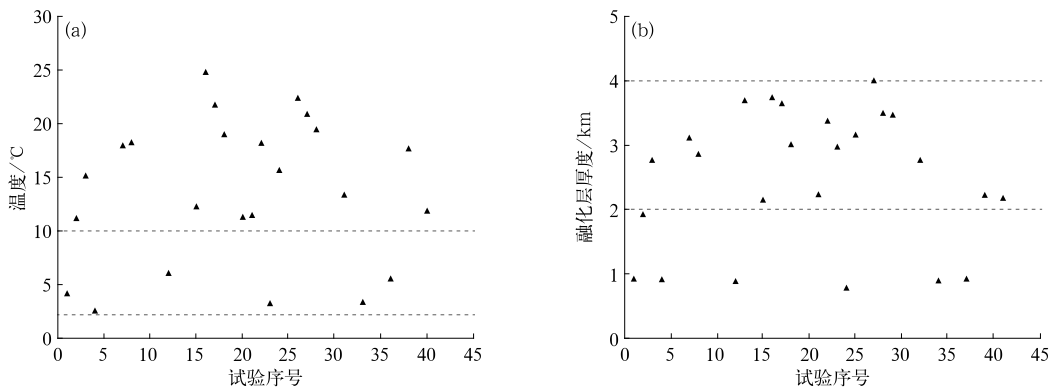


图 3 各试验(a)MLDA 识别融化层底高度对应的温度与(b)融化层厚度分布

Fig. 3 Distributions of (a) the temperature corresponding to bottom height and (b) the thickness of the melting layer retrieved from MLDA for every test

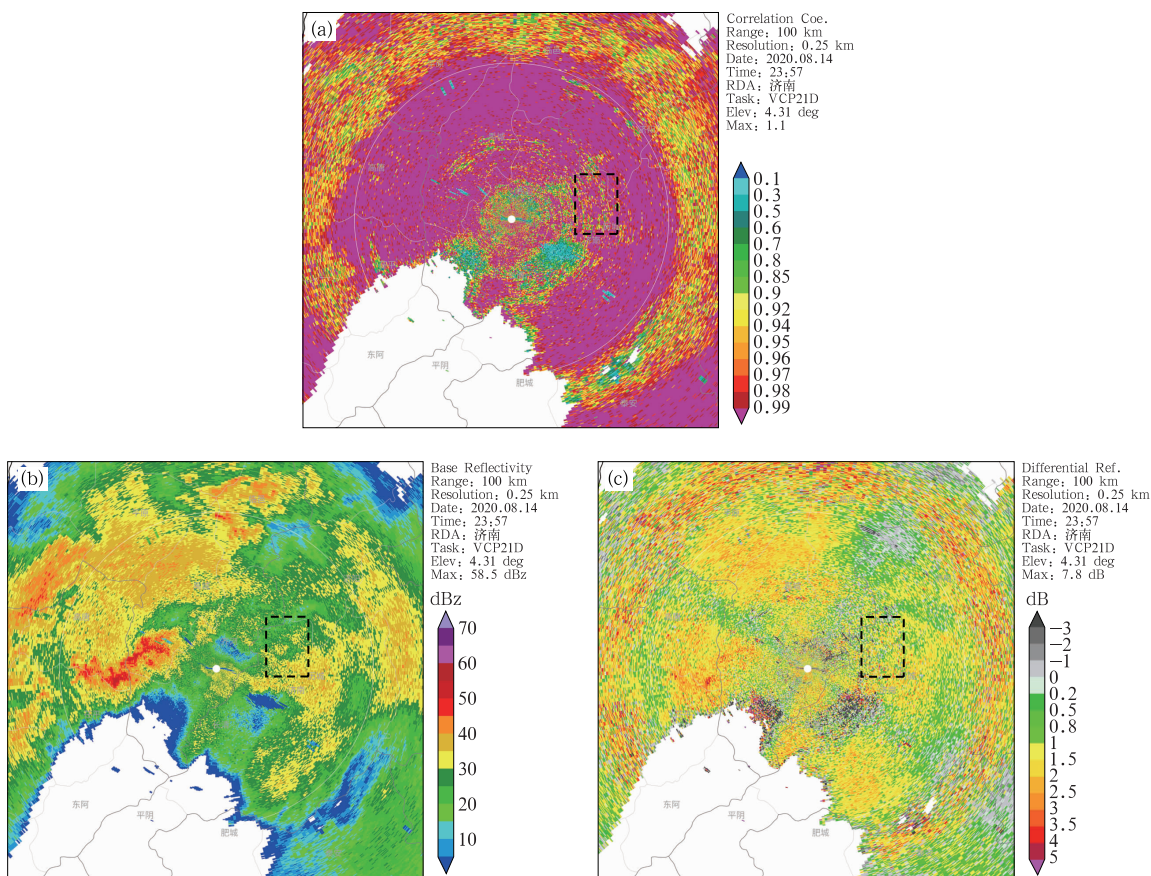


图 4 2020 年 8 月 14 日 23:57 济南雷达站 4.3°仰角(a)CC,(b)ZH,(c)ZDR 分布
(黑虚线框表示被错误识别的融化层区域,下同)

Fig. 4 Distribution of (a) CC, (b) Z_H and (c) Z_{DR} from Jinan Radar Station
at 4.3° elevation at 23:57 UTC 14 August 2020

(The black dotted box represents the region of the falsely identified melting layer, the same below)

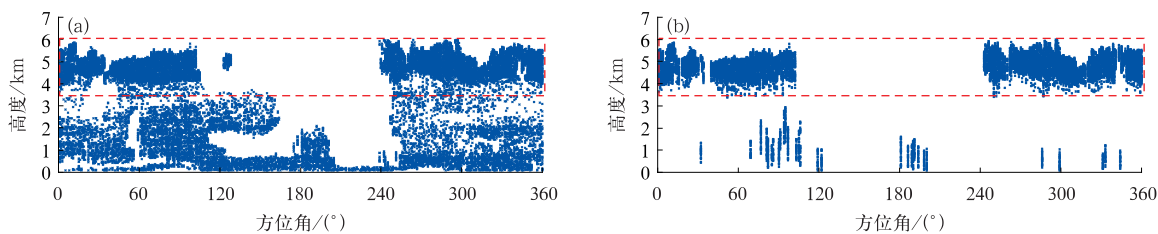


图 5 2020 年 8 月 14 日 23:57 济南雷达站 4.3°仰角加入径向连续性检验(a)前、(b)后
判别为融化层的距离库对应高度在各方位角的分布
(红虚线框内为融化层大致区域)

Fig. 5 Distribution of the height of radial bin judged as the melting layer in every azimuth
from Jinan Radar Station at 4.3° elevation at 23:57 UTC 14 August 2020
(a) before, and (b) after radial continuity check

(The red dotted box represents the rough region of melting layer)

厚度更为合理。

从各试验 MLDA-R1 识别的融化层顶高度与探空 0°C 高度散点分布(图 6)可见,与图 2 相比,散

点向对角线更加靠拢,出现负偏差的试验数明显减少,MLDA-R1 识别的融化层顶高度的 MAE 为 0.246 km,RC 为 0.631。但是只有 10 次试验识别

出融化层,与 MLDA 相比,遗漏识别的试验数明显增加。这是由于径向连续性检验去掉了大量被错误识别的距离库,很多试验距离库总数未达到判别阈值(1500 个)所导致。

图 7a,7b 分别给出了 MLDA-R1 识别的融化层底高度对应的温度与融化层厚度分布,融化层底高度对应的温度(图 7a)主要分布在 2~10℃,融化层厚度(图 7b)主要分布在 0.7~1.0 km,与 MLDA 相比融化层底高度与融化层厚度分布都更加合理。

3.2 扫描仰角调整

Giangrande et al(2008)主要利用 4°~10°仰角层数据,这是由于 10°以上的仰角层在融化层区域

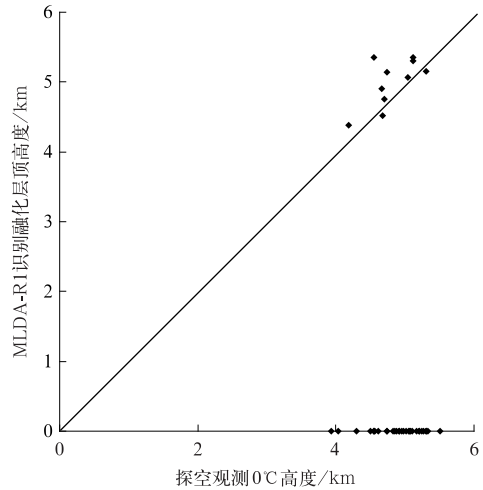


图 6 同图 2,但为 MLDA-R1

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for MLDA-R1

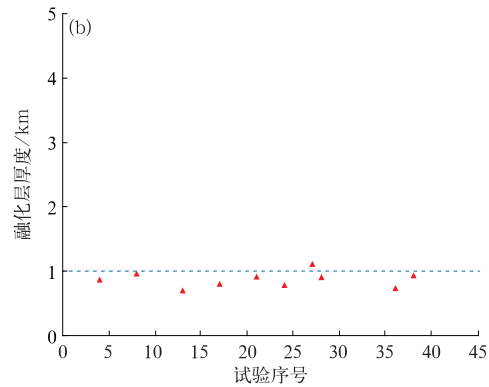
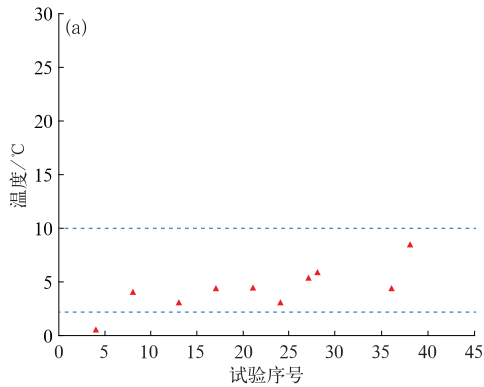


图 7 同图 3,但为 MLDA-R1

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for MLDA-R1

距离库太少,不会对判别阈值造成影响,而 4°以下的仰角在融化层区域的距离库由于径向展宽的原因,会造成融化层位置高估,在这个范围用到的雷达仰角有 6 个,即 4.5°、5.5°、6.5°、7.5°、8.7°和 10.0°,而我国 S 波段双偏振多普勒雷达在这个范围只有 3 个仰角,即 4.3°、6.1°和 9.9°。图 8 统计了 9 个仰角出现融化层特征的试验数,可以看出,具有融化层特征的仰角主要为 3~6 层,其中第 4 层最多,每个试验都会出现。而 3~4 层仰角,即 2.4°和 3.3°不在扫描范围内。

从 2020 年 8 月 5 日 00:02 济南雷达站 3~6 层仰角 180°~210°方位平均 CC 垂直廓线分布(图 9)可以发现,3.3°仰角廓线特征与 4.3°仰角大致相同,由于径向展宽的原因,3.3°仰角 CC 为 0.97 对应的高度(廓线与等值线相交的上交点)略大于融化层顶

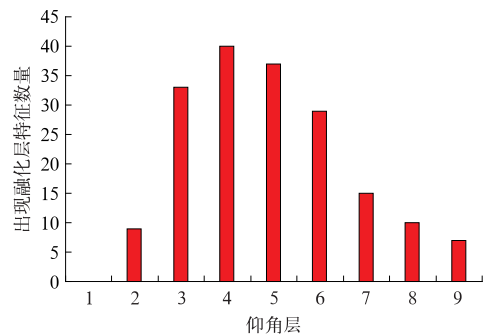


图 8 各仰角出现融化层特征的试验数

Fig. 8 Test number of every elevation angle with the feature of melting layer

高度,而 2.4°仰角 CC 为 0.97 对应的高度明显大于融化层顶高度,高度序列取第 80 百分位数可以滤除 3.3°仰角大部分高于融化层顶高度的距离库,而 2.4°仰角高于融化层顶高度的距离库不会被有效滤

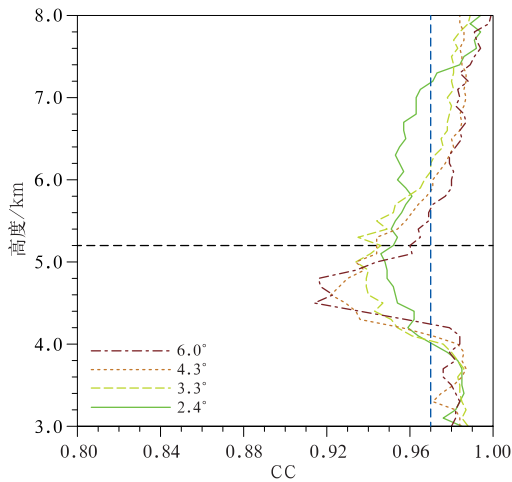


图 9 2020 年 8 月 5 日 00:02 济南雷达站 2.4°、3.3°、4.3° 与 6.0° 仰角在 180°~210° 方位 CC 平均垂直廓线分布 (黑色虚线: 探空 0°C 高度, 蓝色虚线: CC 等于 0.97 等值线)
 Fig. 9 Distribution of mean vertical profile of CC for 180°-210° azimuth from Jinan Radar Station at 2.4°, 3.3°, 4.3° and 6.0° elevations at 00:02 UTC 5 August 2020 (black dashed line: 0°C height from sounding, blue dashed line: 0.97 isoline line of CC)

除, 这会对融化层顶高度造成严重高估。为了提高融化层成功识别率, 同时避免识别的融化层出现较大误差, 在 MLDA-R1 的基础上扫描范围加入 3.3° 仰角, 将其称为 MLDA-R2。

图 10 给出了各试验 MLDA-R2 识别的融化层顶高度与探空 0°C 高度散点分布。与 MLDA-R1 相比, 被遗漏识别的试验数明显减少, 为 17 次, 接近 MLDA。24 次识别成功的试验, 融化层顶高度的 MAE 为 0.217 km, RC 为 0.704, 略优于 MLDA-R1。大部分试验 MLDA-R2 识别的融化层高度略高于探空 0°C 高度, 这主要由于 MLDA-R2 增加的 3.3° 仰角, 受到径向展宽影响, 一些被标识距离库高

度略高于融化层顶。

各试验 MLDA-R2 识别的融化层底高度对应的温度(图 11a)分布在 2~8°C, 识别的融化层厚度(图 11b)主要分布在 0.5~1.0 km, 可见增加了 3.3° 仰角并未影响融化层底高度与厚度合理性。

3.3 阈值总数调整

由 3.2 节可知, 依然有大量试验 MLDA-R2 未识别出融化层, 由图 8 可知, 并不是所有仰角都会出现融化层特征, 这使得距离库总数很难达到判别融化层出现的阈值(即 1500 个)。按照 3.1 节判别融化层的条件, 经过径向性连续性检验后, 一个径向若判别出现融化层, 那么 3.3°、4.3°、6.1° 和 9.9° 仰角距离库数大约分别为 28、22、16 和 10 个, 基于此, 在 MLDA-R2 的基础上对判别融化层出现的距离库总数阈值进行调整, 步骤如下: 将 3.3°、4.3°、6.1° 和 9.9° 各单层距离库总数阈值分别设置为 550、450、

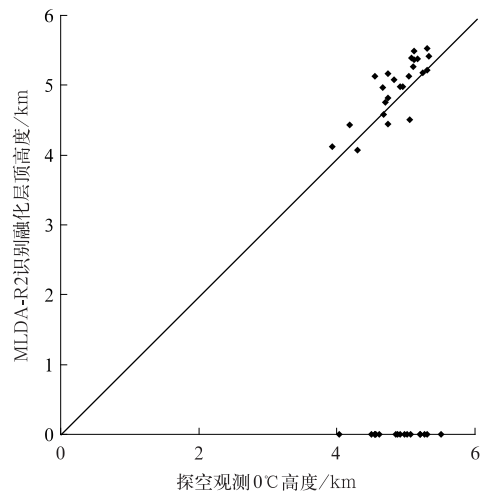


图 10 同图 2, 但为 MLDA-R2
 Fig. 10 Same as Fig. 2, but for MLDA-R2

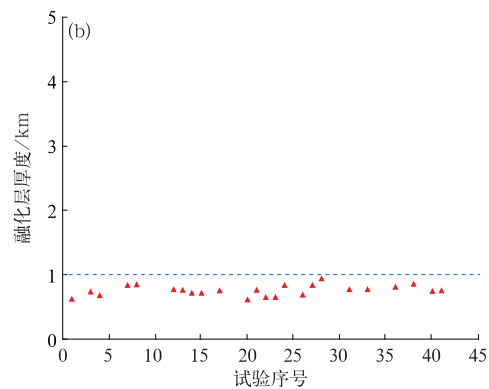
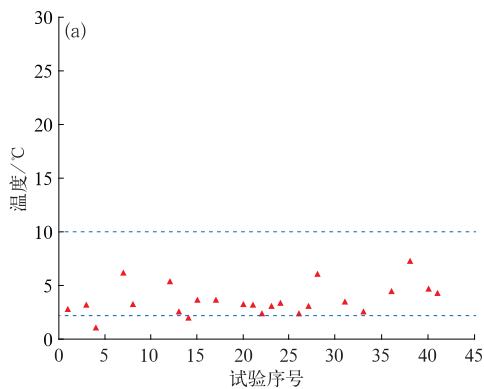


图 11 同图 3, 但为 MLDA-R2
 Fig. 11 Same as Fig. 3, but for MLDA-R2

300、200 个,在滑动扫描范围(前后各 10°方位角),某一层超过一半方位经判别出现融化层,那么判定该仰角出现融化层,并将其对应的阈值累加到阈值总数,例如,如果只有 3.3°仰角判定出现融化层,距离库总数阈值调整为 550 个,依次类推,如果 3.3°、4.3°、6.1°和 9.9°均判定出现融化层,则阈值调整为 1500 个。将该方法称为 MLDA-R3。

从各试验 MLDA-R3 识别的融化层顶高度与探空 0℃高度散点分布(图 12)可见,仅有 4 次试验未被 MLDA-R3 识别,距离库总数阈值的调整并没有使得 MLDA-R3 识别的融化层顶高度出现过大的正负偏差,融化层顶高度的 MAE 为 0.214 km, RC 为 0.678。

从 MLDA-R3 识别的融化层底高度对应的温度分布(图 13a)与融化层厚度分布(图 13b)可见,有两次试验出现融化层底对应温度过高、融化层厚度较大的问题,分别是济南站 8 月 12 日 23:59 和 19 日 23:59,这两次试验均未被 MLDA 与 MLDA-R2

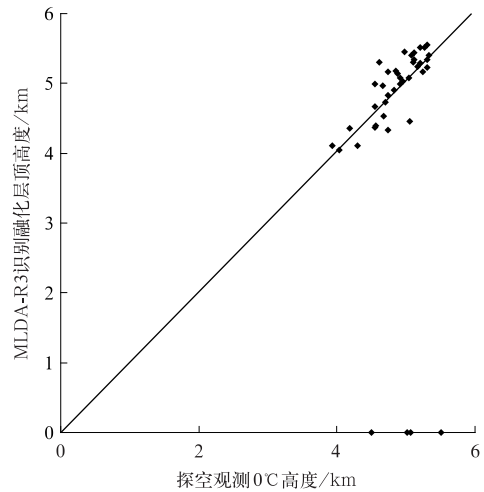


图 12 同图 2,但为 MLDA-R3

Fig. 12 Same as Fig. 2, but for MLDA-R3

识别出融化层,其他试验融化层底高度对应的温度与融化层厚度分布比较合理。

从 2020 年 8 月 19 日 23:59 济南雷达站 3.3°仰角层 CC(图 14a)与 Z_H (图 14b)分布可以看出,在雷

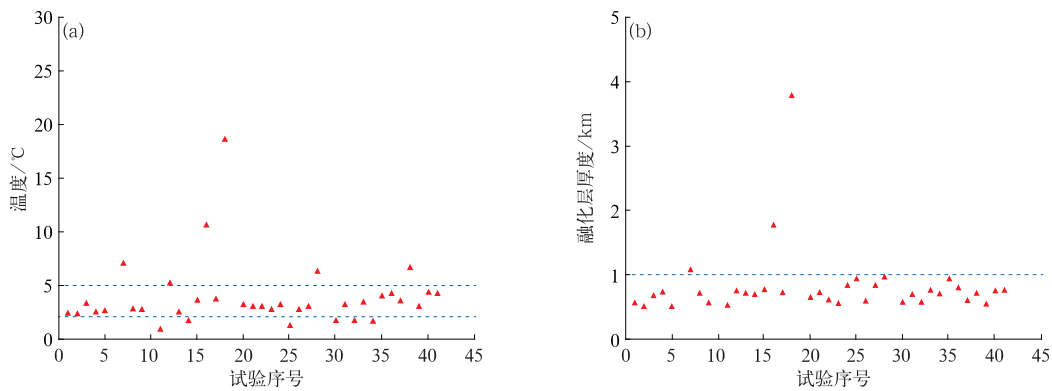


图 13 同图 3,但为 MLDA-R3

Fig. 13 Same as Fig. 3, but for MLDA-R3

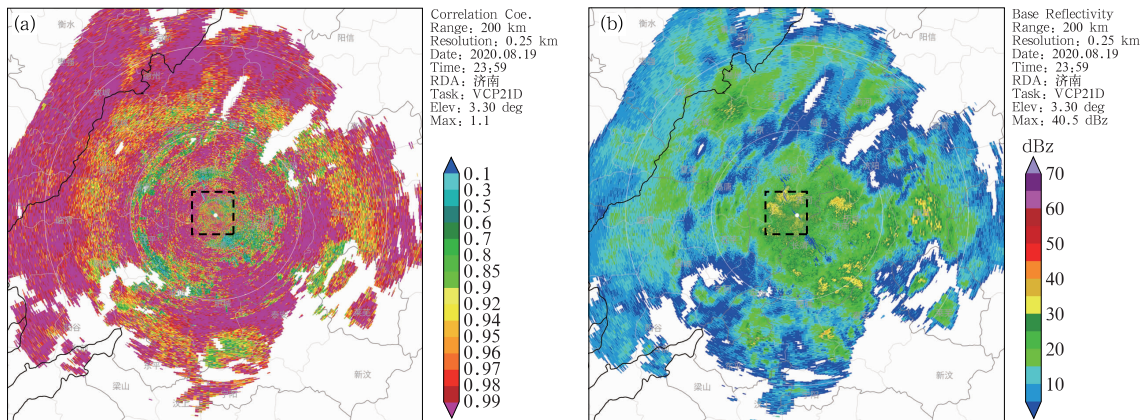


图 14 2020 年 8 月 19 日 23:59 济南雷达站 3.3°仰角(a)CC 与(b) Z_H 分布

Fig. 14 Distribution of (a) CC and (b) Z_H from Jinan Radar Station at 3.3° elevation at 23:59 UTC 19 August 2020

达站周围大片区域(黑色虚线方框)CC分布在 $[0.90, 0.97]$,这是由降水回波与非降水回波叠加(图14b)导致,利用径向连续性检验无法将其滤除。其他仰角层(图略),融化层特征不明显,该次试验判断为融化层的距离库仅来自 3.3° 仰角,导致第20百分位数对应的高度较低,融化层厚度过大。8月12日23:59试验问题大致相同,不再赘述。

从上述分析可见,改进后的MLDA对融化层的识别效果优于原始MLDA,并且成功识别的融化层试验次数明显增多。但是对于降水回波与非降水回波混合的区域,仍然有大量距离库被错误识别为融化层,后期算法需要针对这一问题进行相应的优化,对混合型回波区域加以识别。

4 结 论

本文基于NSSL的MLDA原理,利用济南与青岛两部S波段双偏振多普勒雷达7—8月数据进行41次融化层识别试验,根据试验结果分析了MLDA的不足并进行了相应改进,获得以下结论。

(1)MLDA可以识别大部分试验的融化层,与探空 0°C 高度相比,部分试验识别的融化层顶高度平均绝对误差较大,相关系数较低,同时识别的融化层底高度过低,融化层厚度较大。

(2)在降水回波与非降水回波混合的区域,有些距离库被错误识别为融化层,这影响了MLDA识别融化层的位置。在加入径向连续性检验后,MLDA-R1去除了大量错误识别的距离库,识别的融化层顶高度平均绝对误差降低,相关系数增大,融化层底高度对应温度分布更为合理,但是未识别出融化层的试验数明显增加。

(3)通过在扫描区域增加了 3.3° 仰角,MLDA-R2遗漏识别融化层的试验数明显减少,同时对融化层的识别效果有所提高。

(4)通过调整判别融化层的距离库总数阈值,MLDA-R3遗漏识别融化层的试验数进一步减少,个别试验受到混合回波的影响,识别的融化层底部高度过低。

本文仅仅检验了MLDA对夏季融化层的识别效果,后期还会收集不同季节的融化层个例,尤其是冬季个例,融化层顶往往在比较低的高度,检验改进

后的MLDA对不同季节融化层的识别效果。

参考文献

- 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 L P, Wu L L, Yang Y M, 2007. Development of fuzzy-logical two-step ground clutter detection algorithm[J]. Acta Meteor Sin, 65(2):252-260(in Chinese).
- 潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020.闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J].气象,46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian[J]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 孙晓光,刘宪勋,贺宏兵,等,2011.毫米波测云雷达融化层自动识别技术[J].气象,37(6):720-726. Sun X G, Liu X X, He H B, et al, 2011. Automatic identification technology of melting layer in millimeter wave cloud radar data[J]. Meteor Mon, 37(6):720-726(in Chinese).
- 魏凤英,2007.现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M].北京:气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,仰美霖,等,2021.X波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J].应用气象学报,32(2):200-216. Wu C, Liu L P, Yang M L, et al, 2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci, 32(2):200-216(in Chinese).
- 吴林林,刘黎平,袁野,等,2015.C波段车载双偏振雷达 Z_{DR} 资料处理方法研究[J].高原气象,34(1):279-287. Wu L L, Liu L P, Yuan Y, et al, 2015. Study on Z_{DR} processing algorithm of C-band mobile dual polarization radar[J]. Plateau Meteor, 34(1):279-287(in Chinese).
- 夏凡,张乐坚,张林,2021.基于双线偏振参量对北京X波段雷达非降水回波识别方法的研究[J].气象,47(5):561-572. Xia F, Zhang L J, Zhang L, 2021. Study of recognition algorithm of non-precipitation echo for Beijing X-band radar based on dual polarization parameter[J]. Meteor Mon, 47(5):561-572(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,徐芬,2020.江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析[J].气象学报,78(4):568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sinica, 78(4):568-579(in Chinese).
- 杨忠林,赵坤,徐坤,等,2019.江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J].气象学报,77(1):58-72. Yang Z L, Zhao K, Xu K, et al, 2019. Microphysical characteristics of extreme convective precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin during the Meiyu season based on polarimetric radar data[J].

- Acta Meteor Sin, 77(1):58-72(in Chinese).
- 张乐坚,程明虎,陶岚,2010. CINRAD-SA/SB 零度层亮带识别方法[J]. 应用气象学报, 21(2):171-179. Zhang L J, Cheng M H, Tao L, 2010. Bright band identification from CINRAD-SA/SB[J]. J Appl Meteor Sci, 21(2):171-179(in Chinese).
- Boodoo S, Hudak D, Donaldson N, et al, 2010. Application of dual-polarization radar melting-layer detection algorithm[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(8):1779-1793.
- Brandes E A, Ikeda K, 2004. Freezing-level estimation with polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 43(11):1541-1553.
- Fabry F, Zawadzki I, 1995. Long-term radar observations of the melting layer of precipitation and their interpretation[J]. J Atmos Sci, 52(7):838-851.
- Giangrande S E, Krause J M, Ryzhkov A V, 2008. Automatic designation of the melting layer with a polarimetric prototype of the WSR-88D radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(5):1354-1364.
- Glickman T S, 2000. Glossary of Meteorology[M]. 2nd ed. Boston: American Meteorological Society:855.
- Ma J L, Hu Z Q, Yang M L, et al, 2020. Improvement of x-band polarization radar melting layer recognition by the Bayesian method and its impact on hydrometeor classification[J]. Adv Atmos Sci, 37(1):105-116.
- Matrosov S Y, Clark K A, Kingsmill D E, 2007. A polarimetric radar approach to identify rain, melting-layer, and snow regions for applying corrections to vertical profiles of reflectivity[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(2):154-166.
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnic 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.
- Qi Y C, Zhang J, Zhang P F, et al, 2013. VPR correction of bright band effects in radar QPEs using polarimetric radar observations[J]. J Geophys Res, 118(9):3627-3633.
- 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]. Wea Forecasting, 29(5):1106-1119.
- Tang L, Zhang J, Simpson M, et al, 2020. Updates on the radar data quality control in the MRMS quantitative precipitation estimation system[J]. J Atmos Oceanic Technol, 37(9):1521-1537.
- Wu C, Liu L P, Wei M, et al, 2018. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China[J]. Adv Atmos Sci, 35(3):296-316.
- Zhang J, Langston C, Howard K, 2008. Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D[J]. J Atmos Oceanic Technol, 25(10):1859-1872.
- Zhang J, Qi Y C, 2010. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE[J]. J Hydrometeorol, 11(5):1157-1171.

(本文责编:俞卫平)