

基于 ROSE2.0 的普洱地区 CINRAD/CC 雷达冰雹探测算法评估及参数本地化

陈卓¹ 郭晓梅² 姚自伟^{1*} 周宝鹏³ 段玮⁴

(1 云南省普洱市气象局, 普洱 665000; 2 云南省气象台, 昆明 650034;
3 甘肃省陇西县气象局, 陇西 748100; 4 云南省气象科学研究所, 昆明 650034)

摘要 为提高冰雹探测算法(Hail Detection Algorithm, HDA)产品的可用性, 针对 2015—2020 年普洱地区监测到的 22 次冰雹个例, 利用新一代雷达业务应用软件 ROSE2.0 对相关雷达基数据进行回放及产品分析, 以命中率、虚警率、临界成功指数为指标对 HDA 算法在普洱地区的识别效果进行评估并给出本地化参数配置方案。结果表明: HDA 算法在普洱地区命中率接近 100%, 但虚警现象非常普遍, 使用强冰雹概率(Probability of Severe Hail, POSH)的预警效果优于任意大小冰雹概率(Probability of Hail, POH), 且冰雹尺寸越大 POSH 虚警的概率越低。进一步使用模拟测评法对 POSH 算法的适配参数进行分析, 发现正确输入降雹日当天的 0 °C 层和 -20 °C 层高度能有效减少 POSH 的虚警率及提高临界成功指数; 同时使算法预测的最大冰雹直径普遍偏大的情况得到控制, 其中, 中小冰雹直径偏离百分比减小 76.07%, 改善效果显著高于大冰雹。此外, 增大反射率因子及 POSH 阈值能有效控制虚警, 但也导致漏报次数快速增加, 当阈值太大时命中率明显降低, 为了保证较高的命中率和临界成功指数, 选择 $Z=50$ dBz 或 POSH=70% 为阈值能明显改善 HDA 算法的识别效果。

关键词 ROSE2.0; 冰雹探测算法; 效果评估; 本地化; CINRAD/CC 雷达

中图分类号: P412 **DOI**: 10.19517/j.1671-6345.20230166 **文献标识码**: A

引言

多普勒天气雷达是监测冰雹云活动强有力的工具, 预报员可以通过分析雷达回波特征与相关算法产品对可能产生冰雹的风暴单体进行有效预警。1998 年 Johnson 根据冰雹发生时风暴单体的反射率与特定温度、高度的关系提出了 WSR-88D 冰雹探测算法(Hail Detection Algorithm, HDA)^[1-2], 实现了对冰雹云的自动识别, 之后国内外学者对其进行了丰富的研究和应用。郭晓超等^[3]对遵义 12 次冰雹过程的冰雹预警产品进行评估, 发现 0 °C 层高度、反射率因子垂直廓线等因子对强冰雹算法误差的影响较大。刁秀广等^[4]对 2002—2004 年济南的冰雹个例进行了检验, 发现虽然 HDA 算法有较高

的命中率, 但同时误警率较高, 提高反射率因子阈值能有效改善算法识别能力。王瑾等^[5]提出冰雹概率预警阈值为 50% 时在贵州地区虚警率较高, 为 30% 时能获得最高的临界成功指数评分, 但并非每次强冰雹预警均能获得最佳结果。周金莲等^[6]检验了多部 S 波段雷达的强冰雹算法, 表明每个雷达站对冰雹的预测效果与各地天气气候特点关系密切。冰雹探测算法对强冰雹天气预测有较高准确性, 但仍需要在运用中不断改进^[7-10]。

以上研究表明 HDA 算法有较好的冰雹识别能力, 但由于不同地区天气气候背景、雷达扫描机制、参数设置等原因, 地区间冰雹算法的识别效果差异较大。在实际业务中发现用 HDA 算法预报冰雹往往会出现较多空报现象^[11], 直接不加甄别将导致大

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

云南省基层台站气象科技创新与能力提升计划重点项目(STIAP202233、STIAP202229)、云南省气象局创新团队(2022CX07)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J021)共同资助

作者简介: 陈卓, 女, 1988 年生, 学士, 高级工程师, 主要从事中短期及短时临近预报研究, Email: 757755046@qq.com

收稿日期: 2023 年 5 月 19 日; 定稿日期: 2024 年 1 月 11 日

* 通信作者, Email: yaotidd@163.com

©《气象科技》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

量虚警而使预报员不得不放弃使用该产品。加之算法是针对美国平原地区 CINRAD/SA 雷达设计,而目前我国天气雷达组网中云南布设的 12 部雷达均是 C 波段雷达,国内对低纬高原山区 C 波段雷达的冰雹探测算法识别效果研究较少,且其他省份的研究成果在本地不一定适用。作为云南省冰雹过程最多且灾害最重的地区之一,对普洱 CINRAD/CC 雷达冰雹探测算法的识别效果进行定量研究,并得出算法适配参数的优化配置方案运用于现行业务中,尽可能减少虚警干扰,能有效提高本地新一代雷达业务软件 ROSE2.0 冰雹自动识别预警能力,对 HDA 算法在低纬高原山区的应用具有重要意义。

1 冰雹探测算法

WSR-88D 冰雹探测算法 HDA 主要基于风暴定位与追踪算法 (Storm Cell Identification and Tracking, SCIT) 来确定风暴的三维结构^[1],再根据

反射率因子、风暴强中心高度及 0 °C 层、-20 °C 层所在高度的关系决定风暴的冰雹潜势^[12]。提供的产品包括:①任意尺寸冰雹概率 (Probability of Hail, POH);②直径大于 19 mm 的强冰雹概率 (Probability of Severe Hail, POSH);③最大冰雹直径预测 (Maximum Expected Hail Size, MEHS),单位为 mm。HDA 算法针对每个被识别的风暴单体,提供了是否有利于冰雹形成的指示。

1.1 任意尺寸冰雹概率计算

任意尺寸冰雹概率 POH 为 $H_{45 \text{ dBz}} - H_0$ 的函数,其中 $H_{45 \text{ dBz}}$ 为风暴 45 dBz 回波所对应的高度, H_0 为 0 °C 层高度。POH 根据 45 dBz 回波高度与 0 °C 层高度的差值得出冰雹产生的概率,详见表 1。当 $(H_{45 \text{ dBz}} - H_0) \leq 1.625 \text{ km}$ 时所对应的 POH 值为 0, $1.625 \text{ km} < (H_{45 \text{ dBz}} - H_0) \leq 1.875 \text{ km}$ 时 POH 值为 10%,依次类推。可见 45 dBz 回波所达到的最大高度是决定 POH 值大小的唯一因子。

表 1 任意尺寸冰雹概率 POH 与 $(H_{45 \text{ dBz}} - H_0)$ 的对应关系
Table 1 Corresponding relationship between POH and $(H_{45 \text{ dBz}} - H_0)$

$(H_{45 \text{ dBz}} - H_0)/\text{km}$	≤ 1.625	≤ 1.875	≤ 2.215	≤ 2.375	≤ 2.625	≤ 2.925	≤ 3.3	≤ 3.75	≤ 4.5	≤ 5.5	> 5.5
POH/%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

注: $H_{45 \text{ dBz}}$ 为风暴 45 dBz 回波所对应的高度, H_0 为 0 °C 层高度。

1.2 强冰雹概率计算

强冰雹指直径大于 19 mm 的冰雹,为了确定强冰雹的存在,处理方法类似于垂直积分液态水含量 VIL 的算法。强冰雹概率 P_{OSH} 的计算公式为:

$$P_{\text{OSH}} = 29 \ln \left(\frac{S_{\text{HI}}}{W_{\text{T}}} \right) + 50 \quad (1)$$

式中, W_{T} 为警报阈值 (单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), S_{HI} 为强冰雹指数 (单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 其计算公式如下:

$$W_{\text{T}} = 57.5 H_0 - 121 \quad (2)$$

式中,当 W_{T} 值 < 20 时, W_{T} 默认设为 $20 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$S_{\text{HI}} = 0.1 \int_{H_0}^{H_{\text{T}}} W_{\text{T}}(H) E dH \quad (3)$$

式中, $W_{\text{T}}(H)$ 为温度权重函数; E 为冰雹动能 (单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 通过计算每层风暴的最大反射率因子获得; H_0 为大气 0 °C 层高度, H_{T} 为风暴单体顶高 (单位: km)。计算式分别为:

$$W_{\text{T}}(H) = \begin{cases} 0 & H \leq H_0 \\ \frac{H - H_0}{H_{-20} - H_0} & H_0 < H \leq H_{-20} \\ 1 & H \geq H_{-20} \end{cases} \quad (4)$$

式中, H 为反射率因子 Z 所在高度, H_{-20} 是环境 -20 °C 层高度 (单位: km)。

$$E = 5 \times 10^{-6} \times 10^{0.084 W(Z)} \quad (5)$$

式中, $W(Z)$ 为反射率因子权重函数, 其计算式为:

$$W(Z) = \begin{cases} 0 & Z \leq Z_L \\ \frac{Z - Z_L}{Z_U - Z_L} & Z_L < Z \leq Z_U \\ 1 & Z \geq Z_U \end{cases} \quad (6)$$

式中, Z_L 表示计算冰雹动能的最小反射率因子, Z_U 为最大反射率因子, HDA 算法默认值为 $Z_L = 40 \text{ dBz}$, $Z_U = 50 \text{ dBz}$ 。

1.3 最大冰雹直径计算

通过式 (3)~(6) 计算得到强冰雹指数 S_{HI} 后, 最大冰雹直径 M_{EHS} (单位: mm) 的计算公式为:

$$M_{\text{EHS}} = 2.54 (S_{\text{HI}})^{0.5} \quad (7)$$

2 资料与方法

2.1 资料来源

为评估 HDA 算法在普洱的识别效果, 选取

2015—2020 年普洱境内发生的 33 次降雹天气过程与同期 HDA 产品为研究对象。HDA 产品使用 ROSE2.0 雷达产品生成软件 RPG 回放雷达基数据获得, 实况资料主要来源于普洱各县气象局的灾情报告、乡镇信息员收集的情况等。

由于一次过程可能包含多地降雹事件, 为提高实况资料的准确性及区分风暴单体是否降雹, 建立以下规则^[3]对资料进行筛选: ①对于记录的是一个时间段, 有具体的降雹地点, 则在该时间段内经过降雹地点且被识别的风暴单体入选; ②对于没有具体时间或地点的观测记录, 但该县域内有风暴单体被 HDA 算法识别且满足普洱冰雹预警识别指标^[13], 则将组合反射率或液态水含量值最大的时刻记为降雹时刻, 对应的区域记为降雹地点; 若不符合指标则舍弃该个例; ③如记录有降雹但未发现强回波, 则认为记录有误, 舍弃该个例; ④由于时间记录可能存在

误差, 同时考虑从风暴中生成冰雹至降落到地面有时间差、降雹时间与雷达扫描策略的同步误差, 本文采用“时间窗”方法^[14], 将实况资料记录时间前后 15 min 进入降雹区域内的强单体记为降雹风暴。由于在时间窗内风暴有一个移动范围, 且冰雹在降落过程中受环境风影响有水平位移, 将降雹地点半径 20 km 范围内被 HDA 算法识别的风暴单体记为降雹单体。

对 33 次过程的实况记录和风暴单体进行筛选, 确定其中有 8 次冰雹观测记录不满足规则②和③, 有 2 次过程冰雹落在雷达静锥区之内(半径小于 30 km), 有 1 次过程超出雷达观测范围(半径大于 150 km)。最终得到符合以上规则的 22 次冰雹天气过程(表 2), HDA 算法共识别有效降雹单体 4736 个, 其中有 2444 个属于强降雹单体。

表 2 2015—2020 年普洱地区有相对准确记录和雷达观测数据的冰雹个例

Table 2 Hail cases with exactly records and radar observation in Pu'er during 2015—2020

日期	地点	时间	直径/mm	日期	地点	时间	直径/mm
2015-01-08	景谷	13:28	15	2017-03-29	宁洱	16:14	15
2015-03-23	江城	17:54	11	2017-05-07	宁洱	13:30	15
	墨江	17:37	40	2018-03-11	宁洱	17:45	4
2015-03-24	澜沧	17:00	40	2018-03-17	江城	17:59	5
2015-04-09	思茅	18:43	20	2018-03-23	景谷	17:24—19:23	10
2016-04-17	江城	17:36—18:45	6		宁洱	19:30	10
2016-04-19	澜沧	19:00	23	2018-04-02	江城	18:10—18:33	7
2016-04-21	江城	17:36	14	2018-04-15	澜沧	15:30	20
2016-04-25	江城	15:35	18	2018-04-17	镇沅	13:50—16:00	12
2016-05-01	澜沧	16:45	11		墨江	16:43	12
2017-02-02	江城	22:45—22:55	19	2018-04-18	墨江	15:15—17:50	12
2017-02-03	宁洱	16:38—16:50	30	2020-04-23	江城	20:15	8
2017-03-27	澜沧	19:07	18				

2.2 评估及参数本地化方法

HDA 算法的识别能力采用命中率(Probability of Detection, P_{OD})、虚警率(False Alarm Rate, F_{AR})、临界成功指数(Critical Success Index, C_{SI})做为评估指标。结合降雹观测记录, 在时间窗内的所有雷达体扫时次, 以默认 50% 作为 POH、POSH 的警报阈值, 即当 POH 大于等于 50%、POSH 大于等于 50% 时, 判断为算法识别出冰雹, 评为命中; 当有降雹记录而算法没有识别, 评为漏报; 当算法识别出

冰雹而无实况记录时, 评为虚警。统计每一次过程命中、漏报、虚警的次数 R 、 M 、 F_A , HDA 算法的 P_{OD} 、 F_{AR} 和 C_{SI} 计算方法如下:

$$P_{OD} = \frac{R}{R + M} \quad (8)$$

$$F_{AR} = \frac{F_A}{R + F_A} \quad (9)$$

$$C_{SI} = \frac{R}{R + M + F_A} \quad (10)$$

MEHS 以偏差 (Deviation, D) 及偏离百分比

(Deviation Rate, D_R) 进行评估,具体计算式为:

$$D = p - f \quad (11)$$

$$D_R = \frac{|p - f|}{f} \times 100\% \quad (12)$$

其中, f 、 p 分别表示实况冰雹直径和算法预测的冰雹直径。由于时间窗内包含多个雷达体扫数据,对应多个 MEHS 值,每个单体取最大值为算法预测直径。

由式(7)知 MEHS 仅是高度 H 和反射率因子 Z 的函数,但 Z 为客观值,因此 MEHS 仅与两个特殊层高度有关。本文不对 MEHS 进行单独优化方案的设计,仅在特殊层高度订正时对其进行效果评估。

本文 HDA 算法的可选参数为特殊层高度 (H_0 、 H_{-20})、反射率阈值、POH 及 POSH 阈值,采用模拟测评方法,即在不改变其他参数设置的前提下,分别研究各参数在不同阈值时识别效果的差异,进而探究参数的最优本地化配置方案。

3 结果分析

测评中涉及 HDA 算法的各项参数默认值见表 3,模拟测评时各参数值可直接通过 ROSE2.0 RPGCW 窗口的环境变量和适配数据菜单进行设置,产品分析在 ROSE2.0 PUP 平台进行。

表 3 HDA 算法的各项参数默认值

Table 3 Default values of various parameters for HDA

0 °C 层高度	-20 °C 层高度	反射率阈值	冰雹概率阈值
km	km	dBz	%
3.2	6.1	45	50

3.1 POH 探测效果评估

通过统计,22 次冰雹天气过程中 HDA 算法共识别 POH 大于等于 50% 的风暴单体 4736 个,无漏报。其中出现降雹的单体 840 个, P_{OD} 为 100%, F_{AR} 为 82.23%, C_{SI} 为 17.77% (表 4)。可见默认参数时,POH 算法在普洱地区对降雹单体能够 100% 识别,但虚警次数比正确预警次数多 4.6 倍,临界成功指数较小,说明有较多的普通单体被误识别为降雹单体,虚警现象非常普遍。

3.2 POSH 探测效果评估

由于 22 次过程中有详细冰雹尺寸记录的大冰雹个例仅占样本的 8%,有 17 次过程的冰雹直径 \geq

10 mm,灾情报告中造成严重的经济损失,因此在评估 POSH 探测效果时,将 17 次过程归为强降雹过程。从表 4 可见当满足 POSH 大于等于 50% 时,被识别的 2444 个风暴单体中,有 657 个风暴单体预报正确,但有 1787 个风暴单体没有对应的降雹记录,另外还有 3 个冰雹记录没有风暴单体与之相关,即漏报。默认参数时 P_{OD} 为 99.55%, F_{AR} 为 73.12%, C_{SI} 为 26.85%。

3.3 POH 与 POSH 探测效果对比

综上,对于普洱雷达,POH 和 POSH 均有接近 100% 的命中率,即对出现冰雹的情况做到全命中,零漏报,但虚警现象亦非常普遍,临界成功指数较低。由于 POH 是一个经验关系式,云贵高原春季大多数对流云云底高度高于 3 km,夏季甚至更高^[5],若只关注 45 dBz 回波的高度,在 0 °C 层高度相同的情况下,高原地区云底高度较高但相对较弱的风暴,也可能产生与平原地区云底高度低却发展旺盛的单体同样高的冰雹概率,导致将其误识别为降雹单体,因此以 $POH \geq 50\%$ 为阈值在普洱地区可用性较低。

对比表 4 的数据还可以看出:选择 POSH 时冰雹虚警次数更少,临界成功指数更高,即 POSH 能有效减少对非降雹单体的误识别。鉴于用 POSH 识别冰雹效果优于 POH,但仍存在较大的虚警率和较小的临界成功指数,因此本文 HDA 算法的优化将只针对 POSH 开展。

表 4 默认参数时 POH 和 POSH 识别效果检验

Table 4 Verification of POH and POSH recognition performance under default parameters

	R	F_A	M	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}
	次	次	次	%	%	%
POH	840	3896	0	100	82.23	17.77
POSH	657	1787	3	99.55	73.12	26.85

注: R 和 P_{OD} 表示命中次数和命中率; F_A 和 F_{AR} 表示虚警次数和虚警率; M 和 C_{SI} 表示漏报次数和漏报率,下同。

4 POSH 算法的参数优化及效果评估

4.1 0 °C 层和 -20 °C 层高度订正

4.1.1 POSH 探测效果检验

由 POSH 计算式(1)~(4)可知:温度权重函数 W_T 与 0 °C 层和 -20 °C 层高度有直接关系,间接影响 POSH 值计算及冰雹直径预测。在冰雹形成

的物理意义上,0℃层和-20℃层高度意味着冰雹降落时融化层厚度和凝结增长厚度^[15-16],受季节、地域及环流变化影响较大。HDA算法中0℃层、-20℃层高度默认值为3.2 km和6.1 km,而滇南地区降雹天气对应的0℃层高度为3.8~5.5 km,平均4.5 km;-20℃层高度为7.1~8.9 km,平均7.8 km^[13],两者明显高于POSH默认值。本节将MICPAS软件中获取的降雹日0℃和-20℃层高度输入ROSE2.0 RPG软件,然后依次对17次过程中冰雹直径≥10 mm的个例进行回放,对反演后的POSH产品开展检验评估。

正确输入0℃层和-20℃层高度后,POSH对2016年5月1日过程没有预警提示,其余16次过程降雹单体正确识别次数共减少751次,虚警减少698次,增加68次漏报。图1反应了订正前后 P_{OD} 、 F_{AR} 、 C_{SI} 的变化趋势: P_{OD} 中位数由100%下降为92.86%, F_{AR} 由76.92%下降为64.58%, C_{SI} 则由25.19%上升为36.82%,证明正确输入降雹日0℃层和-20℃层高度能有效减少POSH虚警, C_{SI} 随之明显提高。

但并不是所有个例的 C_{SI} 都明显改善,其中有4次冰雹过程(20150323、20180323、20180417、20180418)平均 C_{SI} 仅提升0.67%, P_{OD} 下降23.30%, F_{AR} 下降3.34%,可视为对特殊层高度订正后 C_{SI} 没有变化但漏报次数增加。仔细分析冰雹实况记录发现这4次过程的冰雹直径为10~12 mm,而其余12次过程冰雹直径均大于13 mm,平均为22 mm,订正后 C_{SI} 平均提升16.19%, F_{AR} 下降17.03%, P_{OD} 下降4.01%。说明冰雹尺寸越大,正确输入特殊层高度后,普通单体被误判为降雹单体的概率降低,POSH识别效果越好,但提高高度阈值也意味着更多的小冰雹会被漏报。如2016年5月1日冰雹直径为11 mm,08:00 0℃层和-20℃层高度分别为5.2 km、8.0 km,超过默认高度2 km以上,在所有个例中差值最大,订正后因较高的计算门限,加之雷暴云自身发展高度的限制或雹胚在中低层的集中程度等因素,导致算法没有识别出冰雹,间接导致订正后 P_{OD} 下降。因此在实际业务中即使POSH有很高的命中率,小冰雹的预警仍需辅助其他雷达特征^[17-22]进行综合判断。

4.1.2 MEHS 预测效果检验

业务中MEHS可作为冰雹尺寸预报的重要参

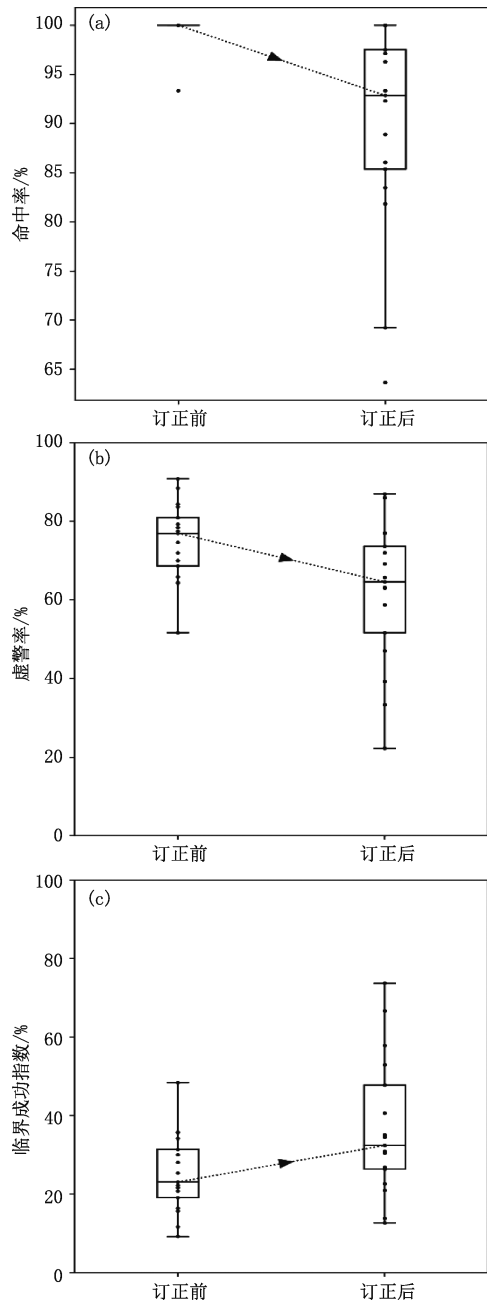


图1 0℃层和-20℃层高度默认参数和订正后的命中率

P_{OD} (a)、虚警率 F_{AR} (b)、临界成功指数 C_{SI} (c)箱线
(线段两端分别为最大值和最小值,箱形上部 and 下部横线分别为上四分位值和下四分位值,粗横线为中位线,虚线为两组数据的中位数连线,“▶”为变化趋势,下同)

Fig. 1 Box plots of P_{OD} (a), F_{AR} (b) and C_{SI} (c) by default parameters and corrected 0℃, -20℃ layer height (two ends of the vertical line: the statistical maximum and minimum values, horizontal lines located at lower and upper positions of box: the 25th and the 75th percentiles, horizontal thick line: the median values, symbol“▶”: the change trend, the same below)

考。在 POSH 命中的 16 次过程中, 默认特殊层高度时平均绝对偏差为 11.5 mm, 偏离百分比 58.1%, 可见 HDA 算法预测的冰雹尺寸明显大于观测值。0 °C、-20 °C 层高度订正后 MEHS 值减小, 平均绝对偏差为 2.1 mm, 减小 9.4 mm; 平均偏离百分比为 10.28%, 减小 47.82%, 说明特殊层高度对冰雹直径预测影响较大, 订正后冰雹大小整体预测更接近实况。

上文表明正确输入特殊层高度后 POSH 对大冰雹的识别效果优于较小冰雹, 因此本节对大冰雹(直径 >19 mm)及中小冰雹(直径 10~19 mm)的个例进行分组讨论, 结果见图 2。大冰雹组的偏差和偏离百分比中位数总是低于中小冰雹组, 可见 HDA 算法对大冰雹的直径预报误差更小; 进行高

度订正后, 两组个例的误差均呈下降趋势, 大冰雹组偏差中位数由 11.7 mm 降至 2.3 mm, 中小冰雹组由 16.7 mm 降至 5.7 mm; 大冰雹组偏离百分比中位数由 58.50% 降至 20.01%, 中小冰雹组由 111.33% 降至 35.26%。可见无论冰雹大小, 订正后的 MEHS 总是更接近实况, 中小冰雹组的偏离百分比中位数下降了 76.07%, 约是大冰雹组的 2 倍, 说明正确输入特殊层高度能显著减小中小冰雹直径的预测偏差。原因可能是含有大冰雹的风暴单体往往能长到更高的高度^[23], 提高高度阈值对其影响较小, 而以中小冰雹为主的风暴单体由于伸展高度有限, 特别是随着 0 °C 层高度增加, MEHS 算法认为对冰雹融化的作用增大^[24-25], 因此预测的冰雹直径较默认情况下减小的趋势明显。

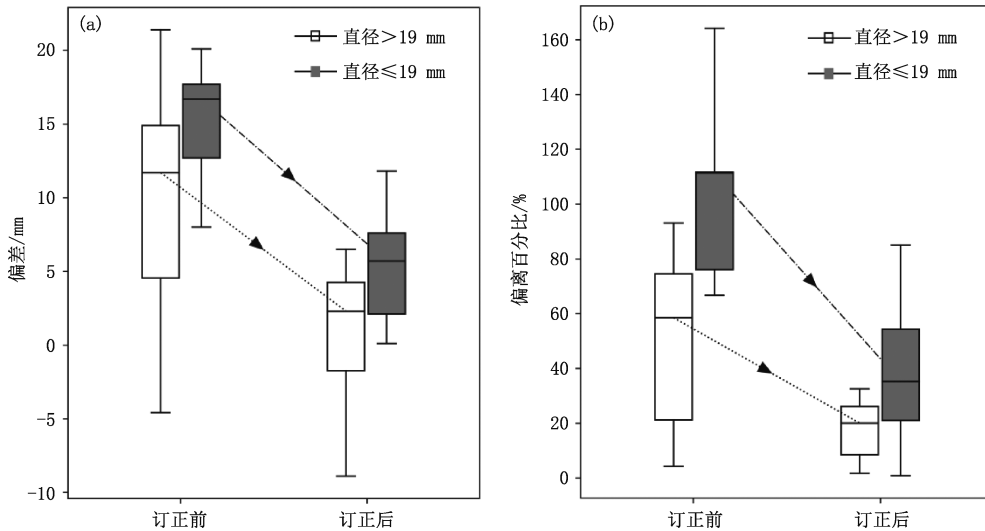


图 2 0 °C、-20 °C 层高度默认参数和订正后大冰雹组(白色箱体)、中小冰雹组(灰色箱体) MEHS 偏差(a)及偏离百分比(b)箱线

Fig. 2 Box plots of MEHS deviation (a) and deviation rate (b) by default parameters and corrected 0 °C and -20 °C layer height for large hail cases (white) and small hail cases (gray)

综上所述, 0 °C 层和 -20 °C 层高度订正后可有效降低 POSH 虚警率, 提高临界成功指数; 同时普遍使 MEHS 减小更接近观测值, 其中, 中小冰雹直径偏离百分比减小了 76.07%, 改善效果显著高于大冰雹, 但 MEHS 对大冰雹的直径预报误差更小。然而 HDA 算法设计的初衷是对可能产生降雹的高悬强回波进行预警, 因此即使在 POSH < 50% 时, 较大的 MEHS 值也可以为判断强风暴单体降雹概率提供参考, 仍然能起到提醒作用。

4.2 提高冰雹探测反射率阈值

最大反射率因子 Z 是计算 POSH 值的参数之一, Z 默认值为 45 dBz, 业务中发现在普洱地区比较容易满足, 本节将分别设置不同的 Z 值, 对 17 次强降雹过程进行 POSH 效果评估。

已有研究表明回波组合反射率 ≥ 55 dBz 在滇西南地区对冰雹预警有较好的指示性^[13], 因此首先将 Z 的阈值由 45 dBz 提高到 55 dBz, 此时命中率和误警率分别下降了 9.07%、12.37%, 临界成功指数增加 10.84%, 冰雹虚警次数减少 846 次, 漏报次数

增长近 20 倍(表 5)。可见,如果以 55 dBz 作为阈值,在正确预报次数相差不大的情况下,由于阈值提高,部分降雹单体不能被预警,在业务监测中如果预报员不能主观识别的话很容易被忽略,因此根据雷达反射率色标,以 $Z=50$ dBz、60 dBz、65 dBz 作为阈值再次对基数据进行回放,检验结果见表 5:

表 5 探测反射率 Z 不同阈值时的识别效果检验

Table 5 Verification of different thresholds of Z

阈值 dBz	R 次	F_A 次	M 次	P_{OD} %	F_{AR} %	C_{SI} %
45	657	1787	3	99.55	73.12	26.85
50	644	1036	25	96.26	61.67	37.77
55	608	941	64	90.48	60.75	37.69
60	401	278	257	60.94	40.94	42.84
65	184	17	452	28.93	8.46	28.18

当 $Z=50$ dBz 时,相比于 55 dBz 作为阈值, POSH 的虚警和命中次数变化不大,但漏报次数减少 60.93%;相比于默认值 45 dBz, F_{AR} 减少 11.45%, C_{SI} 提升 10.92%;当 Z 分别选择 60 dBz 和 65 dBz 时,虽然 F_{AR} 降至 8.46%,即算法对冰雹的误识别次数越来越少,这是我们所希望的结果,但同时正确预警数明显减少, P_{OD} 由接近 100% 下降为 28.93%,漏报次数则快速增加至默认值时的 150 倍。这说明随着 Z 阈值提高,虚警率降低的同时,因漏报次数快速增加而导致命中率明显降低,在业务使用中几乎失去了提前预警的意义。因此,在 POSH 参数设计时,为了获得较好的识别效果, Z 值并不是越大越好。对于普洱雷达, $Z=50$ dBz 能有效控制冰雹的虚警和漏报,临界成功指数较高,是最佳选择。

4.3 改变 POSH 阈值

ROSE2.0 PUP 软件在调用 HDA 产品时,是以 POSH 值是否达到设定阈值来进行报警提示,因此除了改变计算 POSH 所需的参数,即在保留原参数设置的情况下,直接改变 POSH 阈值也能改善识别效果。

表 6 是对 17 次强降雹过程采用不同 POSH 阈值时的检验结果,可以看出:POSH 阈值提高后 P_{OD} 和 F_{AR} 减小, C_{SI} 增大。从命中、虚警及漏报的次数来看,当 $POSH \leq 60\%$ 时,对冰雹误识别的概率较高,但当 $70\% \leq POSH \leq 80\%$ 时,虚警次数快速减少,能更好的判断风暴是否降雹;当 $POSH \geq 90\%$

时,正确与虚警次数差异减小,漏报次数明显增加,此时虽然获得较高的 C_{SI} 评分, P_{OD} 却下降近一半。说明提高 POSH 阈值也能有效控制算法对非降雹单体的误判,为了获得较高的命中率和临界成功指数,同时减少虚警次数,选择 $POSH=70\%$ 为阈值时效果最好。

表 6 POSH 不同阈值时的识别效果检验

Table 6 Verification of different thresholds of POSH

阈值 %	R 次	F_A 次	M 次	P_{OD} %	F_{AR} %	C_{SI} %
50	657	1787	3	99.55	73.12	26.88
60	630	1635	3	99.53	72.20	27.77
70	602	1324	10	98.37	68.73	31.10
80	529	786	58	90.12	59.77	38.53
90	398	481	102	79.60	54.72	40.57
100	246	276	187	56.85	52.84	34.73

4.4 同时改变三个参数阈值

为了进一步验证同时改变三个参数对 HDA 算法识别效果的影响,将 POSH 算法相关参数设置为降雹日 0 °C 层和 -20 °C 层高度、 $Z=50$ dBz、 $POSH=70\%$ 并进行检验,结果见图 3。

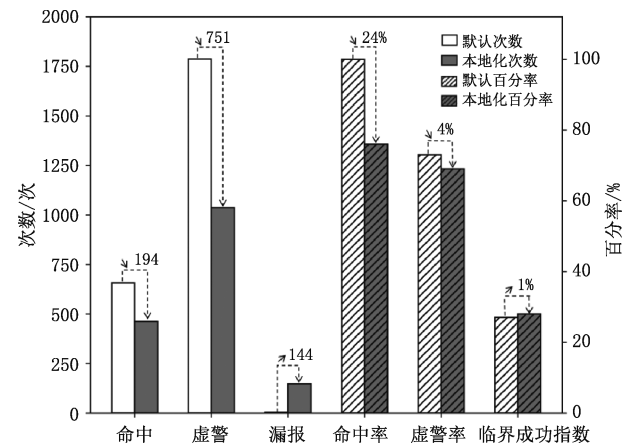


图 3 默认参数与多重参数本地化后识别效果检验结果对比 (箭头表示增加或下降,数字表示变化值)

Fig. 3 Comparison of default parameters and multiple optimization parameters optimization

(The arrow indicates increase or decrease, number indicates increment)

可见与默认参数时相比,同时改变三个阈值虽然虚警次数得到控制,但命中次数明显减少,漏报次数增加近 50 倍,意味着约四分之一的冰雹单体没有被预警,算法 P_{OD} 仅为 77.03%,下降 23.64%; C_{SI} 及

F_{AR} 甚至比单独设置参数阈值时效果略差。因此在 POSH 参数本地化时,同时设置多个参数的最佳阈值并不能有效提高 HDA 算法的识别效果。

5 结论与讨论

利用 ROSE2.0 对普洱境内 22 次冰雹天气过程的 HDA 算法识别效果研究发现:

(1)HDA 算法在普洱地区命中率接近 100%,但也有较多的普通单体被误识别为降雹单体,虚警现象非常普遍,临界成功指数较低。采用 POSH 产品时冰雹虚警次数更少,临界成功指数更高,预警效果优于 POH。且冰雹尺寸越大,POSH 虚警的概率越低,识别效果越好。

(2) 0℃层和-20℃层高度对 POSH 的识别能力影响较大,原默认值在普洱地区明显偏低,订正后能有效减少虚警,提高临界成功指数;此外,订正后 MEHS 减小且更接近观测值,中小冰雹直径偏离百分比减小 76.07%,改善效果显著高于大冰雹,但 MEHS 对大冰雹的直径预报误差更小。

(3)提高反射率因子及 POSH 阈值能有效控制虚警,但也导致漏报次数快速增加,当阈值太大时,命中率会降低,在业务使用中几乎失去了提前预警的意义。为了获得较高的命中率和临界成功指数,选择 $Z=50$ dBz 或 POSH=70%为阈值时效果最好。同时设置多个参数的最佳阈值并不能有效提高 HDA 算法在普洱地区的识别能力。

从研究可见,本文所做的判识改进是有效的。但需要注意的是:为了准确评估冰雹探测算法,理想情况是获得每个被识别单体是否降雹的详细记录,但即使开展专门的冰雹外场观测试验也很难做到;另外由于冰雹观测报告不规范等原因,使得建立地面冰雹观测资料与风暴单体之间的联系存在很多不确定因素,比如在时间窗内确定为降雹单体的风暴可能未降雹。因此本文是对 WSR-88D 冰雹探测算法的初步评估,随着今后冰雹观测记录完备及个例增加,将进一步得到更加可靠的评估结果。

参考文献

- [1] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm [J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 263-276.
- [2] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. Principles and business applications of Doppler weather radar (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [3] 郭晓超,肖蕾,李明元,等.冰雹指数的误差分析及其在冰雹云识别中的应用[J].气象与环境学报,2014,30(1):36-42. Guo X C, Xiao L, Li M Y, et al. Error analysis of hail index and its application to hail cloud identification [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 2014, 30(1): 36-42.
- [4] 刁秀广,黄秀韶,任钟冬,等. CINRAD_SA 雷达冰雹探测算法效果检验及参数本地化[J].气象科技,2007,35(5):35-40. Diao X G, Huang X S, Ren Z D, et al. Performance evaluation of hail detection with CINRAD-SA radar and localization of hail parameters [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2007, 35(5): 35-40.
- [5] 王瑾,刘黎平. WSR_88D 冰雹探测算法在贵州地区的评估检验[J].应用气象学报,2011,22(1):96-106. Wang J, Liu L P. The evaluation of WSR-88D hail detection algorithm over Guizhou region [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 2011, 22(1): 96-106.
- [6] 周金莲,钟敏,吴翠红,等. CINRAD/SA 雷达强冰雹识别算法的应用检验[J].暴雨灾害,2012,31(4):373-378. Zhou J L, Zhong M, Wu C H, et al. Application and test of severe hail detection algorithm based on CINRAD/SA radar [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 2012, 31(4): 373-378.
- [7] 杨金红,吴蕾,李瑞义,等.雷达监测产品在 2021 年强对流天气中的应用分析[J].气象研究与应用,2022,43(2):93-97. Yang J H, Wu L, Li R Y, et al. Application analysis of radar monitoring products in severe convective weather in 2021 [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 2022, 43(2): 93-97.
- [8] 朱平,李生辰.青藏高原东北部 HDA 算法检验评估及参数本地化[J].气象科技,2013,41(2):300-306. Zhu P, Li S C. Evaluation of hail detection algorithm and localization of hail parameters in northeastern Tibetan plateau [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2013, 41(2): 300-306.
- [9] 张玉洁,邵楠,高林,等.基于多源数据融合的综合气象观测产品系统设计与应用[J].气象与环境科学,2022,45(3):96-104. Zhang Y J, Shao N, Gao L, et al. Design and application of integrated meteorological observation product system based on multi-source data fusion [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2022, 45(3): 96-104.
- [10] 张林,杨洪平,张涛,等. ROSE 系统在沈阳一次强冰雹过程分析中的应用[J].气象科技,2013,41(2):242-249. Zhang L, Yang H P, Zhang T, et al. Application of ROSE system to severe hail analysis in Shenyang [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2013, 41(2): 242-249.

- [11] 马洪波, 陈长胜, 牛立强, 等. 基于 SWAN 系统的新冰雹指数应用及检验[J]. 气象灾害防御, 2016, 23(2): 20-25. Ma H B, Chen C S, Niu L Q, et al. Application and verification of new hail index based on SWAN system [J]. Meteorological Disaster Prevention (in Chinese), 2016, 23(2): 20-25.
- [12] 吴林林, 刘黎平, 郑媛媛, 等. 基于 SWAN 的冰雹探测算法研究[J]. 高原气象, 2014, 33(3): 823-831. Wu L L, Liu L P, Zheng Y Y, et al. Study of hail detection algorithm based on SWAN system [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2014, 33(3): 823-831.
- [13] 段鹤, 严华生, 马学文, 等. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象, 2014, 40(2): 174-185. Duan H, Yan H S, Ma X W, et al. Study of the method for hail forecasting and warning in southern Yunnan [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2014, 40(2): 174-185.
- [14] Witt A, Eihls M D, Stumpf G J. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D [J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 286-303.
- [15] 濮文耀, 李红斌, 宋煜, 等. 0℃层高度的变化对冰雹融化影响的分析和应用[J]. 气象, 2015, 41(8): 980-985. Pu W Y, Li H B, Song Y, et al. Analysis and application of the effect of 0℃ layer height on melting hail [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2015, 41(8): 980-985.
- [16] 黄丹萍, 梁岱云, 陆丽安. 南宁冰雹天气类型及预报预警指标[J]. 气象科技, 2020, 48(4): 554-560. Huang D P, Liang D Y, Lu L. A. Analysis of weather background and radar characteristics of hailstorms in Nanning [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2020, 48(4): 554-560.
- [17] 周小刚, 费海燕, 王秀明, 等. 多普勒雷达探测冰雹的算法发展与业务应用讨论[J]. 气象, 2015, 41(11): 1390-1397. Zhou X G, Fei H Y, Wang X M, et al. Doppler radar hail detection algorithm development and its operational application discussion [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2015, 41(11): 1390-1397.
- [18] 段鹤, 严华生, 王晓君, 等. 滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究[J]. 气象, 2011, 37(10): 1216-1227. Duan H, Yan H S, Wang X J, et al. Analysis on Doppler radar statistical features and distinguishing methods of mesoscale and microscale disastrous weather in southern Yunnan [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2011, 37(10): 1216-1227.
- [19] 夏文梅, 王晓君, 孙康远, 等. V型缺口在 C 波段多普勒雷达中的应用研究[J]. 气象, 2016, 42(1): 67-73. Xia W M, Wang X J, Sun K Y, et al. Application study of 'V' notch used in C band Doppler radar [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2016, 42(1): 67-73.
- [20] 尹丽云, 梅寒, 张腾飞, 等. 云南中部一次出现多个超级单体雹暴的强对流过程环境场和雷达回波特征[J]. 气象, 2021, 47(4): 424-438. Yin L Y, Mei H, Zhang T F, et al. Environmental conditions and radar characteristics of a severe convective hailstorm with multiple supercells in central Yunnan province [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2021, 47(4): 424-438.
- [21] 王晓君, 郑媛媛. 普洱市不同等级冰雹天气的雷达回波特征对比分析[J]. 气象, 2022, 48(7): 868-877. Wang X J, Zheng Y Y. Comparative analysis of radar echo characteristics of different grades of hail weather in Pu'er [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2022, 48(7): 868-877.
- [22] 李湘, 张腾飞, 胡娟, 等. 云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 88-93. Li X, Zhang T F, Hu J, et al. Doppler radar statistical characteristics and early warning index of Yunnan hail disaster [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 2015, 30(3): 88-93.
- [23] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. Some essential issues of severe convective weather forecasting [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2017, 43(6): 641-652.
- [24] 于怀征, 龚佃利, 朱秀红, 等. 山东冰雹时空分布特征与分类预报指标研究[J]. 气象科技, 2023, 51(2): 254-261. Yu H Z, Gong D L, Zhu X H, et al. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics of hails in Shandong province and classified forecast indexes [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2023, 51(2): 254-261.
- [25] 俞小鼎. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 2014, 40(6): 649-654. Yu X D. A note on the melting level of hail [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2014, 40(6): 649-654.

Evaluation of CINRAD/CC Radar Hail Detection Algorithm and Parameter Localization in Pu'er on ROSE2.0

CHEN Zhuo¹ GUO Xiaomei² YAO Ziwei¹ ZHOU Baopeng³ DUAN Wei⁴

(1 Pu'er Meteorological Bureau, Yunnan, Simao 675000; 2 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034;

3 Longxi County Meteorological Bureau, Gansu, Longxi 748100; 4 Yunnan Institute of Meteorological Sciences, Kunming 650034)

Abstract: In order to apply the Hail Detection Algorithm (HDA) related products more extensively and correctly, for the 22 hail cases monitored in Pu'er area from 2015 to 2020, the new Radar Operational Software Engineering (ROSE2.0) is used to replay radar-based data and analyse the relevant products. The recognition effect of the HDA algorithm in the Pu'er area is evaluated with the probability of detection (POD), false alarm rate (FAR), and critical success index (CSI), and a localised parameter configuration scheme is provided after that, which is useful to improve the local hail warning ability. The results show that although the POD of the HDA algorithm in Pu'er area is close to 100%, there are also many ordinary storm cells that are identified as hail cells mistakenly. The number of false alarms is very huge, and the low CSI cannot meet the requirement of the weather forecasting operation. The warning effect of using Probability of Severe Hail (POSH) is better than that of Probability of Hail (POH) for any size of hail, and the larger the size of hail, the lower the probability of false alarm of POSH. Further analysis of the adaptation parameters of the POSH algorithm by a simulation test method shows that the height of the 0 °C and -20 °C layers has a significant impact on the recognition ability of POSH, the original default value is significantly lower in Pu'er area, correctly inputting the height of 0 °C and -20 °C layers on the day of hail can effectively reduce the FAR and improve the CSI of POSH; at the same time, it can control the situation that the maximum hail diameter predicted by the algorithm is generally too large, and the maximum expected hail size (MEHS) is closer to the observation value; the deviation percentage of small and medium-sized hail diameter decreases by 76.07%, with a significantly higher improvement effect than large hail, but the diameter prediction error of MEHS for large hail is smaller. In addition, increasing the reflectivity factor and POSH threshold can effectively control FAR, but it also leads to a rapid increase in the number of missed alarms. When the threshold is too large, the POD significantly decreases. In order to achieve a higher POD and CSI, selecting $Z=50$ dBz or POSH=70% as the threshold can improve the recognition effect of the HDA algorithm. Setting the optimal threshold of multiple parameters at the same time can effectively improve the recognition ability of the HDA algorithm in Pu'er.

Keywords: ROSE2.0; hail detection algorithm; effect evaluation; localization; CINRAD/CC radar

Received: 2023-5-19 Accepted: 2024-1-11

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)