暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于雷达回波区域嵌套的致洪暴雨预警方法研究

孔文甲 何明琼 刘天琦 殷楠 王志伟 苏 贾雪婷

Research on a warning method for flash-flood rainstorms based on multi-scale, macro-to-micro nested radar echo analysis

KONG Wenjia，HE Mingqiong，LIU Tianqi，YIN Nan，WANG Zhiwei，SU Yue，JIA Xueting

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-207

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

两个超级单体导致的冀豫交界区极端下击暴流预警分析

Analysis of early warning of extreme downbursts induced by two supercell storms in the border area between Hebei and Henan Provinces

暴雨灾害. 2022, 41(3): 254-265 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.002

基于改进卷积技术的雷达回波图像质量控制方法研究

Study on radar echo image quality control based on improved convolution technology

暴雨灾害. 2022, 41(5): 598-606 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-011

一次多单体冰雹天气过程的雷达回波与闪电特征分析

Analysis of radar echo and lightning characteristics in a multi-cell hail weather event

暴雨灾害. 2020, 39(3): 250-258 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.005

2021年盛夏苏中南一次强冰雹过程大气环境与雷达回波特征

Atmospheric environment and radar echo characteristics of a strong hail event in central and southern Jiangsu in midsummer in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 167-173 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.007

宁波两次下击暴流的环境条件与多普勒雷达特征对比分析

A comparative study on environmental conditions and doppler radar echo characteristics of two downburst events in Ningbo

暴雨灾害. 2025, 44(3): 340-351 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-157

2022年广西雷暴活动特征分析

Statistic analysis of thunderstorm characteristics in Guangxi in 2022

暴雨灾害. 2024, 43(6): 702-712 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-117

关注微信公众号，获得更多资讯信息

孔文甲,何明琼,刘天琦,等.2025.基于雷达回波区域嵌套的致洪暴雨预警方法研究[J].暴雨灾害,44(6):744−754. KONG Wenjia, HE Mingqiong, LIU Tianqi, et al. 2025. Research on a warning method for flash-flood rainstorms based on multi-scale, macro-to-micro nested radar echo analysis [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):744−754 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−207

基于雷达回波区域嵌套的致洪暴雨预警方法研究

孔文甲[1], 何明琼[2], 刘天琦[3], 殷楠[1], 王志伟[3], 苏玥[4], 贾雪婷[5]

(1. 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051; 2. 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 3. 内蒙古自治区气象数据中心, 呼和浩特 010051; 4. 内蒙古自治区人影中心, 呼和浩特 010051; 5. 内蒙古自治区商都县气象局, 商都 013450)

摘　要: 天气雷达是对灾害性天气监测预警极为有效的工具。根据 2005—2022 年内蒙古自治区呼和浩特市降水量资料、多普勒天气雷达基数据、暴雨洪涝资料, 选取雷达 1 km 高度等高距离方位显示图 (Constant Altitude Plan Position Indicator, CAPPI) 中雷达回波的强度、面积、梯度等特征参数, 根据致洪暴雨雷达回波的尺度差异, 确定致洪暴雨预警分级阈值。首次研发了雷达回波区域嵌套 (“大区”和“小区”结合) 分析技术方法 (Radar echo Nested Analysis Technique, RNAT), 并建立预警指标模型, 用于致洪暴雨预警。以 2024 年 8 月 8—9 日内蒙古自治区致洪暴雨过程为例, 对该模型的预警效果进行客观自动识别检验, 结果表明: (1) 雷达回波区域嵌套预警致洪暴雨指标模型的“小区”最优面积为 289 km^2, 最佳边长为 17 km。(2) 应用百分位法对最优面积识别的对流单体强度定级, 确定了雷达回波区域嵌套“小区”强降水权重最大参数大于 40 dBz 的面积参数 (S_{40}) 取值范围: 蓝色 (60 km^2<S_{40}≤120 km^2)、黄色 (120 km^2<S_{40}≤180 km^2)、橙色 (180 km^2<S_{40}≤210 km^2)、红色 (S_{40}>210 km^2) 预警指标。(3) 个例检验结果表明, 雷达回波区域嵌套预警致洪暴雨模型, 可有效提高雷达回波对致洪暴雨的预警能力, 通过“小区”雷达指标判断预警可精准定位洪涝风险点并根据回波演变发布强降水预警, 有助于提升天气雷达对强降水等灾害性天气的定时、定点、定量预警靶向发布能力。

关键词: 致洪暴雨; 雷达回波; 区域嵌套; 自动预警

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−207

Research on a warning method for flash-flood rainstorms based on multi-scale, macro-to-micro nested radar echo analysis

KONG Wenjia[1], HE Mingqiong[2], LIU Tianqi[3], YIN Nan[1], WANG Zhiwei[3], SU Yue[4], JIA Xueting[5]

(1. *Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory*, *Hohhot* 010051; 2. *Hubei Meteorological Service Center*, *Wuhan* 430205; 3. *Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Data Center*, *Hohhot* 010051; 4. *Inner Mongolia Autonomous Region Weather Modification Center*, *Hohhot* 010051; 5. *Shangdu County Meteorological Bureau*, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *Shangdu* 013450)

Abstract: Weather radar serves as an extremely effective tool for monitoring and early warning of severe weather events. Based on precipitation data, Doppler weather radar base data, and rainstorm-flood disaster records in Hohhot, Inner Mongolia Autonomous Region from 2005 to 2022, characteristic parameters of radar echo, such as intensity, area, and gradient at the 1 km constant altitude plan position indicator (CAPPI) level were selected and the thresholds for grading flood warning levels were determined. For the first time, we developed the Radar Echo Nested Analysis Technique (RNAT), which integrates multi-scale regional analysis, and established an early warning indicator model for rainstorm-induced floods. The warning effectiveness of this model was objectively and automatically evaluated using the flood-triggering rainstorm event that occurred in Inner Mongolia Autonomous Region on August 8–9, 2024. The results are as follows. (1) The optimal "small area" in the nested radar echo region warning model is 289 km^2, with a corresponding side length of 17 km. (2) Percentile method was applied to classify the intensity of convective cells identified within the optimal area, establishing the range of the area parameter S_{40} (area with strong precipitation weight parameter greater than 40 dBz) for the "small area" in the nested region: blue warning (60 km^2<S_{40}≤120 km^2), yellow warning (120 km^2 < S_{40}≤180 km^2), orange warning (180 km^2< S_{40}≤

收稿日期: 2024−11−28; **定稿日期**: 2025−02−24

资助项目: 东北区域气象科技协同创新联合基金项目 (2024GX002); 中国气象局气象能力提升联合研究专项 (23NLTSZ009)

第一作者: 孔文甲, 主要从事灾害天气短时预警技术开发研究。E-mail: 635065635@qq.com

通信作者: 何明琼, 主要从事专业气象预报及服务方法研究。E-mail: 25450278@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

210 km^2), and red warning (S_{40}>210 km^2). (3) Case validation shows that the nested radar echo region indicator model can effectively enhance the early warning capability for flood-triggering rainstorms. By using the "small area" radar indicators, this model can precisely locate the flood risk points and facilitate the issuance of progressive heavy rainfall warnings based on echo evolution. This contributes to improving the targeted issuance of timely, location-specific, and quantitative early warnings for severe precipitation and other disastrous weather events using weather radar.

Key words: flood-inducing rainstorms; radar echo; region nesting; automatic alerts

引　言

内蒙古自治区地处我国北疆, 首府呼和浩特市位于自治区中部, 以山地和平原两大地形地貌为主, 市区海拔高度 1 040 m, 年平均降水量 400 mm 左右。夏季 (6—8 月) 是一年中降水相对集中的季节, 降水量约占全年降水量的 60%~70%。虽然降水量并不充沛, 但强降水仍可致市内的大黑河、小黑河等流域出现洪涝灾害, 如 1959 年 7 月 26—27 日、1998 年 8 月 7—8 日、2021 年 7 月 15—16 日, 呼和浩特市因强降雨造成山洪、城市内涝等灾害, 地势低洼区域受灾严重, 部分路段积水深达数米, 并出现路面塌方等严重事故。因此, 暴雨 (特别是致洪暴雨) 预警是呼和浩特市气象部门迫切需要研究的课题之一。

新一代天气雷达 (CINRAD) 在灾害性天气监测、预警方面, 发挥着不可替代的作用, 可监测暴雨、冰雹、龙卷等灾害性天气的发生发展 (俞小鼎等, 2006)。张家国等 (2011) 在对比分析多普勒天气雷达反射率因子回波形态、结构、暴雨落区以及主要影响天气系统的基础上, 概括了湖北省区域性暴雨雷达回波模型。邓虹霞等 (2019) 研究发现, 雷达回波形状主要有块状、带状、混合型等三种, 40 dBz 以上回波是强降水雷达回波的重要信号。桂园园等 (2020) 指出暴雨有对流型降水、混合型降水两种类型, 对流性降水的强回波中心强度可达 50~60 dBz; 混合型降水回波强度偏弱, 在 45 dBz 左右, 但 45 dBz 强回波顶高不超过 6 km。陈文龙等 (2022) 利用西昌多普勒天气雷达基数据, 对 2020 年 6 月 26 日凉山州北部的致洪暴雨天气成因进行诊断分析, 发现雷达回波表现出显著的逆风区和“列车效应”特征。陈鲍发等 (2017) 采用数理统计、天气学分析和图像识别等方法, 对 2008—2018 年赣东北致洪暴雨的天气分型和雷达拼图回波特征进行分析, 为监测赣东北致洪暴雨过程提供了依据。陈鲍发等 (2022) 根据 2000—2020 年江西省昌江流域 10 次特大暴雨过程, 从多普勒天气雷达组合反射率、回波顶高、垂直累积液态水含量、45 dBz 的强回波伸展高度、强回波面积等参数, 得出特大暴雨预警指标。张晓茹等 (2024) 利用多源资料, 对六盘山区的一次强对流暴雨进行综合分析, 指出 50 dBz 以上强度回波面积、垂直累积液态水含量、回波顶高、差分传播相移和差分反射率因子的大值区对强降水落区有较好的指示意义。刘懿枢等 (2024) 在分析江西信江流域大暴雨过程中短时强降水 (≥30 mm·h^{-1}) 的雷达回波特征时指出, 当回波强度≥45 dBz 且强回波面积为 200~399 km^2 时, 易产生≥5 mm·(10 min)$^{-1}$ 雨强; 当回波强度≥50 dBz 且强回波面积≥500 km^2 时, 易产生≥10 mm·(10 min)$^{-1}$ 雨强。

随着计算机技术的高速发展, 机器学习方法与雷达回波资料相结合, 被应用于暴雨或强降水过程的分析研究。Kufigowski 等 (1998) 在降雨数值分析的基础上, 引入了人工神经网络进行局部地区强降雨分析; Luk 等 (2001) 使用多层前反馈神经网络、偏循环神经网络和时间延迟神经网络三种方法对帕拉玛塔河流域上游暴雨量进行预测。王坚红等 (2015) 基于局地雷达回波基数据强度, 采用 Lucas-Kanade 局部光流法、皮尔逊 III 型方法和广义帕累托方法, 构建降水系统的雷达回波动态综合特征与下 1 h 局地强降水极值概率间的统计关系指标。Mosavi 等 (2018) 对使用机器学习方法开展致洪暴雨和洪水预报的文献进行了综述。黄建伟等 (2021) 研究了一种基于 XGBoost 集成学习算法的雷达回波与降雨关系分析模型。Tuyen 等 (2022) 提出了 RainPredRNN 方法, 将 Unet 分割模型和 PredRNN_v2 深度学习模型相结合, 用于基于天气雷达回波图像的降水临近预报。

天气雷达探测距离越大, 越能早发现移来的天气系统, 做到早发现早预防; 探测范围越广, 越能全面分析天气系统的规模、纹理和结构。学者们大多根据雷达回波的强度、高度、形态等特征, 对致洪暴雨或强降水过程进行分析、研究、预警。较少将不同区域下的雷达回波强度、面积、梯度等特征信息有机结合并加以综合应用。孔文甲等 (2024) 分析表明, 在雷达探测范围的“大区”内不同天气系统雷达回波强度、面积、梯度不同, 尤其对流天气系统, 在空间分布上极不均匀, “大区”内雷达特征相近而对流系统所覆盖范围的“小区”雷达特征差异很大, 研究对流系统所覆盖范围的“小区”雷达特征能认识对流系统的生消演变, 利于及时发布“关键区 (小区)”预警。

呼和浩特地区洪涝灾害多由局地暴雨引发, 对

流系统引发的短时强降水事件占比达 59.6% (许晶等, 2023; 周晓敏等, 2023), 客观、定量、综合研究雷达探测范围“大区”和对流系统所覆盖范围的“小区”雷达特征, 对“靶向”发布灾害天气预警信息具有重要意义。因此, 本文利用 2005—2022 年呼和浩特暴雨洪涝事件雷达回波图像资料, 基于雷达回波强度、强回波面积、梯度等重要特征参数, 首次研发了 RNAT, 并构建相应的预警指标模型, 据此对致洪暴雨进行预警, 并以 2024 年 8 月 8—9 日内蒙古自治区暴雨洪涝过程为例进行检验, 旨在为强降水等灾害天气预警预报提供技术支撑。

1 资料说明与研究方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括: (1) 根据 2005—2022 年内蒙古自治区呼和浩特市洪涝灾情记录资料, 共收集了 68 个暴雨洪涝个例, 资料来源于呼和浩特市应急管理局, 用以检索发生洪涝灾害时的雷达数据及灾情。(2) 2005—2022 年、2024 年 8 月 8—9 日呼和浩特多普勒天气雷达 (C 波段, 型号为 CINRAD/CD, 探测半径 200 km, 最佳探测半径 100 km) 回波基数据资料及 2024 年 8 月 8—9 日内蒙古自治区 2 740 个气象站 (含国家气象站、省级气象站, 以下分别简称国家站、省级站) 逐时降水资料, 来源于内蒙古自治区气象数据中心, 用以分析“小区”面积大小及雷达参数特征、发生洪涝灾害时的降雨量。

1.2 研究方法

1.2.1 基于 RNAT 的致洪暴雨预警技术及方法

雷达回波图像分析表明, 雷达探测范围越大, 越能全面了解天气系统, 但精细化气象服务需求则要精细分析小区域的雷达回波特征。朱乾根等 (2007) 研究表明, 导致洪灾的强降水雷达回波在空间尺度上从 200 km^2 到 2 000 km^2 不等, 针对强降水预警靶向发布需求, 首次提出了雷达回波区域嵌套技术 RNAT, 即选取雷达 1 km 高度 CAPPI 雷达回波图像, 将雷达有效探测区域(大区)划分为边长为 17 km 的正方形网格单元 (小区), 分别计算并提取“大区”和“小区”雷达回波特征参数, 进行“全局降水类型识别与分类 QPE”+“网格化暴雨预警等级判定”的区域嵌套回波分析, 最终生成覆盖整个雷达区域的、具有明确预警等级指示的精细致洪暴雨预警指导产品, 为预报员发布精准、及时的暴雨预警提供强有力的客观依据和决策支持。

根据 2005—2022 年内蒙古自治区呼和浩特市暴雨洪涝灾情记录, 按洪涝灾害发生日期, 检索雷达资料, 得到 52 d 致洪暴雨雷达基数据文件, 将其处理为地面 1 km 高度的 CAPPI 图像, 共 12 480 个雷达回波 CAPPI 图像文件, 质量控制后有 10 726 个文件。采用机器学习中的聚类分析 K-均值算法 (Han et al., 2012), 从雷达回波区域嵌套的区域划分、“大区”及“小区”特征参数提取、雷达回波特征最优参数识别等方面, 提出了雷达回波区域嵌套 (“大区”和“小区”结合) 技术 (即 RNAT), 利用该技术预警致洪暴雨, 设计业务流程, 形成 RNAT 预警致洪暴雨的方法。对该方法的应用步骤介绍如下:

(1) 雷达回波区域嵌套的区域划分。将多普勒天气雷达最佳探测半径 100 km 的范围定义为“大区”, 见图 1。再将“大区”细分为边长 17 km (胡胜等, 2006) 的若干正方形“小区”, 即图 1 中的黑色小块 (“小区”示意区域), 位置可由雷达坐标定义, 对各“小区”编号, 纵坐标从上至下用英文字母, 横坐标从左到右用数字。如图 1 中黑色“小区”编号为“F16”, 基于位置编号的小区可根据雷达 CAPPI 特征参数, 对山洪沟、洪涝点等致洪暴雨次生灾害风险点发布精细化预警信息。

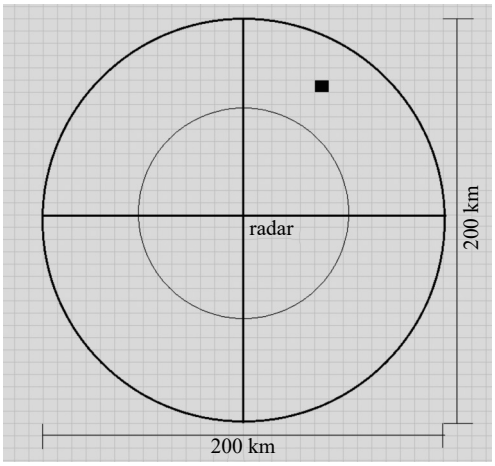


图 1 雷达回波区域嵌套示意图 (大圆、小圆分别代表 100 km、50 km 半径范围, 黑色矩形代表“小区”)

Fig. 1 Schematic diagram of nested radar echo regions (The large and small circles represent ranges with radii of 100 km and 50 km, respectively, the black rectangle represents the "sub-region")

(2) “大区”、“小区”特征参数提取。每个“小区”模拟为一个“小型雷达”, 对 10 726 个致洪暴雨雷达回波 CAPPI 图像中的数据进行遍历扫描, 提取逐个“小区”样本的回波强度均值 (Z_{ave})、回波面积 (S_{20})、风暴面积 (S_{30})、风暴面积比 ($C_{30/20}$) 四个特征参数, $Z_{ave}\geqslant 30$ dBz 的“小区”样本入选, 由于样本丰富, 不同“小区”的雷达回波信息可较好代表该尺度下的雷达回波特征。计算每个 CAPPI 图像文件的雷达特征参数, 参数定义及物理意义见表 1。

表 1 中的 7 个参数除 C_{20} 与雷达探测范围有关外, 其余 6 个参数均是雷达探测范围内描述探测对象的客观数据, 参数随时间的变化反映了探测对象的发展变化。以 Z_{ave}、S_{20}、S_{30}、$C_{30/20}$、$C_{40/30}$ 共 5 个典型参数为例, 68 个暴雨洪涝个例受灾面积位列前 10 的个例其参数演变情况见表 2。

(3) 雷达回波特征最优参数识别。将每个 CAPPI 图像文件的上述 7 个参数生成一行记录, 10 726 个 CAPPI 图像文件得到 10 726 行、7 列的雷达回波参数数字矩阵, 再对 7 列参数两两求相关系数, 相关系数矩阵 (表 3) 表明, Z_{ave} 与 S_{20} 相关系数为 0.319, C_{20} 为 S_{20} 与雷达探测面积比, 所以 Z_{ave} 与 S_{20}、C_{20} 相关系数相同; Z_{ave} 与 S_{30} 相关系数为 0.325, 与 $C_{30/20}$ 相关系数达 0.645, 说明 $C_{30/20}$ 较 S_{30} 更能反映雷达回

表 1 多普勒天气雷达回波 CAPPI 图像特征参数表

Table 1 Characteristic parameters of CAPPI image of Doppler radar echo

参数/单位	物理意义
回波强度均值(Z_{ave})/dBz	某个区域所有≥20 dBz 回波强度平均值
回波面积(S_{20})/km^2	CAPPI图像中所有≥20 dBz 回波像素点面积
回波面积比(C_{20})/%	S_{20}与雷达探测范围面积比值
风暴面积(S_{30})/km^2	CAPPI图像中所有≥30 dBz 回波像素点面积
风暴面积比($C_{30/20}$)/%	S_{30}与S_{20}面积比值
强回波面积(S_{40})/km^2	CAPPI图像中所有≥40 dBz 回波像素点面积
强回波面积比($C_{40/30}$)/%	S_{40}与S_{30}面积比值

表 2 2005—2022 年呼和浩特市受灾面积排位前 10 的暴雨过程雷达特征参数及预警级别

Table 2 Radar characteristic parameters and early warning situations of the top 10 rainstorm processes in terms of affected area in Hohhot, Inner Mongolia Autonomous Region from 2005 to 2022

序号	日期/(年/月/日)	受灾面积/hm^2	预警级别	预警时间	特征参数				
					Z_{ave}	S_{20}	S_{30}	$C_{30/20}$	$C_{40/30}$
1	2018/7/15	16 695	蓝色	08:29:32	31.3	1 178	650	0.6	0.2
			黄色	09:14:45	30.0	1 835	872	0.5	0.2
			橙色	14:57:07	31.0	4 159	1 989	0.5	0.3
2	2018/7/13	3 518	蓝色	13:32:56	29.0	1 032	371	0.4	0.3
			黄色	14:05:19	28.5	1 781	653	0.4	0.2
3	2021/5/13	3 420	蓝色	03:20:04	30.7	1 176	543	0.5	0.4
			黄色	03:43:00	31.3	1 873	929	0.5	0.4
			橙色	16:11:10	30.6	4 010	1 686	0.4	0.4
4	2021/8/18	3 020	蓝色	09:06:50	30.4	6 717	3 723	0.6	0.1
5	2018/7/19	1 392	蓝色	03:50:10	30.2	1 052	445	0.4	0.3
			黄色	07:26:31	27.8	1 839	540	0.3	0.2
6	2015/7/28	1 106	蓝色	00:06:20	27.5	7 605	2 202	0.3	0.2
7	2021/7/15	1 099	蓝色	11:59:46	31.2	1 055	483	0.5	0.4
			黄色	12:22:46	32.2	1 849	974	0.5	0.4
			橙色	13:20:47	33.7	4 291	2 532	0.6	0.4
8	2010/5/27	1 085	蓝色	00:01:32	26.6	1 286	301	0.2	0.4
			黄色	19:05:56	27.5	5 427	1 370	0.3	0.3
9	2020/7/11	1 010	蓝色	00:00:43	29.4	3 248	1 370	0.4	0.1
			黄色	00:4 652	29.5	3 400	1 448	0.4	0.2
			橙色	02:53:44	29.9	4 231	1 781	0.4	0.3
10	2021/6/23	1 000	蓝色	07:59:03	28.8	1 111	398	0.4	0.2
			黄色	09:01:37	30.0	1 827	883	0.5	0.2
			橙色	13:40:29	32.7	4 244	2 434	0.6	0.3

表 3 2005—2022 年呼和浩特市 68 个暴雨洪涝个例雷达回波特征参数相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of feature parameters of Hohhot Doppler radar echo from 68 flood-producing cases during 2005-2022

	Z_{ave}	S_{20}	C_{20}	S_{30}	$C_{30/20}$	S_{40}	$C_{40/30}$
Z_{ave}	1						
S_{20}	0.319*	1					
C_{20}	0.319*	1	1				
S_{30}	0.325*	0.861*	0.861*	1			
$C_{30/20}$	0.645*	0.352*	0.352*	0.507*	1		
S_{40}	0.332*	0.486*	0.486*	0.718*	0.569*	1	
$C_{40/30}$	0.481*	0.048	0.048	0.176	0.751*	0.498*	1

注: *表示通过0.001显著性水平检验。

波 Z_{ave} 与 S_{20} 相关性; Z_{ave} 与 S_{40} 相关系数为 0.332, 与 $C_{40/30}$ 相关系数为 0.481, 说明 $C_{40/30}$ 较 S_{40} 相关性更大, 结合物理意义, 选取 Z_{ave}、S_{20}、S_{30}、$C_{30/20}$ 四个参数为雷达回波 CAPPI 图像识别参数。

(4) 区域嵌套。“大区”用图 1 中雷达探测半径 100 km 的参数确定; “小区”用表 4 的阈值对雷达回波预警级别定级, 从而提高暴雨洪涝监测预警精度。

1.2.2 基于 RNAT 的致洪暴雨预警业务流程

通过提取洪灾历史雷达回波 CAPPI 图像中的特征参数, 提炼预警指标, 日常业务中, 从实时雷达回波数据提取特征, 随后与强降水预警阈值指标对比, 实现强降水预警实时发布, 业务流程如图 2 所示。

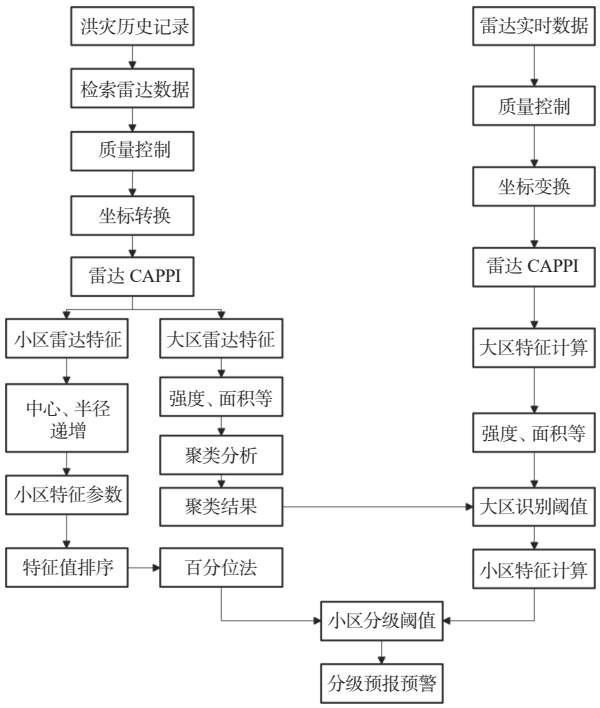


图 2 基于 RNAT 的呼和浩特市致洪暴雨预警业务流程图

Fig. 2 Operational flowchart for RNAT-based flash flood rainstorm warning in Hohhot City

2 结果与分析

2.1 区域嵌套“小区”最佳面积确定

2.1.1 区域嵌套“小区”最佳边长确定

呼和浩特天气雷达最佳探测半径为 100 km (孔文甲等, 2024), 即“大区”面积约 30 000 km^2。为获取最佳“小区”面积, 最小区域从边长 11 km 开始, 以 6 km 为步长, 递增至边长 101 km, 分析不同边长下“小区”监测的特征。由图 3 可见不同边长“小区”下 Z_{ave} 的最小值、25% 百分位数、50% 百分位数、75% 百分位数的变化情况: 上述参数均随着边长增大而减小; 不同边长“小区”的雷达回波强度最大值变化显著, 随着边长增大而迅速减小, 这是因为强回波较普通回波出现概率小, “小区”面积扩大则 Z_{ave} 有减小趋势, 而 Z_{ave} 的最大值减小更快。

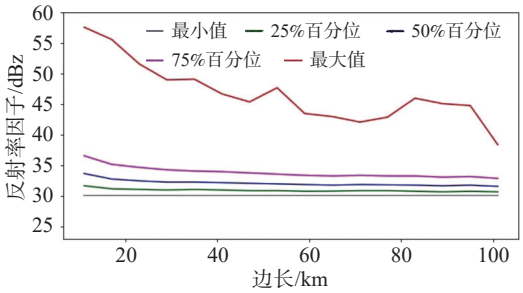


图 3 2005—2022 年呼和浩特多普勒天气雷达不同边长“小区”雷达回波反射率因子

Fig. 3 Radar reflectivity factor from grid cells with varying side lengths of Hohhot Doppler weather radar(2005-2022)

2.1.2 “小区”样本结果分析

小提琴图 (Violin plot) 是将箱线图与核密度图相结合的图形, 可直观反映 10 726 个雷达回波 CAPPI 图“小区”样本实测数据的分布情况及概率密度 (管理等, 2020), 横坐标是分析的数据对象占总样本的相对比例, 无量纲; 纵坐标是分析的数据对象的单位。

图 4 是 2005—2022 年呼和浩特致洪暴雨中从 Z_{ave}、S_{20}、C_{20}、S_{30}、$C_{30/20}$、S_{40}、$C_{40/30}$ 共 7 组特征参数图中选取的、辨识度较高的 2 组 (S_{30}、$C_{30/20}$) 多普勒天气雷达回波参数小提琴图。图 4a—c 分别为边长 11 km、17 km、23 km 的 S_{30}, 图 4d—f 分别为边长 11 km、17 km、23 km 的 $C_{30/20}$, 即图 4a—c 表示“小区”面积分别为 121 km^2、289 km^2 和 529 km^2 时 S_{30} 的分布情况。

对比图 4a、c 可见, 图 4a 中面积 121 km^2 占绝大部分, 即左偏, 图 4c 中面积 100 km^2 占绝大部分, 即右偏。是因为 10 726 个雷达回波 CAPPI 图既有大范围降雨又有对流性降雨, 但无论大范围降雨还是对流性降雨, 满足 Z_{ave}≥30 dBz 入选条件的回波区域

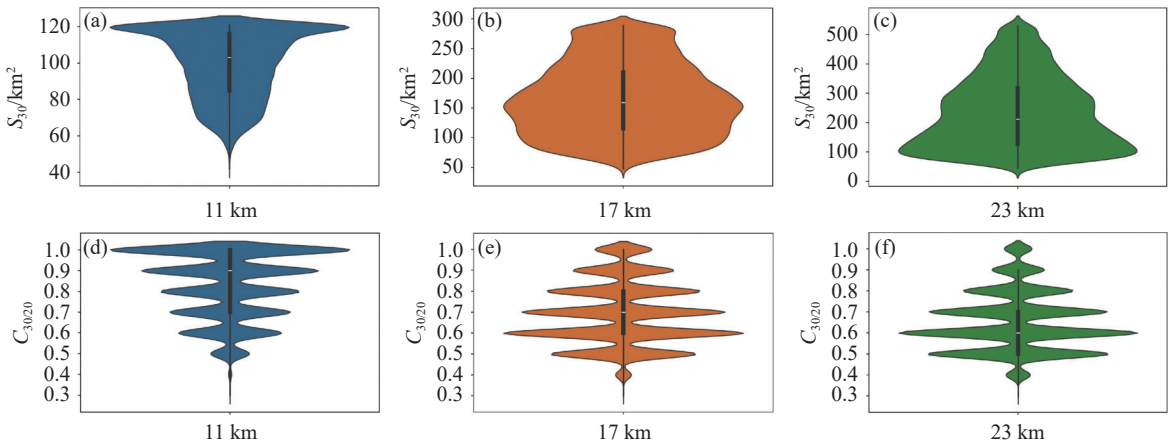


图 4 2005—2022 年呼和浩特致洪暴雨中边长分别为 11 km (a、d)、17 km (b、e)、23 km (c、f) 的“小区”内 S_{30} (a—c) 以及 $C_{30/20}$ (d—f) 的多普勒天气雷达回波参数小提琴图

Fig. 4 Violin plots of Doppler radar echo parameters for flood-producing rainstorms in Hohhot from 2005 to 2022. (a–c) S_{30} and (d–f) $C_{30}/_{20}$ of "small areas" with side lengths of (a, d) 11 km, (b, e) 17 km, and (c, f) 23 km

S_{30}≥121 km^2 所以左偏; 由于“小区”的面积扩大 Z_{ave} 有减小趋势 (图 3), 所以小区面积 529 km^2 (边长 23 km) 的情况下只有强度大、面积大的回波区域满足 Z_{ave}≥30 dBz 入选条件, 显然这样的回波区域占少数, 因此右偏。

图 4b 说明大范围降雨、对流性降雨两种情况下回波区域的特征背离: 第一丰值 S_{30} 大多约 160 km^2, 位于图 4b 中下部, 是正方形“小区”包含全部对流单体造成, 与 Warner 和 Austin (1978) 的研究结果相近。第二丰值 S_{30} 大多约 100 km^2, 位于图 4b 下部, 是正方形“小区”半包含对流单体造成; 因为单体随机分布, 且“小区”半包含对流单体的情况下 Z_{ave} 最大, 容易满足 Z_{ave}≥30 dBz 入选条件, 100/160=0.625, 正是“大半个”“小区”面积比例。第三丰值 S_{30} 大多约 289 km^2, 位于图 4b 最上部, 正是大范围强降雨下“小区”样本面积分布, 大范围强降雨情况下一张雷达回波 CAPPI 图理论上有 108 个“小区”样本, 但“小区”面积越大包含弱回波的概率越大, Z_{ave} 越小, 因为以“小区”理论面积 289 km^2 出现的概率在减小, 以至于图 4c“小区”理论面积增加到 529 km^2 时满足 Z_{ave}≥30 dBz 入选条件的最少, 导致图 4c 右偏, 即“小区”面积越大满足 Z_{ave}≥30 dBz 入选条件的越少。图 4d、e、f 表示“小区”面积分别为 121 km^2 (边长 11 km)、289 km^2 (边长 17 km) 和 529 km^2 (边长 23 km) 时, $C_{30/20}$ 的分布情况。图 4d 说明“小区”面积 121 km^2 的情况下 $C_{30/20}$ 第一丰值 1.0 占大部分, 图 4e 说明“小区”面积 289 km^2 的情况下 $C_{30/20}$ 第一丰值 0.6 占大部分。

综上可知, 强降水对流单体 S_{20} 大多约 289 km^2 (图略), S_{30} 大多约 160 km^2, $C_{30/20}$ 约为 0.6。

2.1.3 区域嵌套“小区”分析和预警指标

由上节分析可知, 确定边长 17 km、面积 289 km^2 的“小区”为嵌套“小区”, 即对流单体的优势尺度为 17 km, 与 β 中尺度下限相近 (寿绍文等, 2009), 应用“百分位法”(唐永兰等, 2018), 给出雷达特征参数阈值见表 4。

表 4 2005—2022 年呼和浩特多普勒天气雷达边长 17 km“小区”雷达回波特征参数阈值

Table 4 Parameter thresholds of Hohhot Doppler radar echo for a “small area” of side length of 17 km from 2005 to 2022

指标	Z_{ave}/dBz	S_{20}/km^2	C_{20}	S_{30}/km^2	$C_{30/20}$	S_{40}/km^2	$C_{40/30}$
最小值	30.10	130.00	0.45	34.00	0.02	0.00	0.00
25%百分位数	31.40	198.00	0.69	123.00	0.60	11.00	0.10
50%百分位数	33.10	257.00	0.89	165.00	0.70	30.00	0.20
75%百分位数	35.70	285.00	0.99	216.00	0.80	63.00	0.40
最大值	58.70	289.00	1.00	289.00	1.00	287.00	1.00

不同强度的对流单体因强度、面积不同, 导致雨强和降雨总量不同, 由此产生的暴雨洪涝灾害强度不同 (高毅, 2015)。结合上述分析, 确定 17 km 为正方形“小区”边长, 此时“小区”内的雷达特征参数代表对流单体的特征参数。对流单体分为普通单体和超级单体, 其水平尺度在 20 km 左右, 而超级单体相伴随的强天

气有各种级别的龙卷、冰雹、下击暴流和暴洪等 (俞小鼎等, 2006)。参考“大区”特征参数相关系数表 3 可见, “小区”强回波识别参数降维后 S_{40} 是权重最大参数, S_{40} 大则强度均值大, $C_{40/30}$ 大, 说明“小区”内天气强烈, 取值 0.5, 其他参数 Z_{ave}、S_{20}、S_{30}、$C_{30/20}$、$C_{40/30}$ 权重分别取值 0.1。应用百分位法对最优面积识别的对流单体定级, 确定了雷达回波区域嵌套“小区”强降水蓝色、黄色、橙色、红色预警指标, 见表 5。

表 5 呼和浩特多普勒天气雷达回波区域嵌套下的“小区”预警致洪暴雨各级阈值

Table 5 Parameter thresholds for flood-producing rainstorm warning levels of regionally-nested “small area” radar indicator of Hohhot Doppler radar echo

预警级别	Z_{ave}/dBz	S_{20}/km^2	S_{30}/km^2	$C_{30/20}$	$C_{40/30}$	S_{40}/km^2
蓝色	$25.0<Z_{ave}\leqslant30.1$	$130.0<S_{20}\leqslant198.0$	$25.0<S_{30}\leqslant123.0$	$0.2<C_{30/20}\leqslant0.6$	$0<C_{40/30}\leqslant0.1$	$60.0<S_{40}\leqslant120.0$
黄色	$30.1<Z_{ave}\leqslant31.4$	$198.0<S_{20}\leqslant257.0$	$123.0<S_{30}\leqslant165.0$	$0.6<C_{30/20}\leqslant0.7$	$0.1<C_{40/30}\leqslant0.2$	$120.0<S_{40}\leqslant180.0$
橙色	$31.4<Z_{ave}\leqslant33.1$	$257.0<S_{20}\leqslant285.0$	$165.0<S_{30}\leqslant216.0$	$0.7<C_{30/20}\leqslant0.8$	$0.2<C_{40/30}\leqslant0.4$	$180.0<S_{40}\leqslant210.0$
红色	$Z_{ave}\geqslant35.7$	$S_{20}>285.0$	$S_{30}>216.0$	$C_{30/20}>0.8$	$C_{40/30}>0.4$	$S_{40}>210.0$

综上, 区域嵌套预警致洪暴雨技术, 客观、定量分析了“大区”、“小区”的雷达回波特征参数, 可为规范化、标准化智能识别致洪暴雨发生地点、雨强和预警级别提供可行方案。

2.2 雷达回波区域嵌套技术预警致洪暴雨的指标模型检验

2.2.1 天气个例降水实况

2024 年 8 月 8—9 日受高空低槽和低层暖湿气流共同影响, 内蒙古自治区出现强降水天气过程, 强降水落区集中在自治区中西部的巴彦淖尔市乌拉特前旗、包头市和呼和浩特市 (图 5), 包头市大部地区出现大到暴雨, 全市平均降雨量 53.8 mm。强降水时段出现在 8 日 19:00—9 日 09:00(北京时, 下同)。累计降雨量最大出现在包头市固阳县协和义, 24 h 雨量达 172.3 mm, 最大小时雨强出现在巴彦淖尔市五原县套海镇, 达 50.5 mm·h^{-1} (8 日 19:00—20:00)。8 月 9 日 01:00—02:00 呼和浩特市武川县得胜沟乡蘑菇窑区域站雨强 19.7 mm·h^{-1}, 土默特左旗察素齐镇西沙尔沁区域站雨强 16.4 mm·h^{-1}, 达短时强降水标准 (常煜等, 2022)。此次降雨天气过程持续时间长、影响范围广、累计降雨量大, 降水极端性强, 巴彦淖尔市乌拉特前旗单站最大日降水量为近 20 a 第二位; 部分地区出现山洪、中小河流洪水、城市内涝等次生、衍生灾害。巴彦淖尔市应急管理局统计, 暴雨洪涝造成全市直接经济损失共计 1.57 亿元; 包头市应急管理局统计, 暴雨洪涝导致农作物受灾面积 3 680.92 hm^2、受灾人口 4 157 人、倒塌房屋 6 间、因灾死亡牲畜 207 头 (只), 直接经济损失 1 310.8 万元。

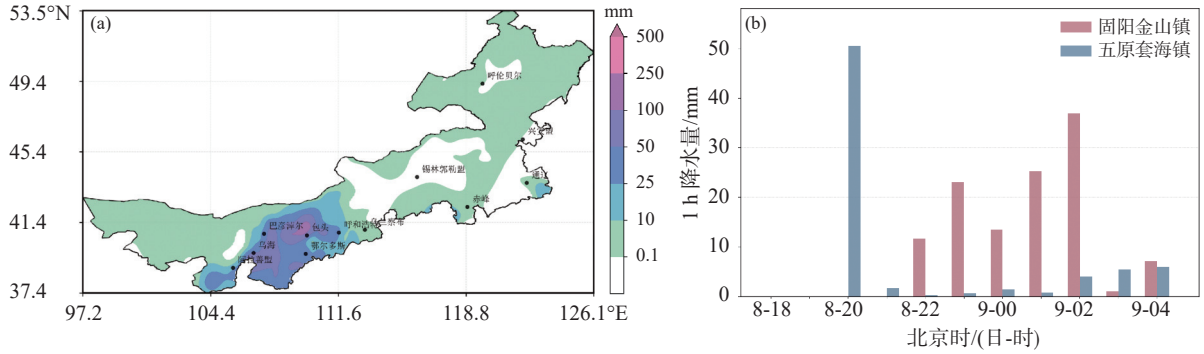


图 5 2024 年 8 月 8 日 08 时—9 日 08 时内蒙古自治区累积降水量 (a), 8 月 8 日 18:00—9 日 04:00 固阳县金山镇、五原县套海镇逐时降水量变化 (b)

Fig. 5 (a) Accumulated precipitation in Inner Mongolia Autonomous Region from 08:00 BT on August 8 to 20:00 BT on August 9, 2024, and (b) the variations of hourly precipitation at Jinshan Town in Guyang County, Taohai Town in Wuyuan County from 18:00 BT on August 8 to 04:00 BT on August 9, 2024

2.2.2 指标模型检验及结果分析

以上述天气过程为例, 对雷达回波区域嵌套技术预警致洪暴雨指标模型进行检验。图 6a 给出了 8 月 9 日 01:00—02:00 呼和浩特市各站 1 h 雨量实况, 图 6b 显示强回波区位于呼和浩特市西北部地区, 40 dBz 以上的雷达回波区域与强降水区域一致。

采用“大区”对本次暴雨过程进行监测。8 日 12:00—23:00, 雷达回波强度均值 Z_{ave} 维持在 32 dBz 左右; 8 日 13:00, S_{20} 迅速增大, 至 21:00 达最大, 即 25 000 km^2; S_{30} 在 19:00 达最大, 为 10 000 km^2; S_{40} 一

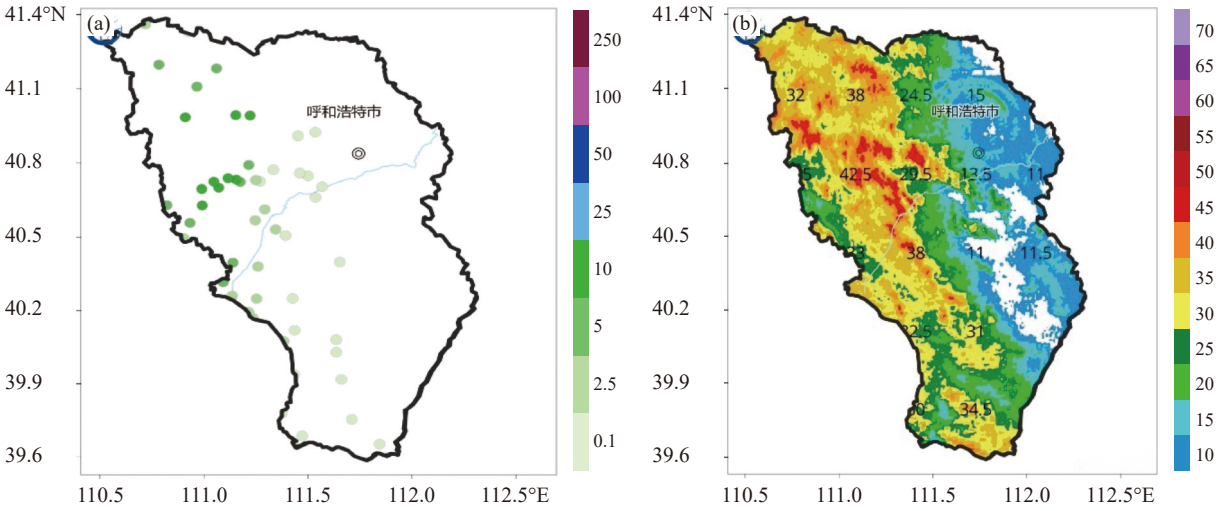


图 6 2024 年 8 月 9 日 01:00—02:00 呼和浩特市雨量 (a, 单位: mm) 和多普勒天气雷达组合反射率因子 (b, 单位: dBz)

Fig. 6 (a) Hourly precipitation (unit: mm) in Hohhot City and (b) composite reflectivity factor (unit: dBz) from Hohhot Doppler radar at 02:00 BT on August 9, 2024

直较大, 且基本不变。

此次过程“大区”雷达回波特征参数演变时序图 (图 7) 可见, 8 日 14:57“大区”Z_{ave} 为 30.4 dBz, S_{20} 为 1 874 km^2, S_{30} 为 819 km^2, $C_{30/20}$ 为 0.3, 阈值达到“大区”“黄色预警”级别。

表 6 为此次过程“大区”雷达回波强烈发展阶段参数演变, 可见 $C_{30/20}$ 在 0.5~0.7 之间, $C_{40/30}$ 在 0.1~0.2 之间, 对照表 5 可知, 此次降水过程 Z_{ave}、S_{20}、S_{30}、$C_{30/20}$ 四个特征参数指标均极大。对比表 2 和表 6 可见, 该过程具有极端性, 达到红色预警指标。

天气雷达探测范围广, 此次过程中土默特左旗国家站的小时降水量为 8.8 mm, 其周边地区雷达回波发展强烈, 强降水落区预警采用更为精细的小区预警指标检验, 表 7 包括了土默特左旗国家站及附近地区有三个小区预警, 分别为 F3、G4 和 G5, 其中 G4 为黄色预警, 各雷达参数如下: 位置编号 G4, Z_{ave} 为 41.8 dBz, S_{20} 为 289 km^2, S_{30} 为 283 km^2, S_{40} 为 176 km^2, $C_{30/20}$ 为 1.0, $C_{40/30}$ 为 0.7, 预警级别为黄色, 另两个小区预警参数详见表。根据预警指标生成了预警图 (图 8) 中黄色框定位置。

天气雷达不仅探测范围广, 而且探测周期短, 每 6 min 完成一次体扫, 进而可实现动态预警: 从 8 月 8 日 13 时开始, 小区的 C_{20} 显著增大, 到 20 时达到最大, 为总面积的 80%, $C_{30/20}$ 持续增大, 在 17:10—18:40 占比最大, 达 75%。

根据小区预警指标可知, 17:00—18:00, 土默特左旗 17:04 达蓝色预警指标, 17:09 达橙色预警指标, 17:15 达红色预警指标, 17:21 达橙色预警指标, 17:27 达蓝色预警指标, 17:44 达橙色预警指标, 17:50 达红色预警指标 (表 8)。由此可见, 通过“小区”

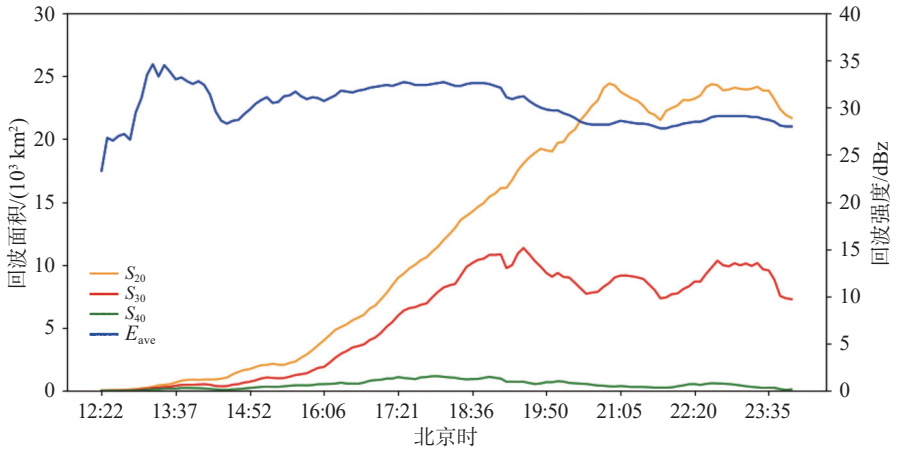


图 7 2024 年 8 月 8 日 12:22—23:35 呼和浩特市不同强度雷达回波面积与回波强度均值变化图

Fig. 7 Temporal evolution of the area and mean intensity of radar echoes at various intensity levels over Hohhot from 12:22 BT to 23:35 BT on August 8, 2024

表 6 2024 年 8 月 8 日 17—18 时呼和浩特多普勒天气雷达回波“大区”特征参数表

Table 6 The characteristic parameters table of Hohhot Doppler weather radar echo in the "large area" from 17:00 BT to 18:00 BT on August 8, 2024

时间	Z_{ave}/dBz	S_{20}/km^2	C_{20}	S_{30}/km^2	$C_{30/20}$	S_{40}/km^2	$C_{40/30}$
17:04:12	32.3	7 258	0.23	4 595	0.6	862	0.2
17:09:56	32.4	7 770	0.25	5 078	0.7	960	0.2
17:15:44	32.3	8 379	0.27	5 454	0.7	961	0.2
17:21:29	32.5	8 962	0.29	5 971	0.7	1 070	0.2
17:27:17	32.7	9 308	0.30	6 364	0.7	1 006	0.2
17:33:00	32.6	9 726	0.31	6 562	0.7	965	0.1
17:38:45	32.4	10 009	0.32	6 634	0.7	917	0.1
17:44:36	32.4	10 382	0.33	6 824	0.7	1 050	0.2
17:50:20	32.4	10 600	0.34	6 932	0.7	1 080	0.2
17:56:04	32.5	11 056	0.35	7 421	0.7	1 146	0.2

表 7 2024 年 8 月 8 日 18:13:22 土左旗基于呼和浩特雷达回波的“小区”洪涝风险预警参数表

Table 7 Flood risk parameters Table for various radar echo-based grid cells at 18:13:22 BT, August 8, 2024

位置	Z_{ave}/dBz	S_{20}/km^2	S_{30}/km^2	$C_{30/20}$	S_{40}/km^2	$C_{40/30}$	预警级别
F3	37.8	289	276	1.0	102	0.4	蓝色
G4	41.8	289	283	1.0	176	0.7	黄色
G5	37.4	289	135	0.8	83	0.6	蓝色

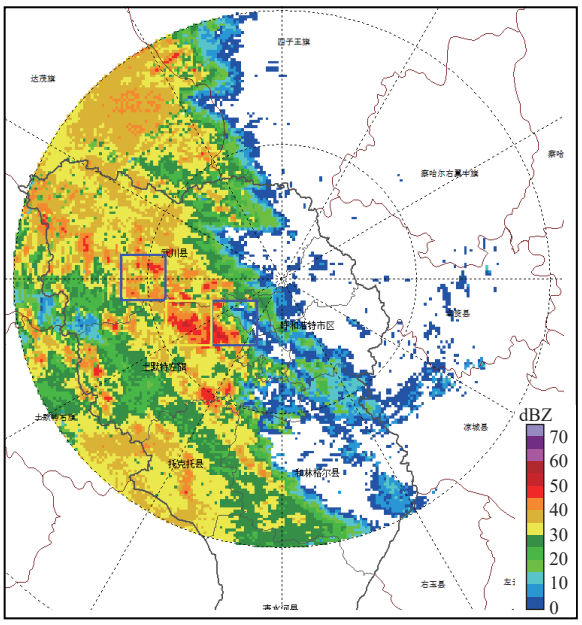


图 8 2024 年 8 月 8 日 18:13:22 基于呼和浩特雷达回波的“小区”发布的洪涝风险预警图 (黄框区域发布黄色预警, 蓝框区域发布蓝色预警)

Fig. 8 Small-scale area flood risk warning map of Hohhot radar echo at 18:13:22 BT on August 8, 2024 (A yellow warning is to be issued for the area within the yellow box, and a blue warning for the area within the blue box)

表 8 2024 年 8 月 8 日 17—18 时呼和浩特雷达回波“小区”特征参数演变

Table 8 The evolution of characteristic parameters of radar echo for "small-scale area" in Hohhot from 17:00 BT to 18:00 BT on August 8, 2024

时间	Z_{ave}/dBz	S_{20}/km^2	C_{20}	S_{30}/km^2	$C_{30/20}$	S_{40}/km^2	$C_{40/30}$	预警级别
17:04:12	30.9	209	0.72	109	0.5	22	0.2	无
17:09:56	35.3	243	0.84	181	0.7	83	0.5	蓝色
17:15:44	36.7	276	0.96	208	0.8	115	0.6	蓝色
17:21:29	34.6	253	0.88	169	0.7	83	0.5	蓝色
17:27:17	30.8	209	0.72	93	0.4	34	0.4	无
17:44:36	35.3	289	1.00	228	0.8	72	0.3	无
17:50:20	38.5	288	1.00	264	0.9	117	0.4	黄色
17:56:04	40.3	289	1.00	270	0.9	174	0.6	黄色

预警, 可精细监测特定地区的降水发展演变(图略)。

对比呼和浩特土左旗气象站逐时雨量站点降水实况 (表 9), 17:00—18:00 小时雨量为 8.8 mm, 接近内蒙古中西部地区短时强降水标准 (10.0 mm·h^{-1}) (常煜等, 2022), 较好地诠释了预警指标的可行性。

表 9 2024 年 8 月 8 日 16—23 时呼和浩特市土默特左旗小时降水量实况

Table 9 Hourly precipitation in Tumote Left Banner, Hohhot from 16:00 BT to 23:00 BT on August 8, 2024

时间	小时降水量/mm	时间	小时降水量/mm
16:00	0.0	20:00	5.7
17:00	2.0	21:00	4.7
18:00	8.8	22:00	1.0
19:00	6.8	23:00	2.7

3 结论与讨论

利用 2005—2022 年期间呼和浩特市发生的 68 个暴雨洪涝灾情记录, 提取致洪暴雨发生时的天气雷达基数据特征参数, 建立雷达回波区域嵌套技术预警致洪暴雨指标模型, 并以 2024 年 8 月 8—9 日内蒙古自治区致洪暴雨过程为例, 对该模型的预警效果进行客观自动识别检验, 得出主要结论如下:

(1) 通过相关分析, 得到雷达回波区域嵌套预警致洪暴雨指标模型的“小区”最优面积为 289 km^2, 最佳边长为 17 km。基于致洪暴雨历史个例的雷达特征参数特征值, 确定了致洪暴雨预警分级阈值。

(2) 应用百分位法对最优面积识别的对流单体强度定级, 确定了雷达回波区域嵌套“小区”强降水权重最大参数大于 40 dBz 的面积参数 (S_{40}) 取值范围:

蓝色 (60 km^2<S_{40}≤120 km^2)、黄色 (120 km^2<S_{40}≤180 km^2)、橙色 (180 km^2<S_{40}≤210 km^2)、红色 (S_{40}>210 km^2) 预警指标。

(3) 以 2024 年 8 月 8—9 日致洪暴雨为例, 对雷达回波区域嵌套预警致洪暴雨指标模型检验表明, 对“大区”雷达回波进行监测, 回波强度 Z_{ave}、面积 S_{20} 和 S_{30}、梯度 $C_{30/20}$ 四个特征参数中的回波强度 Z_{ave} 最先达到预警致洪暴雨的阈值; 通过自动对比“小区”强降水预警指标, 精细监测到呼和浩特地区强降水过程雷达回波演变情况, 递进式发布了相应级别的预警, 雷达回波区域嵌套技术预警致洪暴雨指标模型不仅为此次强降水过程预报预警提供了技术支撑, 而且提高了本地强降水天气等灾害性天气的定时、定点、定量预警靶向发布能力。

本文初步实现了基于雷达回波特征的智能预警, 但仍有局限。一是降水估测精度受反射率因子 (Z) 与降水率 (R) 关系 *Z-R* 制约, 难以适应不同类型降水的复杂性; 二是预警的精细化程度有待提升。未来将着力于两点改进: 首先, 应用机器学习或聚类方法对“大区”分类, 建立分型 *Z-R* 关系以提升估测精度; 其次, 深入挖掘“小区”雷达数据特征, 构建累积降水量估测模型, 最终实现定时、定点、定量的精细化预警。

参考文献 (References):

陈鲍发,马中元,黄龙飞,等.2017.赣东北致洪暴雨的天气分型和回波特征分析[J].江西科学,35(2):219−225. Chen B F, Ma Z Y, Huang L F, et al. 2017. Analysis of weather classification and echo characteristics of flood-causing rainstorms in Northeast Jiangxi [J]. Jiangxi Science,35(2):219−225 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096−3599.2021.03.005

陈鲍发,马中元,王立志,等.2022.江西昌江流域特大暴雨短时强降水回波特征分析[J].气象,48(11):1418−1427. Chen B F, Ma Z Y, Wang L Z. et al. 2022. Echo characteristics of short-term heavy rainfall due to severe rainstorm in Changjiang River basin, Jiangxi Province [J]. Meteorological Monthly,48(11):1418−1427 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.041002

陈文龙,竹利,黄欣,等.2022.凉山“6·26”致洪暴雨天气的成因分析[J].成都信息工程大学学报,37(2):202−207. Chen W L, Zhu L, Huang X, et al. 2022. Analysis of the cause of the rainstorm causing flood event happened on June 26th in Liangshan Prefecture [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,37(2):202−207 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.02.014

常煜,孙永刚,张小东,等.2022.汛期短时强降水指标[S]. 呼和浩特:内蒙古自治区市场监督管理局:1-2. Chang Y, Sun Y G, Zhang X D, et al. 2022. Indexes for short - term heavy precipitation during flood season [S]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Administration for Market Regulation:1-2 (in Chinese)

管理,戴建华,赵渊明,等.2020.上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J].气象,46(12):1543−1554. Guan L, Dai J H, Zhao Y M, et al. 2020. Radar climatology analysis of warm season afternoon convective storm over Shanghai [J]. Meteorological Monthly,46(12):1543−1554 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.12.002

邓虹霞,智海,马中元,等.2019. 2017 年江西汛期设区市城区暴雨回波特征分析[J].气象科学,39(2):274−284. Deng H X, Zhi H, Ma Z Y, et al. 2019. Analysis on characteristics of rainstorm echo in flood season districts and citis of Jiangxi Province in 2017 [J]. Journal of the Meteorological Sciences,39(2):274−284 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0081

桂园园,马中元,齐永胜,等.2020. 2017 年鹰潭市城区暴雨天气与回波特征分析[J].自然灾害学报,29(3):63−75. Gui Y Y, Ma Z Y, Qi Y S. et al. 2020. Analysis of rainstorm weather and echo characteristics in Yingtan City in 2017 [J]. Journal of natural disasters,29(3):63−75 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2020.0308

高毅.2015.小尺度对流单体的分类识别方法研究[D].天津:天津大学,9-56. Gao Y. 2015. Research on classification and identification methods of small - scale convective monomers [D]. Tianjin:Tianjin University,9-56 (in Chinese)

黄建伟,段勇,杨堃,等.2021.基于机器学习的雷达回波与降雨分析[J].软件工程与应用,10(1):35−43. Huang J W, Duan Y, Yuang, K, et al. 2021. Analysis of radar echoes and rainfall based on machine learning [J]. Software Engineering and Applications,10(1):35−43 (in Chinese). doi:10.12677/sea.2021.101006

胡胜,顾松山,庄旭东,等.2006.风暴的多普勒雷达自动识别[J].气象学报,64(6):796−808. Hu S, Gu S S, Zhuang X D, et al. 2006. Automatic identification of storm cells using doppler radars [J]. Acta Meteorologica Sinica,64(6):796−808 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2006.076

孔文甲,刘诗韵,孙鑫,等.2024.雷达卫星定量分析[M].北京:气象出版社:1-35. Kong W J, Liu S Y, Sun X, et al. 2024. Quantitative analysis of radar satellites [M]. Beijing:Meteorological Publishing Press:1-35 (in Chinese)

刘懿枢,陈鲍发,余剑浩,等.2024.信江流域大暴雨中的短时强降水回波特征分析[J].高原山地气象研究,44(4):128−134,118. Liu Y S, Chen B F, Yu J H, et al. 2024. Analysis of echo characteristics of short-term heavy rainfall in heavy rainstorm in Xinjiang river basin [J]. Plateau and mountain meteorology mesearch,44(4):128−134,118 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.04.014

寿绍文.2009.中尺度气象学 (第二版)[M].北京:气象出版社:26-30. Sou S W. 2009. Mesoscale Meteorology (Second Edition) [M]. Beijing:Meteorological Press:26-30 (in Chinese)

唐永兰, 于晓晶, 徐桂荣, 等.2018.近 54 a 湖北极端降水的变化特征及其与城市化的关系研究[J].暴雨灾害,37(1):73−82 Tang Y L, Yu X J, Xu G R, et al. 2018. Study on the change characteristics of extreme precipitation and its relationship with urbanization in Hubei Province in recent 54 years [J]. Torrential Rain and Disasters,37(1):73−82 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.01.010

王坚红, 黄维, 王群, 等.2015.雷达回波预测极端暴雨概率方法构建原理与应用研究[J].高原气象,34(2):575−585 Wang J H, Huang W, Wang Q, et al. 2015. Construction and application of extreme rainstorm probability prediction based on radar echo base data [J]. Plateau Meteorology,34(2):575−585 (in Chinese). doi:10.7522/j. issn.1000−0534.2014. 00132

许晶,孔文甲,刘诗韵,等.2023.和林短时强降水雷达客观识别方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象,17(2):114−119. Xu J, Kong W J, Liu S Y. et al. 2023. Research on objective identification method of short-term heavy precipitation radar in Helin [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):114−119 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.015

俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:3-19,90-109. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Principles and Operational Applications of Doppler Weather Radar [M]. Beijing:Meteorological Press:3-19, 90-109 (in Chinese)

张家国,王珏,黄治勇,等.2011.几类区域性暴雨雷达回波模型[J].气象,37(3):285−290. Zhang J G, Wang J, Huang Z Y, et al. 2011. Several kinds of regional rainstorm radar echo models [J]. Meteorological Monthly,37(3):285−290 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.3.005

张晓茹,苏洋,丁永红,等.2024.多源观测资料在六盘山西侧一次强对流暴雨中的应用[J].气象,50(8):929−940. Zhang X R, Su Y, Ding Y H, et al. 2024. Application of multi-source observation data in a severe convective rainstorm on the west side of Liupan Mountain [J]. Meteorological Monthly,50(8):929−940 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.071002

周晓敏,田付友,郑永光,等.2023.中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J]. 气象,49(3):267−278. Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al. 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rainstorm in China [J]. Meteorological Monthly,49(3):267−278 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.071201

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2007.天气学原理与方法 (第四版)[M]. 北京:气象出版社:412-418. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W. 2007. Synoptic principles and methods (4th ed.). Beijing:China Meteorological Press:412-418 (in Chinese)

Han J, Tamber M, Pei J. 2012. Data mining: concepts and techniques (3rd ed.) [M]. USA:Morgan Kaufmann, 443-495. doi:10.1016/C2009−0−61819−5

Kufigowski R J, Barros A P. 1998. Localized precipitation forecasts from a numerical weather prediction model using artificial neural networks [J]. Weather and Forecasting,13:1194−1204. doi:10.1175/1520−0434(1998)013%3C1194:LPFFAN%3E2.0.CO;2

Luk K C, Ball J E, Sharma A. 2001. An application of artificial neural networks for rainfall forecasting [J]. Mathematical and Computer Modelling,33(6-7):683−693. doi:10.1016/S0895−7177(00)00272−7

Mosavi A, Ozturk P, Chau K W. 2018. Flood prediction using machine learning: literature review [J]. Water,10(11):1536. doi:10.3390/w10111536

Tuyen D T, Tuan T M, Le X H, et al. 2022. RainPredRNN: A new approach for precipitation nowcasting with weather radar echo images based on deep learning [J]. Axioms,11(3):107. doi:10.3390/axioms11030107

Warner C, Austin G L. 1978. Statistics of radar echoes on day 261 of gate [J]. Monthly Weather Review,106(7):983−994. doi:10.1175/1520−0493(1978)106<0983:SOREOD>2.0.CO;2

(责任编辑 闵爱荣)