

# 干旱地区一次低涡中心对流暴雨山洪过程分析及ROSE评估

李凯鹏

巴彦淖尔市气象台, 内蒙古 巴彦淖尔

收稿日期: 2024年4月10日; 录用日期: 2024年5月8日; 发布日期: 2024年5月16日

## 摘要

综合使用常规Micaps资料、临河雷达ROSE资料等, 对2023年7月20日巴彦淖尔市对流暴雨过程进行了分析, 重点讨论了过程发生的中尺度环境条件时空演变特征及暴雨成因。结果表明: 1) 4号台风“泰利”从北部湾将水汽向北输送至巴市次级水汽源地四川, 西风槽将水汽继续向北输送至河套地区, 为此次过程提供了充分的水汽。2) 低涡中心沿阴山山脉南侧缓慢东移致使此次强降水时间延长。3) 阴山南侧摩擦层局地南风超低空急流维持使低层暖强迫加强形成列车效应, 致使后旗局地形成短时暴雨。4) 阴山、乌拉山的地形作用加剧了强对流的发展。5) ROSE评估分析, 降水估测随着距离增大准确率逐渐降低, 短时强降水报警虽然受冰雹影响较大, 但对山洪风险预警发布有一定指导意义。

## 关键词

强对流, 冷涡, 急流, 阴山, 台风, 山洪

# Analysis of Convective Rainstorm Mountain Torrent Process and ROSE Evaluation in an Arid Area

Kaipeng Li

Bayan Nur Meteorological Observatory, Bayan Nur Inner Mongolia

Received: Apr. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 8<sup>th</sup>, 2024; published: May 16<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The process of convective rainstorm in Bayan Nur City on July 20, 2023 was analyzed by using

文章引用: 李凯鹏. 干旱地区一次低涡中心对流暴雨山洪过程分析及 ROSE 评估[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 514-522. DOI: 10.12677/ccrl.2024.133056

conventional Micaps data, Linhe radar ROSE data, etc. and the spatio-temporal evolution characteristics of mesoscale environmental conditions and the cause of rainstorm were discussed. The results show that: 1) Typhoon No. 4 “Tali” transported water vapor northward from Beibu Gulf to Sichuan, the secondary water vapor source of Ba City, and the westerly trough continued to transport water vapor northward to Hetao area, providing sufficient water vapor for this process. 2) The slow eastward movement of the center of the vortex along the southern side of the Yinshan Mountains resulted in the prolonged duration of the heavy rainfall. 3) The maintenance of ultra-low level jet in the south friction layer of Yinshan strengthened the low level warm force and formed a train effect, resulting in the formation of short-term rainstorm in the rear area. 4) The topographic effects of Yinshan and Wulashan intensified the development of strong convection. 5) ROSE assessment and analysis showed that the accuracy of precipitation estimation gradually decreased with the increase of distance. Although short-term heavy precipitation warning was greatly affected by hail, it had certain guiding significance for flash flood risk warning.

## Keywords

Strong Convection, Cold Vortex, Jet Stream, Yinshan, Typhoon, Flash Flood

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

巴彦淖尔市属典型的中温带大陆性季风气候，处于季风影响的末端，降水多集中在夏季7、8月，且多暴雨。2023年巴彦淖尔市(以下简称巴市，下同)遭受到严重干旱天气的影响，由于前期降水明显偏少，导致乌拉特草原土壤墒情差，旱情较为严重。7月20日清晨到21日下午，受冷涡影响，巴市出现了强对流天气，其中东部沿山出现了对流暴雨(简称为“7.20”暴雨，下同)。本文利用常规观测资料、临河雷达资料等，分析“7.20”暴雨发生前和发生时的中尺度演变特征以及雷达回波特征，揭示这些动力、热力条件如何在巴市东部合理配置，从而在短时、局地范围内造成对流暴雨。

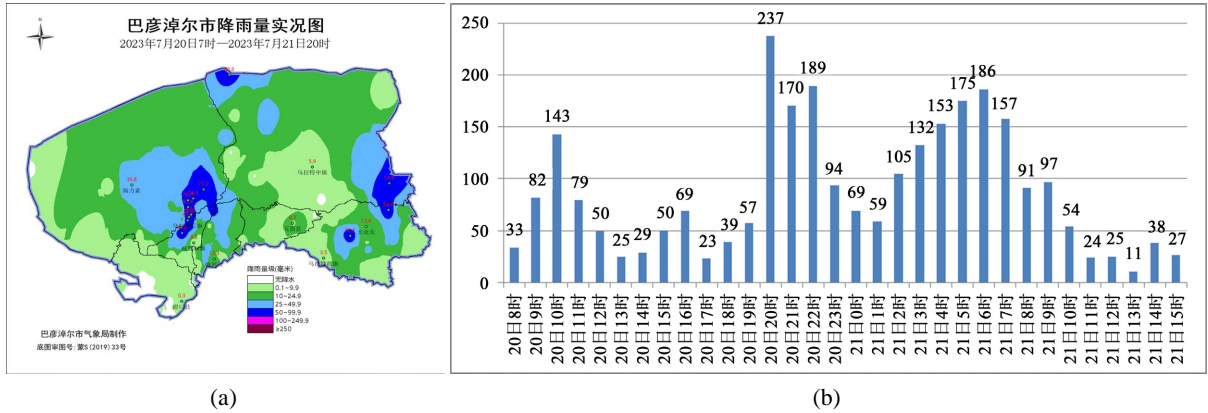
对流性暴雨属于强对流天气之一，也被称为短时暴雨或短时强降水，由超级单体、飚线或中尺度对流系统等对流风暴造成[1][2]。由于对流暴雨历时短，局地性强，常规的观测网难以捕捉，同时模式对其预报能力非常有限，在短时效内准确预报对流暴雨发生的时间、落区等仍然是预报员们面临的难题之一[3]。

## 2. 强对流天气概况

2023年7月20日7时至21日20时，受西风槽加强成冷涡持续维持影响，巴彦淖尔市出现强对流天气，部分地区出现短时强降水、雷暴大风和冰雹。其中暴雨13个站，大雨31个站，最大降水量出现在乌拉特后旗三贵口中游85.4毫米(降水分布见图1(a))，最大雨强出现在临河区古城乡为40.9毫米/小时(20日21时~22时)。最大阵风出现在乌拉特中旗甘其毛都38.0米/秒(13级)。临河区新华镇联合、狼山镇、五原县复兴镇、杭锦后旗陕坝镇红太阳、乌拉特后旗西乌盖沟出现小冰雹。

强对流天气分20日上午、20日傍晚、21日凌晨三个阶段(见图1(b))，短期内累加致使乌拉特后旗共16条山洪沟道发生洪水，乌拉特前旗共12条山洪沟道发生洪水、3座水库进水，乌拉特中旗共有1条山洪沟道发生洪水、7座水库进水；临河区，杭锦后旗、五原部分农田出现渍涝、作物倒伏等。洪涝灾害

导致我市 6 个旗县(区) (临河区、乌拉特前旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗、杭锦后旗、五原县) 14 个苏木乡镇不同程度受灾，造成直接经济损失共计 2874.24 万元。

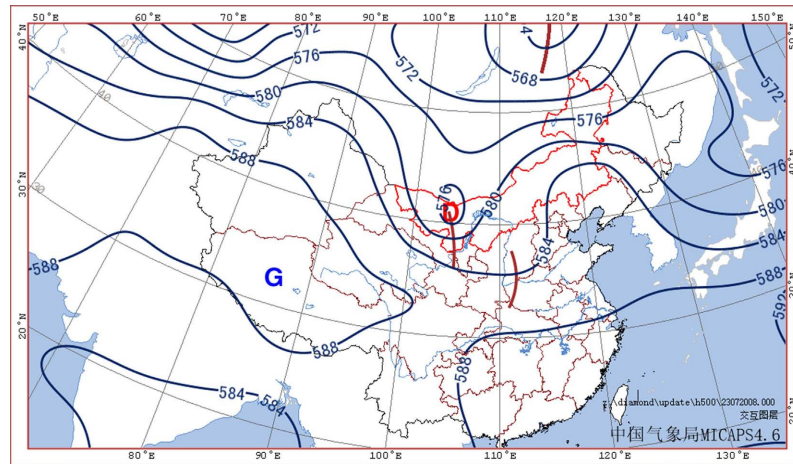


**Figure 1.** Spatial distribution of total precipitation from July 20 to 21 (a) and cumulative time distribution of precipitation at all stations (b)

**图 1.** 7 月 20 日至 21 日总降水量空间分布图(a)及所有站降水累加时间分布图(b)

### 3. 强对流天气大尺度环流背景

强对流发生前，巴彦淖尔市处于非常有利的大尺度环境之中。20 日 08 时 500 hPa 上(见图 2)，西太平洋副热带高压位置偏南，588 线控制着华南地区、江南地区，西脊点西伸至贵州西北部，大陆高压 588 线控制着青藏高原，形成两高对峙，台风“泰利”17 日至 18 日在南海活动，从南海有东南转西南暖湿气流沿副高西侧北上四川省北部及甘肃省南部，西风槽已东移至阿拉善盟，受北部补充冷空气影响加强发展为涡，河套地区东高西低形势建立，槽前西南气流接力将水汽向北输送至河套地区。



**Figure 2.** Height field (d, unit: gpm) at 0800 hPa (a) on July 20, 2023

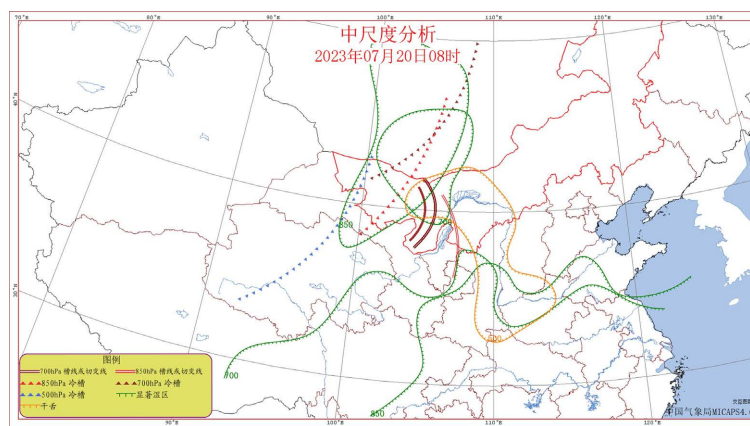
**图 2.** 2023 年 7 月 20 日 08 时 500 hPa (a)高度场(d, 单位: gpm)

### 4. 对流风暴中尺度环境分析

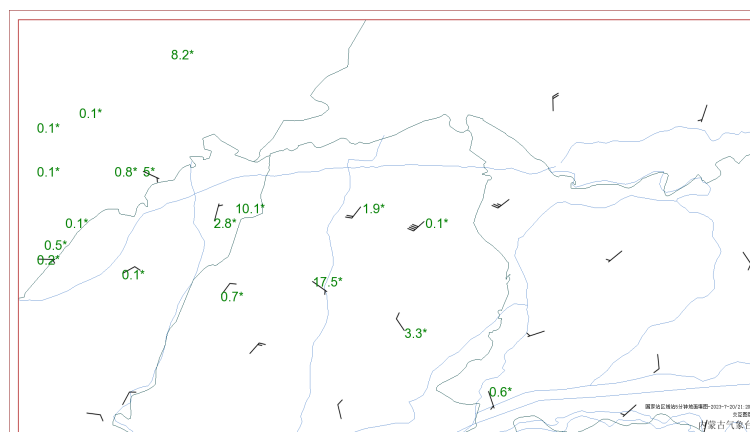
降水发生前 20 日 08 时探空表明，临河 850 hPa 与 500 hPa 温差达 30 度，K 指数 35.2，沙氏指数小于 -1.18，CAPE32.3，CIN532.6，对流层低层存在小量的抑制能量，有利于对流在局地触发后加强产生强

对流, 850 hPa 比湿 8 到 10 g/kg。垂直风切变较强, 有利于对流触发后的加强发展。根据 20 日 08 时观测资料制作中尺度分析综合图(见图 3(a)), 巴彦淖尔市西部为明显的下湿上干层结; 500 hPa 至 850 hPa 都有低涡切变存在、且在涡后部都存在温度槽, 非常有利于对流性暴雨在此发生。

临河区古城乡 20 日 22 时小时雨强 40.9 毫米, 短时强降水发生前 21 时 20 分地面风场(见图 3(b)), 古城乡东侧新华镇出现 16 m/s 的超低空急流, 临河区以北为偏北风, 之后雨强开始明显增大, 21 时 20 分至 25 分降雨 8 毫米。



(a)



(b)

**Figure 3.** Mesoscale analysis (a) at 08:00, 20th; Surface wind field before short time heavy precipitation (b)

**图 3.** 20 日 08 时中尺度分析(a); 古城乡短时强降水发生前地面风场(b)

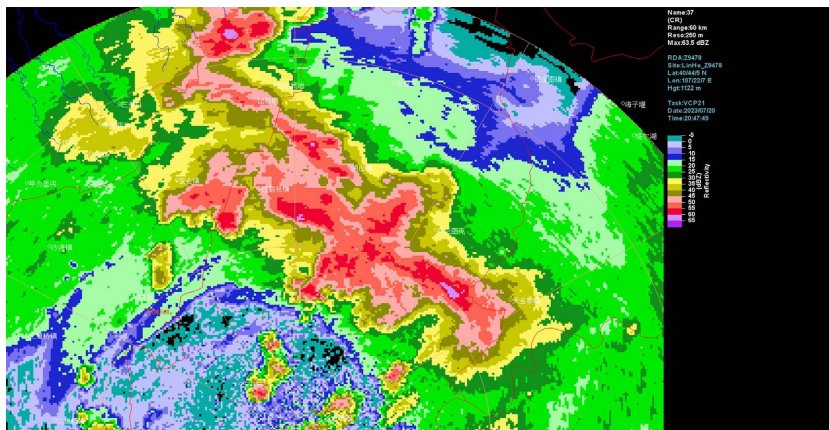
## 5. 临河雷达回波分析

20 日夜间降水过程中涡旋回波在巴市维持, 回波动画显示低涡中心沿阴山山脉南侧缓慢东移, 致使此次强降水时间延长。20 时 25 分 37 号组合反射率显示在大坝沟、东升庙沟、西乌盖沟下游方向形成西北 - 东南向带状回波, 分析阴山北部偏北风加大, 此三条沟上游为后旗阴山较低三处, 冷空气势力较强时, 可视作优先通过沟口, 其沟口所对平原地区暖湿空气不断在冷垫上爬升形成带状对流回波。随着冷空气整体过山, 低层西南风与西北风切变形成, 20 时 48 分 37 号组合反射率(见图 4(a))中可以看出, 降水回波成十字交叉状, 西北 - 东南向带状回波继续减弱中, 西南 - 东北向带状回波继续加强发展。至 21

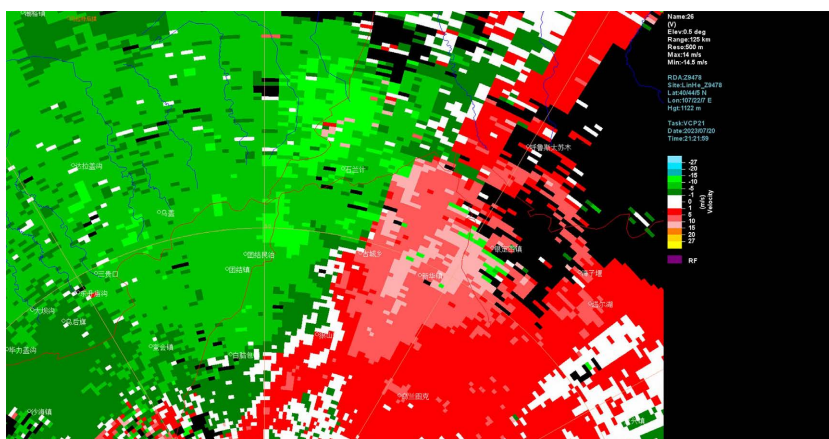


时 05 分完全发展为西南 - 东北向带状回波，回波分布方向与西南引导气流方向一致，局地短时强降水可能加大。

21 时 22 分 0.5°26 号径向速度(见图 4(b))显示，古城乡西侧出现大范围 14 m/s 左右的偏北径向速度，古城乡东侧为大范围 14 m/s 左右的西南径向速度，超低空急流维持使低层暖强迫加强形成列车效，致使局地形成短时暴雨，古城乡随后出现 40.9 毫米的短时强降水。



(a)



(b)

**Figure 4.** Reflectance of combination at 20:48.37 on 20 July (a); 21:22 0.5°26 Radial velocity (b)

**图 4.** 7 月 20 日 20 时 48 分 37 号组合反射率(a); 21 时 22 分 0.5°26 号径向速度(b)

## 6. ROSE 评估分析

**Table 1.** Results of one-hour quantitative precipitation estimation for individual cases on July 20, 2023

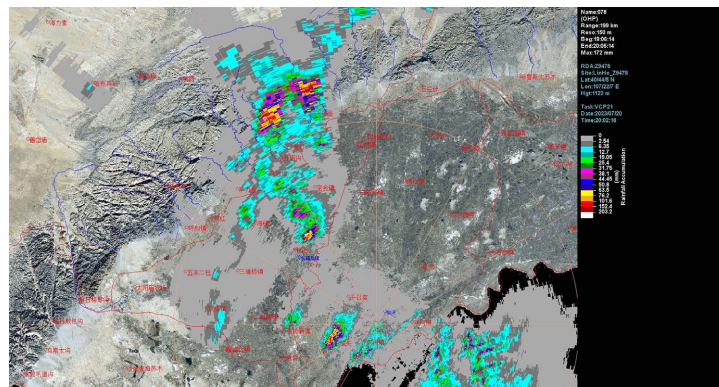
**表 1.** 2023 年 7 月 20 日个例 1 小时定量降水估测评估结果

| 雨量等级       | 距离等级                   | 平均偏差比 | 归一化平均绝对误差 | 相关系数 | 准确率    |
|------------|------------------------|-------|-----------|------|--------|
| 10~19.9 mm | $D \leq 25.0$          | 1     | 0.52%     | 1    | 99.48% |
|            | $25.0 < D \leq 50.0$   | 0.88  | 14.76%    | 0.39 | 85.24% |
|            | $50.0 < D \leq 100.0$  | 0.76  | 24.96%    | 0.43 | 75.04% |
|            | $100.0 < D \leq 150.0$ | 0.49  | 23.68%    | 1    | 76.32% |

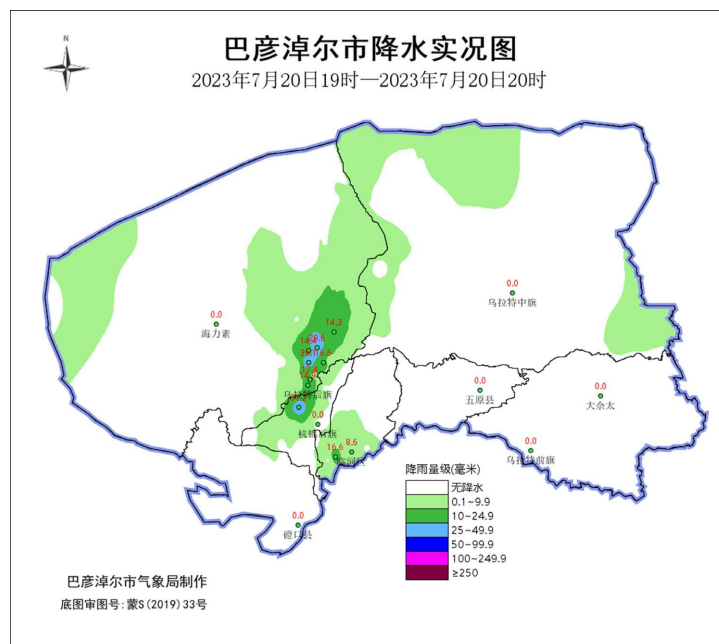
续表

|        | D ≤ 25.0          |      |        |   |        |
|--------|-------------------|------|--------|---|--------|
| ≥20 mm | 25.0 < D ≤ 50.0   | 0.72 | 28.86% | 0 | 71.14% |
|        | 50.0 < D ≤ 100.0  | 1.26 | 26.17% | 1 | 73.83% |
|        | 100.0 < D ≤ 150.0 |      |        |   |        |

根据 ROSE 的 1 小时定量降水估测评估结果(见表 1) 10~19.9 毫米降水: 25 公里以内检验站次少, 准确率非常高 99.48%; 25 到 50 公里准确率较高 85.24%; 50 到 100 公里准确率 75.04%; 100 到 150 公里检验站次少, 准确率 76.32%。20 毫米以上降水: 25 到 50 公里检验站次少, 准确率 71.14%; 50 到 100 公里检验站次少, 准确率 73.83%。



(a)



(b)

**Figure 5.** One-hour precipitation estimation by ROSE radar at 20:00 on 20th (a); Hourly rainfall Intensity distribution in Bayan Nur City (b)

**图 5.** 20 日 20 时 ROSE 雷达 1 小时降水估测(a); 巴彦淖尔市小时雨强分布(b)

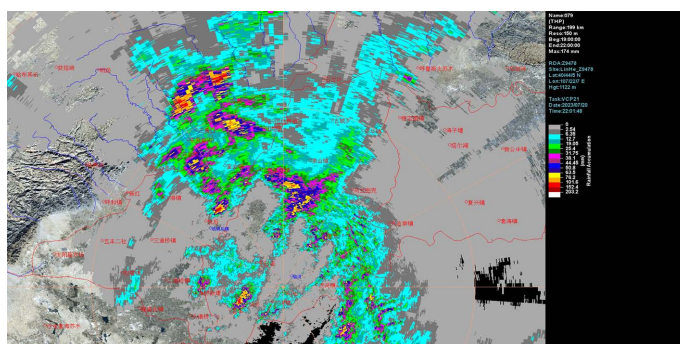
此次过程所有站累加小时降水最大出现在 20 日 20 时(见图 1(b)),对比 20 日 20 时所有实际 1 小时降水量(见图 5(b))大于 10 毫米站点与其 ROSE 雷达估测 1 小时降水量(见图 5(a)),所有站点基本准确。ROSE 雷达估测 1 小时降水量最大位于乌后旗乌盖沟上游与西乌盖沟中游之间,达 172 毫米,分析为由于低层湿度较大,电磁波折射致使阴山地形反射雷达回波造成,但对山洪风险预警仍有一定指示意义。

**Table 2.** Evaluation results of individual 3-hour quantitative precipitation estimation on July 20, 2023

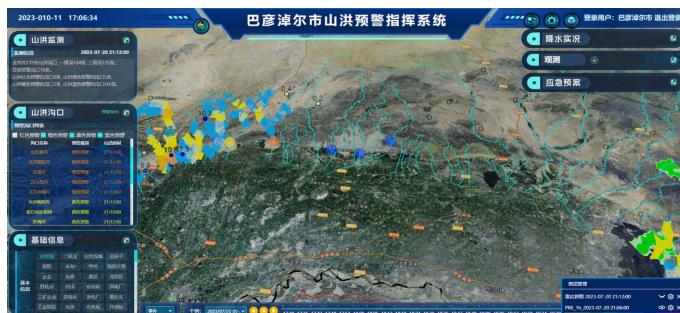
**表 2.** 2023 年 7 月 20 日个例 3 小时定量降水估测评估结果

| 雨量等级         | 距离等级                   | 平均偏差比 | 归一化平均绝对误差 | 相关系数 | 准确率     |
|--------------|------------------------|-------|-----------|------|---------|
|              | $D \leq 25.0$          | 1     | 0         |      | 100.00% |
| 20.0~49.9 mm | $25.0 < D \leq 50.0$   | 0.68  | 32.73%    | 0.08 | 67.27%  |
|              | $50.0 < D \leq 100.0$  | 1     | 23.70%    | 0.86 | 76.30%  |
|              | $100.0 < D \leq 150.0$ | 0.51  | 49.34%    | 0    | 50.66%  |

根据 3 小时定量降水估测评估结果(表 2) 20~49.9 毫米降水: 25 公里以内检验站次少, 准确率非常高 100.00%; 25 到 50 公里准确率 67.27%; 50 到 100 公里准确率 76.30%; 100 到 150 公里, 准确率 50.66%。无 50 毫米以上站次。



(a)



(b)

**Figure 6.** 3-hour precipitation estimation by ROSE radar at 22:00 on 20th (a); Flash flood warning Command System of Bayan Nur City 21:12 Warning situation (b)

**图 6.** 20 日 22 时 ROSE 雷达 3 小时降水估测(a); 巴彦淖尔市山洪预警指挥系统 21 时 12 分预警情况(b)

3 小时降水量大于 20 毫米站次最多时刻 20 日 22 时, 所有站点准确率一般, 大多数强降水站点位于山洪沟口中, 阴山地形对低仰角电磁波影响较大。雷达估测 3 小时降水(见图 6(a))最大值位于乌后旗乌盖



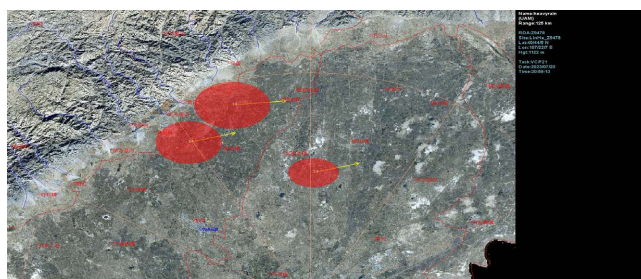
沟上游与西乌盖沟中游之间，达 174 毫米。巴彦淖尔市山洪预警指挥系统 21 时 12 分(见图 6(b))五条沟口橙色预警，根据面雨量估测未来出现山洪风险的可能较大，为此次过程最强预警，巴市气象局已在 19:10 联合水利局发布了相关沟口区域的山洪灾害气象预警。

**Table 3.** Test and evaluation results of individual short-term heavy precipitation alarm products on July 20, 2023

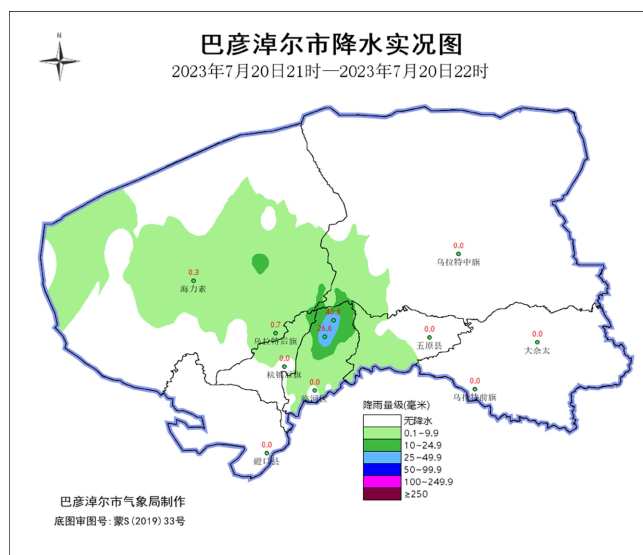
**表 3.** 2023 年 7 月 20 日个别短时强降水报警产品检验评估结果

| 强降水等级        | 距离等级      | 命中次数 | 虚警次数 | 漏报次数 | 命中率<br>(识别率) | 虚警率 | 临界成功指数<br>(准确率) |
|--------------|-----------|------|------|------|--------------|-----|-----------------|
| 20~49.9 mm/h | <50 km    | 1    | 1    | 3    | 25%          | 50% | 20%             |
|              | 50~100 km | 2    | 0    | 0    | 100%         | 0   | 100%            |
|              | >100 km   |      |      |      |              |     |                 |

根据短时强降水报警产品检验评估结果(见表 3) 20~49.9 毫米降水：50 公里以内，命中 1 次，虚警 1 次，漏报 3 次，命中率 25%，虚警率 50%，准确率 20%；50 到 100 公里，命中 2 次，虚警 0 次，漏报 0 次，命中率 100%，虚警率 0%，准确率 100%。



(a)



(b)

**Figure 7.** ROSE short-term heavy precipitation warning at 20:59 on 20th (a); Distribution of rain intensity in Bayan Nur City at 22:00 on 20th (b)

**图 7.** 20 日 20 时 59 分 ROSE 短时强降水报警(a); 巴彦淖尔市 20 日 22 时小时雨强分布(b)



20日20:59分雷达在临河区古城乡、狼山镇上游杭后有三个短时强降水报警(见图7(a)),指向临河区东北部,对比22时雨强分布图(见图7(b))报警指示区域准确,报警雨量为73毫米,站点最大雨强为古城乡40.9毫米,对比雷达回波分析实际最大雨强出现在古城乡站点以南、狼山镇站点以东,雨强60毫米左右,因此报警指示降水量基本准确。

## 7. 结论

采用各类资料分析了2023年7月20日巴彦淖尔强对流天气过程发生的中尺度环境条件时空演变特征及暴雨成因,主要结论如下:

- 1) 4号台风“泰利”从北部湾将水汽向北输送至巴市次级水汽源地四川,西风槽将水汽继续向北输送至河套地区,为此次过程提供了充分的水汽。
- 2) 低涡中心沿阴山山脉南侧缓慢东移致使此次强降水时间延长。
- 3) 阴山南侧摩擦层局地南风超低空急流维持使低层暖强迫加强形成列车效应,致使局地形成短时暴雨。
- 4) 阴山、乌拉山的地形作用加剧了强对流的发展。
- 5) ROSE评估分析,降水估测随着距离增大准确率逐渐降低,短时强降水报警虽然受冰雹影响较大,但对山洪风险预警发布仍有一定指导意义。

## 参考文献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:316.
- [2] Doswell, C.A., Brooks, H.E. and Maddox, R.A. (1996) Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. *Weather and Forecasting*, **11**, 560-581. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2)
- [3] 章丽娜,王秀明,熊秋芬,等.“6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J].暴雨灾害,2014,33(1):1-9.