

阴山南麓一次局地灾害性强对流暴雨成因及可预报性分析

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22日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

综合使用常规Micaps资料、临河雷达ROSE资料等, 对2022年8月6日阴山南麓一次局地灾害性强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: 副高快速南落使短期内其原控制区对流层中高层对雷暴发展有很大抑制作用的下沉气流消失, 但低层暖湿高能状态仍然维持; 大范围对流抑制、高海拔地区小量抬升可释放凝结潜热的不稳定性空间分布为灾害性山洪的发生提供了有利的大气层结背景条件; 布格提谷地使地面变性高压前部爬坡的西北气流汇聚增强, 在阴山北麓局地触发强对流单体; 率先翻山的强对流单体产生的冷出流顺山洪沟而下与因山脉分流而加强的暖湿气流在阴山南麓局地对峙加剧了强对流的发展; 最佳抬升层较高时, 模式800 hPa风场在分析阴山地形作用时有较强指示作用。

关键词

强对流, 阴山, 山洪, 暴雨

Analysis on the Cause and Forecastability of a Local Catastrophic Severe Convective Rainstorm at the Southern Foot of Yinshan Mountain

Kaipeng Li

Bayannaer Meteorological Observatory, Bayannaer Inner Mongolia

Received: Apr. 22nd, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Using conventional Micaps data and ROSE data of Linhe radar, the process of a local severe convective rainstorm at the southern foot of Yinshan Mountain on August 6, 2022 was analyzed, focusing on the spatial and temporal evolution characteristics of mesoscale environmental conditions and the causes of the rainstorm. The results show that the rapid south fall of the subtropical high makes the downflow disappear in the short term, but the low-level warm and wet high-energy state is still maintained; the unstable spatial distribution of large-scale convection suppression and small uplift that can release condensation latent heat in high altitude areas provides favorable background conditions for the occurrence of catastrophic mountain floods; the Bugti valley enhances the convergence of the northwest airflow at the front of the ground, In the north foot of Yinshan local trigger strong convection monomer; the cold outflow of the strong convection monomer produced by the first mountain over the mountain and the warm and humid air flow strengthened by the diversion of the mountain area at the southern foot of Yin Mountain intensified the development of strong convection; when the optimal lifting layer is higher, mode 800 hPa wind field has a strong indicator effect in the analysis of Yinshan terrain effect.

Keywords

Heavy Convection, Yinshan Mountain, Flood, Rainstorm

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

阴山山脉位于内蒙古自治区的中部，由大青山、乌拉山和狼山组成，东西长约 1000 千米，南北宽 50~100 千米。最高峰为西端狼山的呼和巴什格，海拔为 2364 米。阴山山脉地势南高北低、西高东低，主要由块状的中低山、山间盆地和丘陵组成。阴山山脉为内蒙古气候南北差异的重要分界线，导致山脉南北两侧的景观和农业生产差异显著，山南为农业区，山北为牧业区。

阴山山脉减弱了偏北干冷空气对河套地区的侵蚀，使冷暖空气在山南农业区相互作用致灾的程度下降，但反过来，暖湿气流强盛时，阴山南麓坡度大，易因地形抬升触发强对流形成灾害性山洪。阴山山脉西部的巴彦淖尔市(以下简称巴市)位于季风末端，西南季风爆发时，往往只有偏西的部分水汽影响到巴彦淖尔市，盛夏强对流天气中往往湿度条件相对较差，空气比热容小，底层辐射加热快，温度条件相对较强，因此较容易由于局地热力不均或地形抬升，形成局地强对流天气。

局地强对流受地区小地形地貌的影响较大，区域预报较难全面考虑各地区局地热力环流等细节，因此主要由基层预报人员进行研究。例如，曾琳等[1]基于 X 波段相控阵雷达等多源高时空分辨率新型遥感探测资料研究发现，午后局地风形成辐合，上升气流加强，近地层出现弱垂直风切变和低空急流脉动，对强对流的发生发展有一定的指示意义；侯淑梅等[2]利用 ERA5 再分析等资料分析发现，强的深层垂直风切变有利于对流风暴组织化发展，爬线的长轴走向与 0~6 km 垂直风切变矢量方向相同，新单体发生、发展、合并的区域位于风矢量差大值中心前沿；徐伙等[3]分析了 2019 年 6 月 6 日局地极端强降水形成的天气形势和物理量场发现，降水前后的螺旋度和水汽通量散度对衢州西部、南部暴雨发生有较好的预测，

但对极端性和降水尺度的预报不足；赵衍斌等[4]分析 2020 年 6 月 16~17 日重庆西部地区平行岭谷地形影响下的一次局地暴雨过程发现，中尺度对流系统的发展演变与地面辐合线的位置变化关系密切，平行岭谷地形辐合抬升作用使对流系统在华蓥山附近停滞，并在其南端两次发展加强；刁秀广[5]利用雷达等资料对 7 次典型中尺度辐合线触发强对流风暴的特征进行了分析表明，对于干型强对流风暴产生的阵风锋，其右侧往往是雷暴触发的主要区域，导致风暴向右传播；湿型强对流风暴产生的阵风锋，激发雷暴的方向与雷暴平均移动方向基本相反，导致风暴呈后向传播特征；李超等[6]利用 FNL 大气再分析等资料研究发现，在对流上升运动和迎风坡地形抬升作用的共同影响下，通过增强气流的垂直上升运动，使更多的水汽被输送到对流层中高层，促使水汽向云冰粒子和雹粒子的凝华转换过程增强，最终导致降水效率得到显著提升，降水效率在地形迎风坡处显著增强表征的水汽向雨水的高效转化，对极端降水的演变起到了极好的指示作用；付智龙等[7]利用 ERA5 再分析等资料研究发现，山地-平原环流在夜间的转换使背景东南风形成深厚的倾斜上升运动，是暴雨增强和中尺度对流云团重组发展的原因。冯文等[8]利用 ERA5 再分析等资料研究发现，较低的凝结高度导致最强降水时段对流低层出现强潜热释放，对流区低层气团内部增暖，形成强烈锋生效应，低层强的锋生导致上升气流加速，深对流发展加强，暴雨增幅；沈焯等[9]利用中尺度气象模式和暴雨云团追踪算法开展数值实验发现，当天气强迫较弱时，城市热岛效应增强大气边界层对流活动，暴雨云团进入城市后快速坍塌，云团数量减少，空间覆盖增大，降雨在城区增加，当天气强迫较强时，城市冠层影响暴雨云团特征，城市地区出现大量面积小、移动缓慢且空间结构“尖瘦”的暴雨云团，降雨在城区和城市下风向增加；毛江玉等[10] ERA5 大气环流再分析等资料研究发现，极端强降水事件更大程度地取决于偏北的西风急流南侧的高空辐散及位涡强迫的强冷空气，对于极端强降水事件位涡收支的定量诊断表明，在强降水达到峰值及之前，高层负的位涡倾向主要由负的垂直位涡平流所导致，而中低层正的位涡倾向则主要取决于垂直非绝热加热的位涡制造和垂直位涡平流。

2. 强对流天气概况

2022 年 8 月 6 日 7 时至 17 时，受阴山地形抬升对流层低层西南气流作用的影响，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 1 个站，大雨 3 个站，最大降水量出现在乌拉特后旗新公社南 59.9 毫米(降水分布见图 1(a))，最大雨强出现新公社南在为 59.0 毫米/小时(9 时~10 时)。最大阵风出现在五原县套海镇 28.4 米/秒(10 级)。从新公社南 9 时至 10 时逐 5 分钟降水数据分析(见图 1(b))，强降水主要发生在 9 时 10 分至 9 时 40 分，半小时内降水 57 毫米，为巴市较罕见雨强，通过雷达回波演变和山洪致灾程度证实为真实数据。

乌拉特后旗的流沙沟、玻璃庙沟、红山沟、炭窑沟、撇洪沟、杨贵沟、明路沟 7 条山洪沟均出现洪水，其中流沙沟、玻璃庙沟、炭窑沟、杨贵沟洪水较大，杨贵沟内国道 335 线多处被山洪冲断。乌拉特中旗大水口沟、狼山沟、崩洪沟、红山口沟 4 条山洪沟出现洪水。

3. 强对流天气大尺度环流背景

强对流发生前，巴市处于南高北低的大尺度环境之中。6 日 08 时 500 hPa 上(见图 2(a))，副热带高压相对于 6 日 08 时发生明显东退南落，588 线南移 2 个纬距至北纬 40°以南，控制着河西走廊至鄂尔多斯市南部。584 线南移 2 个纬距至北纬 43°以南。贝加尔湖北部冷涡东移加强发展，温度场落后于高度场，-20℃冷中心向贝加尔湖西南侧甩出一温度槽。河套地区受 10 至 12 m/s 西北气流控制，上游阿拉善盟受西南气流控制，高层虽无明显冷平流或干平流，但副高原完全控制区对雷暴发展有很大抑制作用的中高层下沉气流已消失。

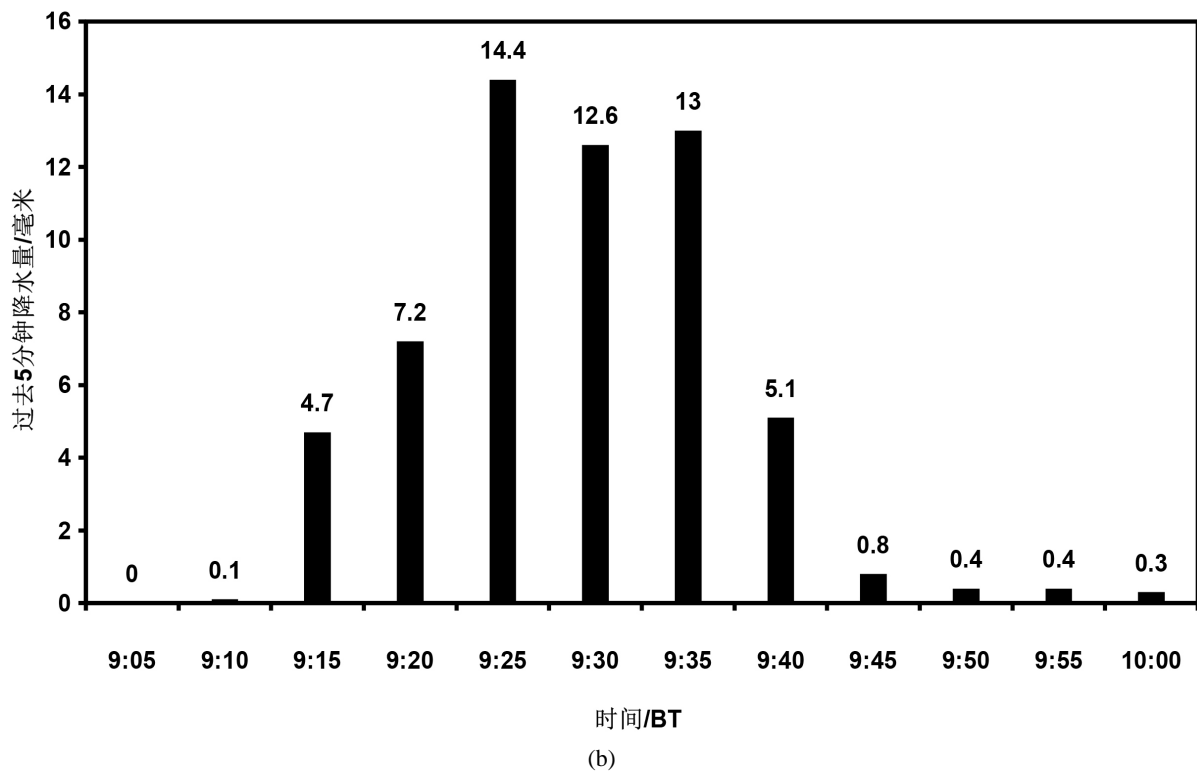
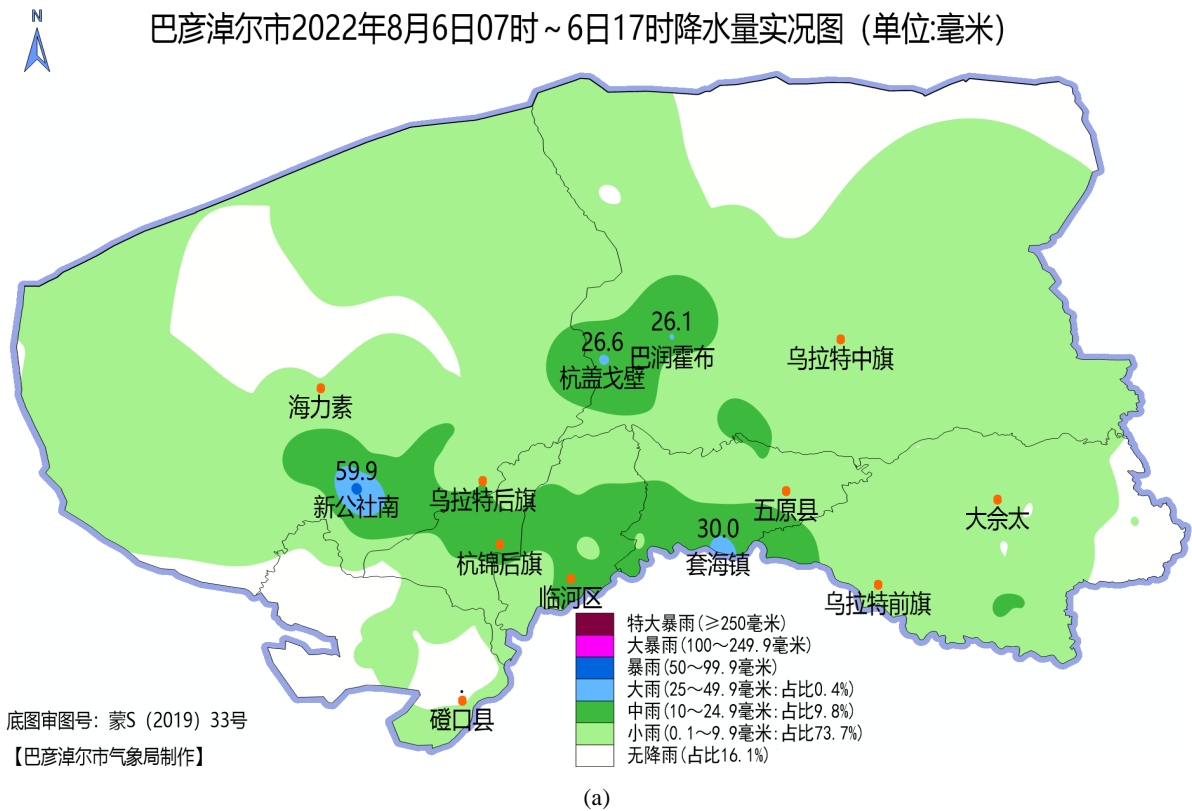
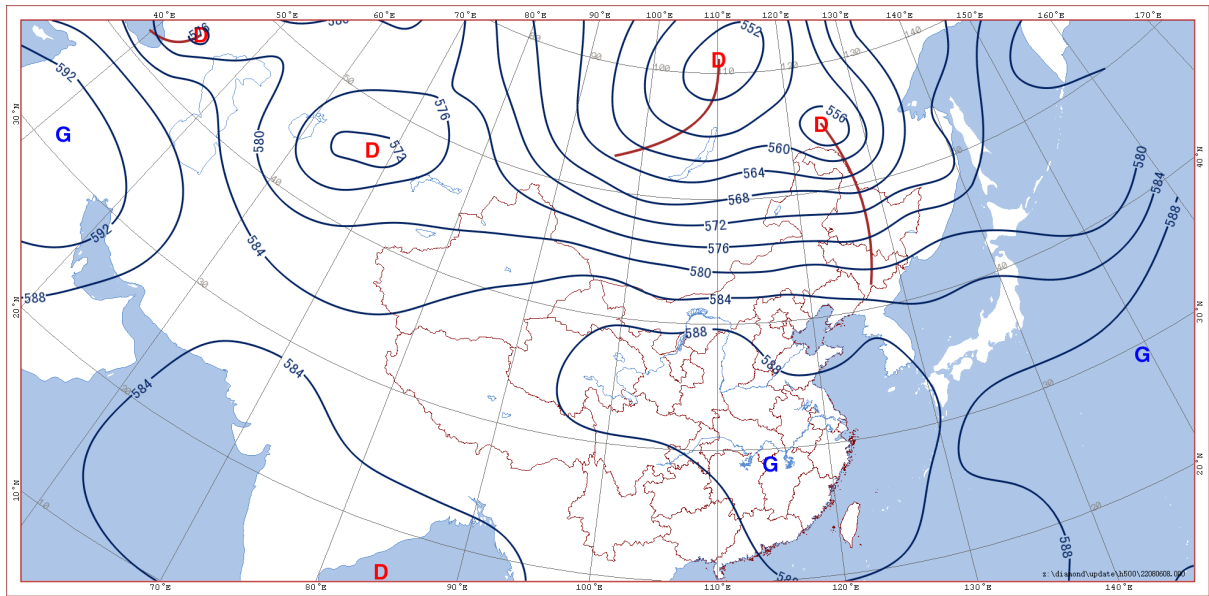
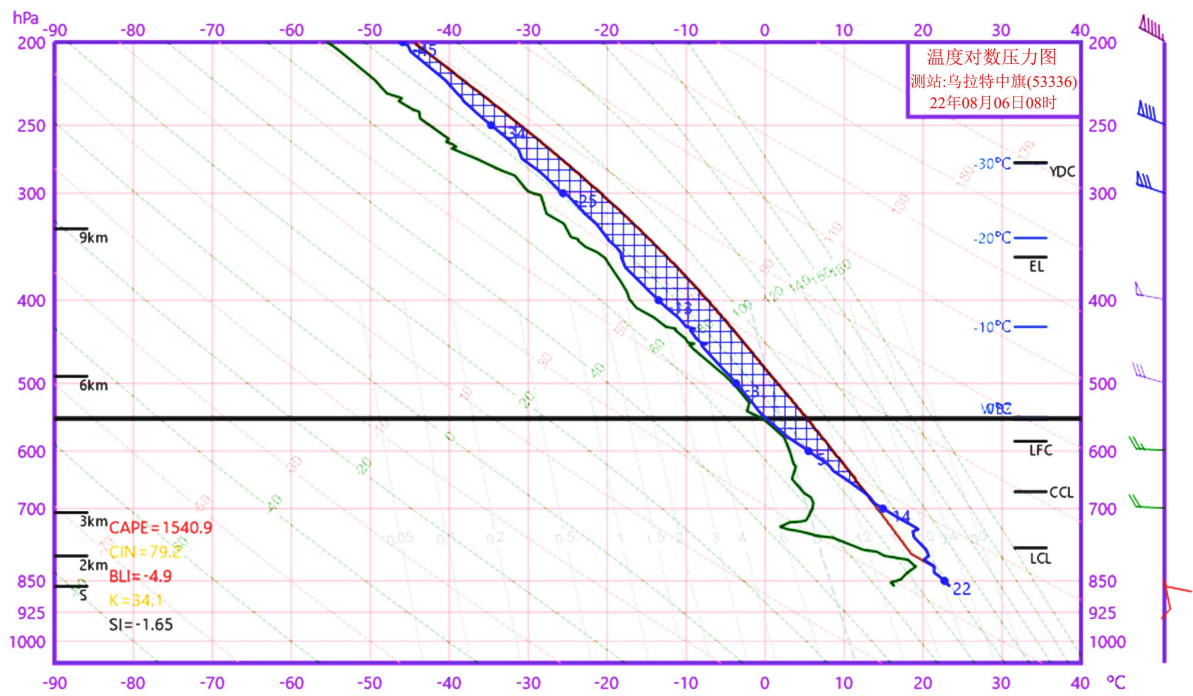


Figure 1. Spatial distribution map of precipitation on August 6 (a) and 5-minute precipitation map of New Commune South (b)

图 1. 8月6日降水量空间分布图(a)及新公社南逐5分钟降水量图(b)



(a)



(b)

Figure 2. 500 hPa (a) Altitude field (d, unit: gpm) and the optimal elevation layer revised radiosonde map of Ulat Zhongqi (b) on August 6, 2022 at 08:00

图 2. 2022 年 8 月 6 日 08 时 500 hPa (a)高度场(d, 单位: gpm)及最佳抬升层订正后的乌拉特中旗探空图(b)

4. 大气不稳定性分析

临河探空站位于新公社南站东南方向 78 千米，海拔 1042 米，离暴雨中心最近。降水发生前 6 日 08 时临河探空低层存在较大的抑制能量，且自由对流高度较高，不利于早晨强对流天气的出现，且临河最大湿度层位于报文第一层，其余各层订正抬升均弱于报文第一层，最佳抬升层为报文第一层。

乌拉特中旗探空站位于新公社南站东偏北方向 173 千米处, 海拔 1290 米, 都处于阴山山脉中。08 时乌拉特中旗低层存在较大的抑制能量, 抑制能量大于不稳定能量, 早晨不易出现强对流天气, 但中旗比湿最大层在在 817.9 hPa 处, 为 17 g/kg, 达 1761 米, 最佳抬升层为此最大湿度层, 订正后(见图 2(b)) CAPE 高达 1540.9 J·kg⁻¹, 抑制能量仅有 79.2 J·kg⁻¹, 自由对流高度也较低, 适当的地形抬升或强的湍流扰动即可触发对流。

巴彦诺尔公探空站位于新公社南站西南方向 178 千米处, 海拔 1292 米。08 时巴彦诺尔公低层存在较大的抑制能量, 抑制能量与不稳定能量相当, 早晨不易出现强对流天气, 但巴彦诺尔公比湿最大层在在 844.8 hPa 处, 为 16.7 g/kg, 最佳抬升层比最大湿度层高二层, 为 806.8 hPa, 海拔为 1874 米, 订正后 CAPE 高达 1506.7 J·kg⁻¹, 抑制能量为 54.6 J·kg⁻¹, 自由对流高度也较低, 适当的地形抬升或强的湍流扰动即可触发对流。

虽然新公社南离临河探空站更近, 但新公社南站和乌拉特中旗站同处于阴山山脉中, 因此乌拉特中旗探空更具有分析价值。新公社南站海拔 1965 米, 为单要素山洪雨量站, 且强对流发生在上午 9 时 10 分左右, 因此未用附近区域站进行要素订正。

对比周围三站对流参数(表 1), 未订正前均存在较大对流抑制能量, 且无较强天气系统性抬升, 因此不利于早晨大范围对流的出现; 最佳抬升层在 1800 米左右, 只适合在阴山海拔较高小区域触发对流, 且至抬升凝结高度仅有 289 米。且阴山南麓较陡峭, 局地强对流爆发海拔越高, 形成的山洪冲击力越大, 裹挟的沙石越多越大, 致灾性越强。因此这种大范围对流抑制、高海拔地区小量抬升可释放凝结潜热的不稳定性空间分布为灾害性山洪的发生提供了有利的大气层结背景条件。

Table 1. Comparison of convection parameters in Rixin commune south station on August 6, 2022

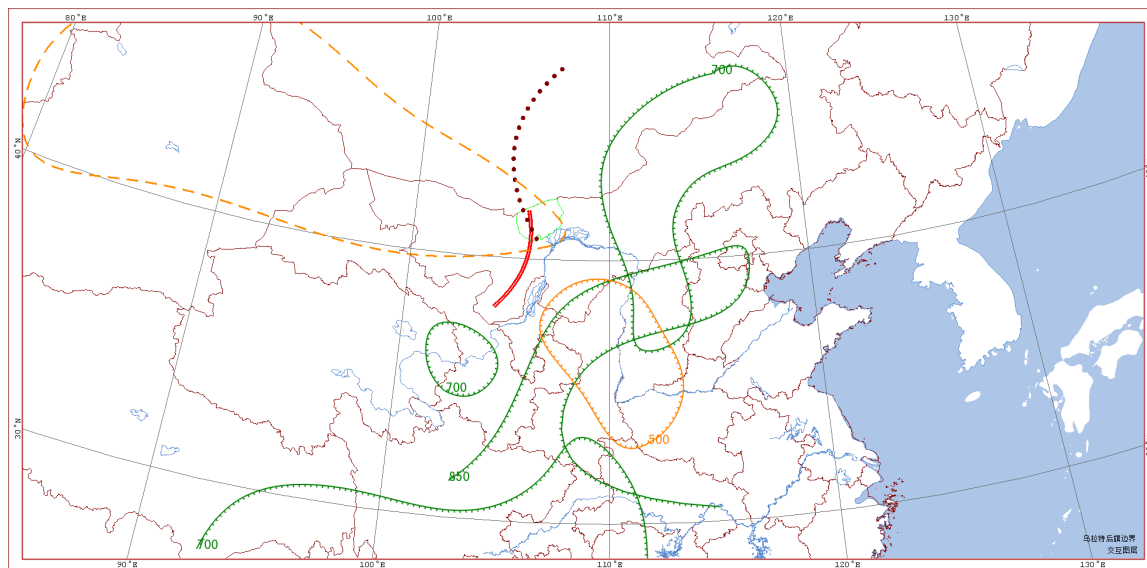
表 1. 2022 年 8 月 6 日新公社南站的对流参数对比

| 台站/订正 | CAPE (J·kg ⁻¹) | CIN (J·kg ⁻¹) | 抬升层高度 (m) | LCL (m) | 至 LCL 需抬升 (m) | LFC (hPa) |
|--------|-------------------------------|------------------------------|--------------|------------|------------------|--------------|
| 临河 | 458.7 | 343.4 | 1042 | 1699 | 657 | 608.0 |
| 乌拉特中旗 | 126.6 | 344.3 | 1290 | 2182 | 892 | 584.4 |
| 巴彦诺尔公 | 390.3 | 318.8 | 1292 | 2066 | 774 | 604.9 |
| 乌中旗最佳层 | 1540.9 | 79.2 | 1761 | 2050 | 289 | 676.6 |
| 诺尔公最佳层 | 1506.7 | 54.6 | 1827 | 2793 | 919 | 662.8 |

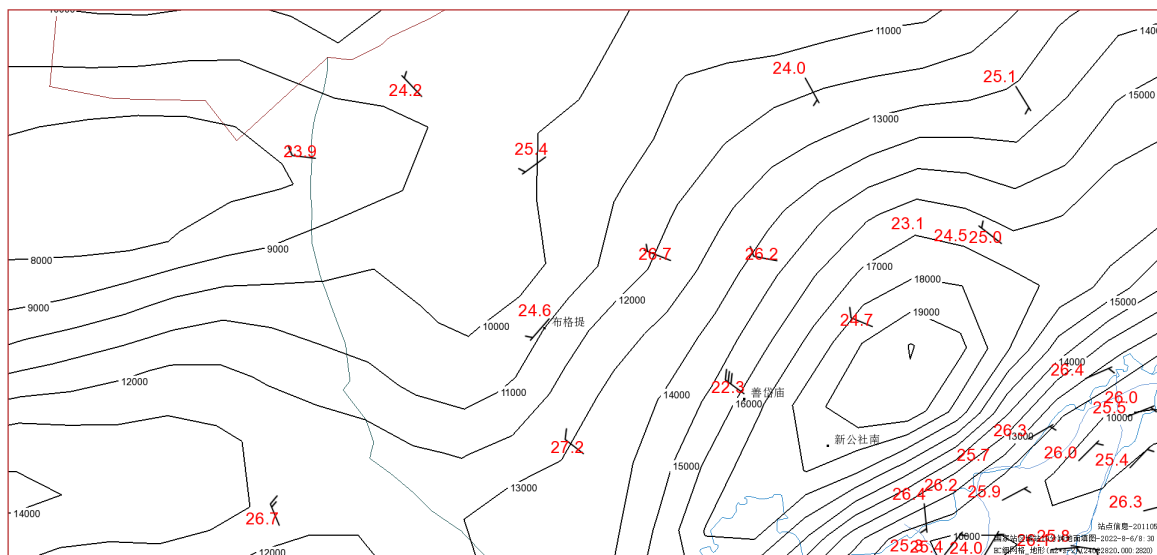
5. 对流风暴中尺度环境分析

风压场中, 巴市 500 hPa 受西北气流控制, 副热带高压南落东退, 西风风速加大; 700 hPa 图中 312 dagpm 线大幅向东南撤退至陕西北部至山西北部, 蒙古国南部 308 dagpm 线存在浅槽; 850 hPa 图上 144 dagpm 低压范围大幅扩大, 中心巴彦诺尔公减压至 138 dagpm, 巴彦淖尔市受弱西南气流控制, 弱切变线位于巴彦淖尔市西部(图 3(a)); 海平面气压场受 995 hPa 低压顶部控制偏南气流影响, 5 日蒙古国西部冷锋东南移动, 强度随其后部逐渐变性的冷高压减弱而减弱。

湿度场上, 巴市地面露点温度 17℃到 22℃, 地面湿度条件较好; 850 hPa 巴市及上游温度露点差 6℃~10℃, 湿区位于延安及以南地区; 700 hPa 巴市及上游温度露点差 5℃~9℃, 大范围湿区位于呼和浩特及以东地区; 500 hPa 巴市北部和阿拉善盟北部受湿区影响, 干区位于民勤—延安及以南地区。700 hPa 巴彦诺尔公至临河存在弱湿平流, 500 hPa 和 850 hPa 无明显湿度平流。



(a)



(b)

Figure 3. Mesoscale analysis at 8:00 on August 6 (a); 8:30 before convective rainstorm of New commune (b)

图 3. 8月6日8时中尺度分析(a); 新公社南对流暴雨发生前8:30地面要素场(b)

温度场中，巴市地面温度 24℃到 28℃；巴彦淖尔市位于 850 hPa 与 500 hPa 温差 28℃显著区东部前沿，850 hPa 受 24℃暖中心控制，700 温度脊线位于阿拉善盟东部。对流层中低层无明显温度平流。8 时 30 分善岱庙附近出现 12.6 米/秒西北风(图 3(b))，温度比周围区域低 3℃到 5℃，冷空气先锋开始翻越阴山。

综上所述，此次局地强对流天气的中尺度环境有利因素为：副高快速南撤，其原控制区域地面仍维持暖湿高能状态；地面高压前部弱冷空气有一定动力抬升作用；冷空气从坡度较小的阴山北麓爬坡，地形抬升使抬升高度进一步提高；巴彦淖尔市位于 850 hPa 与 500 hPa 温差 28℃显著区东部前沿，热力不稳定性较强；850 hPa 和 700 hPa 巴市及上游温度露点差 5℃~10℃，弱的抬升不足以释放凝结潜热，局地强对流触发后，也可形成较强降水。

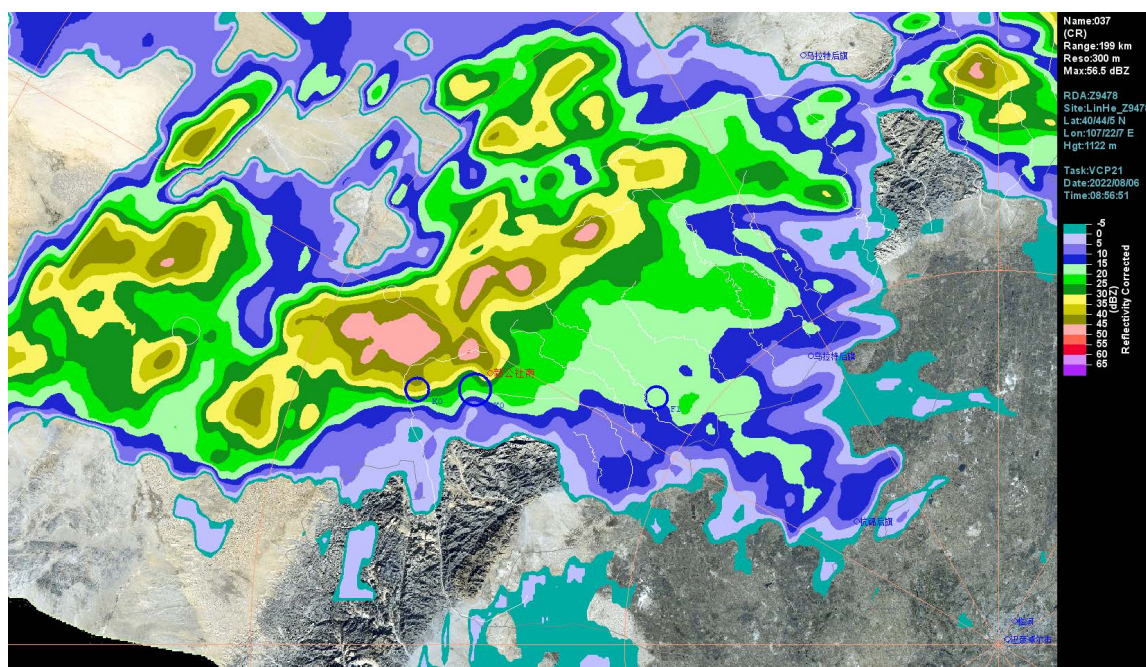
6. 临河雷达回波分析

8月6日7时至8时,阴山山脉以北有西南—东北向带状弱降水回波生成,回波整体向东南方向移动,乌拉特后旗布格提为2.3毫米,其余站点未出现明显降水。分析是由于地面蒙古国高压前冷空气南下,西北气流自马瑙湖(海拔813米)沿布格提(海拔1106米)附近谷地爬北坡地形抬升加强所形成。

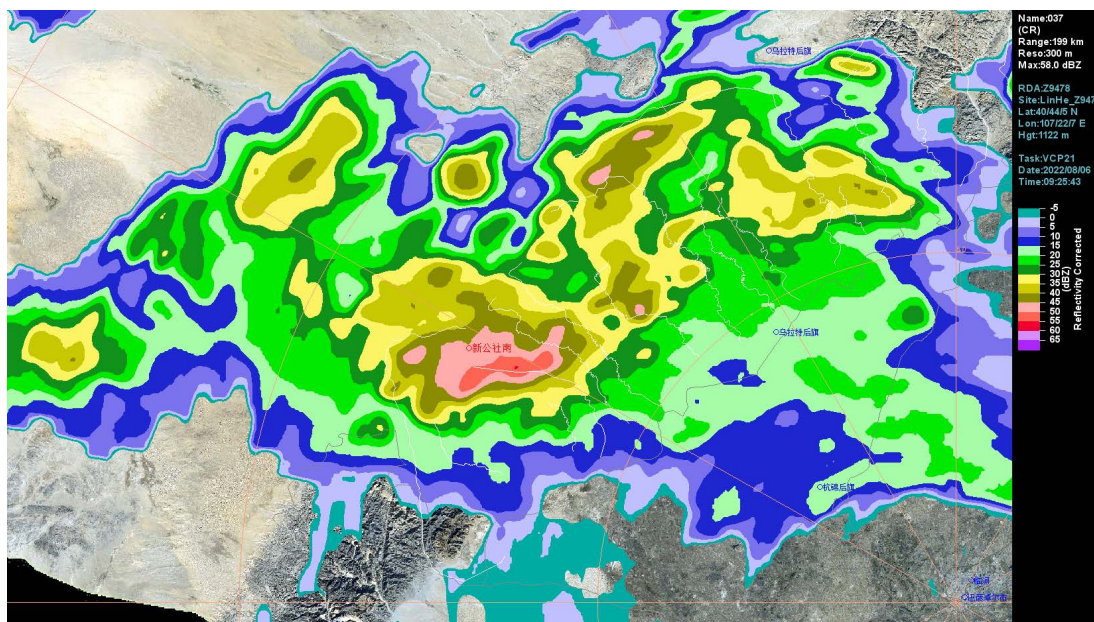
8时至9时,带状回波西南部分减速加强发展,最大小时雨强出现在乌拉特后旗善岱庙(海拔1540米)为14.3毫米,带状回波东北部分东移减弱,未产生明显降水。分析是由于乌拉特后旗境内阴山山脉呈西南—东北向,带状回波西南部分继续爬坡减速抬升加强;乌拉特中旗境内阴山山脉呈西—东向,带状回波东北部在阴山北部以东移为主,不再爬坡抬升因此减弱。

9时至10时,乌拉特后旗杨贵沟附近各对流单体继续加强发展,风暴追踪信息显示9时8分善岱庙单体向东南移动、杨贵沟上游站西侧单体向南移动,9时14分左右两单体在新公社南附近合并加强,紧随合并强单体9时25分(图4(b))又有一单体自呼和温都尔嘎查北部自西向东移过新公社南,9时40以后加速向东南方向移动,最大小时雨强出现在乌拉特后旗新公社南(海拔1965米)为59.0毫米。分析为地表西北气流从阴山最高峰呼和巴什格西南侧绕行翻过阴山,气流速度加大,抬升作用达到最大,能量在局地得到持续释放,单体生成后先沿着哈日干那高勒河谷逆流而上向东发展,再向东南传播翻越山脊进入阿贵图音高勒上游,后沿阿贵图音高勒顺流而下东移加强发展形成山洪,新公社南位于阿贵图音高勒中游,阿贵图音高勒山洪最终冲入杨贵沟形成灾害;对流回波移除山区后继续下坡,回波移动速度加快,降水强度减小。

连贯来看布格提、善岱庙、新公社南在严格的一条西北至东南向线上,分析降水为同一云团谷底对流触发后在持续地形抬升加强形成。ROSE雷达软件识别出自8时28分善岱庙明显降水开始至9时49分阿贵图音高勒降水减弱,杨贵沟山区附近一直存在中气旋(图4(a))。风廓线VWP显示强降水期间,1.8 km到2.1 km维持西南风,为与爬坡率先翻越阴山的西北气流在阴山南麓对峙提供了背景流场与充足的水汽。



(a)

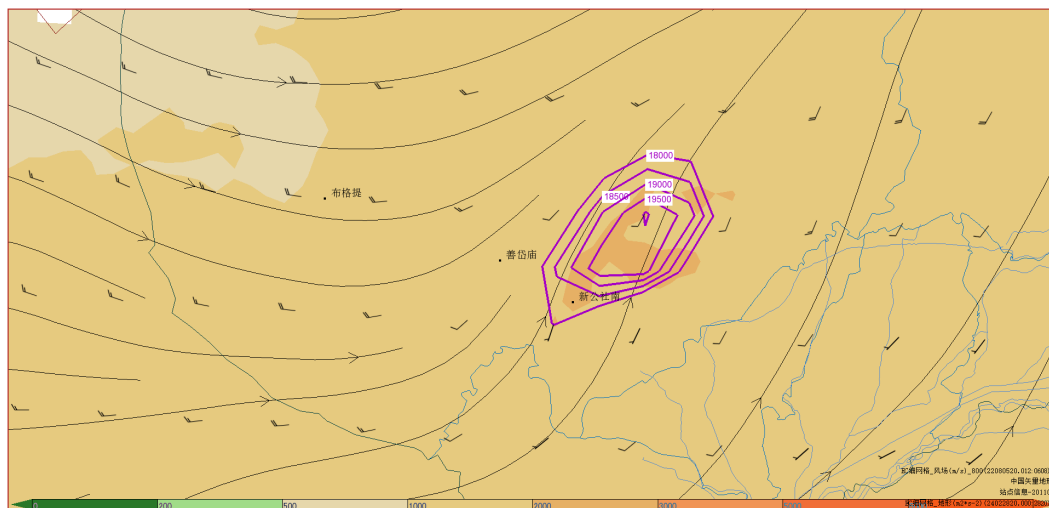


(b)

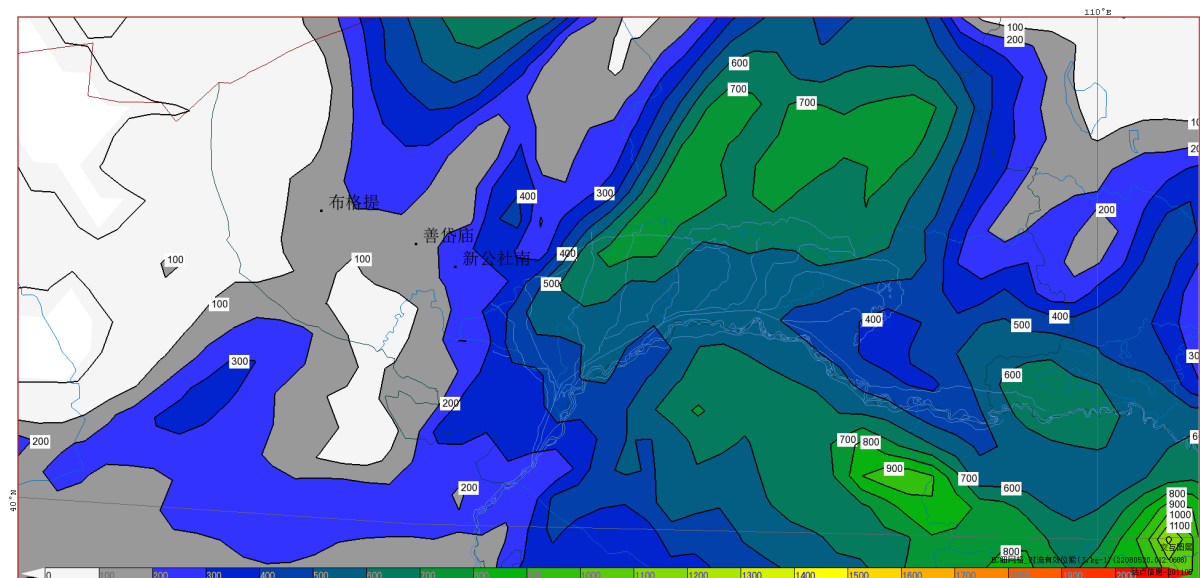
Figure 4. August 6 at 08:56 (a); 09:55 (b) combined reflectivity
图 4. 8月6日8时56分(a); 9时25分(b)组合反射率

7. 模式可预报性分析

8月6日乌拉特中旗探空850 hPa位于1422米，低于最佳抬升层1761较多，更远低于新公社南站的1965米，因此选取1947米的800 hPa进行动力抬升分析。EC模式预报在6日08时800 hPa新公社南站附件受大范围3到8米/秒西南气流控制，在阴山地形作用下气流在新公社南站附近分流(图5(a))，分流点地形抬升作用最强，西南气流源源不断将水汽抬升至抬升凝结高度2050米以上释放凝结潜热，致使新公社南附近局地大气层结维持不稳定，持续触发对流形成此次局地暴雨。但EC模式6日08时CAPE在新公社南附近只有 $200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图5(b))，远小于周围区域，参考意义不大。因此最佳抬升层较高时，模式800 hPa风场在分析阴山地形抬升时有较强指示作用。



(a)



(b)

Figure 5. EC mode forecast at 800 hPa wind field and EC contour line and micaps topography on August 6 (a); CAPE distribution at 08:00 in EC mode forecast (b) on August 6

图 5. EC 模式预报 8 月 6 日 08 时 800 hPa 风场与 EC 等高线、micaps 地形叠加(a); EC 模式预报 8 月 6 日 08 时 CAPE 分布(b)

8. 结论

2022 年 8 月 6 日上午巴彦淖尔市乌拉特后旗阴山南麓发生局地灾害性强对流暴雨过程, 采用各类资料分析了暴雨的成因以及可预报性, 主要结论如下:

1) 副高快速南落使短期内其原控制区对流层中高层对雷暴发展有很大抑制作用的下沉气流消失, 但低层暖湿高能状态仍然维持。

2) 大范围对流抑制、高海拔地区小量抬升可释放凝结潜热的不稳定性空间分布为灾害性山洪的发生提供了有利的大气层结背景条件。

3) 布格提谷地使地面变性高压前部爬坡的西北气流汇聚增强, 在阴山北麓局地触发强对流单体。

4) 率先翻山的强对流单体产生的冷出流顺山洪沟而下与因山脉分流而加强的暖湿气流在阴山南麓局地对峙加剧了强对流的发展。

5) 最佳抬升层较高时, 模式 800 hPa 风场在分析阴山地形作用时有较强指示作用。

参考文献

- [1] 曾琳, 张羽, 李怀宇, 等. 基于多源探测资料的一次广州局地强对流垂直结构分析[J]. 热带气象学报, 2023, 39(3): 348-360.
- [2] 侯淑梅, 朱晓清, 史茜, 等. 冷涡背景下山东省“5·17”极端强对流天气环境条件分析[J]. 气象, 2023, 49(11): 1328-1342.
- [3] 徐伙, 姚余辉, 应楚昊, 等. 衢州一次局地暴雨天气物理量诊断及极端性预报指标分析[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(10): 220-222.
- [4] 赵衍斌, 李强, 周盈颖, 等. 重庆西部平行岭谷地形作用下的一次局地暴雨天气过程的分析[J]. 气象, 2023, 49(6): 657-670.
- [5] 刁秀广. 阵风锋、海风锋和冷锋等触发局地强对流风暴实例分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 45-57.
- [6] 李超, 崔春光, 徐慧燕, 等. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J].

- 气象, 2022, 48(12): 1497-1511.
- [7] 付智龙, 李国平, 姜凤友, 等. 四川盆地西部一次暖区山地暴雨事件的动力过程分析与局地环流数值模拟[J]. 大气科学, 2022, 46(6): 1366-1380.
- [8] 冯文, 吴冰雪, 杨薇. 海南岛秋汛期特大暴雨局地锋生的特征及其对对流系统发展的影响[J]. 大气科学学报, 2023, 46(2): 271-282.
- [9] 沈焯, 张晶寒, 袁慧玲, 等. 南京城市下垫面对夏季暴雨云团特征的影响[J]. 水科学进展, 2024: 1-10.
- [10] 毛江玉, 赵雪洁, 刘屹岷, 等. 江淮梅雨期持续性暴雨和极端强降水事件的位涡比较分析[J]. 暴雨灾害, 2024: 1-14.