

# 干旱地区一次局地对流性大暴雨成因分析

李凯鹏

巴彦淖尔市气象台, 内蒙古 巴彦淖尔

收稿日期: 2024年6月2日; 录用日期: 2024年7月3日; 发布日期: 2024年7月9日

## 摘要

综合使用常规Micaps资料、临河雷达ROSE资料等, 对2023年8月9日河套平原一次局地对流性大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: 副高快速大幅度北跳后南落使短期内对流层中高层下沉气流的增温作用达到、下沉气流的对流抑制作用减弱, 但低层暖湿高能状态仍然维持; 中高海拔地区无抑制、低海拔地区小量抬升可突破抑制释放大量储藏能量的不稳定性空间分布为夜间乌加河河谷地带的强对流的发生提供了有利的大气层结背景条件; 前半夜暖中心前部热力不稳仍然较强, 低海拔地区局地动力抬升使抑制消失则局地触发强对流, 西南部地面露点较高、850 hPa比湿较大, 易形成局地强降水。阴山最高峰与乌加河河谷离最高峰最近处沙海镇巨大海拔差所产生的热力差异, 为此次夜间局地强对流提供了有利的山风热力环流条件; 对流层中低层的强劲的东南风与山风环流高层的东南风一直, 进而加强了山风环流; 山风产生的冷空气抬升各沟口自西南向东北依次展开, 由于沙海镇受多条沟口的冷出流影响, 因此动力抬升时间最长、抬升幅度最大; 最佳抬升层较低时, 模式850 hPa风场在分析乌加河河谷水汽能量输送方向时有较强指示作用。

## 关键词

强对流, 对流抑制, 山风环流, 大暴雨

# Cause Analysis of a Local Convective Heavy Rain in Arid Area

Kaipeng Li

Bayannaer Meteorological Observatory, Bayannaer Inner Mongolia

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2024; published: Jul. 9<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The process of a local convective heavy rain in Hetao Plain on August 9, 2023 is analyzed by using

conventional Micaps data and ROSE data of riverfront radar. The spatio-temporal evolution of mesoscale environmental conditions and the cause of the rainstorm are discussed. The results show that the subtropical high quickly and sharply jump to the north and then set to the south makes the warming effect of the downdraft in the middle and upper troposphere reach and the convective suppression effect of the downdraft weaken in the short term, but the warm and humid high energy state in the lower layer is still maintained. The spatial distribution of instability with no inhibition in the middle and high altitudes and a small amount of uplift in the low altitudes can break through the inhibition and release a large amount of stored energy provides a favorable atmospheric stratification background for the occurrence of strong convection in the Uga River valley at night. In the early night, the thermal instability in the front of the warm center is still strong, and the local dynamic uplift in the low altitude area causes the local strong convection to disappear. The surface dew point in the southwest is higher and the specific humidity of 850 hPa is larger, which is easy to form local heavy precipitation. The thermal difference caused by the huge altitude difference between the highest peak of Yinshan Mountain and Shahai Town, the closest place to the highest peak in the valley of Wujia River, provided favorable conditions for the local strong convection at night. The strong southeasterly wind in the middle and lower troposphere is consistent with the southeasterly wind in the upper troposphere, which further strengthens the mountain wind circulation. The cold air generated by the mountain wind spreads from southwest to northeast. Shahai Town is affected by the cold outflow of several gullies, so the dynamic uplift time is the longest and the uplift amplitude is the largest. When the optimal uplift layer is low, the wind field of model 850 hPa has a strong indication in the analysis of the direction of water vapor energy transport in the Uga River valley.

## Keywords

Strong Convection, Convection Suppression, Mountain Wind Circulation, Heavy Rain

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(以下简称巴市)地处中纬度地区,位于大陆深处,远离海洋,地势高漫,属中温带大陆性气候。巴市属干旱地区,年平均降水量 174 毫米,由东到西递减。巴市位于季风末端,夏季西南季风爆发时,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。

巴市因热力不均形成的局地热力环流有两类。一类是地形热力环流,阴山山脉与河套平原、阴山山脉与北部内蒙古高原、阴山山脉与海流图盆地等因海拔差异而形成的热力环流;另一类是地貌热力环流,河套平原与库布齐沙漠、河套平原与乌兰布和沙漠、河套平原与乌梁素海等因地貌差异而形成的热力环流。盛夏底层湿度较大时,在没有明显系统性扰动的情况下,往往易由上述热力环流局地触发对流。

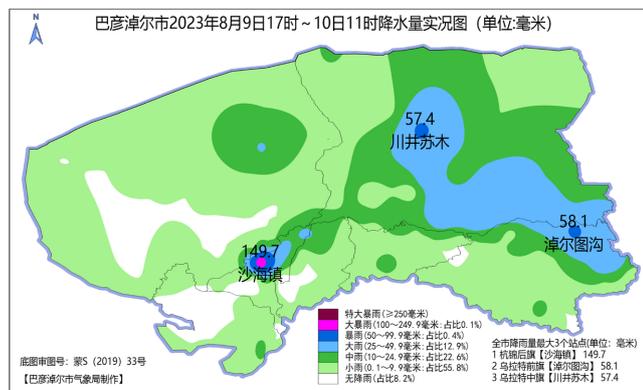
众多学者基于非常规高分辨率观测资料对局地热力环流进行了研究,得到了很多具有实际应用价值的成果。例如,吴雪冰[1]利用中尺度模式 WRF-ARW (V4.0)对海南岛一次典型山地环流个例进行了高分辨率模拟,详细讨论了山地环流的水平、垂直结构及其演变特征发现,19 时山风开始出现,至凌晨后山区已为山风控制,近地面风场沿黎母、五指山脉北侧出现“人”字型山风大值区,同时山脉上空 1.2~1.8

km 背景风加强, 气流呈现出明显的波动状态, 在山地环流演变过程中温度场大值区与气流辐合区对应较好; 周泽旭[2]为进一步探究影响局地山谷风环流发育强度的因素, 以温度热力差异和海拔高度差为条件设置了两类敏感实验, 结果表明, 扩大温度差异能够明显的促进局地山谷风环流发育, 在一定范围内增加山体海拔高度能够促进局地谷风环流发育, 即山体海拔高度越高, 谷风风速越大; 姜平等[3]利用计算流体力学手段, 结合基于气象站观测事实并理想化的初始条件, 对重庆复杂地形下局地山谷风环流进行高精度数值模拟, 结果表明, 仅仅由地形高低起伏导致的热力差异能够在局地形成山谷风环流; 任雍等[4]基于边界层测风激光雷达等数据研究了武夷山谷风环流特征表明, 山谷风日出现时大气日变化特征显著, 山风出现的时间段, 以偏北风为主, 风速较小, 低空激光雷达回波信号较强, 气流运动以下沉为主, 垂直方向上形成环流圈; 谷风阶段, 以偏南风为主, 较山风阶段风速有所增强, 低空激光雷达回波信号减弱, 以上升气流为主; 激光雷达数据融合的风廓线可见, 武夷山非山谷风日常出现在对流层中低层盛行偏南风的天气形势下。李嗣源等[5]利用第二次青藏高原科学考察等数据研究了局地山谷风环流在林芝地区一次地形云和降水形成过程中的作用, 发现午后阶段, 由于山区强烈的太阳辐射加热, 首先产生明显的上坡风和强上谷风环流, 在山坡迎风坡受阻挡抬升, 并激发出强的地形波, 产生了强对流云和降水; 傍晚阶段, 由于山脉强烈的长波辐射冷却效应, 产生的强下坡风在谷底辐合抬升, 促进了山谷上空的弱对流、层状云发展; 凌晨阶段, 下坡风达到最强, 产生了强下谷风环流(山风), 下坡风在谷底产生强烈的抬升作用, 形成深厚的层状云降水过程。

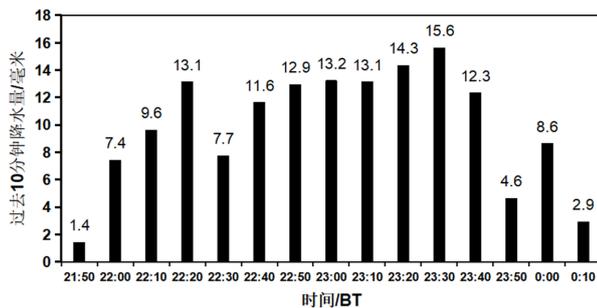
## 2. 强对流天气概况

2023年8月9日17时至10日11时, 受副高北侧扰动的影响, 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。其中大暴雨1个站, 暴雨2个站, 大雨17个站, 最大降水量出现在杭锦后旗沙海镇149.7毫米(降水分布见图1(a)), 最大雨强出现新公社南在为68.5毫米/小时(23时~00时)。最大阵风出现在乌拉特后旗巴音忽热28.2米/秒(10级), 沙海镇最大阵风26.9米/秒(10级)。巴市东北部大范围中到大雨出现10日04时至10时, 沙海镇大暴雨发生大范围对流前的9日22时至00时, 两小时内降水136.6毫米, 大暴雨主要时间段21时40分至00时10分逐10分钟降水呈双峰状态(见图1(b))。沙海镇大暴雨降水量大、历时短为巴市较罕见, 通过ROSE雷达降水量估测和农田渍涝致灾程度证实为真实数据。

强对流天气造成杭锦后旗沙海镇、头道桥镇、蛮会镇、团结镇、双庙镇5个镇、39个村、6978人受灾, 受灾农作物5845.4公顷(其中: 葵花2924.7公顷、玉米1578.9公顷、葫芦258.6公顷、番茄522.9公顷、辣椒478.3公顷、西瓜80公顷), 杭锦后旗共计直接经济损失3276.9万元, 其中沙海镇共计直接经济损失2682.7万元。



(a)

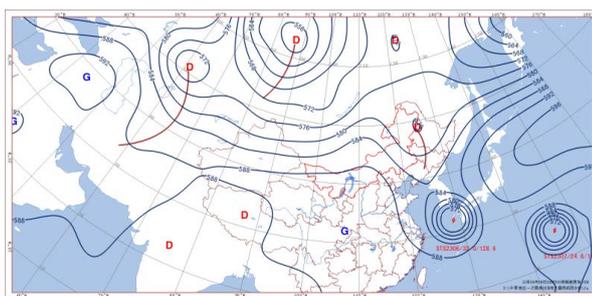


(b)

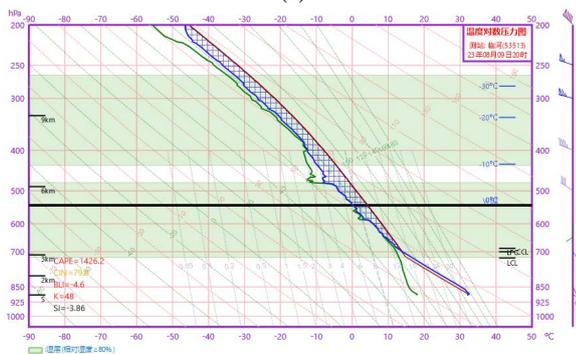
**Figure 1.** (a) Spatial distribution map of precipitation on August 9; (b) 10-minute precipitation of Shahai Town  
**图 1.** (a) 8月9日降水量空间分布图; (b) 沙海镇逐10分钟降水量图

### 3. 强对流天气大尺度环流背景

强对流发生前, 9日20时500 hPa上(见图2(a)), 亚欧大陆高纬度地区为两高一低型, 低涡位于西伯利亚北部; 亚洲中纬度地区为两低一高型, 副热带高压控制内蒙古中西部、华北地区大部区域, 副高北侧高压脊北伸至贝加尔湖东南侧; 06号台风“卡努”位于东海东部, 继续北上减弱将从韩国南部登录, 台风北侧低层偏东气流不断向华东地区、华北地区输送水汽; 07号台风“兰恩”在太平洋西部加强发展。副热带高压相对于9日08时发生明显北跳, 2023年首次完全控制内蒙古西部, 东经110°的588线从北纬36°以北跳7个纬距至北纬43°附近, 对流层中高层下沉增温作用明显, 对流层低层东南风增湿作用较强; 10日08时588南落3个纬距至北纬40°附近, 对流层中高层下沉气流的对流抑制作用减弱; 副高快速大幅度北跳后南落使短期内对流层中高层下沉气流的增温作用达到、下沉气流的对流抑制作用减弱, 但低层暖湿高能状态仍然维持。



(a)



(b)

**Figure 2.** (a) 500 hPa altitude field at 20:00 on 9 August; (b) River frontage radiosonde map with revised optimum uplift  
**图 2.** (a) 8月9日20时500 hPa高度场; (b) 最佳抬升层订正后的临河探空图

#### 4. 大气不稳定性分析

沙海镇最近的探空站为临河站，位于沙海镇东南方向 41 千米，海拔 1042 米略高于沙海镇(海拔 1029 米)，同属河套平原且强对流发生在 22 时，因此大气层结相似度高。次近的探空站为乌拉特中旗，位于沙海镇东北 144 千米，属阴山山脉且海拔差异较大，因此不进行对比分析。9 日 20 时临河探空虽然 CAPE 高达 1100 J/kg、沙氏指数达-3.68°C，但低层存在抑制能量，夜间长波辐射会使热力条件持续减弱，因此触发能量释放需要较强差动平流或一定的动力抬升，且抬升凝结高度、自由对流高度适中，有利于抑制突破后形成局地强对流。850 hPa 东南风 8 米/秒，500 hPa 西北风 12 米/秒，垂直风切变较大，有利于对流组织性的维持，风向相反，有利于临河西北方向上升气流加强，东南方向下称气流加强。

对比临河站对流参数(表 1)，抑制能量在 1331 米附近开始接近消失，1331 米以上储存不了对流能量，在湍流扰动下会缓慢释放，因此夜间降水大于 10 毫米的 22 个站点中除川井(海拔 1343 米，降水 12.4 毫米)外海拔在 1021 至 1245 米，1300 米以上的其余 40 个站点均未出现明显降水。由于 850 hPa 以下比湿都在 14 g/kg 左右，仅需将暖湿空气动力抬升至 1331 米左右即可，后续仅靠较小速度可抵达自由对流高度。因此这种中高海拔地区无抑制、低海拔地区小量抬升可突破抑制释放大量储藏能量的不稳定性空间分布为夜间河谷地带的强对流的发生提供了有利的大气层结背景条件。

**Table 1.** Convection parameters of different elevated layers at Linhe Station at 20:00 on August 9, 2023

**表 1.** 2023 年 8 月 9 日 20 时临河站不同抬升层对流参数

抬升层气压(hPa)	CAPE(J·kg <sup>-1</sup> )	CIN(J·kg <sup>-1</sup> )	抬升层高度(m)	LCL (m)	至 LCL 需抬升(m)	LFC (hPa)
889.0	1100.3	140.1	1042	2853	1811	686.8
885.5	1426.2	79.8	1071	2919	1848	695.0
882.3	1335.9	62.1	1112	2997	1855	694.2
871.3	1079.6	40.9	1219	3139	1920	688.0
860.6	1022.8	6	1331	3251	1920	684.2

#### 5. 对流风暴中尺度环境分析

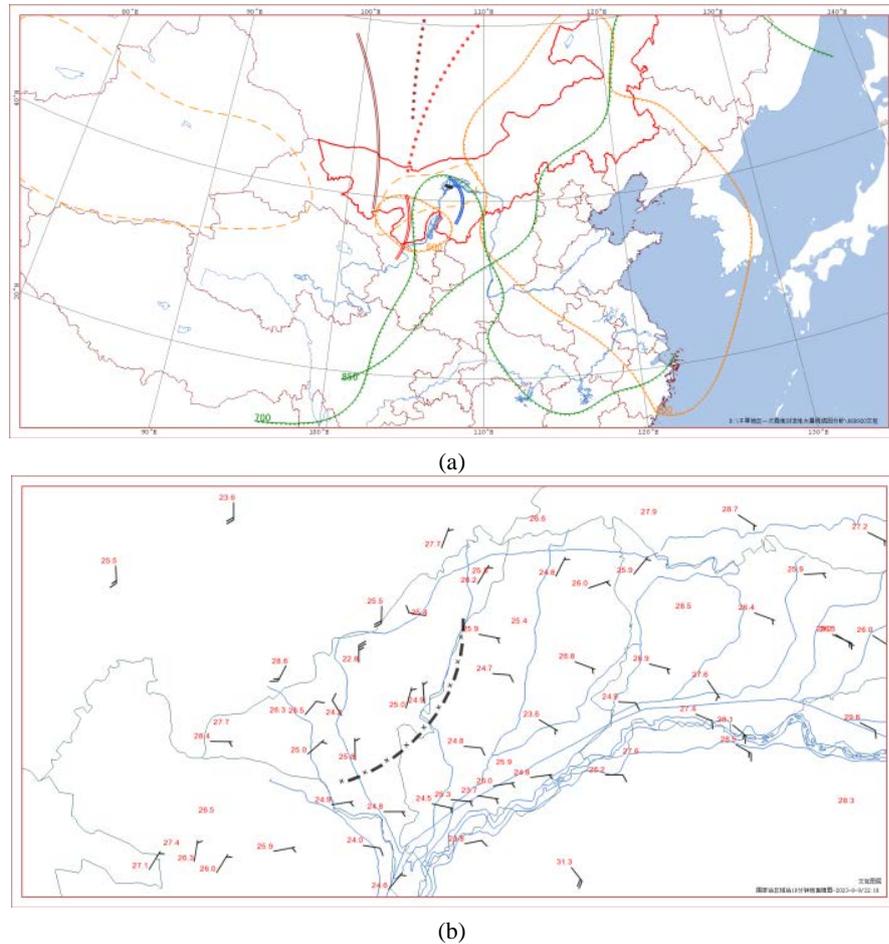
风压场中，500 hPa 临河及以西 7 站为西北风，乌拉特中旗及以东 3 站为西南风，河套地区存在明显切变线。临河及上游阿拉善盟风速由 08 时的 2 到 4 米/秒增大为 20 时的 8 到 18 米/秒，盛夏中高层风速增大，垂直风切变增大，有利于风暴组织性的维持；700 hPa 西低东高，有利于地面辐合线等底层扰动东移减速，维持时间加长，阿拉善右旗存在明显切变线(图 3(a))；850 hPa 阿拉善左旗存在低压，低压南侧有切变线；海平面气压场巴市位于 995 hPa 低压顶前，阴山以北以东南风为主，阴山以南以偏东风为主。

湿度场上，巴市地面露点温度 9°C 到 21°C，西南部露点温度较高；850 hPa 巴市比湿 9~13 g/kg，湿区位于汉中及以南地区；700 hPa 巴市西南部受市区影响；500 hPa 干区位于银川、民勤一带，位置偏南。700 hPa 巴市东部弱湿平流，500 hPa 弱干平流。

温度场中，巴市气温 23 到 36°C；西部偏南 23°C 到 26°C，西部偏北 33°C 到 36°C，西部南低北高，温度梯度较大，有利于西部低层偏东气流的维持；东部 28°C 到 32°C，无明显南北差异。850 hPa 位于 32°C 暖中心前部，温度脊北伸至贝加尔湖东南部；700 hPa 温度脊线北伸至贝加尔湖以北；巴市及阿拉善盟东部 850 hPa 与 500 hPa 温差达 32°C 以上；对流层中低层无明显温度平流。逐 5 分自动站填图显示 22 时 10 分(图 3(b))至 00 时沙海镇维持 10~18 m/s 偏北风，平原其余站点以 2~4 m/s 偏东风为主。

综上所述，夜间低层无强暖湿平流、高层无强干冷平流，虽然对流抑制在低海拔区域储存了一些不稳定能量，无大范围系统性动力抬升，大气长波辐射只会使热力条件越来越弱，因此中尺度背景不利于

夜间大范围对流天气的出现。但前半夜暖中心前部热力不稳仍然较强，低海拔地区局地动力抬升使抑制消失则局地触发强对流，西南部地面露点较高、850 hPa 比湿较大，易形成局地强降水。



**Figure 3.** (a) Mesoscale analysis at 20:00 on August 9; (b) Surface Wind Field and Temperature at 20:00 before heavy rain  
**图 3.** (a) 8月9日20时中尺度分析; (b) 沙海镇大暴雨发生前20时地面风场与温度

## 6. 临河雷达回波分析

9日16时30分受下垫面加热不均影响，在磴口县南部乌兰布和沙漠与绿洲边界奈伦湖附近触发生成强对流风暴，强对流风暴沿黄河绿洲一侧(西北侧)向下游东北方向缓慢移动加强发展，途径磴口县、杭锦后旗、临河区三地黄河沿岸，至21时(图4(a))在黄河拐向东处(五原县天吉泰镇)减弱消亡，分析为风暴冷流出流方向扩大致风暴组织性减弱所致。

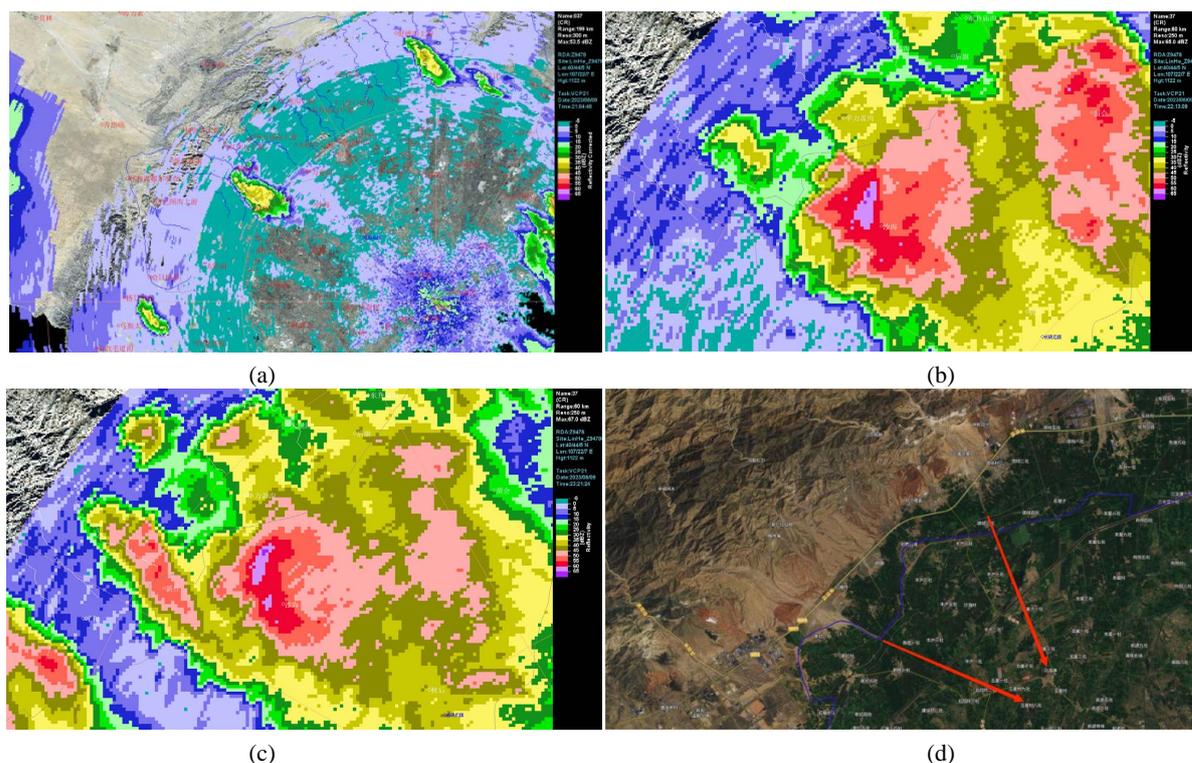
21时5分在格日敖包沟、杨贵沟、布尔嘎斯高勒三条沟在出口段有对流快速加强生成(图4(a))，分析为山洪沟口冷流出流所致。21时28分杨贵沟回波东北移动进入红山沟下游，红山沟外3公里处新红站东侧快速生成强对流单体，红山沟外10公里处沙海镇南快速生成强对流，三处回波沿红山沟下游方向呈线状分布。同时毕力盖沟下游出现对流，毕力盖沟外3公里快速生成强对流单体。沙海镇位于两大山洪沟口山风交叉的位置。

至22时13分强对流已发展呈三角形(图4(b))，这种三角形回波或云图在局地对流暴雨过程中较为多见，触发强对流的顶点位置位于红山沟下游向外延伸4公里处。22时19分在沙海附近回波最大值达到

此次过程最强 68 dbz，产生大暴雨第一次雨强峰值。

至 23 时 21 分，在后向传播的作用下，强对流单体质心一直在沙海镇附近徘徊 1 小时左右，23 时 21 分在红山沟沟口处新生强对流(图 4(c))，沙海镇受山风交叉影响的条件被破坏，沙海镇强回波完全转为沿毕力盖沟出口方向分布，强对流一个核心的组织性被破坏。23 时 27 分强对流风暴分裂为两部分，之后逐渐减弱东北移动离开沙海。

阴山山脉最高峰呼和巴什格(海拔 2364 米)位于沙海镇(海拔 1029 米)西北 25 公里处，此段阴山山脉呈西南-东北走向，对 850 hPa 东南气流有明显的地形抬升作用。呼和巴什格西南侧第一条较大的山洪沟为毕力盖沟，流域面积达 138 平方公里，其山洪沟出口段直指沙海镇(图 4(d))；呼和巴什格西南侧第二条较大的山洪沟为红山口沟，流域面积达 141 平方公里，其山洪沟出口段指向沙海镇西侧；两条较大沟之间有巴戈毕力盖沟和查干布尔嘎斯沟等中小沟口，山风环流产生的冷空气沿这些山洪沟流出都能影响到沙海镇。此次山风产生的冷空气抬升各沟口自西南向东北依次展开，由于沙海镇受多条沟口的冷流出影响，因此动力抬升时间最长、抬升幅度最大，造成沙海镇强对流持续形成此次局地大暴雨。



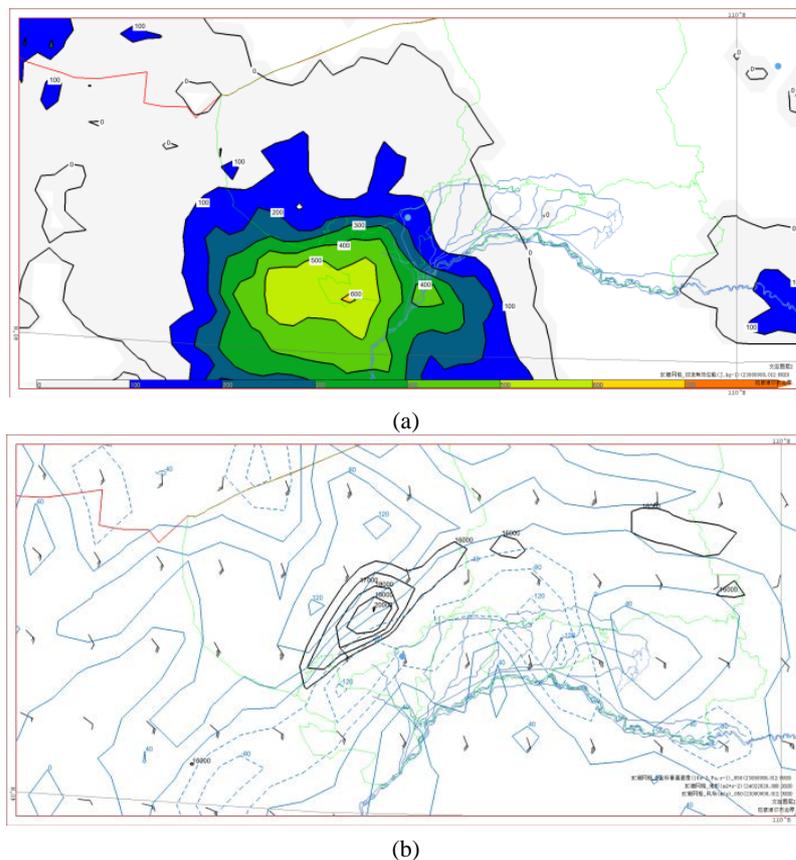
**Figure 4.** Combined reflectance at (a) 21:04, (b) 22:13 and (c) 23:21 on 9 August; (d) Satellite topographic map of Shahai Town and its Northwest Shanhonggou Estuary

**图 4.** (a) 8 月 9 日 21 时 04 分、(b) 22 时 13 分、(c) 23 时 21 分组合反射率；(d) 沙海镇及其西北山洪沟口卫星地形图

## 7. 模式可预报性分析

EC 模式 9 日 08 时预报 9 日 20 时巴市西南部 CAPE 为 100~600 J/kg，最大值位于磴口县西南部(图 5(a))，对下午磴口县西南先触发对流有较强短临监测指示意义；预报西南部有 1~6 毫米对流性降水；预报 850 hPa、700 hPa 受大范围 8 到 10 m/s 东南风控制(图 5(b))，阴山山脉乌拉特后旗段呈西南-东北分布，与对流低层东南风垂直的山脉走向产生了强烈的阻挡作用，致使 EC 预测山脉东南侧垂直上升速度

达 0.8~1.2 Pa/s。分析最高峰呼和巴什格位于此段阴山山脉中点，其对东南风阻挡作用最强，在夜间呼和巴什格与沙海镇间最强山风环流的引导下，致使底层呼和巴什格东南侧沟口西北山风增大。因此最佳抬升层较低时，模式 850 hPa 风场在分析阴山热力环流时有较强参考作用。



**Figure 5.** (a) EC forecast CAPE distribution at 20:00 on August 9; (b) 850 hPa wind field and vertical velocity distribution, EC contour (black)

**图 5.** (a) EC 预报 8 月 9 日 20 时 CAPE 分布; (b) 850 hPa 风场和垂直速度分布、EC 等高线(黑色)

## 8. 结论

2023 年 8 月 9 日夜間巴彥淖爾市杭錦後旗沙海鎮發生強對流大暴雨過程，採用各類資料分析了大暴雨的成因，主要結論如下：

1) 副高快速大幅度北跳後南落使短期內對流層中高层下沉氣流的增溫作用達到、下沉氣流的對流抑制作用減弱，但低層暖濕高能狀態仍然維持；

2) 中高海拔地區無抑制、低海拔地區小量抬升可突破抑制釋放大量儲藏能量的不穩定性空間分布為夜間烏加河河谷地帶的強對流的發生提供了有利的大氣層結背景條件；

3) 前半夜暖中心前部熱力不穩仍然較強，低海拔地區局地動力抬升使抑制消失則局地觸發強對流，西南部地面露點較高、850 hPa 比濕較大，易形成局地強降水。

4) 陰山最高峰與烏加河河谷離最高峰最近處沙海鎮巨大海拔差所產生的熱力差異，為此次夜間局地強對流提供了有利的山風熱力環流條件；對流層中低層的強勁的東南風與山風環流高層的東南風一致，進而加強了山風環流。

5) 山风产生的冷空气抬升各沟口自西南向东北依次展开, 由于沙海镇受多条沟口的冷出流影响, 因此动力抬升时间最长、抬升幅度最大。

6) 最佳抬升层较低时, 模式 850 hPa 风场在分析乌加河河谷水汽能量输送方向时有较强指示作用。

## 参考文献

- [1] 吴冰雪. 海南岛山地环流三维结构的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [2] 周泽旭. 复杂地形下城市山谷风环流研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [3] 姜平, 刘晓冉, 朱浩楠, 等. 复杂地形下局地山谷风环流的理想数值模拟[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1272-1282.
- [4] 任雍, 张雪芬, 吴松华, 等. 基于地基与星载激光雷达技术的武夷山山谷风环流研究分析[J]. 气象, 2023, 49(10): 1203-1214.
- [5] 李嗣源, 郭学良, 唐洁, 等. 青藏高原东南局地山谷风环流在一次地形云和降水形成中的作用[J]. 大气科学, 2023, 47(5): 1576-1592.