

# 乌鲁木齐机场一次雷暴大风天气成因分析

王清平

民航新疆空中交通管理局空管中心气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年8月22日; 录用日期: 2022年9月22日; 发布日期: 2022年9月27日

## 摘要

本文利用常规高空地面探测、新疆区域加密自动站、FY4A卫星TBB、乌鲁木齐机场多普勒天气雷达资料对2022年6月30日夜间发生于乌鲁木齐机场的一次雷暴大风天气进行研究, 着重分析雷暴大风天气的环流形势、 $\beta$ 中尺度MCS特征发展演变的卫星、雷达特征。结果表明: 1) 此次雷暴大风天气是在高空西西伯利亚低涡底部偏西气流分裂的短波槽东移、高层处于西南急流出口区右侧的辐散区、低层切变线共同作用下产生的。地面温度持续升高为强对流的发生提供较好的不稳定能量和不稳定层结。2) 多个 $\gamma$ 尺度对流云团在发展过程中合并加强生成 $\beta$ 中尺度对流云团并逐渐东移影响机场及乌鲁木齐市。对流发展至鼎盛时期MCS的长轴达300 km, 短轴近100 km, 较强的MCS中尺度系统造成沿天山一带出现雷暴大风天气。3) 雷达图中可以明显看到强回波云团在发展过程中, 在其移动方向前方不断激发新的回波云团发展并加强, 多个强回波云团簇合并并且发展加强形成成片的强对流回波, 造成大范围、长时间雷暴大风天气。4) 地面风场辐合线的存在有利于两个对流云团发展加强, 促使地面风进一步加强, 有较强正反馈作用。

## 关键词

雷暴大风, FY4A, TBB, 辐合线

## The Analysis of the Cause of a Thunderstorm and Strong Wind Occurred at Urumqi Airport

Qingping Wang

Meteorological Department of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Using high and ground sounding data and Xinjiang Regional automatic weather station and FY4A satellite TBB and Urumqi airport doppler weather radar data to analyze the circulation pattern and development and evolution characteristics of beta MCS characteristics which accompanied with a thunderstorm and strong wind occurred at Urumqi airport On the night of June 30, 2022. The result shows that: 1) The thunderstorm and gale weather was caused by the combined action of the short wave trough splitting the west air flow at the bottom of the high-altitude West Siberian vortex, the divergence area on the right side of the southwest jet outlet area at the upper level, and the low-level shear line. The continuous rise of ground temperature provides better unstable energy and unstable stratification for the occurrence of strong convection. 2) Multiple  $\gamma$  Mesoscale convective cloud clusters merge and strengthen in the development process  $\beta$  the mesoscale convective cloud cluster gradually moved eastward to affect the airport and Urumqi city. The long axis of MCS reached 300 km and the short axis was nearly 100 km when the current developed to its peak. The strong mesoscale system of MCS caused thunderstorm and gale weather along the Tianshan Mountains. 3) In the radar field, it can be clearly shows that the severe echo cloud cluster is always developing, and new echo cloud clusters are constantly excited to develop and strengthen in front of its moving direction. Multiple echo clouds cluster merge and develop to broad of severe convective echo which resulting in large-scale and long-term thunderstorm and gale weather. 4) The existence of the convergence line of the sur-face wind field is conducive to the development and strengthening of the two convective cloud clusters, and promotes the further strengthening of the surface wind, which has a strong positive feedback effect.

## Keywords

Thunderstorm, FY4A, TBB, Convergence Line

Copyright © 2022 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

强对流天气是夏季易发生的中尺度对流天气，其产生的大风、冰雹、短时强降水、龙卷等灾害天气对农业、交通造成严重影响，因此是夏季关注度较高的天气之一。我国的雷暴等强对流天气主要集中在华南和青藏高原、在春季，华北平原、华东地区也有不少。潘留杰等[1]、闵晶晶等[2]研究了陕西、天津等地的冰雹、强对流天气过程成因，沈杭峰等[3]研究中国东部早春的一次强飚线造成的大风天气指出，在中国东部地区早春时节由于较强的冷暖空气交汇构成较强的水平温度梯度，致使飚线强度加强，有利于极端大风的出现。

新疆地区由于其独特的地形地貌特征，其强对流天气分布也很广泛，新疆的学者对强对流天气的研究也有不少。陈洪武等[4]统计了新疆区域 1961~1999 年的冰雹天气时空分布特征，指出新疆冰雹主要高发区在天山山脉西段的昭苏和巴音布鲁克，北疆降雹主要集中在 5~8 月，降雹一般出现在下午，傍晚是高峰期；60%的冰雹持续在 6 分钟以内。张俊兰等[5]、赵俊荣等[6]研究了阿克苏、石河子等地的夏季对流天气，对新疆区域夏季对流天气预报有很好的参考。杨霞等[7]研究新疆深秋季节的暴雨天气，发现中

尺度气旋的位置与 TBB 分布有较好的对应关系, 其中心与 TBB 低值中心的移动方向一致。魏勇等[8]从环流形势、水汽通道、雷达回波特征等方面对天山北坡中部的冰雹、暴雨天气成因分析。李建刚等[9]研究天山山区夏季 MCS 时空分布特征, 发现 6 月为  $M_{\alpha}CS$  出现的高发期且椭圆形  $M_{\alpha}CS$  占多数。 $M_{\alpha}CS$  发展期主要集中在午后和后半夜, 消亡于前半夜。其生命史主要为 3~6 h。王清平等[10]对新疆巴州地区一次罕见的短时暴雨 MCS 特征进行研究, 发现暴雨主要发生再 TBB 等值线密集区,  $TBB \leq -52^{\circ}C$  区域的形成、发展、消失与暴雨的发生、发展、结束时段对应较好。刘晶等[11]研究乌鲁木齐短时强降水和冰雹的中小尺度特征, 指出短时强降水和冰雹均发生在中尺度对流云团 TBB 梯度最大处。

乌鲁木齐处于天山山脉北坡中部, 夏季经常受到由天山山区移出的强对流云团影响, 造成冰雹、暴雨、大风等灾害性天气。乌鲁木齐机场作为民航交通运输部门, 强对流天气对飞行的影响巨大, 因此研究强对流天气的发展、发展演变, 提高短时临近预报对于民航航班运行正常有非常重要的意义。

本文试图利用常规高空地面探测、新疆区域加密自动站、FY4A 卫星 TBB、乌鲁木齐机场多普勒天气雷达对 2022 年 6 月 30 日发生于乌鲁木齐机场的一次雷暴大风天气的  $\beta$  中尺度 MCS 特征发展演变特征进行分析研究, 以期提高强探测资料在强对流天气预报业务中的应用。

## 2. 资料与方法

本文用到的研究资料主要有常规高空、地面观测资料、新疆区域地面加密自动气象站数据和 FY-4A 新一代静止气象卫星和乌鲁木齐机场雷达资料。

常规高空、地面资料是预报业务中重要的资料, 高空资料每日 08 时、20 时两次观测, 地面资料每小时间隔, 加密自动站数据时间分辨率为 1 小时间隔, 使用 Python 进行数据绘图。

FY-4A 静止气象卫星上的 TBB (云顶黑体亮温) 产品时间分辨率为 1 小时间隔, 空间分辨率 4 km。数据可从国家卫星气象中心网站(<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>)获取, 采用 Python 软件进行绘图。

乌鲁木齐机场雷达资料主要使用组合反射率数据, 6 分钟间隔, 数据探测半径 150 km。

## 3. 天气概述及环流形势

### 3.1. 天气概况

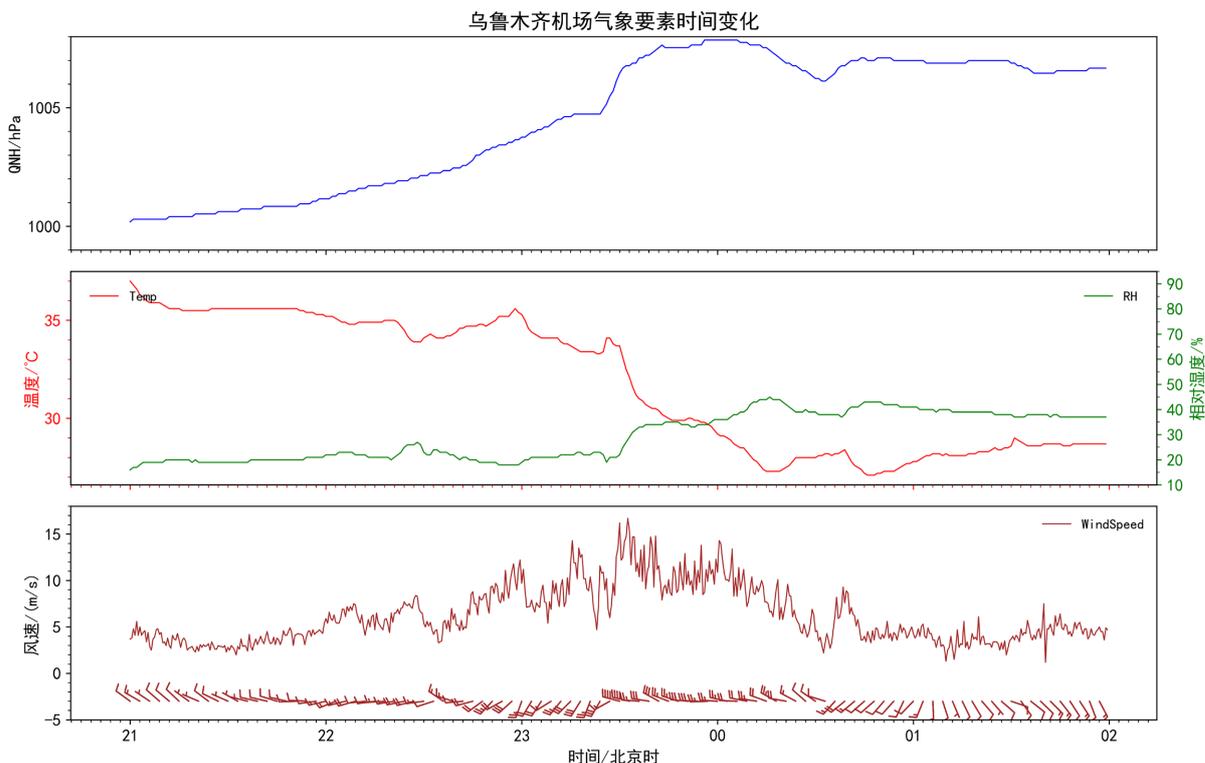
2022 年 6 月 30 日, 受高空低涡底部分裂的短波槽东移影响, 北疆沿天山一带的石河子、昌吉、乌鲁木齐地区出现了大范围的雷暴、大风天气, 最大风力达 8 级(17.2 m/s)。乌鲁木齐机场 6 月 30 日 21:00 开始风向维持偏西风(图 1), 风速维持  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 气压逐渐缓慢上升。21:51 (北京时, 下同)机场出现雷暴, 风速逐渐加大至  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右, 22:40 开始, 风向由西北偏西转西南风, 风速最大增至  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 23:00 开始气温逐渐下降, 23:24 开始气压陡升, 气温陡降, 此时风向再次转为西北风, 风速最大达到  $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 23:30 机场实况出现西北大风和短时扬沙天气, 能见度 2000 m, 自动观测站记录最大瞬时风速达  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大平均风速  $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 7 月 1 日 00:30 后转为积雨云伴随小阵雨, 降水很短暂, 过程降水量为 0.0 mm。

受此次雷暴大风及扬沙天气影响, 造成 35 架次航班延误, 2 架次航班备降, 对飞行造成较大影响。

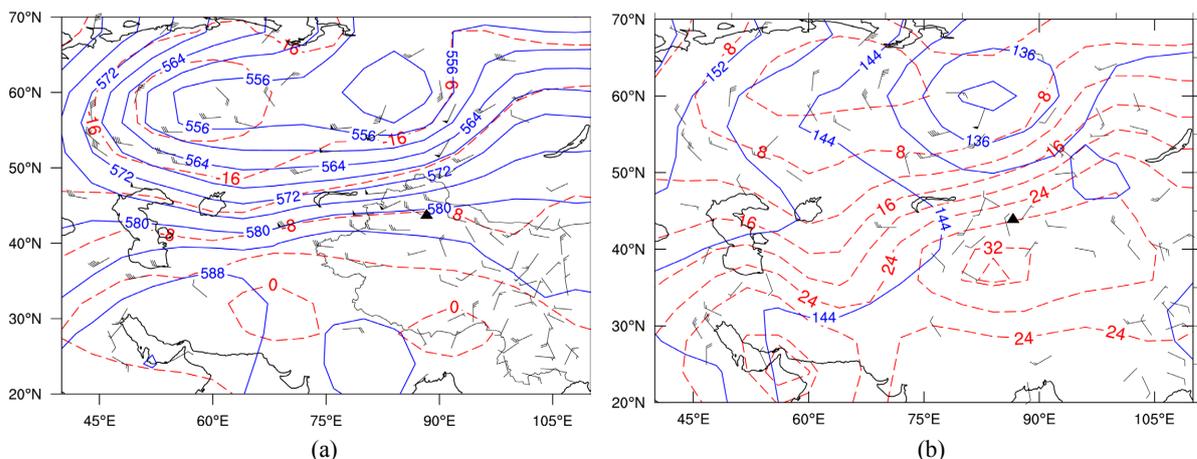
### 3.2. 环流形势

500 hPa 等压面图中, 雷暴发生前的 6 月 28~29 日, 欧亚地区中纬度为“两槽一脊”经向环流, 西西伯利亚、中国中东部地区为槽区, 西北地区为脊区控制, 新疆区域处于西西伯利亚低涡槽底偏西气流控制。30 日 08 时, 西西伯利亚低涡槽底部分裂的短波位于巴尔喀什湖附近, 北疆地区上空为  $10\sim 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

的偏西风，中亚地区咸海 - 巴尔喀什湖附近为  $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  及以上的偏西急流。30 日 20 时(图 2(a))急流带东移进入北疆西部，风速为  $22\sim 28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，北疆沿天山一带处于急流出口右侧辐散区域。



**Figure 1.** The evolution of pressure (blue line) and temperature (red line) and relativity (green line) and wind field  
**图 1.** 乌鲁木齐机场气压(蓝线)、气温(红线)、湿度(绿线)和风场时间演变图



**Figure 2.** Circulation pattern of 500 hPa (a) and wind field of 850 hPa, (b) at Jun 30th, 2022. Blue line represents geopotential height, unit: dagpm; red dotted line represents temperature field, unit:  $^{\circ}\text{C}$   
**图 2.** 2022 年 6 月 30 日 20 时 500 hPa 环流形势和 850 hPa 风场。(a) 500 hPa; (b) 850 hPa。蓝色实线为等高线，单位：dagpm；红色虚线为温度线，单位： $^{\circ}\text{C}$

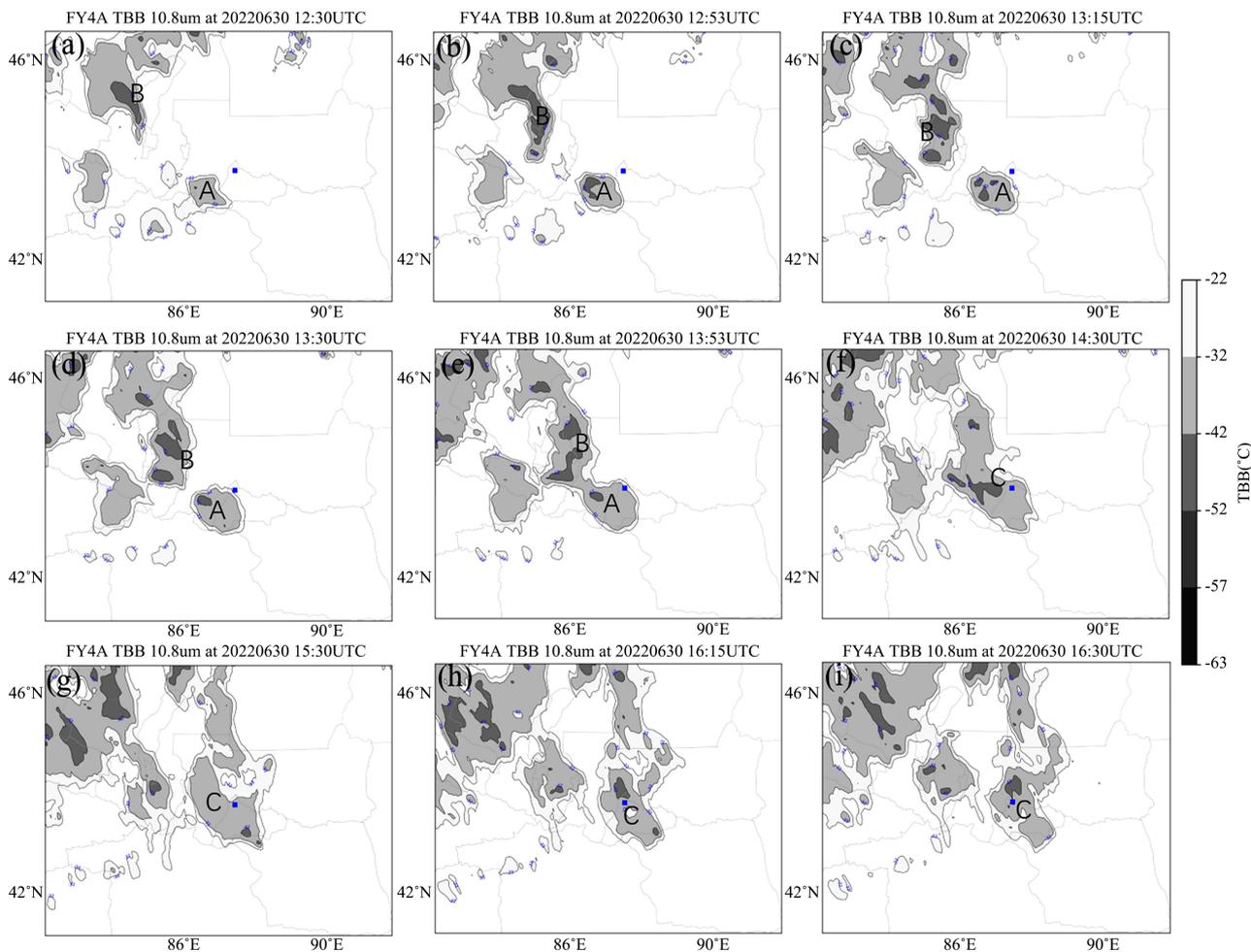
700 hPa (图略)，6 月 28~29 日形势与 500 hPa 较一致。30 日 08 时，北疆上空风速较弱，为  $4\sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  西南风及弱西北风，乌鲁木齐上空为  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  西北风，中亚塔什干站上空为  $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其与新疆西部的伊

宁站上空形成较强风速辐合, 30 日 20 时伊宁站风速由  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  加强至  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 乌鲁木齐站上空由  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  西北风加强至  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  东南风, 沿天山一带形成风向切变, 有利于辐合上升运动。

850 hPa, 巴尔喀什湖附近短波槽前偏东风较明显, 伊宁站上空偏东风  $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 北疆上空为暖脊控制, 盆地上空克拉玛依 - 乌鲁木齐上空为  $23^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$ , 且乌鲁木齐上空  $T_{850-500}$  达到  $33^{\circ}\text{C}$ , 说明沿天山一带上空层结很不稳定。30 日 20 时(图 2(b)), 盆地上空温度进一步升温, 北疆盆地至巴尔喀什湖一带等温线密集, 温度梯度加大, 沿天山一带温度为  $27^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ , 乌鲁木齐站上空  $T_{850-500}$  进一步上升至  $39^{\circ}\text{C}$ , 不稳定层结进一步加强。地面图中(图略)北疆盆地为热低压, 北疆沿天山一带及准噶尔盆地持续升温, 最高温度达  $35^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ , 为雷暴大风提供较好的热力条件。

#### 4. MCS 系统结构特征演变

FY-4A 新一代静止气象卫星提供了较多的云定量产品, TBB 能很好的反映出云顶亮度温度变化, 可以用于分析对流发展旺盛程度的演变, 本文使用云顶黑体亮温 TBB 产品分析中尺度对流系统结构特征及其演变。



**Figure 3.** The evolution of FY-4A satellite TBB. (a) 20:30; (b) 20:53; (c) 21:15; (d) 21:30; (e) 21:53; (f) 22:30; (g) 23:30; (h) 00:15; (i) 00:30. Blue solid square represents Urumqi Airport

**图 3.** FY-4A 卫星云顶亮温 TBB 时间演变图。图中蓝色色实心方块为乌鲁木齐机场。(a) 20:30; (b) 20:53; (c) 21:15; (d) 21:30; (e) 21:53; (f) 22:30; (g) 23:30; (h) 00:15; (i) 00:30

20:30 (图 3(a))在乌鲁木齐机场西南部的昌吉州境内有对流云团 A, 其中心 TBB 值为 $-42^{\circ}\text{C}$ , 而在机场西北方向约 300 km 处的克拉玛依附近有一“西北-东南”向的对流云带 B, 其中心  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  的范围明显较对流云团 A 大, 在高空偏西风 and 偏西南风的引导下, A 和 B 云团不东移、发展。20:53 (图 3(b)), 对流云团 A 不断加强, 中心  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  的区域快速加大, 对流云团 B 的形状出现呈“弓”型, 且其南端不断和主体合并加强, 中心  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  区域不断加大。21:15 (图 3(c)), 对流云团 A 呈“椭圆”状, 中心出现三个  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  中心, 对流云团 A 在东移过程中发展加强, 出现 4 个  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  中心, 其前部进入石河子西部, 南北长度达 200 km, 东西近 100 km。21:30 (图 3(d)), 对流云团 A 维持椭圆状, 3 个中心  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  区域合并略有减小, 而对流云团 B 在东移过程中不断发展加强, 前沿已到达石河子。在偏西和西南风的作用下, 21:53 (图 3(e)), 对流云团 A 和 B 连为一体, 形成“西北-东南”向对流云带, 长轴长度近 300 km, 中心  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  区域加强, 影响乌鲁木齐机场的对流云团中心主要位于昌吉州和石河子附近, 此时机场出现雷暴。22:30 (图 3(f)), 石河子和昌吉州多个  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  中心合并加强, 此时乌鲁木齐机场正处于  $\text{TBB}$  梯度大值区边缘, 地面实况显示机场出现弱雷雨。23:30 (图 3(g)), 对流云团范围结构开始分裂, 昌吉-乌鲁木齐地区的对流云团结构组织好依然完整, 机场西侧  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  区域小时, 但是在低空辐合线作用下再次发展, 7 月 1 日 00:15, 机场北侧  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$  区域发展至最强, 此时机场仍维持弱雷雨, 00:30 (图 3(i))以后, 对流云团逐渐东移, 乌鲁木齐机场转为小阵雨天气, 云顶亮温也逐渐升高至 $-32^{\circ}\text{C}$  以上。

综上所述, 多个对流云团在发展过程中合并加强,  $\text{TBB}$  快速降低, 旺盛阶段  $\text{TBB} \leq -42^{\circ}\text{C}$ , 至成熟阶段多个对流云团合并且中心  $\text{TBB}$  逐渐上升至 $-32^{\circ}\text{C}$ , 云顶较均匀。

## 5. 雷达特征分析

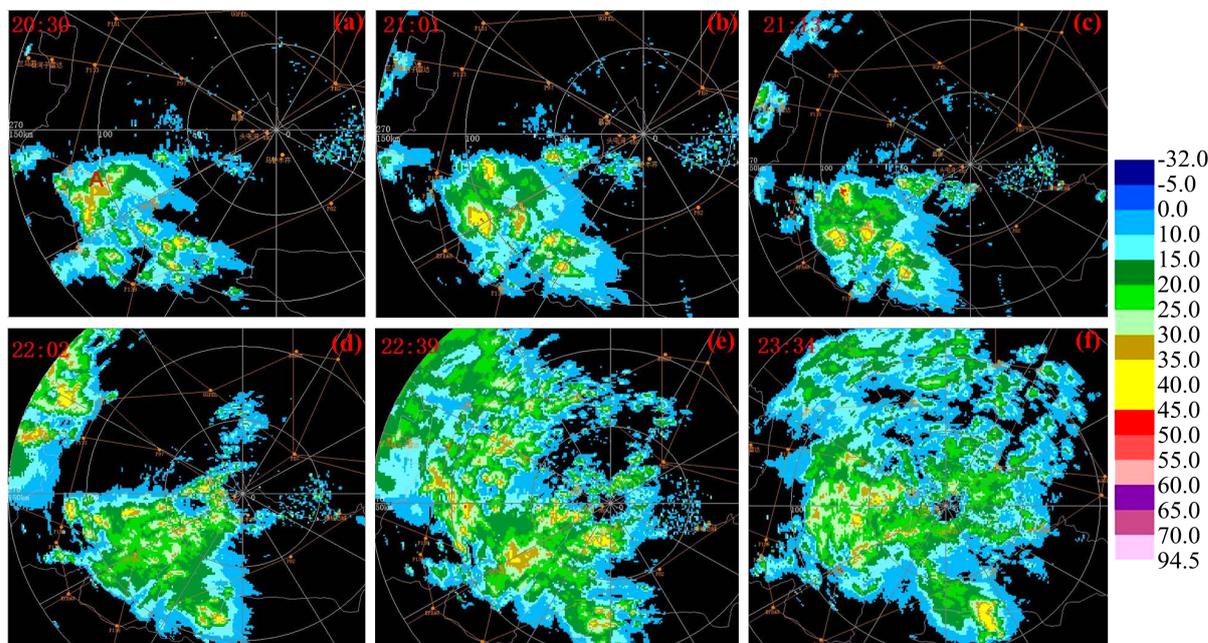


Figure 4. The evolution of radar graph at 30th, Jul, 2022. (a) 20:30; (b) 21:01; (c) 21:13; (d) 22:02; (e) 22:39; (f) 23:34

图 4. 2022 年 6 月 30 日雷达图像演变分析。(a) 20:30; (b) 21:01; (c) 21:13; (d) 22:02; (e) 22:39; (f) 23:34

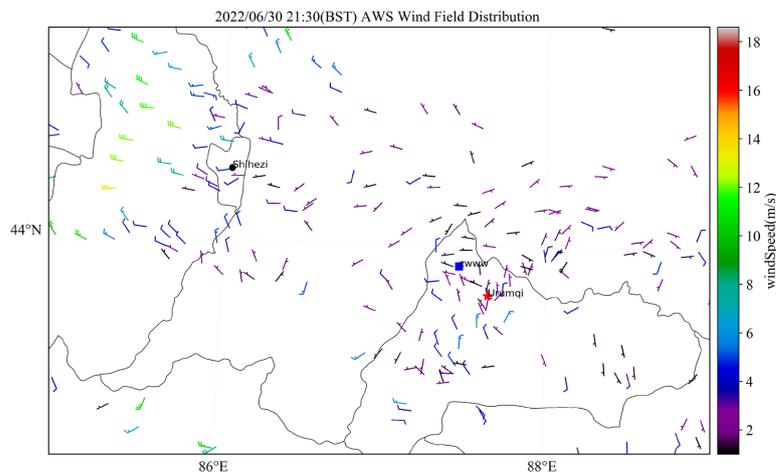
30 日 20:30 (图 4(a))在乌鲁木齐机场偏西-西南侧 80~120 km 有分散的多个回波云团 A, 中心回波分别为 40~45 dBZ, 在机场西南方向  $240^{\circ}\sim 270^{\circ}$  方位 50~60 km 处有 30~35 dBZ 的对流单体, 此后 A 回波向

东北移动, 在移动过程中, 触发其移动方向前部的对流单体, 使得对流单体快速发展。21:01 (图 4(b))在机场西南方向 50 km 处对流单体强度发展至 35~40 dBZ。而回波云团 A 逐渐分裂多个中心, 中心最大强度达 45~50 dBZ。21:13 (图 4(c)), 对流回波云团 A 的西侧出现零散单体, 回波 20~25 dBZ, 此后, 这些零散单体不断东移发展并与回波云团 A 合并加强, 回波强度发展至 40~50 dBZ。22:02 (图 4(d)), 回波云团 A 前侧激发的对流回波已影响机场, 机场出现干雷暴, 但地面风速较弱, 5~8 m·s<sup>-1</sup>。而位于石河子附近的强回波云团范围较大, 中心强度 35~40 dBZ。22:14 (图略), 石河子附近回波前侧及上节中对流云团 A 西侧不断有新生的对流单体, 且不断合并加强。22:39 (图 4(e)), 合并加强的回波强度达 45~50 dBZ。23:34 (图 4(f)), 机场西侧主要以混合性层状云为主, 对流回波维持短暂后减弱消失。雷雨天气转为小阵雨, 很快便结束。

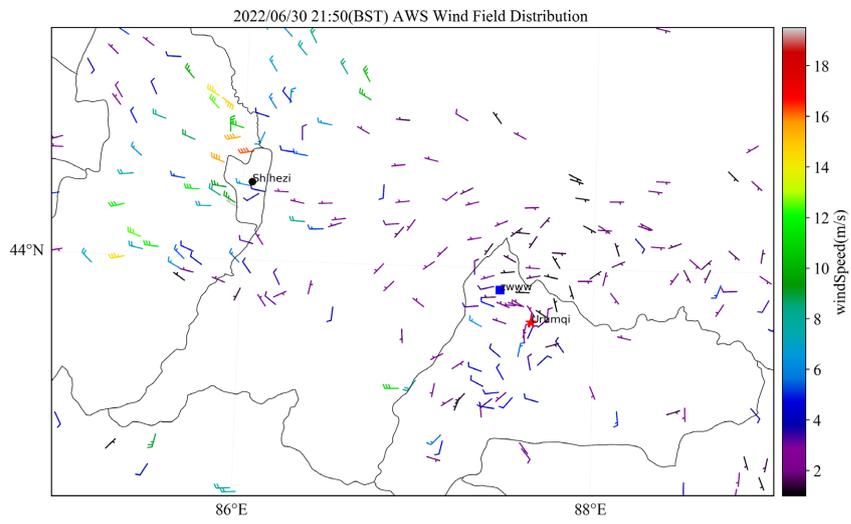
## 6. 中小尺度特征

### 地面加密风场

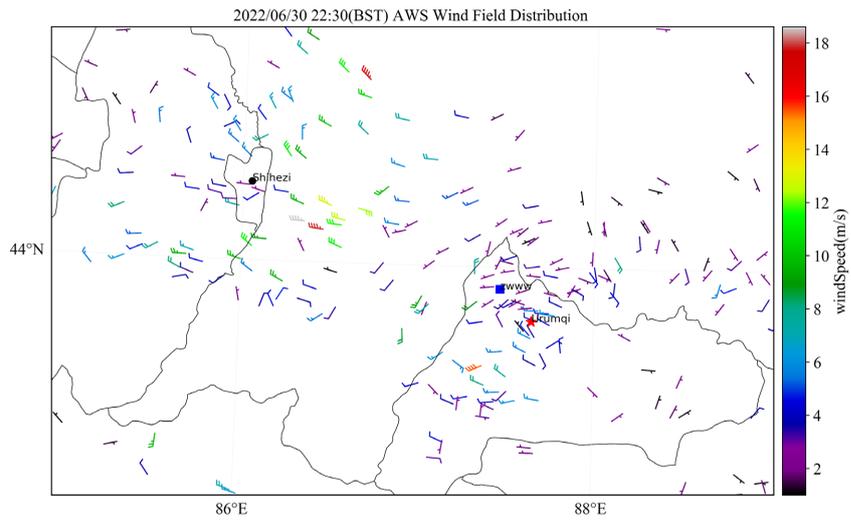
28 日 21:30 (图 5(a)), 乌鲁木齐附近风场较弱, 风速为 1~4 m·s<sup>-1</sup> 的偏西风为主, 石河子至奎屯一线有较强的偏西风最大风速达 14 m·s<sup>-1</sup>, 对应时次的卫星云图中可以明显看到强对流云团, 云顶亮温 TBB ≤ -42℃, 随着强对流云团的发展加强, 其前部的下沉气流造成的地面大风风速逐渐加大。21:50 (图 5(b)), 石河子附近风速逐渐加大, 由 2~4 m·s<sup>-1</sup> 加强至 6~8 m·s<sup>-1</sup>, 而大风速核位于石河子西北侧、西南侧风速, 风速为 16~20 m·s<sup>-1</sup>, 乌鲁木齐机场西南方向出现偏西及西南风, 风速为 6~12 m·s<sup>-1</sup>, 这是上节中的强回波云团 A 前沿的风速区。22:30 (图 5(c)), 石河子附近的大风速区进一步东移至呼图壁县附近, 最大风速达 18 m·s<sup>-1</sup>, 与乌鲁木齐西南方向的强回波云团前部的地面风形成风向风速辐合, 此时乌鲁木齐西南方向的强对流云团最大风速 16 m·s<sup>-1</sup>, 乌鲁木齐机场地面风由 3~4 m·s<sup>-1</sup> 的西北风转为 230°~260° 的西南风, 风速加大至 7 m·s<sup>-1</sup>。23:00 (图 5(d)), 乌鲁木齐西南方向的对流云团前侧西南及偏西风已经影响乌鲁木齐市及乌鲁木齐县区域, 风速为 8~12 m·s<sup>-1</sup>, 最大风速仍可达 16 m·s<sup>-1</sup>, 此时乌鲁木齐受该对流云团影响, 地面风向仍为西南风 230°, 风速增大至 9 m·s<sup>-1</sup>, 而位于昌吉、呼图壁境内的偏西风继续东移, 地面辐合线已经位于昌吉市境内。23:30 (图 5(e)), 辐合线已影响乌鲁木齐机场及其北侧乌鲁木齐米东区, 此时机场 10 分钟最大风速达 20 m·s<sup>-1</sup>, 该时段对夜间乌鲁木齐进港高峰期的航班影响较大。1 日 00:00 (图 5(f)), 地面大风前沿已经影响乌鲁木齐市, 乌鲁木齐机场最大风速减小至 15 m·s<sup>-1</sup>。16:30 以后, 随着强对流云团的东移, 地面大风速区也随之东移, 机场风速减小至 6 m·s<sup>-1</sup> 以下。



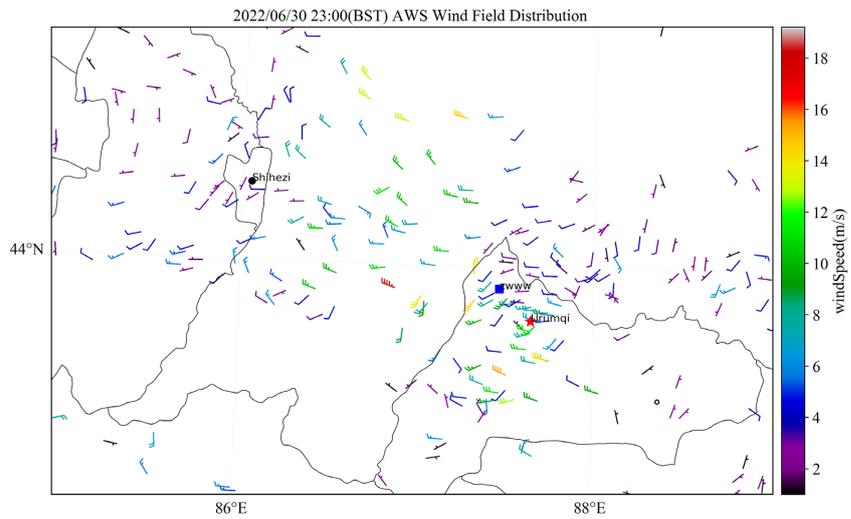
(a) 21:30



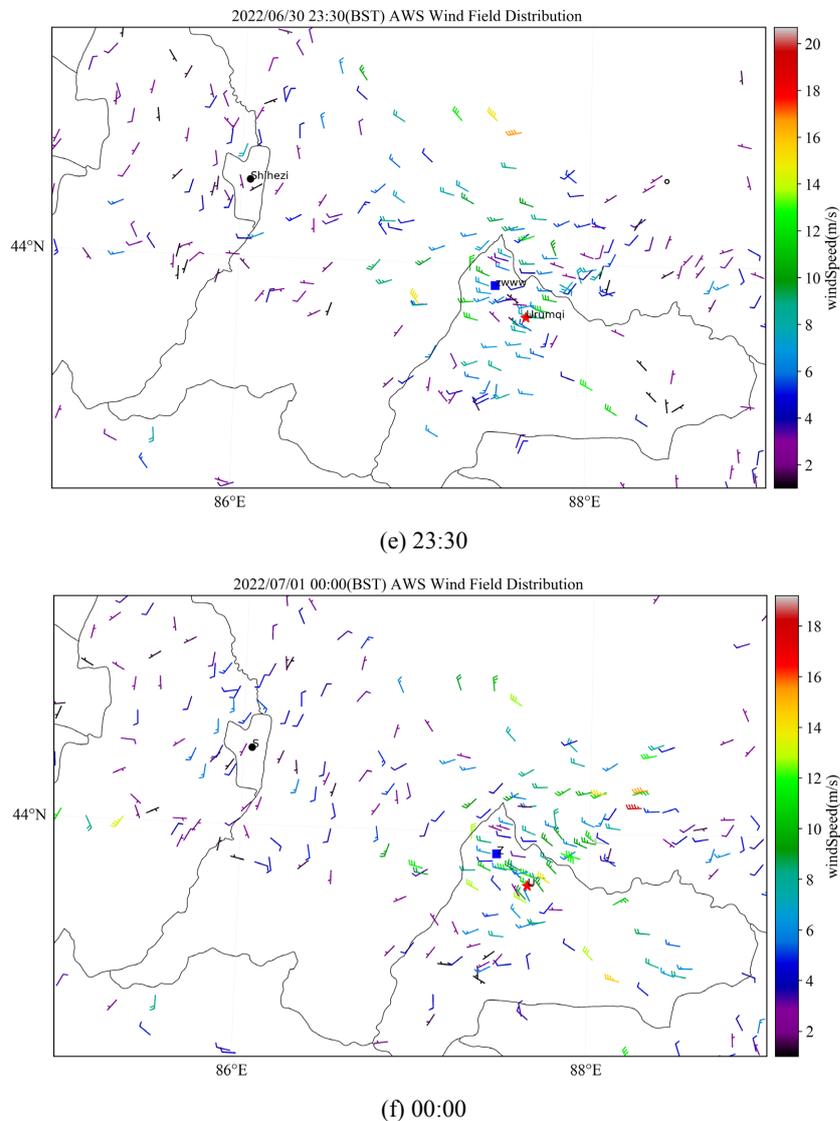
(b) 21:50



(c) 22:30



(d) 23:00



**Figure 5.** The evolution of ground densified automatic station wind field at terrain area  
**图 5.** 暴雨区地面加密自动站风场演变图

综上所述，乌鲁木齐西南方向强对流云团前部的西南风与偏西方向对流云团前部的偏西风形成的中尺度辐合线，有利于对流云团的发生、发展，对流云团经过辐合线处，快速发展加强。说明地面辐合线时对流云团和发展的触发因子，这于袁美英等[12]研究一致。

## 7. 结论

通过对 2022 年 6 月 30 日夜间乌鲁木齐机场的雷暴大风天气进行分析，发现：

- 1) 此次雷暴大风、扬沙天气是在高空低涡槽底部分裂的短波槽东移、高空处于急流出口右侧辐散区，低层切变线的共同作用下产生的。850 hPa 与 500 hPa 较强的温差反映出对流天气发生前层结非常不稳定。
- 2) 多个  $\gamma$  尺度对流云团在发展过程中合并加强生成  $\beta$  中尺度对流云团并逐渐东移影响机场及乌鲁木齐市。对流发展至鼎盛时期 MCS 的长轴达 300 km，短轴近 100 km，较强的 MCS 中尺度系统造成沿天山一带出现雷暴大风天气。

3) 雷达图中可以明显看到强回波云团在发展过程中, 在其移动方向前方不断激发新的回波云团发展并加强, 多个强回波云团簇合并且发展加强形成成片的强对流回波, 造成大范围、长时间雷暴大风天气。

4) 地面风场辐合线的存在有利于两个对流云团发展加强, 促使地面风进一步加强, 有较强正反馈作用。

## 参考文献

- [1] 潘留杰, 张宏芳, 王楠, 等. 陕西一次强对流天气过程的中尺度及雷达观测分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 278-289.
- [2] 闵晶晶, 刘还珠, 曹晓钟, 等. 天津“6.25”大冰雹过程的中尺度特征及成因[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5): 525-536.
- [3] 沈杭锋, 张红蕾, 高天赤, 等. 浙江盛夏一次强对流天气的特征及其成因分析[J]. 气象, 2016, 42(9): 1105-1113.
- [4] 陈洪武, 马禹, 王旭, 等. 新疆冰雹天气的气候特征分析[J]. 气象, 2003, 29(11): 25-28.
- [5] 张俊兰. 南疆柯坪强雷暴天气的分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 880-888.
- [6] 赵俊荣. 天山北坡中部一次罕见局地强降水中小尺度系统分析[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(6): 19-24.
- [7] 杨霞, 李云, 赵逸舟, 等. 新疆一次深秋局地短时大暴雨的成因分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 162-170.
- [8] 魏勇, 彭军, 热苏力·阿不拉, 等. 新疆天山北坡中部一次冰雹天气成因分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 771-777+802.
- [9] 李建刚, 姜彩莲, 张云惠, 等. 天山山区夏季 MaCS 时空分布特征[J]. 高原气象, 2019, 38(3): 604-616.
- [10] 王清平, 彭军, 茹仙古丽·克里木. 新疆“巴州”罕见短时暴雨的 MCS 特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 685-692.
- [11] 刘晶, 于碧馨, 赵克明, 等. 乌鲁木齐“4. 24”短时降水和冰雹中小尺度特征对比分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(4): 347-355.
- [12] 袁美英, 李泽椿, 张小玲, 等. 东北地区一次短时大暴雨  $\beta$  中尺度对流系统分析[J]. 气象学报, 2010, 68(1): 125-136.