

乌鲁木齐机场一次强对流天气的环境条件及雷达回波特征分析

杜安妮

民航新疆空中交通管理局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年8月23日; 录用日期: 2022年9月22日; 发布日期: 2022年9月30日

摘要

本文利用FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐6小时再分析资料、加密自动站、雷达资料等,对2022年6月28日乌鲁木齐机场雷雨大风天气过程的发生发展的环境条件及雷达回波特征进行分析,结果表明:1)此次强对流天气过程发生在较强西风气流中短波影响背景下,中低层风速辐合区、辐合切变区、低空急流等为强对流提供了较好的大尺度强迫抬升条件。2)强对流发生前,北疆区域处于明显的热力不稳定环境中,强对流发生区域对流能量的释放与500 hPa和850 hPa假相当位温差及对流有效位能的变化有较好的对应关系。乌鲁木齐机场的探空曲线结构呈现上下干、中层湿的结构,与机场出现弱降水和雷暴大风相对应。3)影响乌鲁木齐机场的强对流云团是由多个中 γ 尺度对流单体合并加强并迅速东南移动引起,雷达回波图像清晰地再现了整个发展过程。该中尺度雷暴系统是在较强的露点梯度区和地面中尺度辐合线上触发的,对流触发后强烈的上升运动和水汽的迅速汇聚使得中尺度雷暴系统得以长时间发展和维持。

关键词

强对流, 热力不稳定, 中 γ 对流单体, 中尺度辐合线

Analysis of Environmental Conditions and Radar Echo Characteristics of a Severe Convective Weather at Urumqi Airport

Annie Du

Xinjiang Air Traffic Management Bureau of CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Aug. 23rd, 2022; accepted: Sep. 22nd, 2022; published: Sep. 30th, 2022

Abstract

Based on the 6-hour reanalysis data of FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, encrypted automatic station and radar da-

ta, this paper analyzes the environmental conditions and radar echo characteristics of the occurrence and development of the thunderstorm and gale weather process at Urumqi airport on June 28, 2022. The results show that: 1) This strong convective weather process occurred under the background of strong westerly flow and short wave influence, and the convergence area, convergence shear area and the low-level jet provides better large-scale forced lifting conditions for strong convection. 2) Before the occurrence of strong convection, the northern Xinjiang region was in an obvious thermal unstable environment. The release of convective energy in the region where strong convection occurred had a good relationship with the change of 500 hPa and 850 hPa pseudo equivalent potential temperature difference and convective effective potential energy. The sounding curve structure of Urumqi airport presents the structure of upper and lower dry and middle wet, which corresponds to the weak precipitation and thunderstorm gale at the airport. 3) The strong convective cloud cluster affecting Urumqi airport is caused by the merger and strengthening of multiple meso- γ -scale convective cells and the rapid southeast movement. The radar echo image clearly reproduces the entire development process. The mesoscale thunderstorm system is triggered in the strong dew point gradient area and the ground mesoscale convergence line. After the convection is triggered, the strong upward movement and the rapid convergence of water vapor make the mesoscale thunderstorm system develop and maintain for a long time.

Keywords

Strong Convection, Thermal Instability, Medium γ Convective Cell, Mesoscale 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

强对流天气是指由于大气垂直对流的强烈发展而产生的雷雨、冰雹、雷暴大风、龙卷等短时剧烈的恶劣天气，一般都伴有雷电发生[1] [2] [3] [4]，其破坏性大，是需要重点防范的灾害性天气之一。强对流天气空间尺度小，生命史短暂并带有明显的突发性，对人民的生命财产安全和国民经济造成巨大的危害[5] [6] [7]。

除了公众安全外，强对流天气对民航安全运行的影响极大，常常造成航班大面积延误，强对流天气下突发性的强烈垂直风切变还可能造成航空器失事，因此国内外专家学者对机场范围内强对流天气及其对飞行安全的影响做了大量的研究。如张利平[8]等从与天气发生的不正常事件中分析了该类天气的预报和服务能力，认为较难把握该类天气在机场出现的时间，但结束时间预报一般预报较为准确；杜安妮[9]等研究了乌鲁木齐机场雷雨大风对飞行的影响；陈阳权[10]等利用中尺度模式研究机场及终端区的强对流天气，希望能够为强对流天气的预报提供一定的参考。

在 2022 年 6 月 8 日，新疆北疆沿天山一带出现了一次大范围的强对流天气，乌鲁木齐机场相继出现了小雨、雷暴大风、沙尘暴等恶劣天气，对飞行安全和航空运行造成了严重影响。本文利用 FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料、加密自动站和机场实况、多普勒雷达资料等，通过对其发生发展的环境条件、雷达回波演变及对流触发物理机制等进行分析，为将来此类强对流天气的分析和预报累积经验。

2. 资料与方法

文章所使用的资料包括 2022 年 6 月 28 (以下时间均为世界时 UTC)的 FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料、

加密自动站、机场雷达数据及乌鲁木齐机场 METAR 报文等资料,对强对流发生发展的环流条件、环境条件、对流合并加强的原因及触发条件等进行分析 and 诊断。

3. 天气过程概述

受高空短波槽影响,2022年6月28日北疆西部、北疆沿天山一带出现大范围的雷雨、大风等天气过程。伊宁、克拉玛依、石河子、乌鲁木齐等机场先后出现雷阵雨、短时大风天气。从28日下午10:00前后开始,在乌鲁木齐机场西部出现范围较小的对流单体,随着对流云持续发展,多个对流单体合并加强并持续东移,影响了乌鲁木齐机场西部、西北部、乌鲁木齐机场本场及其偏东地区。从乌鲁木齐机场的实况上看,机场在28日12:40~14:00出现雷阵雨,偏西风平均风12~16 m/s,阵风达18 m/s,短时伴有700~900 m沙尘暴,降水量1.1 mm。

此次雷雨大风天气对乌鲁木齐机场飞行造成了较大影响,受机场周边及机场对流的共同影响,造成乌鲁木齐机场20架出港航班延误,7架降落航班备降,1架航班返航。

4. 对流发展环境条件分析

4.1. 环流形势分析

强对流天气的发生发展需要一定的大尺度环流背景[10]。图1为FNL资料的500 hPa、700 hPa、850 hPa的环流形势分析,图中要素为风场、位势高度场、温度场、湿度场等组成。

图1(a)为28日06时500 hPa的形势,中高纬地区盛行较强的西风气流,大风速区达到20 m/s以上。在新疆北部地区的西部国境线一带风速最大达到24 m/s,且有明显的风速辐合区;至12时(图1(b)),新疆北部地区有明显的短波槽活动,且风速辐合区较06时明显东移且辐合强度增强。可见西风气流上较强的风速辐合和新疆北部的短波槽为此次北疆西部、北疆沿天山一带及乌鲁木齐机场的强对流天气提供了大尺度环流背景。在06时(图1(c))的700 hPa上,环流形势与500 hPa形势较为一致,在新疆北部地区存在12 m/s以上的偏西急流,偏西急流对中纬度水汽的输送有一定的作用,但从整层的相对湿度来看,饱和湿区均较小,至12时(图1(d)),乌鲁木齐至石河子之间有明显的短波槽活动,在克拉玛依至石河子一带存在70%以上的湿区。850 hPa上,06时(图1(e))克拉玛依附近存在明显的辐合切变,其后部有12 m/s的偏西急流,温度梯度较大,存在较强的冷平流,至12时(图1(f)),辐合切变区东移至乌鲁木齐机场以西地区,且辐合切变区后部西北风增大至16~20 m/s,低层的辐合切以及较强的冷平流与系统前部暖区交汇,为强对流的发生发展提供了较好的大尺度抬升条件。

可见,整层的大尺度环流背景为区域性对流发生提供了较好环境背景,乌鲁木齐机场及其附近的雷雨大风天气就发生在此背景之下。

4.2. 热力、水汽条件

图2为FNL再分析资料计算的温湿对数压力图,由图可见乌鲁木齐机场上空存在一定的对流有效位能,大小在255 J/kg以上,K指数在32℃以上,这些指数表明机场上空有一定的热力不稳定性。从温度和露点曲线随高度的变化上看,700 hPa以下水汽饱和程度较低,从06时至12时,700~300 hPa的水汽饱和程度明显增加,300 hPa水汽饱和程度较低,这种上下干、中层湿的探空结构有利于地面产生对流性大风[11],但降水强度不大。

假相当位温综合反映了大气的温湿状况,通常假相当位温是随高度而增大。若其随高度减小,表明大气处于不稳定状态[9]。图3为28日区域假相当位温、500 hPa与850 hPa假相当位温差以及乌鲁木齐机场假相当位温和湿度曲线。从图2(a)可见,在28日06时,假相当位温梯度区位于西部国境线附近,

北疆西部、北疆沿天山一带为假相当位温高值区，为高能舌区，强对流天气易发生在高能区，而至 12 时 (图 2(b))，石河子至乌鲁木齐为高能舌的梯度区，非常利于对流天气的发生。通常 500 hPa 和 850 hPa 的假相当位温差值可以用来表征大气的不稳定度，负值越大，表明大气越不稳定，在图 3(a)、图 3(b)中填色部分为 500 hPa 和 850 hPa 假相当位温的差值，在 06 时新疆北部大部分地区都处于明显的负值区中，表明整层大气处于不稳定状态，至 20 时，从克拉玛依至石河子一带的差值明显增大达到零 K 以上，表明克拉玛依至石河子一线能量有明显的释放，气层处于稳定状态，与克拉玛依和石河子机场出现雷雨雨有较好的对应关系，乌鲁木齐机场处于能量即将释放的边缘。图 3(c)乌鲁木齐机场的假相当位温变化曲线可见，在 28 日 12 时前，假相当位温随高度明显增大，尤其在 06 时前增大更加明显，表明在机场上空存在明显的热力不稳定，12 时以后减小表明不稳定能量得到了释放。从湿度随高度的变化可见，饱和湿度主要在 700 hPa 以上，低层饱和湿度较小，不利于产生强降水。

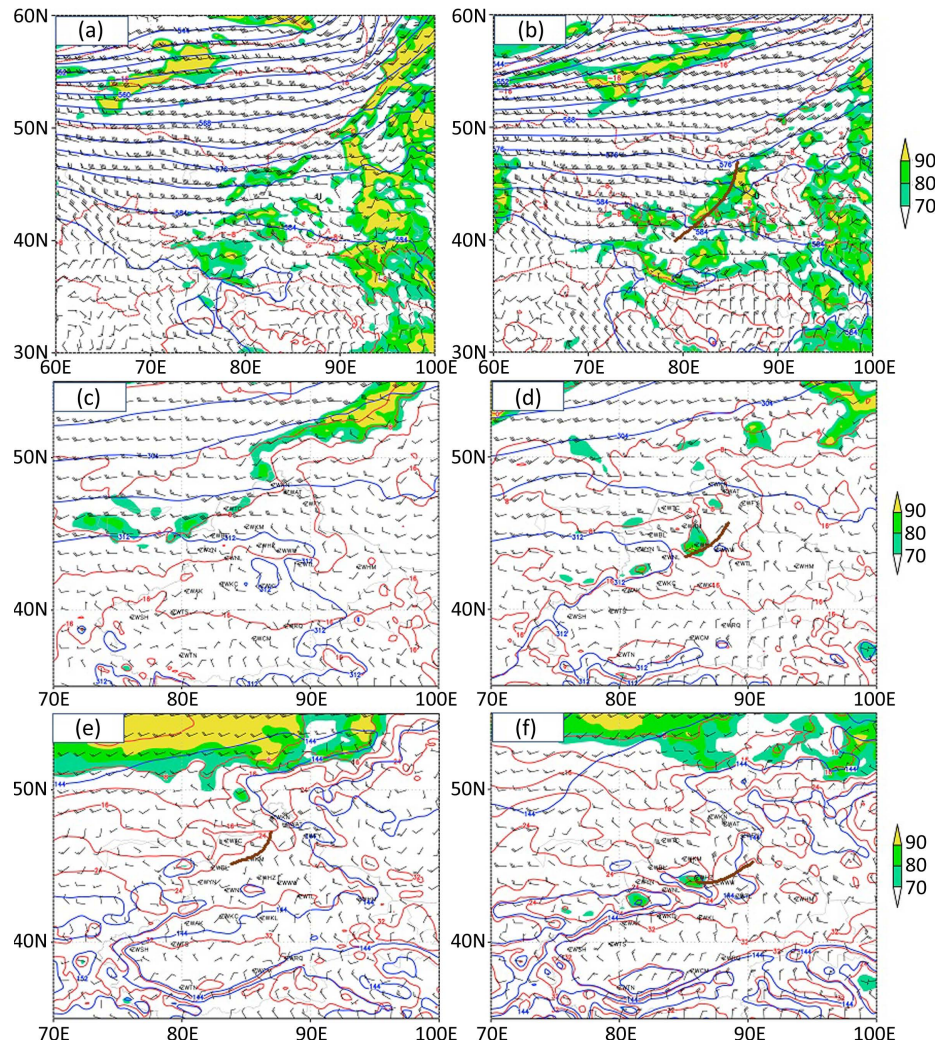


Figure 1. Wind field (wind rod, unit m/s), temperature (red isoline, unit $^{\circ}\text{C}$), potential height (blue isoline, unit hPa), relative humidity (color in, unit %) on June 28, 2022; (a) and (b) are 06:00 and 12:00 of 500 hPa; (c) and (d) are 06:00 and 12:00 of 700 hPa; (e) and (f) are 06:00 and 12:00 of 850 hPa

图 1. 2022 年 6 月 28 日的风场(风杆, 单位 m/s)、温度(红色等值线, 单位 $^{\circ}\text{C}$)、位势高度(蓝色等值线, 单位 hPa)、相对湿度(填色, 单位 %); (a)、(b)为 500 hPa 的 06 时和 12 时; (c)、(d)为 700 hPa 的 06 时和 12 时; (e)、(f)为 850 hPa 的 06 时和 12 时

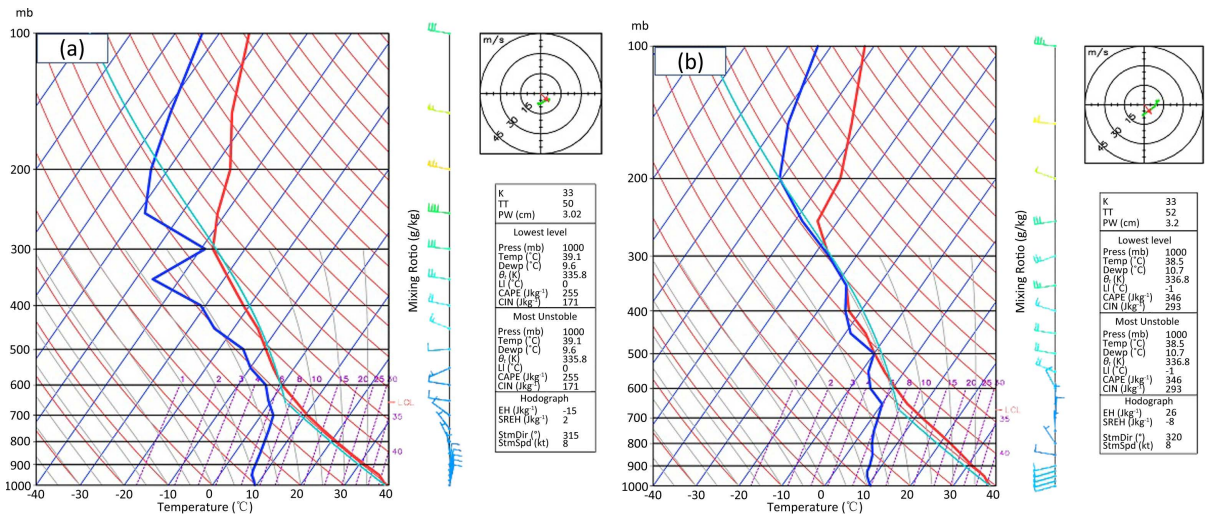


Figure 2. Temperature log pressure chart on June 28, 2022; (a) is 00:00 and (b) is 12:00
 图 2. 2022 年 6 月 28 日温度对数压力图; (a)为 00 时, (b)为 12 时

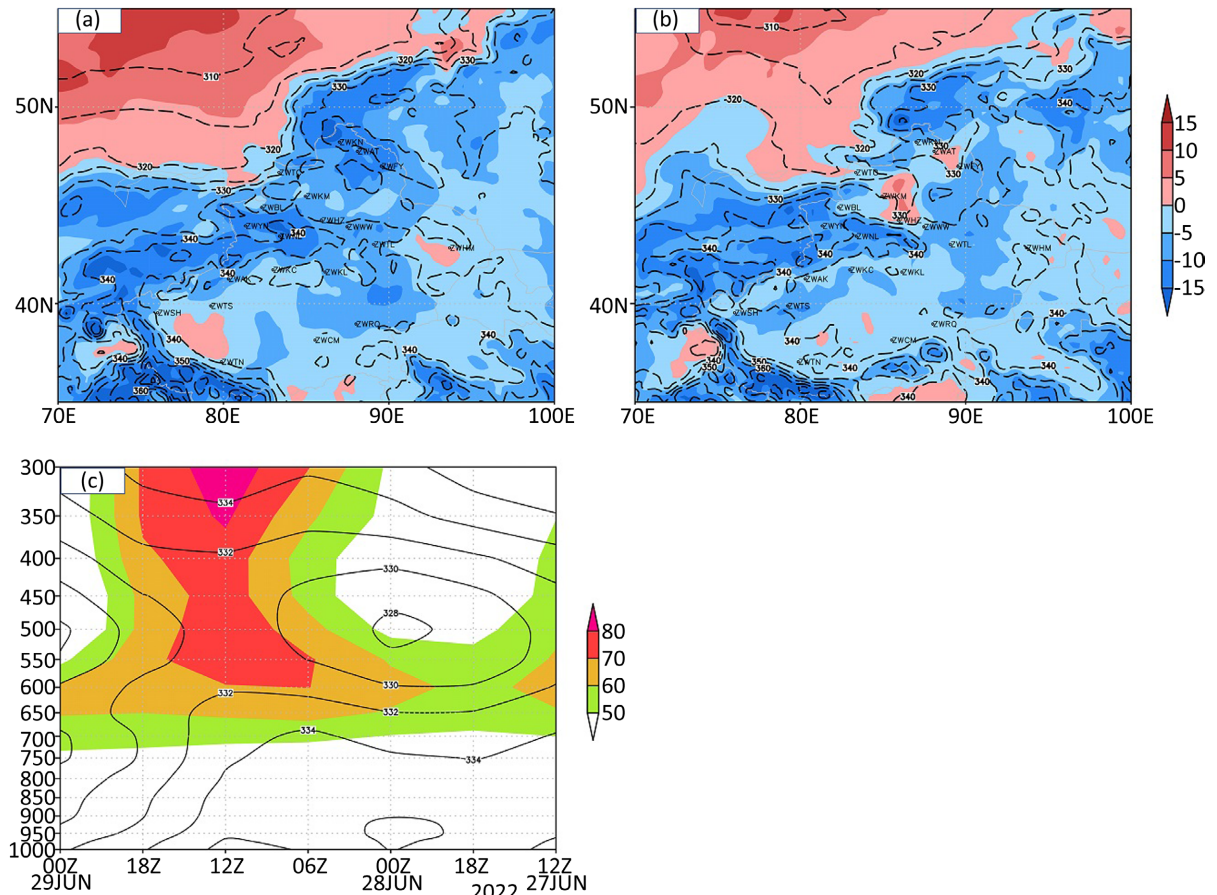


Figure 3. False equivalent potential temperature of 850 hPa at 06:00 (a) and 12:00 (b) on June 28, 2022 (contour line, unit K), and false equivalent potential temperature difference between 500 hPa and 850 hPa (color in, unit K). (c) is false equivalent potential temperature of Urumqi Airport from 12:00 on June 27 to 00:00 on June 29 (contour line, unit K), relative humidity (color in, unit %)
 图 3. 2022 年 6 月 28 日 06 时(a)、12 时(b) 850 hPa 假相当位温(等值线, 单位 K)、500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差(填色, 单位 K), (c)为乌鲁木齐机场 6 月 27 日 12 时至 29 日 00 时假相当位温(等值线, 单位 K)、相对湿度(填色, 单位%)

对流有效位能 CAPE 是具有明确物理意义的热力不稳定参数, CAPE 越大, 对流发展高度越高, 对流强度越大[12]。有研究表明, FNL 再分析资料计算的对流有效位能较实际探空偏小, 但其变化趋势对雷暴有一定的指示意义[13] [14] [15] [16]。图 4 为 FNL 再分析资料的对流有效位能(即 CAPE), 由图可见, 在 28 日 06 时, 新疆北部有明显的对流有效位能, 其值在 100 J/kg 以上, 真实探空数据计算值可能比再分析资料计算值要大, 表明在白天新疆北部区域有明显的能量累积。至 12 时, 该区域对流有效位能显著减小, 其变化表明能量得到了显著的释放, 与伊犁河谷、克拉玛依 - 石河子 - 乌鲁木齐一带的北疆沿天山强对流天气有较好的对应。

通过对上述的环流形势、热力不稳定性等分析表明, 新疆北部区域整层大气在大尺度环流形势和热力不稳定等环境条件上适合对流天气发生, 有强对流发生的潜势。从整层的相对湿度来看, 饱和湿区的范围较小, 在机场上空湿度主要集中在 700 hPa, 且探空曲线呈现上下干、中层湿的形态, 表明强对流发生时降水量不大但易产生雷暴大风。

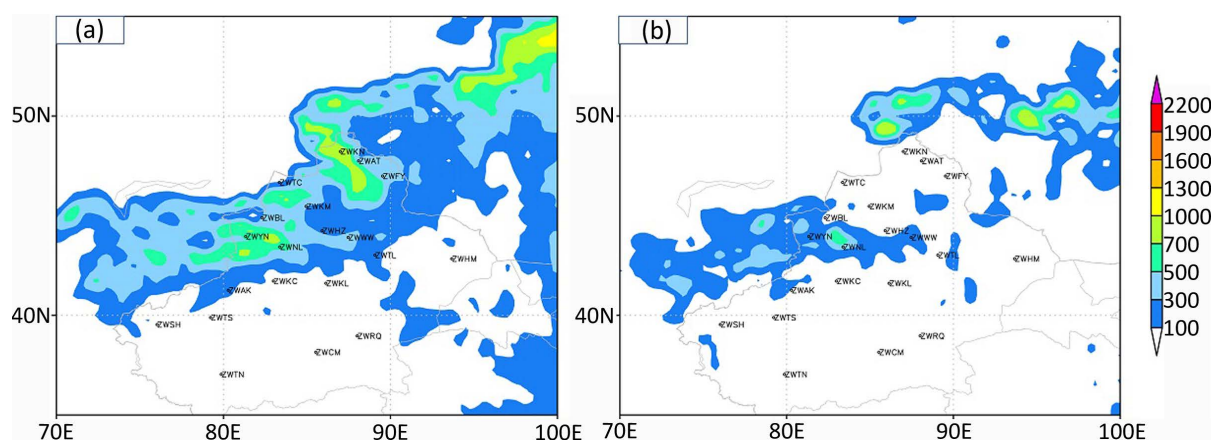


Figure 4. Convective effective potential energy (unit J/kg) at 06:00 (a) and 12:00 (b) on June 28, 2022

图 4. 2022 年 6 月 28 日 06 时(a)、12 时(b)对流有效位能(单位 J/kg)

5. 雷达回波特征及触发条件

从以上分析可知, 此次强对流天气的发生具备了有利的大尺度环流背景和热力不稳定能量条件。研究表明多普勒雷达产品能够直观地反映出强对流发生发展的水平和垂直特征, 可以利用雷达产品对其进行回波特征分析[17] [18]。

5.1. 雷达回波特征分析

图 5 为乌鲁木齐机场多普勒雷达组合反射率, 由图可见在 10:05 降水云团主要位于机场偏西和西南部山区, 为混合性降水回波, 夹杂的对流单体强度约 35~45 dBz。在机场西北方向约 70 公里(白色方框, 记为 A)处有弱回波发展。至 11:06, 西北方向的对流单体 A 迅速发展加强, 强度达 45~55 dBz, 从对应的最强回波显示(图 6(a))上看, 该对流单体回波顶高达 10 km 以上, 45~55 dBz 回波发展高度达 7 公里左右, 呈现为稳定少动的中 γ 尺度孤立对流单体。11:30 在 A 单体的偏西方向有新的对流单体生成(记为 B), 单体水平尺度比 A 单体小, 强度略弱。随着回波发展, 至 12:01, A、B 单体合并, 并迅速发展加强, 且向东南方向移动。至 12:37 已经影响到乌鲁木齐机场, 回波范围明显增大, 从此时的最强回波显示(图 6(b))上看, 最强回波发展高度, 50 dBz 以上的回波主要在 2 公里以下, 对流云团呈现典型的成熟阶段多单体特征。

可见影响乌鲁木齐机场的强对流云团是由多个中 γ 尺度对流单体合并加强并迅速东南移动引起，雷达回波图像清晰的再现了整个发展合并过程。

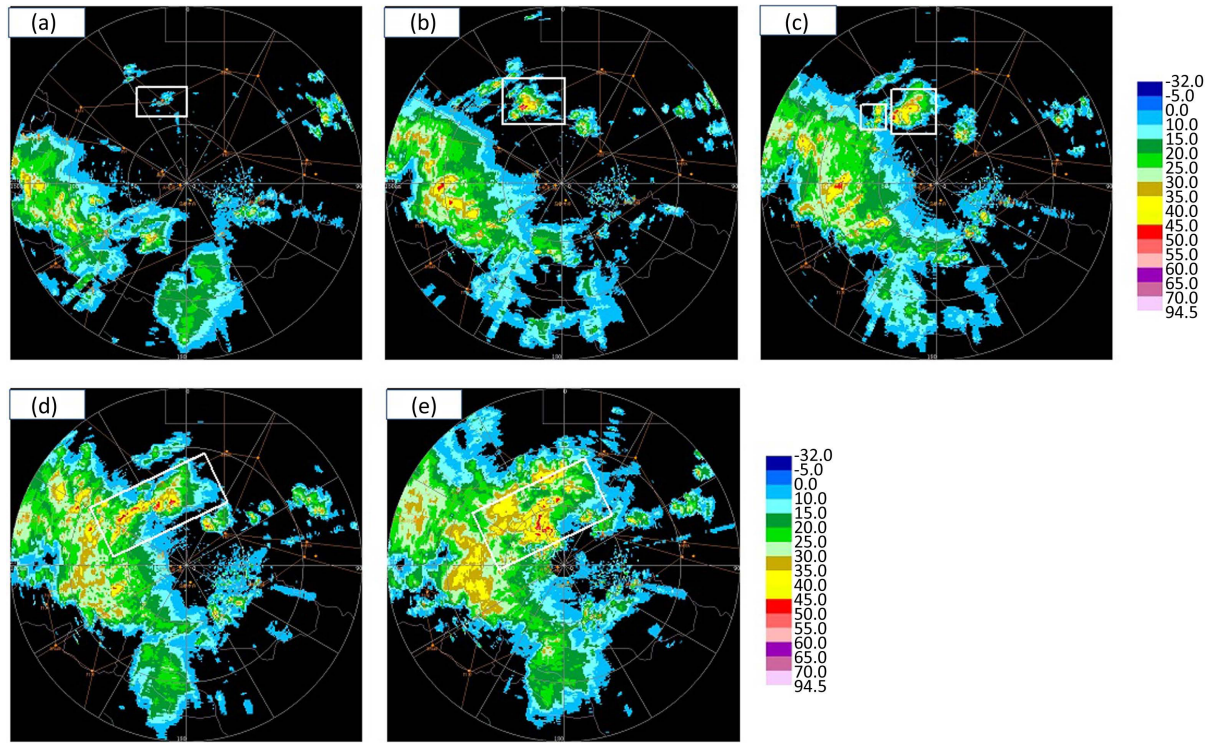


Figure 5. Combined Doppler radar reflectance of Urumqi Airport (unit dBz); (a)~(e) is 10:05, 11:06, 11:30, 12:01, and 12:37 respectively

图 5. 乌鲁木齐机场多普勒雷达组合反射率(单位 dBz); (a)~(e)分别为 10:05、11:06、11:30、12:01、12:37

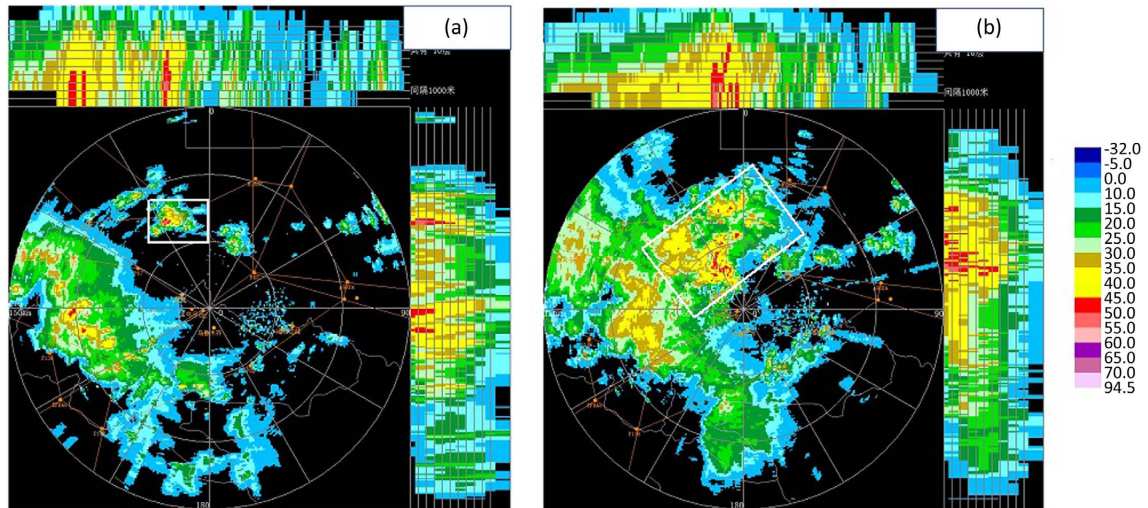


Figure 6. Strongest echo display of Doppler radar at Urumqi Airport; (a) is 11:06 and (b) is 12:37

图 6. 乌鲁木齐机场多普勒雷达最强回波显示; (a)为 11:06, (b)为 12:37

5.2. 动力触发分析

此次强对流天气过程是在低层辐合切变和上层明显的风速辐合的背景下产生的，具备了较好的大尺

度抬升条件，因此产生了北疆沿天山大范围的对流天气过程。但就影响乌鲁木齐机场的对流云团而言，在机场西北方向触发生成的对流单体 A 和 B 以及其合并加强不断加强和维持的过程，地面中尺度辐合线和较高的露点梯度可能是其重要的物理机制。

图 7 为 28 日 10:00 和 11:00 时的加密自动站数据，在 28 日 10:00 时，乌鲁木齐至石河子之间存在明显的低露点区，石河子至呼图壁一带为较大的露点梯度区，这种露点梯度区的存在有利于对流的触发。同时，在呼图壁以北，有近乎东西向的中尺度辐合线存在，在当前的大尺度环流背景下，露点梯度区和中尺度辐合线共同触发了乌鲁木齐机场西北部的中 γ 对流单体。至 11 时，露点梯度区已经明显东移，而中尺度辐合线依然存在，且辐合强度较 10 时增强，此时该处对流单体已经强烈的发展起来。可见在大尺度强迫抬升基础上，中度系统的触发作用使得该中 γ 尺度对流云团得以触发、发展和维持。

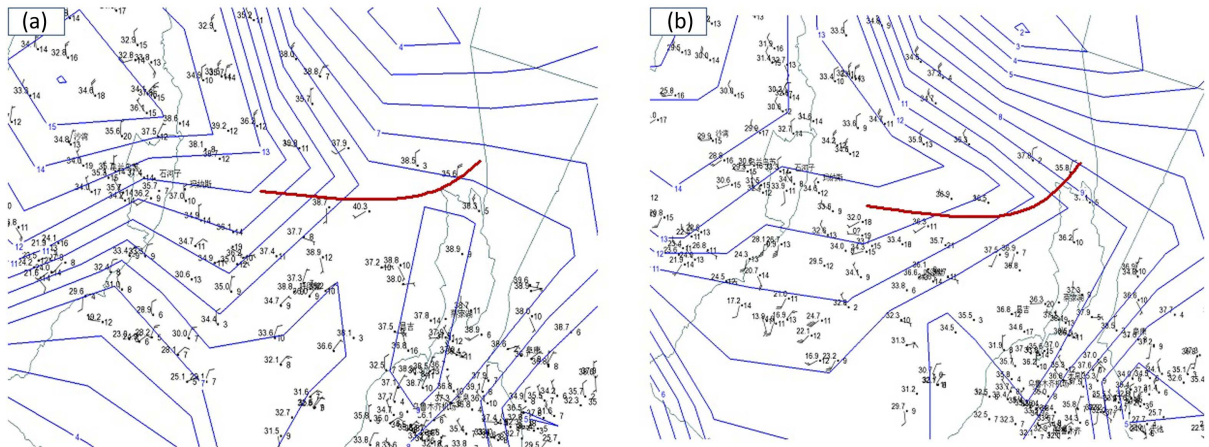


Figure 7. Encrypted automatic station data at 10:00 (a) and 11:00 (b) on June 28, 2022. Blue contour lines are dew point contour lines. Fill in the figure for wind field (unit m/s), temperature (left, unit $^{\circ}\text{C}$) and dew point (right, unit $^{\circ}\text{C}$)

图 7. 2022 年 6 月 28 日 10:00 (a)、11:00 (b) 加密自动站数据，蓝色等值线为露点等值线，填图为风场(单位 m/s)、温度(左侧，单位 $^{\circ}\text{C}$)、露点(右侧，单位 $^{\circ}\text{C}$)

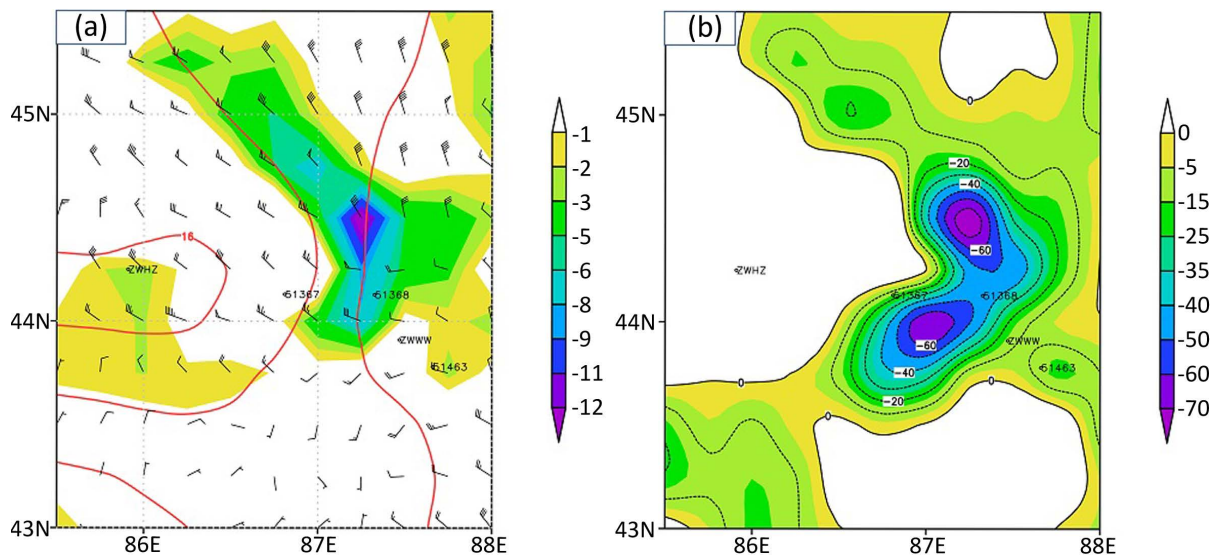


Figure 8. (a) shows the wind field at 850 hPa (wind rod, unit m/s), temperature field (red contour, unit $^{\circ}\text{C}$), vertical velocity (color in, unit Pa/s), and (b) shows the divergence of water vapor flux (unit, $10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$)

图 8. (a)为 850 hPa 风场(风杆，单位 m/s)、温度场(红色等值线，单位 $^{\circ}\text{C}$)、垂直速度(填色，单位 Pa/s)，(b)为水汽通量散度(单位， $10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$)

图 8(a)为 28 日 12:00 的 FNL 再分析资料绘制的 850 hPa 风温场和垂直速度, 图 8(b)为该时刻水汽通量散度。由图可见, 在乌鲁木齐机场西北方向存在明显的风速辐合, 同时存在剧烈的上升运动区, 上升速度中心达到 -12 Pa/s , 该上升运动区与上述中 γ 尺度雷暴单体相对应。从图 8(b)的水汽通量散度来看, 虽然整个大尺度环流背景下水汽输送和水汽条件均不理想, 但在地面中尺度辐合线触发对流后, 强烈的中尺度辐合和上升运动使得水汽得以迅速汇聚, 在西北方向的水汽通量散度中心达到 $70 \times 10^{-5} \cdot \text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$, 水汽的迅速汇聚为雷暴单体的持续发展和维持提供了条件。

通过上述分析可知, 此次影响乌鲁木齐机场的雷暴云团是在较强的露点梯度和地面中尺度辐合线上触发的, 对流触发后强烈的上升运动和水汽的迅速汇聚使得该中尺度雷暴系统得以长时间发展和维持。

6. 结论

通过对 2022 年 6 月 28 日发生在乌鲁木齐机场的雷雨大风天气过程的天气形势、热力不稳定、水汽等环境条件以及对流发生发展的雷达回波演变和动力触发机制等进行分析, 得到以下结论:

1) 此次强对流天气过程发生在较强西风气流中短波影响背景下, 中低层风速辐合区、辐合切变区、低空急流等为强对流提供了较好的大尺度强迫抬升条件。

2) 对假相当位温和对流有效位能分析发现, 强对流发生前, 北疆区域处于明显的热力不稳定环境中, 强对流发生区域对流能量的释放与 500 hPa 和 850 hPa 假相当位温差及对流有效位能的变化有较好的对应关系。乌鲁木齐机场的探空曲线结构呈现上下干、中层湿的结构, 与机场出现弱降水和雷暴大风相对应。

3) 影响乌鲁木齐机场的强对流云团是由多个中 γ 尺度对流单体合并加强并迅速东南移动引起, 雷达回波图像清晰地再现了整个发展合并过程。该中尺度雷暴系统是在较强的露点梯度区和地面中尺度辐合线上触发的, 对流触发后强烈的上升运动和水汽的迅速汇聚使得中尺度雷暴系统得以长时间发展和维持。

参考文献

- [1] 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 一次强飚线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 621-636.
- [2] 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 刘黎平, 王改利. 2009 年 6 月 3-4 日黄淮地区强飚线成熟阶段特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35(1): 105-120.
- [3] 陈涛, 代刊, 张芳华. 一次华北飚线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J]. 气象, 2013, 39(8): 945-954.
- [4] 段亚鹏, 王东海, 刘英. “东方之星”翻沉事件强对流天气分析及数值模拟[J]. 应用气象学报, 2017, 28(6): 666-677.
- [5] 沈杭锋, 张红蕾, 高天赤, 勾亚彬, 陈勇明. 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.
- [6] 陆汉成, 杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 251-288.
- [7] 黄永明, 倪允琪. 长江中下游一次非典型梅雨锋中尺度暴雨过程的分析研究[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 100-114.
- [8] 张利平, 马琳芳, 陈阳权, 谭艳梅. 与天气相关的不正常事件及预报服务能力分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2016, 27(5): 14-18.
- [9] 杜安妮, 陈阳权. 乌鲁木齐机场 1 次短时雷雨大风天气特征及成因分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(4): 59-62. <https://doi.org/10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2021.04.017>
- [10] 陈阳权, 杜安妮, 丁旭, 秦贺, 张利平. WRF 模式对乌鲁木齐机场终端区一次强对流天气过程的模拟分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(2): 48-55.
- [11] 李帆, 罗静静. 高空冷涡形势下一次雷暴大风过程的诊断分析[J]. 现代农业科技, 2022(1): 178-181.
- [12] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象, 2012, 38(2): 164-173.
- [13] 王秀明, 俞小鼎, 朱禾. NCEP 再分析资料在强对流环境分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2012, 23(2): 139-146.
- [14] 廖晓农, 王华, 石增云, 杨洁. 北京地区雷暴大风日 0e 平均廓线特征[J]. 气象, 2004(11): 35-37.

-
- [15] 梁爱民, 张庆红, 申红喜, 李秀连, 王科. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象, 2006(11): 73-80+131.
- [16] 郑永光, 张春喜, 陈炯, 陈明轩, 王迎春. 用 NCEP 资料分析华北暖季对流性天气的气候背景[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007(5): 600-608. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2007.096>
- [17] 刘欣, 王咏青, 胡志群, 周玉淑. 青藏高原一次冰雹强对流天气过程的诊断及雷达回波特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(5): 611-625.
- [18] 尉英华, 陈宏, 张楠, 何群英, 林晓萌. 冷涡影响下一次冰雹强对流天气中尺度特征及形成机制[J]. 干旱气象, 2018, 36(1): 27-33.