

# 乌鲁木齐机场一次雷暴天气过程分析

郭俊含, 杜安妮, 李静轩, 张宇翔

民航新疆空中交通管理局, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年12月28日; 录用日期: 2024年1月5日; 发布日期: 2024年1月12日

## 摘要

利用常规探测资料、FNL再分析资料( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )、多普勒雷达资料以及FY-4卫星资料等, 着重对乌鲁木齐国际机场2022年7月17日一次雷暴天气过程的动力条件进行分析, 得到以下结论: 此次雷暴天气大尺度环流背景为500 hPa上偏西气流, 多有短波分裂, 配合700 hPa天山北坡有明显的风速辐合带、乌鲁木齐机场南侧西北风和西南风的风向切变、850 hPa上东南风和西南风的风向切变、以及地面不稳定低值区共同作用产生的。强盛的偏西、西南急流携带充足水汽输送至北疆西部以及天山北坡, 且雷暴前期在乌鲁木齐机场南侧存在强烈的水汽辐合, 配合垂直方向上高层辐散低层辐合的上升运动, 为雷暴提供水汽和动力条件; 南疆西部有高能舌东北伸, 同时乌鲁木齐本场上空存在假相当位温等值线密集区, 垂直方向上为中层向下渗透冷空气, 低层相对高温高湿, 为雷暴天气的发生积累了一定的位势不稳定能量。尺度小但强度强的孤立对流单体在东移过程中激发出新的单体导致了此次雷暴天气持续时间较长。

## 关键词

强对流, 雷达回波, 动力抬升, 乌鲁木齐地窝堡国际机场

# Analysis of a Thunderstorm Process at Urumqi Airport

Junhan Guo, Anni Du, Jingxuan Li, Yuxiang Zhang

Xinjiang Air Traffic Management Bureau CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Dec. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Using conventional sounding data, FNL reanalysis data ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ), Doppler radar data, and

**FY-4 satellite data, analysis of the dynamical conditions of a thunderstorm weather process at Urumqi International Airport on July 17, 2022, conclusions are as follows: The large-scale circulation background of this thunderstorm was westerly flow over 500 hPa, mostly with short-wave splitting, which was produced by the combination of obvious wind convergence zone on the north slope of Tianshan Mountain at 700 hPa, wind shear of northwest and southwest winds on the south side of Urumqi Airport, wind shear of southeast and southwest winds on 850 hPa, and low value area of ground instability. Strong westerly and southwest jets carry sufficient water vapor to the western part of northern Xinjiang and the Northern Slope of Tianshan Mountain. In the early stage of the thunderstorm, there was strong water vapor convergence on the south side of Urumqi Airport, which provided water vapor and dynamic conditions for the thunderstorm with the upward movement of upper level divergence and lower level convergence in the vertical direction. In the west of southern Xinjiang, there is a high energy in the northeast, and there is a dense area of pseudo-equivalent temperature isocontours over Urumqi. In the vertical direction, the middle layer penetrates cold air downward, and the low layer is relatively high temperature and humidity, which accumulates a certain potential instability energy for the occurrence of thunderstorms. The small scale but strong isolated convective cells stimulated new cells during eastward movement, which led to the longer duration of the thunderstorm.**

## Keywords

Severe Convection, Radar Echo, Dynamic Lifting Action, Urumqi Diwopu International Airport

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

雷暴天气属于一种中小尺度的局地性的对流天气系统，常伴有闪电和大风。它产生在强烈发展的积雨云中，因此常伴有剧烈的雷电活动以及阵性降水，有时甚至伴有冰雹和龙卷风等灾害性天气。雷暴通常在夏季发生，是夏季的主要气象灾害之一。

李照荣等[1]对西北地区雷暴天气统计后发现，总体特征是多发生于山区和高原，盆地、河谷和沙漠较少，季节变化来看，夏季最强，春秋次之，冬季发生概率极小，其中，新疆西部天山山区则为三大雷暴多发区之一。与此结论吻合的是，新疆雷暴分布地域性强，年雷暴日数山区多于平原，北部多于南部，西部多于东部，天山西段及其两侧是呈带状分布[2]。赵德龙等[3]根据近 33 年来乌鲁木齐地区雷暴空间分布得出城南多余城北，南部山区为雷暴多发中心，城区、北部平原区及达坂城谷地为低值区域；总体而言，乌鲁木齐地区雷暴日数呈波动下降趋势。由此发现，山区地形对强对流天气的发展作用十分明显，地形阻挡加强了地面风场的切变辐合，同时气流过山引发正负位势涡度带的生成和传播，激发垂直环流的形成，为强对流发展提供动力条件[4]。同时，干侵入能够增加大气的位势不稳定，为对流发展储备充沛对流有效位能，为中尺度中对流云团和中尺度涡旋的发生、发展提供有利的环境条件[5]。多普勒雷达和卫星云图也是分析强对流天气的有效手段。刘雯[6]等利用逐时 FY-2G 红外亮温(TBB)资料对南疆地区中尺度对流系统(MCS)进行分析时发现，南疆地区 MCS 具有明显的日变化特征，午后和傍晚是 MCS 最活跃的时段。昆仑山北坡 MCS 的最活跃时段早于天山南，而天山南坡 MCS 夜间和凌晨形成的特征更为显著。多普勒雷达的组合反射率因子强度与当地降水量的大小密切相关[7]。

乌鲁木齐地窝堡国际机场在 2022 年 7 月 17~18 日出现雷暴、短时弱雷雨天气，参考已有的对于新疆天山北坡强对流天气的大量研究[8] [9]，通过分析此次雷暴天气的环流形势、物理量场、卫星以及雷达资料，以期对短时雷暴的临近预报总结经验方法，以此为日后相类似雷暴天气的短临预报提供参考，力求增大夏季对流天气的预报提前量和准确度，为航空安全运行奠定基础。

## 2. 天气实况及环流背景

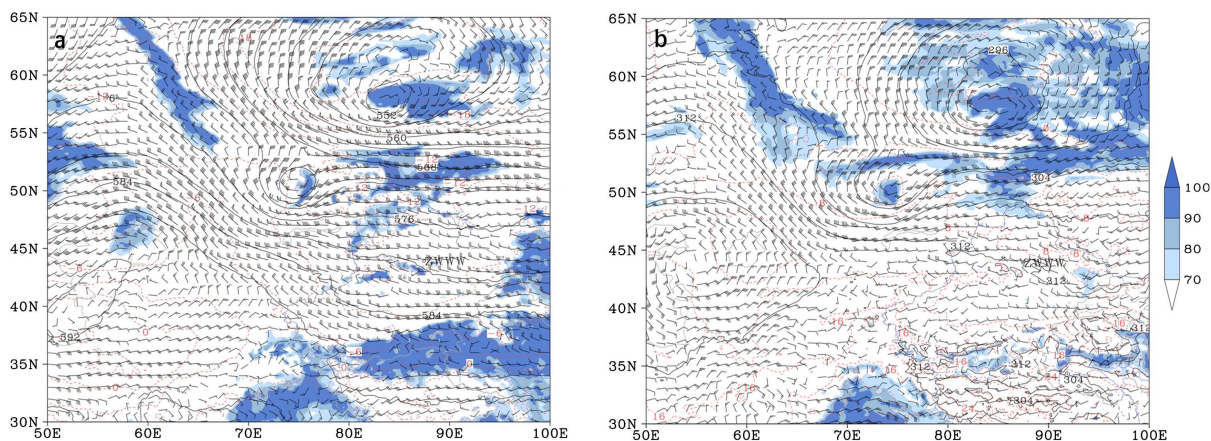
### 2.1. 天气过程简介

2023 年 7 月 17 日新疆天山南坡以及南疆盆地南缘均出现雷暴或雷雨天气，17 日 23:30~18 日 03:30 乌鲁木齐机场雷暴，其中 18 日 01:30 短时弱雷雨，过程降水量 0.0 mm。共造成航班延误 14 架次。

### 2.2. 环流形势

7 月 15~18 日 500 hPa 上欧亚的整体环流形势为“两槽两脊”型，新疆地区受西西伯利亚低涡底部的偏西气流影响，其底部不断有新的短波分裂影响北疆地区。16 日 20 时，低涡后有小的低涡分裂，并不断东移南压，配合有 $-12^{\circ}\text{C}$ 的冷中心(图略)；17 日 14 时，天山山区西段也有短波槽生成(图 1(a))；17 日 20 时低涡在巴尔喀什湖北侧填塞为短波槽，槽线附近风速达到急流标准，最大风速为 26 m/s，且槽后风速大于槽前风速，强冷平流使得冷空气快速东移南下，此时乌鲁木齐机场上游的短波槽叠加巴湖北侧的短波槽底部的急流影响，加深发展，影响本场西侧及西南侧。

700 hPa 与 500 hPa 环流类似，整体为偏西气流多波动，17 日 14~20 时，天山北坡有明显的风速辐合带(图 1(b))，博乐站附近最大风速为 12 m/s，乌鲁木齐北侧风速为 2~4 m/s，为雷暴天气提供动力抬升条件；18 日 02 时雷暴发生期间(图略)，700 hPa 上乌鲁木齐机场南侧有西北风和西南风的风向切变，冷暖空气的交汇为此次雷暴天气的发生提供不稳定能量。

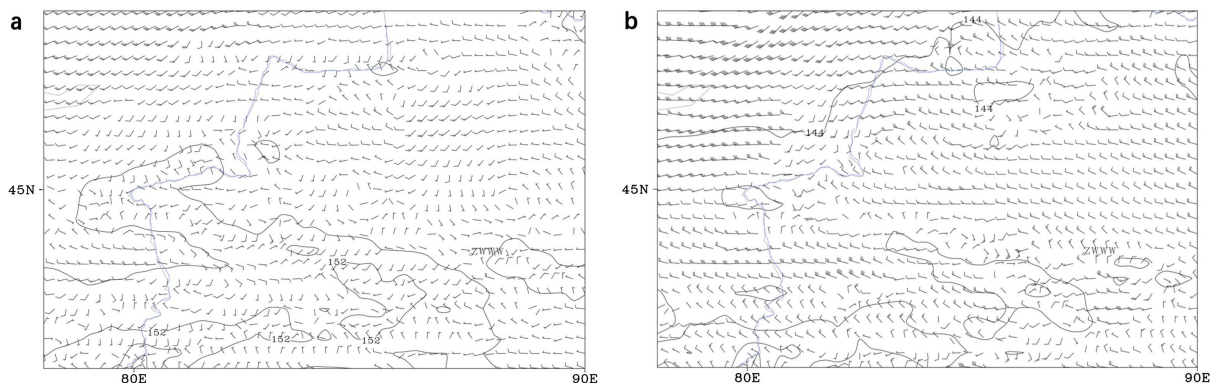


**Figure 1.** July 17 14:00 500 hPa (a) and 700 hPa (b) potential height (black isoline, unit: dagpm), wind field (wind pole, unit: m/s), temperature (red isoline, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), relative humidity (color filling, unit: %)

**图 1.** 7 月 17 日 14 时 500 hPa (a) 和 700 hPa (b) 位势高度(黑色等值线, 单位: dagpm)、风场(风杆, 单位: m/s)、温度(红色等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、相对湿度(填色, 单位: %)

7 月 17 日 08 时，雷暴发生前期，850 hPa 上乌鲁木齐机场西侧有东南风与西南风的切变(图 2(a))，有利于辐合上升运动；17 日 20 时本场上空转为偏北风(图 2(b))，风速有明显增大，与天山山区的地形作用起到强迫抬升作用，从而加强了上升运动，为雷暴的发生提供动力条件。地面图中，17 日 20 时北疆地区受两个高压之间的不稳定低值区控制(图略)。





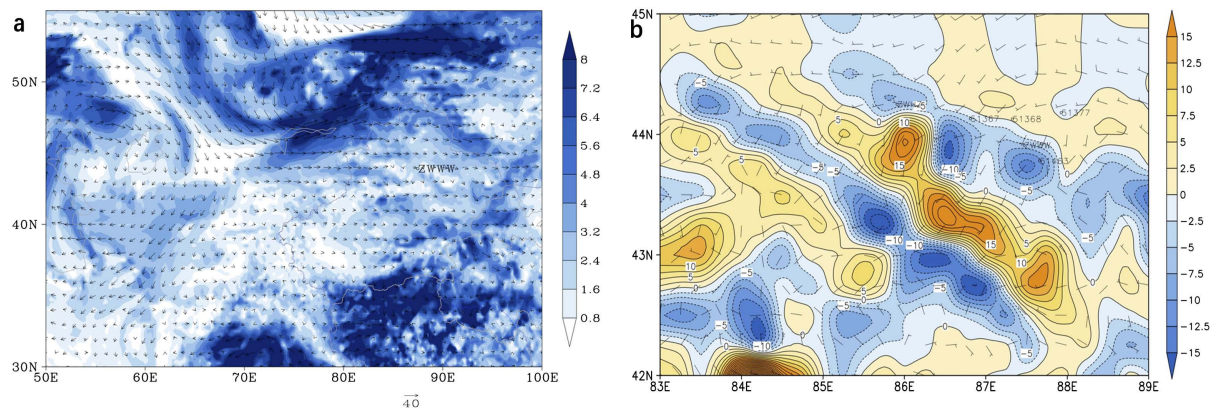
**Figure 2.** July 17, 08:00 (a) and 20:00 (b) 700 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm), wind field (wind pole, unit: m/s)

**图 2.** 7月17日 08时 (a)和 20时 (b) 700 hPa 位势高度(黑色等值线, 单位: dagpm)、风场(风杆, 单位: m/s)

### 3. 水汽条件

#### 3.1. 水汽通量

图 3(a)为根据 FNL 再分析资料绘制的 700 hPa 水汽通量, 结合风场可以判断, 17 日 20 时低涡底部充足水汽由强盛的偏西、西南急流输送至北疆西部以及天山北坡, 为雷暴天气的发生提供水汽条件, 18 日 02 时 700 hPa 乌鲁木齐机场上游至本场上空转为西北风(图略), 持续将水汽输送至本场, 此时本场附近的水汽通量大值区主要集中在终端区偏南山区方向, 中心值为  $4.8\sim 5.6 \text{ g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ 。



**Figure 3.** (a) The water vapor flux of 700 hPa (colored,  $\text{g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ , shaded area is the positive water vapor flux area) and the wind field (flow line, m/s) at 20:00 on 17 July; (b) Vapor flux divergence of 850 hPa at 20:00 on the 17th (filling, isoline, unit:  $10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ )

**图 3.** (a) 7月17日 20时 700 hPa 水汽通量(填色, 单位:  $\text{g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ , 阴影区为水汽通量正值区)和风场(流线, 单位: m/s); (b) 17日 20时 850 hPa 水汽通量散度(填色, 等值线, 单位:  $10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ )

#### 3.2. 水汽通量散度

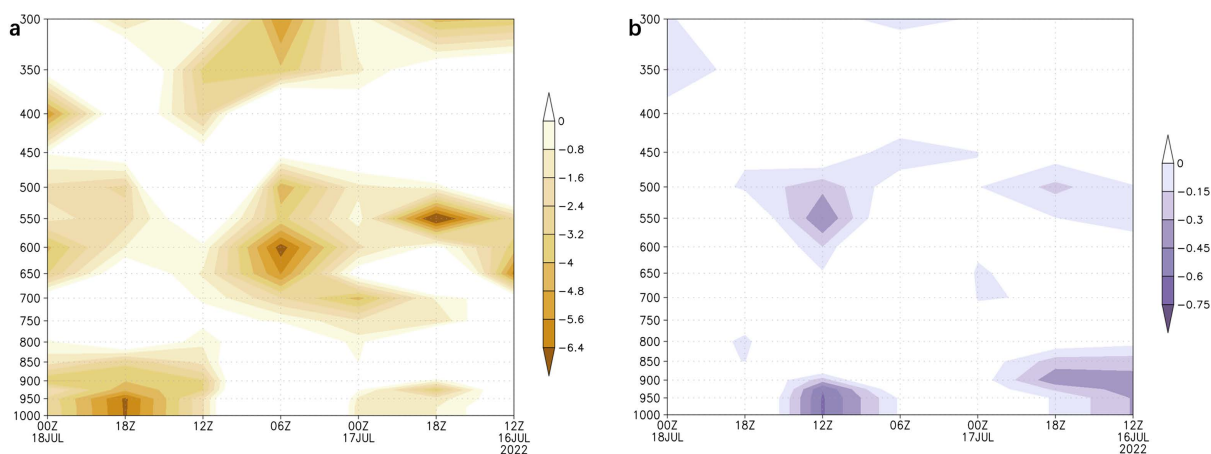
16 日 20 时至 17 日 14 时, 850 hPa 上天山北坡水汽通量散度基本呈现正值“带状”的分布(图略), 即均存在水汽的辐散, 正值中心位于乌鲁木齐机场的东南侧和东侧, 中心值为  $7.5\sim 10 \times 10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ ; 17 日 20 时(图 3(b)), 乌鲁木齐机场及其上游即天山北坡的中段水汽通量散度均转为负值, 同样呈带状分布, 负值中心分别位于呼图壁站(51367)西南侧和乌鲁木齐机场南侧, 辐合中心值分别为小于  $-15 \times 10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$  和  $-12.5\sim -15 \times 10^{-5}\cdot\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ , 正负值中心差值很大, 由此可见此区域有强烈的水

汽辐合, 与对流天气发生的区域吻合, 同时可见 20 时由上空偏北风引起的地形强迫抬升作用在一定程度上为水汽在天山北坡辐合提供了有利条件; 18 日 02~08 时乌鲁木齐机场上空仍为水汽辐合区(图略), 但强度略有减小, 且区域逐渐分散。

#### 4. 动力条件

如图 4(a)中散度时间-高度剖面所示, 16 日 23 时~17 日 08 时, 900~950 hPa 近地面层有明显散度负值区, 即有辐合上升运动, 中层基本为辐散下沉运动, 其中, 17 日 02 时, 550 hPa 存在一个强辐合中心, 中心值小于 $-6.4 \times 10^{-5}$  hPa/s; 17 日 08~20 时, 雷暴天气发生前期, 中低层散度均为正值, 750~500 hPa 上为散度正值区, 中心值小于 $-6.4 \times 10^{-5}$  hPa/s, 出现在 17 日 14 时, 此时本场上空为低层辐散中高层辐合; 17 日 20 时起, 800 hPa 以下出现散度负值区, 即开始有辐合上升运动, 中心值出现在 18 日 02 时, 与实况雷暴较旺盛时期吻合。

图 4(b)为垂直速度的时间-高度剖面图, 分别在 17 日 00 时前以及 17 日 14~23 时内, 为底层和中高层有上升运动, 中低层有下沉运; 其中 17 日 14~23 时雷暴前期, 900 hPa 以下有明显的垂直运动负值区, 即上升运动最强时刻, 中心值为 $-0.75 \sim -0.6$  hPa/s, 出现在 20 时, 此时 600~450 hPa 也出现一个上升运动中心, 中心值为 $-0.45 \sim -0.3$  hPa/s, 此配置为雷暴前期提供了动力条件。



**Figure 4.** Height-time profile of divergence (a) and vertical velocity (b) near Urumqi Airport (43.91°N, 87.47°E) from 20:00 July 16 to 08:00 July 18 (colored, divergence unit:  $10^{-5}$  hPa/s, vertical velocity unit: hPa/s)

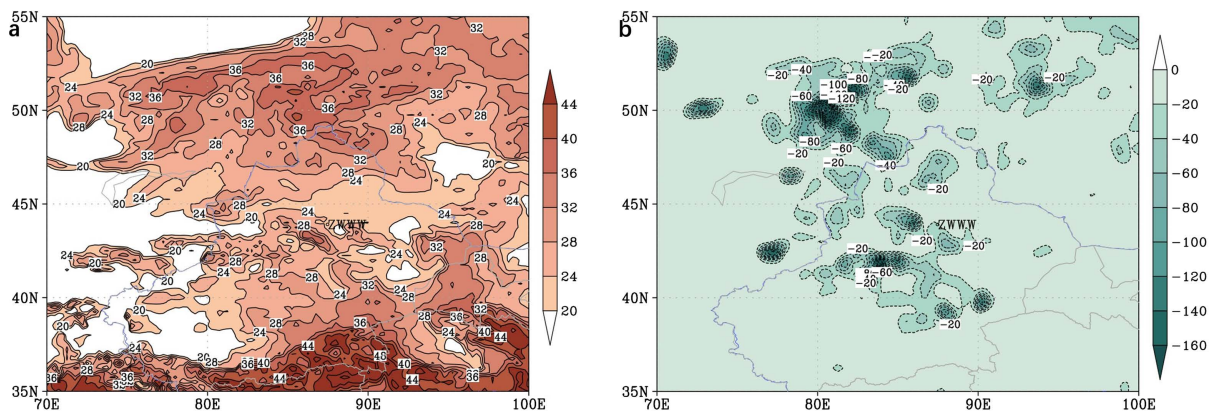
**图 4.** 7 月 16 日 20 时至 18 日 08 时散度(a)和垂直速度(b)在乌鲁木齐机场附近(43.91°N, 87.47°E)的高度 - 时间剖面图(填色, 散度单位:  $10^{-5}$  hPa/s, 垂直速度单位: hPa/s)

#### 5. 不稳定能量

##### 5.1. k 指数和对流抑制指数(cin)

7 月 17 日 14 时, 新疆地区 K 指数大值区集中在北疆西部和南疆盆地地区, 此时北疆沿天山一带 K 指数为  $24^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ , 局地  $28^{\circ}\text{C} \sim 32^{\circ}\text{C}$ , 此时 K 指数大值中心较为分散(图略); 17 日 20 时(图 5(a)), 乌鲁木齐机场 K 指数虽略有减小, 但此时本场西南侧山区 K 指数大值中心范围不断增大且形成区域, K 指数梯度也有明显增大, 说明天山山区有不稳定能量的积累, 利于后续对流单体的形成和雷暴天气的发生。沙氏指数是判断大气稳定度的一种依据, 其小于零则表示大气处于不稳定状态, 其负值越小, 则不稳定程度越大, 根据乌鲁木齐站的 T-lnp 图可以发现(图略), 17 日 08 时的沙氏指数  $S_i$  为 2.12, 14 时  $S_i$  为 -0.11, 沙氏指数是一个持续减小的过程, 雷暴天气发生前期 20 时,  $S_i$  降至 -1.75, 对雷暴天气有较好的指征意义。

对流抑制能(cin)定义为能阻止气块自地面向上升至自由对流高度的能量大小, 若其值较高, 意味着大气处于较稳定状态, 不利于雷暴的发生, 但其值过低也不利于能量的积累, 7月17日14时, 北疆西部至天山山区以及南疆盆地大部的 cin 值均在 0~20 J/Kg 之间(图略), 20时整个区域有明显的 cin 值减小(图 5(b)), 其中乌鲁木齐机场减小至-20~-40 J/Kg, 同时, 本场偏西及西南方向均有 cin 的负值中心, 对应雷暴天气的发生; 18日02时雷暴天气已经发生, 不稳定能量得到释放, 本场 cin 值增大至 0~20 J/Kg 之间(图略)。

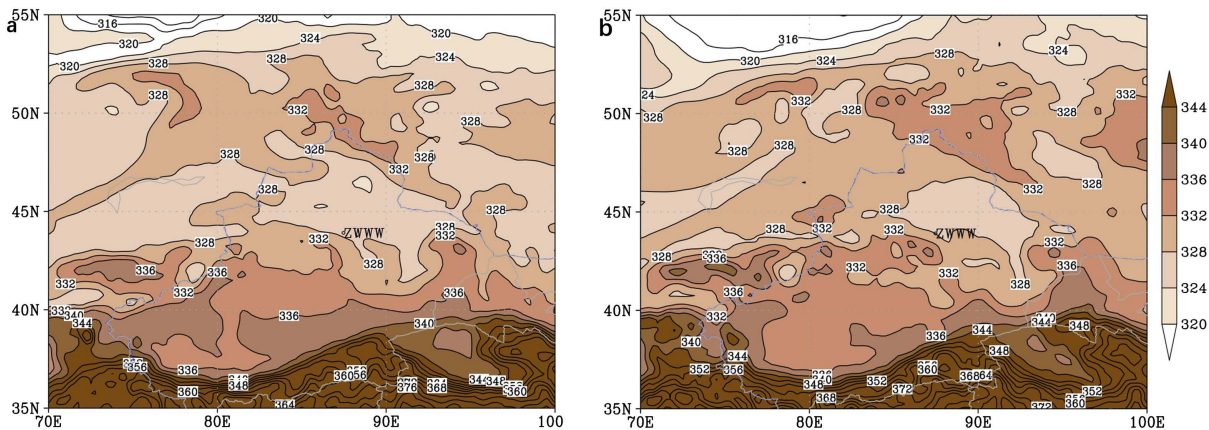


**Figure 5.** July 17, 20:00 (a) K index (colouring, isolate, unit: °C); (b) Convection suppression index (filling, contour line, unit: J/Kg)

**图 5.** 7月17日20时(a) K 指数(填色, 等值线, 单位: °C); (b) 对流抑制指数(填色, 等值线, 单位: J/Kg)

## 5.2. 假相当位温

假相当位温是综合温度、气压和湿度的一个综合物理量, 能够在一定程度上反应大气的不稳定状态。分析假相当位温可知, 17日14时(图 6(a))假相当位温大值区分别位于北疆北部以及南疆盆地, 有高能舌由南疆西部向东北伸; 17日20时(图 6(b))高能中心进一步北伸, 此时位于南疆西部的高能中心值也由 336~340 K 升至 340~344 K, 并且北疆西部也有大范围能量的增大, 此时高能舌已沿天山南坡西伸至天山中段, 南疆西部-伊犁河谷-天山中段的假相当位温梯度也可以看出有明显增大, 意味着此区域存在能量锋区。



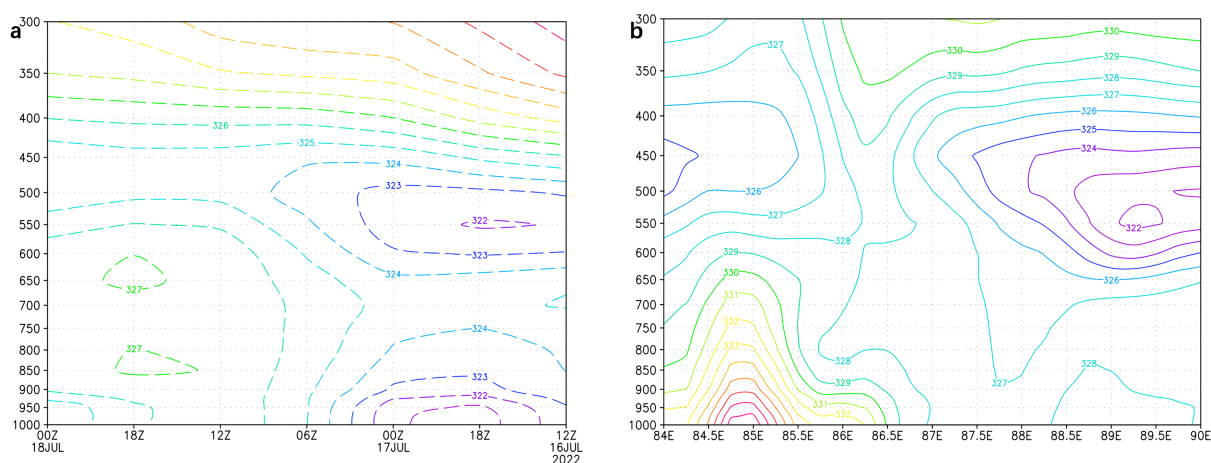
**Figure 6.** July 17, 14:00 (a) and 20:00 (b) false equivalent potential temperature (filling, contour, unit: K)

**图 6.** 7月17日14时(a)和17日20时(b)假相当位温(填色, 等值线, 单位: K)

图 7(a)为7月16日20时至18日08时假相当位温在乌鲁木齐机场高度-时间剖面图, 由此可得,



17日02时550 hPa和地面分别存在一个假相当位温低值区,中心值分别为322 K和321 K,17日14时起,假相当位温开始有明显增大,并且以500 hPa以下为完整一个能量大值区,其强度中心出现在18日02时前后,中心值达到327 K,位于650~600 hPa和850~800 hPa,与实况雷暴时间吻合。7月17日14时的假相当位温87.5°E以西有假相当位温随高度递减(图略),且等值线较为密集,存在能量锋区,假相当位温中心值为335 K,出现在83.5°E左右;此时乌鲁木齐机场(87.5°E附近)上空500 hPa高度上为假相当位温的低值区,中心值为323 K,此时850 hPa和500 hPa上假相当位温差值约为4 K左右。17日20时(图7(b)),上游能量锋区不断西移,此时地面假相当位温大值中心移至且85°E,且高能中心值增大至338 K,等值线更加密集,能量锋区增强且靠近本场,87°E以东的500 hPa上存在强度为322 K的低值中心,这种中层向下渗透冷空气,低层相对高温高湿产生的位势不稳定能量,为对流天气的发生提供了有利条件。



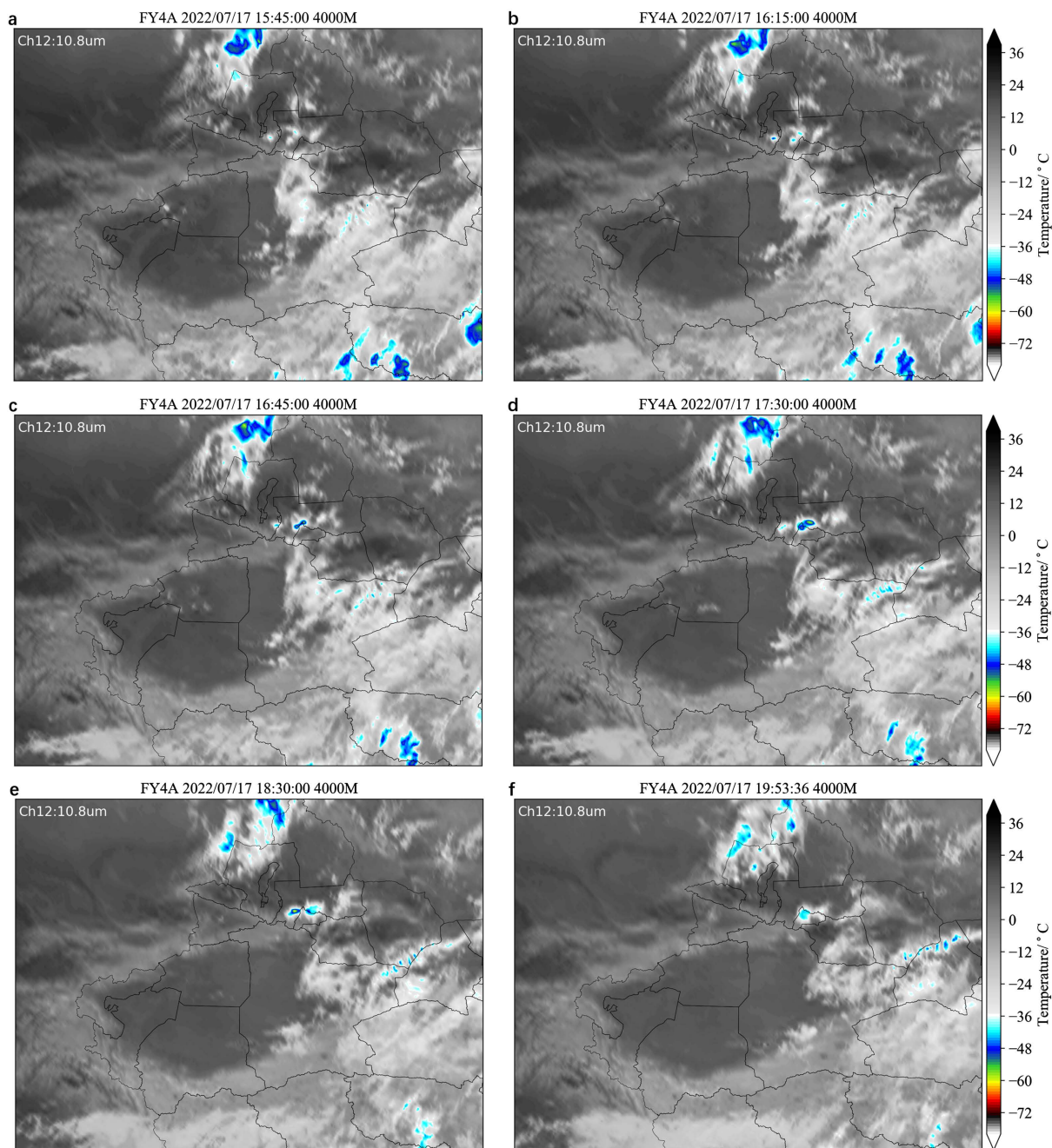
**Figure 7.** (a) Elevation and time profile of pseudo equivalent potential temperature near Urumqi Airport (43.91°N, 87.47°E) from 20:00 on July 16 to 08:00 on July 18 (isocontour, unit: K); (b) Vertical profile of the zonal space along 43.91°N dummy potential temperature (isoline, unit: K)

**图7.** (a) 7月16日20时至18日08时假相当位温在乌鲁木齐机场附近(43.91°N, 87.47°E)的高度-时间剖面图(等值线, 单位: K); (b) 沿43.91°N作假相当位温的纬向空间垂直剖面图(等值线, 单位: K)

## 6. 风云卫星云图和多普勒雷达回波特征分析

### 6.1. 卫星云图特征

图8为空间分辨率4 km的风云4A卫星资料绘制的云顶亮温TBB图,17日23:45乌鲁木齐上游石子附近以及本场西北方向有分散的对流单体生成(图8(a)),此时单体尺度小,强度弱且位置分散;18日00:15位于本场西侧有新的对流单体生成(图8(b)),石子附近的单体有明显增强,云顶亮温由-36°C~-40°C降至-45°C~-48°C,并不断东移;00:45西侧和西北侧两个规则的椭圆形单体合并加强(图8(c)),中高空的引导气流为偏西或西北气流,故使得合并加强后的两个单体移至上空,呈现为有两个中心的“哑铃状”分布,其中心强度均达到-54°C左右;01:30合并后的对流云团持续东移(图8(d)),尺度有所增大,此时本场被对流云团覆盖,但其强度中心位于本场东北和偏东方向,中心值接近-60°C,此时之前位于石河子的对流单体不断减弱东移至本场西侧;02:30前部的对流云已逐渐消散(图8(e)),但后部的单体由于850 hPa风场上东南风和西南风的切变(图略),有明显的激发作用,使得其中心强度骤增至-60°C左右,给本场持续带来雷暴天气;03:53对流云逐渐减弱消散(图8(f)),虽仍位于本场附近,但其强度已减弱至-36°C~-40°C,本场雷暴天气随之结束。



**Figure 8.** FY-4A satellite (UTC) cloud top brightness temperature TBB (unit: °C)

**图 8.** FY-4A 卫星(UTC)云顶亮温 TBB(单位: °C)

## 6.2. 多普勒雷达回波特征

22:08 乌鲁木齐机场上游西北和偏西方向 150 km 开始有分散的对流单体向东南方向移动加强; 23:03 西北方向的对流单体在东南移的过程中右前方不断有新的对流单体激发, 与偏西方向的对流单体有逐渐合并的趋势; 23:40 回波呈带状进入本场 50 km 范围内, 且回波中心达到 45 dBz (图 9(a)); 18 日 00:04 其后部生成新的对流云带, 但此时强度较弱, 排列较为分散; 00:22 影响本场的回波再次加强, 且强度超过 35 dBz 的回波范围进一步扩大, 对流云主体紧密(图 9(b)), 此时本场正处于强回波中心, 强度为



45~50 dBz; 此后随着对流回波东南移动, 本场上空被基本覆盖; 00:59 回波逐渐减弱, 但后部新生成的对流回波略有加强, 其主体位于本场偏西方向 100 km 处; 01:17 前部的对流回波已有明显减弱, 中心强度降至 35~40 dBz, 后部对流云带呈东北-西南向, 整体向东移动并发展, 逐渐连接成完整带状(图 9(c)); 02:00 后部的对流回波前沿接近 50 km 处, 中心强度增强至 45~50 dBz; 02:31 回波主体基本全部位于本场偏西、西南方向 50 km 范围内, 强度维持不变(图 9(d)); 02:55 后对流云逐渐减弱东移; 03:38 后回波主体强度基本降至 30 dBz 以下, 对应本场此次雷暴天气结束。

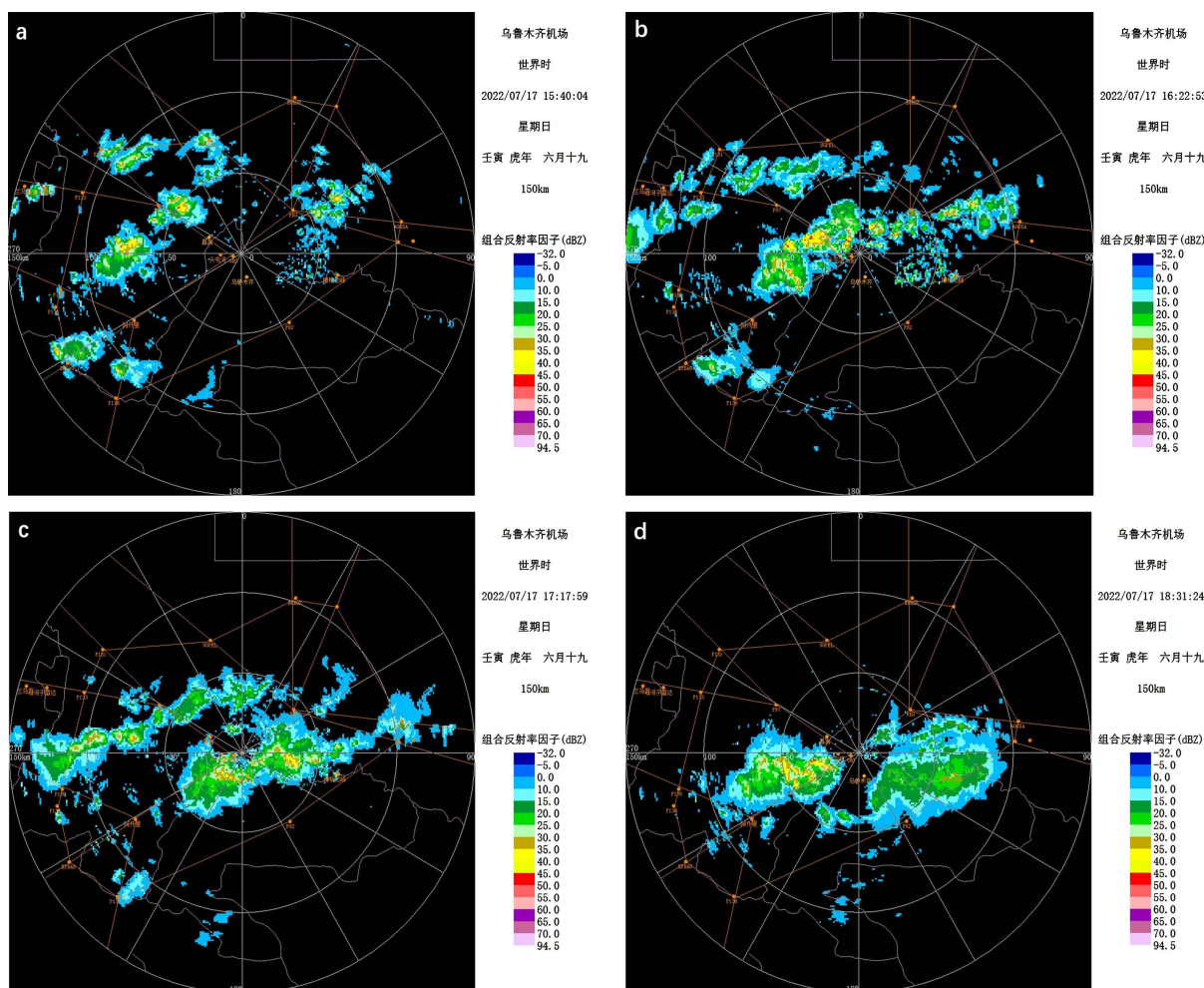


Figure 9. Doppler radar reflectivity factor (unit: dBz)

图 9. 多普勒雷达反射率因子(单位: dBz)

## 7. 结论

1) 此次雷暴天气大尺度环流背景为 500 hPa 上偏西气流, 多有短波分裂, 配合 700 hPa 天山北坡有明显的风速辐合带、乌鲁木齐机场南侧西北风和西南风的风向切变、850 hPa 上东南风和西南风的风向切变、以及地面不稳定低值区共同作用产生的。

2) 低涡底部充足水汽由强盛的偏西、西南急流输送至北疆西部以及天山北坡、雷暴前期在乌鲁木齐机场南侧存在强烈的水汽辐合, 配合垂直方向上高层辐散低层辐合的上升运动, 为雷暴天气的发生提供良好的水汽和动力条件。

3) 雷暴前期, 南疆西部有高能舌东北伸, 同时乌鲁木齐本场上空存在假相当位温等值线密集区, 垂直方向上为中层向下渗透冷空气, 低层相对高温高湿, 为雷暴天气的发生积累了一定的位势不稳定能量。

4) 此次影响乌鲁木齐机场的对流云团主要来自西北-偏西方向, 其在东南移时有新的孤立的对流单体激发, 尺度小, 但强度高。

## 参考文献

- [1] 李照荣, 康风琴, 马胜萍. 西北地区雷暴气候特征分析[J]. 灾害学, 2005, 20(2): 83-88.
- [2] 霍广永, 江远安, 史红政, 等. 1961-2010年新疆雷暴时空分布及其变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1156-1164.
- [3] 赵德龙, 曹兴, 万瑜. 近33年来乌鲁木齐地区雷暴时空变化特征及趋势预测分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(20): 165-168.
- [4] 卢冰, 史永强. 2012年7月中旬克拉玛依罕见强对流天气的数值模拟分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 948-956.
- [5] 曾勇, 杨莲梅, 张迎新. 中亚低涡背景下新疆阿克苏地区一次强对流天气形成的干侵入机制[J]. 干旱气象, 2018, 36(1): 34-43.
- [6] 刘雯, 李建刚, 杨莲梅. 2016年夏末南疆地区中尺度对流系统(MCS)活动特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(4): 9-16.
- [7] 刘惠云, 李进忠, 蒋军, 等. 乌鲁木齐市强降水雷达回波特征分析及预报研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 36(1): 34-43.
- [8] 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.
- [9] 魏勇, 彭军, 热苏力·阿布拉, 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(4): 771-777.