

# 乌鲁木齐机场2022年夏季1次短时雷雨大风天气分析

张亚莉, 郭俊舍, 李静轩, 张宇翔, 尹才虎

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: 2023年2月16日; 录用日期: 2023年3月21日; 发布日期: 2023年3月28日

## 摘要

本文利用FNL  $1^\circ \times 1^\circ$ 逐6小时的再分析资料、新疆加密自动站资料、常规气象观测资料及乌鲁木齐机场自动观测资料(AWOS)等,对乌鲁木齐机场2022年6月28日短时雷雨大风天气特征及成因进行分析,结果表明: 1) 此次强对流天气发生在乌拉尔槽底部前部,多短波分裂东移的有利环流背景下,机场雷暴大风呈现持续时间短、尺度小、移动速度快、起始突然等特点。2) 雷暴发生前,机场700 hPa高度存在垂直风切变,处于假相当位温能量锋区内,呈现“上干冷下暖湿”的温-湿廓线的垂直结构,具备动力和热力不稳定。3) 水汽来源于地中海地区,雷暴发生等地具有明显水汽通量带和水汽通量的辐合,具备丰富的水汽条件。4) 低层辐合高层辐散的高低空配置,低层西北急流与地形产生的强迫抬升作用,使机场具备强烈的上升运动。5) 机场低层850 hPa具有切变线,地面位于风向风速辐合区,有利于强对流的触发和维持。

## 关键词

乌鲁木齐机场, 雷雨大风, 假相当位温, 水汽通量, 触发机制

# Analysis of a Short-Term Thunderstorm and Gale Weather in Urumqi Airport in Summer of 2022

Yali Zhang, Junhan Guo, Jingxuan Li, Yuxiang Zhang, Caihu Yin

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

Received: Feb. 16<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, the characteristics and causes of short-term thunderstorm and gale weather in

文章引用: 张亚莉, 郭俊舍, 李静轩, 张宇翔, 尹才虎. 乌鲁木齐机场 2022 年夏季 1 次短时雷雨大风天气分析[J]. 自然科学, 2023, 11(2): 261-268. DOI: 10.12677/ojns.2023.112031

Urumqi Airport on June 28, 2022 are analyzed by using FNL  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data every 6 hours, Xinjiang encrypted automatic station data, conventional meteorological observation data and Urumqi Airport automatic observation data (AWOS). The results show that: 1) The strong convective weather occurred in the front of Ural trough bottom, and under the favorable circulation background of multi-short-wave split moving eastward, the thunderstorm and gale at the airport showed the characteristics of short duration, small scale, fast moving speed and sudden start. 2) Before the thunderstorm, there was vertical wind shear at the height of 700 hPa at the airport, which was located in the pseudo-equivalent potential temperature energy front, showing a vertical structure of temperature-humidity profile of “dry and cold at the top, warm and humid at the bottom”, and was dynamically and thermally unstable. 3) Water vapor originates from the Mediterranean region. Thunderstorms and other places have obvious convergence of water vapor flux bands and water vapor fluxes, and have abundant water vapor conditions. 4) Lower-level convergence and upper-level divergence, and the forced uplift of lower-level northwest jet and topography make the airport have strong upward movement. 5) The airport has a shear line at 850 hPa at the lower level, and the ground is located in the convergence area of wind direction and wind speed, which is beneficial to trigger and maintain strong convection.

## Keywords

Urumqi Airport, Thunderstorms and Strong Winds, Pseudo-Equivalent Potential Temperature, Water Vapor Flux, Trigger Mechanism

Copyright © 2023 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

雷暴大风是一种强烈的对流性天气，是由强烈发展的积雨云产生的，具有季节性强，短时大风强降水，尺度小、持续时间短、移动速度快、局地性强等特点，能带来严重的自然灾害，给社会经济和人民生活带来巨大的损失[1]。近年来，随着强对流灾害频发，国内外对强对流的天气研究越来越多，研究表明，强雷暴大风主要发生在中国中东部地区，从3月开始由南向北移[2]。中国大范围雷暴大风事件(Derechos)具有季节变化，春季到夏季由北向南移，具有明显的日变化，多开始于午后到前半夜[3]。张琳娜等[4]利用模拟资料，对雷暴大风过程中径向动量和质量动能进行收支分析，得出雷暴过程中对流层中低层动量和动能通量输送的特征。在中尺度环境物理量特征方面的诸多研究表明，中尺度辐合切变线、上干冷下暖湿的温-湿廓线垂直结构、强的深层垂直风切变、高空动量下传等条件是雷暴的发展和维持的主要原因[5][6][7]。

新疆学者对疆内强对流研究中对雷暴大风和冰雹的统计和诊断分析居多。研究表明，新疆雷暴分布地域性强，山区多于平原，北部多于西部，西部多于东部，天山西段及其两侧呈现带状分布[8]。庄晓翠等[9]和赵俊荣[10]对北疆的强对流天气研究表明，强对流天气是在大尺度环流异常的形势下，高、中、低层多中系统相互作用的结果。赵俊荣[11]和魏勇等[12]对天山北坡的冰雹天气分析表明，多普勒天气雷达能较好地监测出冰雹等强对流天气，钩状回波、“V”型缺口及回波墙等特征回波的出现对强对流天气具有较好的指示意义。刘雯等[13]对南疆中尺度对流天气分析得出，南疆夏季中尺度对流系统活动频繁，天山南坡和昆仑山北坡是MCS活跃区。

乌鲁木齐地区雷暴平均活动期在4~9月，集中在5~8月，7月最多[14]，是乌鲁木齐机场夏季航空运行的主要威胁之一。短波槽东移、逆温层的存在、近地层高温高湿、急流出口区右侧辐散区、低层切变

线、地面能量锋、地面辐合线等是导致乌鲁木齐机场强雷暴触发的主要条件[15][16][17]。由于新疆雷暴具有时空尺度小、突发性强的特点,所以夏季的雷暴一直都是乌鲁木齐机场预报的重点和难点,本文通过对乌鲁木齐机场一次雷暴大风天气进行了诊断分析,以期能更深入地认识雷暴大风天气的特点和成因,为今后雷暴的预报提供一定的参考。

## 2. 资料与方法

本文使用的资料包括 2023 年 6 月 28 日(北京时,以下同)的 FNL  $1^\circ \times 1^\circ$  逐 6 小时的再分析资料、新疆加密自动站资料、常规气象观测资料、及乌鲁木齐机场自动观测资料(AWOS)等,对 28 日机场强对流天气过程的特点、环流形势演变特点及雷暴三要素等方面进行初步的诊断分析。

## 3. 天气实况及要素特征

2022 年 6 月 28 日,受乌拉尔槽底部偏西、西南气流影响,北疆西部、天山山区及其北坡出现大范围的强对流天气。下午-傍晚,伊犁河谷、北疆沿天山一带及天山山区西段出现强对流性天气,其中,14:00~15:00、17:06~19:00 克拉玛依机场出现雷暴,14:06~17:23 博乐机场出现弱雷雨,17:40~18:18 伊宁机场出现弱雷雨,18:47~20:00 石河子机场出现弱雷雨。傍晚~夜间,天山山区中段及天山北坡、南疆西部地区出现对流性天气,其中,20:32~23:20 那拉提机场出现弱雷雨,20:34~24:00 乌鲁木齐机场(以下简称“机场”)出现雷雨大风短时伴尘暴,23:05~24:00 喀什机场出现雷暴,23:27~24:00 吐鲁番机场出现西北风  $320^\circ$ ,平均风  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,阵风  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

28 日 20:34~20:46 机场出现尘暴天气,主导能见度 700~900 m,20:46~22:00 出现弱雷雨伴扬沙,22:00~24:00 出现小阵雨伴 CB 天气,过程降水量 1.1 mm。图 1 为机场跑道两端(R07 和 R25)的风向风速演变图,由图可见,20:30~22:30 出现偏西风  $5\sim 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,阵风  $10\sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,大风时段集中在 20:39~21:30,平均风速  $12\sim 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,阵风最大达  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此次雷暴大风天气造成机场出港延误 20 架次(延误超两小时 1 架次),备降 7 架次,返航 1 架次,对航空运行造成了较大的影响。

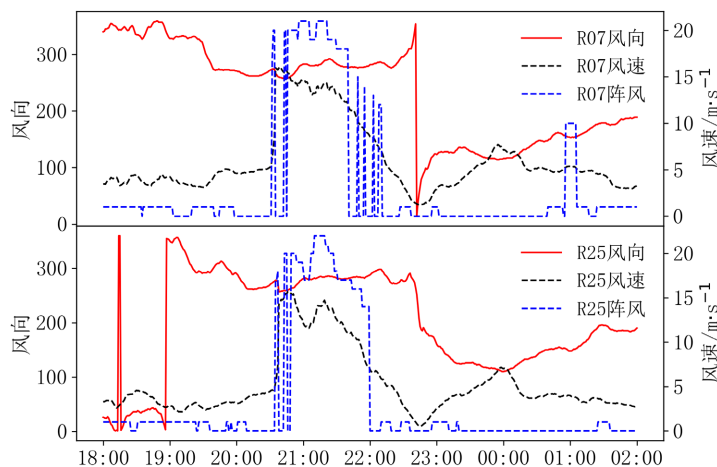


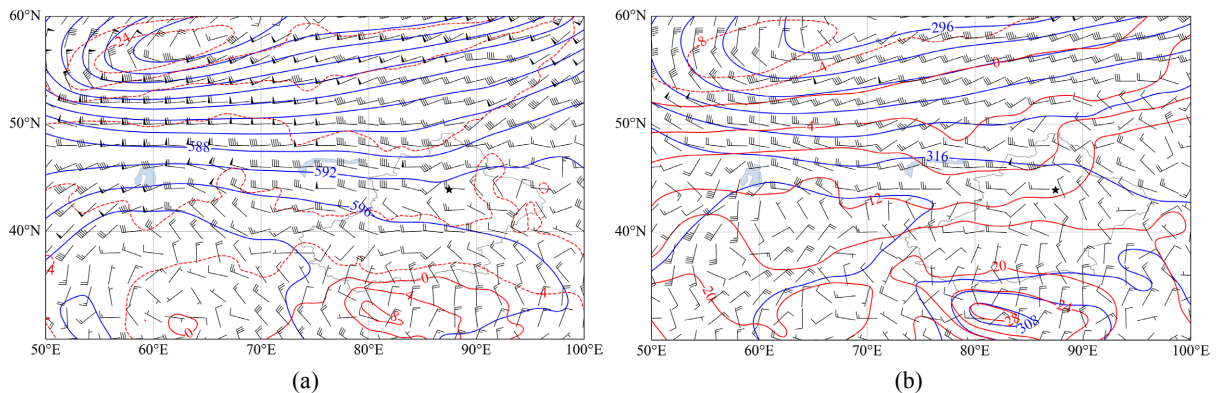
Figure 1. Time sequence diagram of wind direction and wind speed at both ends of airport runway  
图 1. 机场跑道两端风向风速时序图

## 4. 环流形势演变

300 hPa 上西西伯利亚存在闭合的低压中心,伊朗-青藏高原受伊朗高压控制,新疆地区受偏西气流控制。28 日,西西伯利亚低压加强东移南压,伊朗高压逐渐西退,北疆地区受扰动侵袭明显。

500 hPa, 28日, 欧亚地区中高纬为“两脊一槽”的环流形势, 乌拉尔~西西伯利亚为宽广的槽区, 低值系统配合有 $-20^{\circ}\text{C}$ 的冷中心。温度槽落后于高度槽, 槽不断发展东移, 新疆位于槽底前部, 多短波活动。14~20时, 北疆西部~天山山区西段、北疆盆地~天山山区中段及东疆~天山山区东段有明显短波活动。20时, 北疆沿天山一带冷平流明显, 短波槽移动至石河子附近, 为强对流的发生提供动力条件(图 2(a))。

700 hPa上, 28日, 新疆多短波活动, 等高线与等温线近乎垂直, 冷平流明显。20时, 乌鲁木齐处于西北风和偏南风的切变线上, 冷暖空气交汇, 为强对流的发生提供不稳定条件(图 2(b))。20时, 850~925 hPa上, 北疆沿天山一带为西北急流控制, 最大风速达 $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 乌鲁木齐附近为风向风速辐合区, 加上地形的强迫抬升作用, 利于上升运动的增强。



**Figure 2.** Circulation pattern of 500 hPa (a) and 700 hPa (b) at 20:00 (height (blue line: Dagpm), temperature (red line:  $^{\circ}\text{C}$ ), the  $\star$  in the picture is the location of the airport (the same as below))

**图 2.** 20时 500 hPa (a)和 700 hPa (b)环流形势图(高度(蓝线: dagpm)、温度(红线:  $^{\circ}\text{C}$ ), 图中 $\star$ 为机场位置(以下同))

地面上, 冷高压中心位于乌拉尔地区, 前部不断分裂小股冷空气东移南下入侵新疆。14时, 新疆偏西地区为东南~西北向的弱高压控制, 新疆偏东地区为低压后部, 北疆西部有冷空气入侵, 西北风逐渐增大, 最大风速 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。3小时正变压中心位于巴湖~北疆西部, 博乐~塔城位于弱正变压前沿。20时, 冷高压进一步东移, 气压梯度在新疆中部加强, 北疆沿天山一带西北风增大, 最大风速位于乌鲁木齐附近, 达 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。正变压东移至伊犁河谷~天山山区西段, 中心强度为 $+2\text{ hpa}$ , 天山山区中段及其北坡位于正变压前沿。

## 5. 成因诊断分析

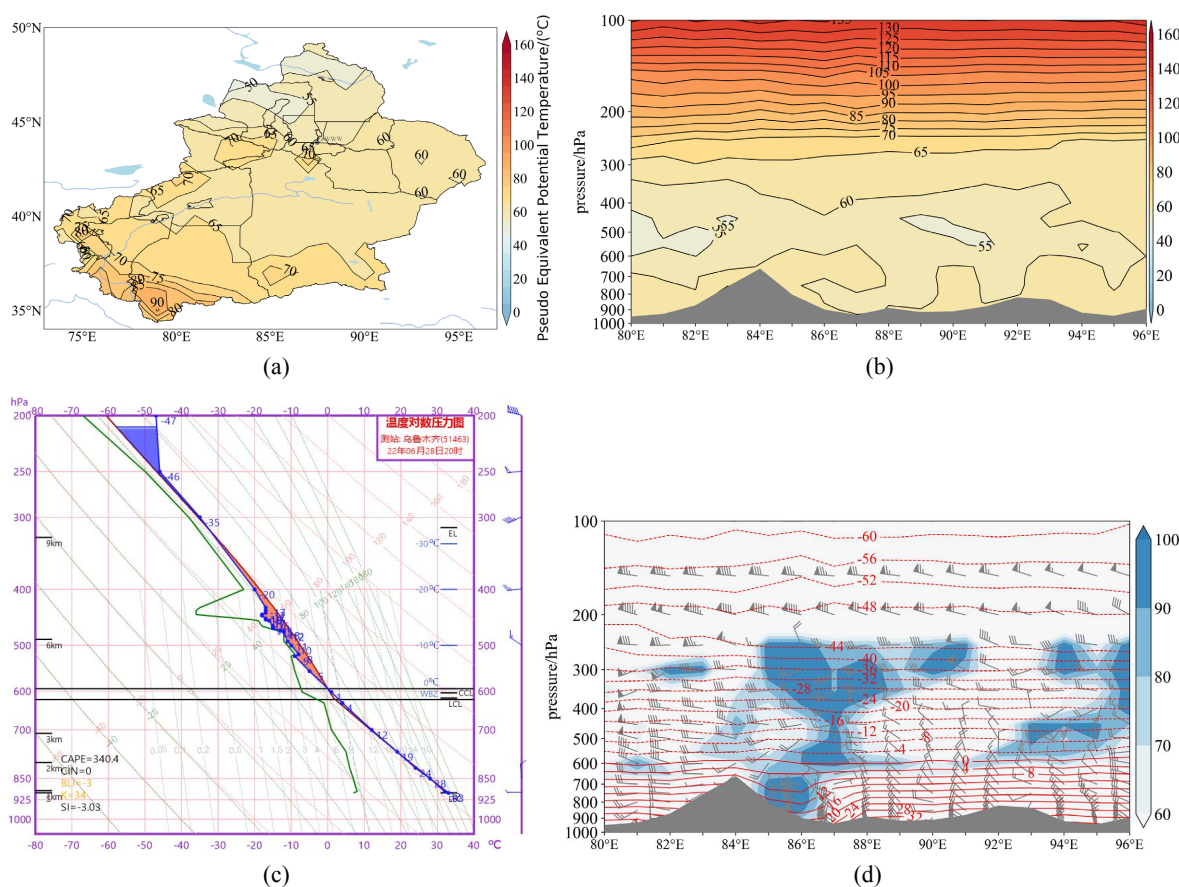
### 5.1. 稳定度分析

分析假相当位温可知, 28日14时, 850 hPa高能舌从伊犁河谷东伸至天山山区中段, 中心位于天山山区西段, 强度为 $70^{\circ}\text{C}$ 。假相当位温综合反映大气的温湿状况, 通常假相当位温随高度增大, 若其随高度减小, 表明大气处于不稳定状态[18]。88°E~91°E的空间剖面上, 300 hPa下假相当位温是随着高度增加而减弱的, 低值中心位于伊犁河谷上空500 hPa, 中心值为 $50^{\circ}\text{C}$ 。500 hPa与低层850 hPa的假相当位温差为 $-5^{\circ}\text{C}$ ~ $10^{\circ}\text{C}$ , 伊犁河谷、天山北坡大气处于不稳定状态, 而午后~傍晚的强对流天气均出现在上述区域内。20时, 高能舌减弱消散, 南疆西部、天山山区西段~中段的部分区域出现高能中心, 乌鲁木齐西南山区出现强度达 $70^{\circ}\text{C}$ 的高能中心, 乌鲁木齐处于假相对位温相对密集处的能量锋区内(图 3(a))。80°E~83°E、87°E~91°E的500 hPa上存在强度为 $55^{\circ}\text{C}$ 的低值中心, 低层高温高湿的不稳定能量与中层向下渗透的冷空气导致中低层位势不稳定(图 3(b))。

分析k指数和对流有效位能(CAPE)值可知, 14时, 北疆大部具有热力不稳定, 较强不稳定区集中在北

疆北部、西部及天山山区西段,上述地区的  $k$  指数中心强度达  $35^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{CAPE}$  值中心强度达  $400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上。20 时,北疆大部的  $\text{CAPE}$  值明显减弱,不稳定能量明显得到释放。伊犁河谷、天山山区及其北坡为热力不稳定区,大于  $400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  的  $\text{CAPE}$  值位于博乐~精河,大于  $40^{\circ}\text{C}$  的  $k$  指数位于石河子和乌鲁木齐附近,为雷暴的发生提供不稳定层结条件。由 51463 站的温度对数压力图可见,正不稳定能量位于中层  $600\sim 300 \text{ hPa}$ ,  $\text{CAPE}$  值为  $340 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 对流抑制能量(CIN)为  $0 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $K$  指数为  $34^{\circ}\text{C}$ , 沙氏指数为  $-3.03^{\circ}\text{C}$  (图 3(c)), 较以往经验表明,所有指数均有利于乌鲁木齐雷暴的发生。

图 3(d)为沿  $44^{\circ}\text{N}$  作风、温度及相对湿度的纬向空间垂直剖面图,由图可知,20 时,机场低空冷空气侵入,  $700 \text{ hPa}$  以下转为西北急流,  $700 \text{ hPa}$  高度存在偏西风 and 偏东风的垂直风切变,为机场雷暴提供动力不稳定条件。在  $87^{\circ}\sim 88^{\circ}\text{E}$  剖面上  $600\sim 300 \text{ hPa}$  为大湿区,相对湿度大于  $90\%$ ,  $600 \text{ hPa}$  下为干区,低空  $600 \text{ hPa}$  以下风随高度顺转存在暖平流,高空  $600 \text{ hPa}$  以上风随高度逆转存在冷平流,机场上空呈现“下暖湿上干冷”的温-湿廓线垂直结构,此时机场大气为强不稳定状态。



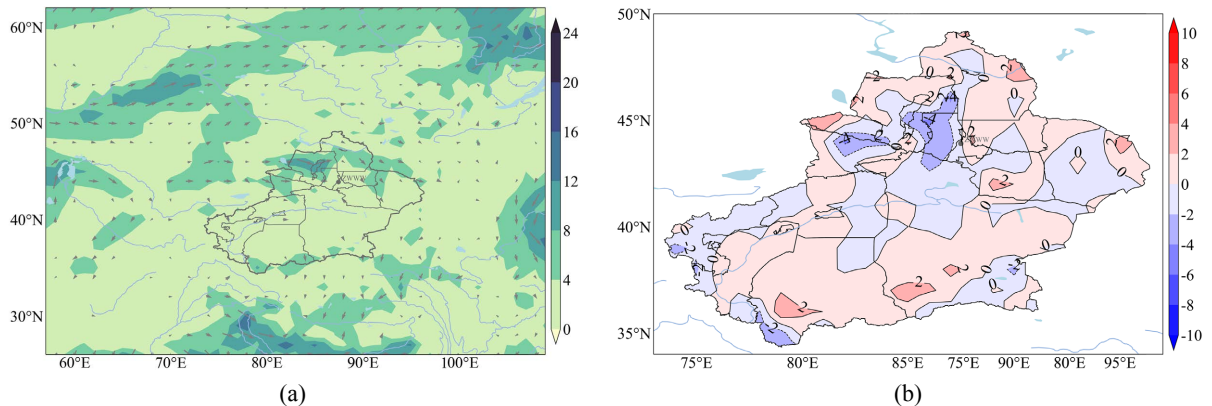
**Figure 3.** Pseudo-equivalent potential temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) of 850 hPa at 20:00 (a), vertical zonal section along  $44^{\circ}\text{N}$  pseudo-equivalent potential temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) (b), logarithmic diagram of temperature and pressure at station 51463 (c) and vertical zonal section along  $44^{\circ}\text{N}$  wind field, temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and humidity (unit: %) (d)

图 3. 20 时 850 hPa 假相当位温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )平面图(a), 沿  $44^{\circ}\text{N}$  作假相当位温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )的纬向空间垂直剖面图(b), 51463 站的温度压力对数图(c)及沿  $44^{\circ}\text{N}$  作风场、温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和湿度(单位: %)的纬向空间垂直剖面图(d)

## 5.2. 水汽条件分析

$700 \text{ hPa}$  上, 乌拉尔槽前具有强度为  $4\sim 8 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的水汽通量带, 偏西气流和西南急流接水源源不断将地中海地区的水汽输送至新疆地区。14 时, 北疆大部水汽充沛, 北疆西部、天山山区西段有

中心强度为  $4\sim 8 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的水汽通量大值区, 配合伊犁河谷、北疆沿天山一带及天山山区西段中心强度为  $-2\sim -1 \times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的水汽通量散度, 有利于水汽在克拉玛依、博乐等地汇聚, 促进雷暴发生。20 时, 北疆水汽有所耗散, 水汽通量带范围减小至北疆西部~天山山区中段, 强度略加强至  $8\sim 12 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  (图 4(a)), 配合那拉提、天山山区中段中心强度大于  $-4 \times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的水汽通量散度(图 4(b)), 为乌鲁木齐、那拉提等地雷暴发生提供充足的水汽条件。



**Figure 4.** Water vapor flux (unit:  $\times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (a) and water vapor flux divergence (b) (unit:  $\times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of 700 hPa at 20:00

**图 4.** 20 时 700 hPa 水汽通量(单位:  $\times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (a)和水汽通量散度(b) (单位:  $\times 10^{-9} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 5.3. 触发机制和抬升条件分析

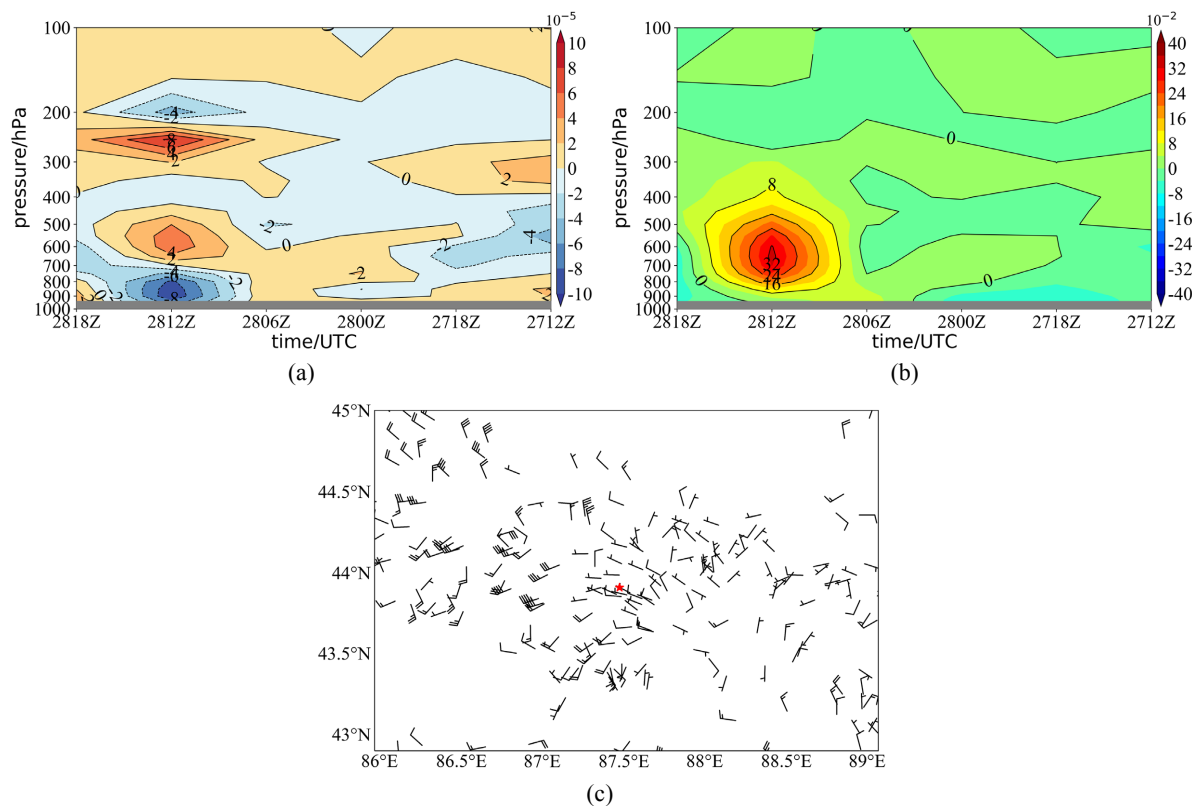
由垂直速度可知, 28 日 08 时, 垂直速度大值区主要集中在北疆盆地、北疆沿天山一带及北疆东部, 中心强度最大为  $8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 位于北疆东部的富蕴和北疆沿天山一带的乌鲁木齐附近。14 时, 随着短波东移, 北疆西部、天山山区、北疆沿天山一带的上升运动明显加强, 垂直速度中心位于天山山区西段的低层 925~850 hPa, 中心强度增强至  $12 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。20 时, 北疆西部、天山山区西段上升运动逐渐减弱至  $4\sim 8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 北疆盆地中部~乌鲁木齐的 925~500 hPa 具有较强垂直上升运动, 垂直速度中心强度位于中高层, 强度大于  $40 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 为乌鲁木齐、吐鲁番等地的强对流天气提供动力条件。

由图 5 可知, 28 日 14 时, 机场上空低层辐合高层辐散的高低空配置逐渐形成, 上升运动逐渐加强。20 时, 机场上空低层 925~850 hPa 出现辐合中心, 高层 600~500 hPa 出现辐散中心, 辐合中心强度为  $-8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 辐散中心强度为  $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 低空辐合高空辐散配置达到最强(图 5(a))。此时, 冷空气渗透, 机场低层 700 hPa 以下转为西北大风, 最大风速达  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 与地形产生的强迫抬升作用有利于上升运动的加强。垂直速度中心位于 850~700 hPa, 中心强度为  $32 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (图 5(b)), 机场低空出现强烈的上升运动, 为雷暴触发提供强动力条件。此时低层 850 hPa 和 925 hPa 上乌鲁木齐处于西北风和西南风的切变线上, 地面上位于风向风速辐合区的前沿(图 5(c)), 有利于机场强对流的触发和维持。

## 6. 结束语

本文对乌鲁木齐机场 2022 年 6 月 28 日夜间出现的短时雷暴大风天气的特征及成因进行初步的分析, 得出以下结论:

1) 此次强对流天气发生在乌拉尔槽底前部, 多短波分裂东移影响新疆的有利环流背景下, 呈现范围广、局地性强的特点。28 日午后 - 夜间北疆西部、天山山区及其两侧出现大范围的短时雷雨大风等对流性天气, 对航空运行产生较大影响。



**Figure 5.** Time profile of horizontal divergence (a) (unit:  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and vertical velocity (b) (unit:  $\times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of airport and wind field of ground encryption automatic station at 20:00 (c)

**图 5.** 机场水平散度(a)(单位:  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、垂直速度(b)(单位:  $\times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的时间剖面图及 20 时地面加密自动站风场(c)

2) 雷暴发生前, 700 hPa 高度存在垂直风切变, 机场处于假相当位温能量锋区内, 垂直结构上呈现“上干冷下暖湿”的温-湿廓线, 机场大气层具备动力和热力不稳定。

3) 700 hPa 偏西急流和西南急流接力源源不断将地中海地区水汽输送至新疆地区, 雷暴发生等地具有明显水汽通量带和水汽通量的辐合, 有利于水汽汇聚, 为雷暴提供充足水汽条件。

4) 雷暴发生前, 低层辐合高层辐散的高低空配置逐渐建立, 雷暴发生时, 这种配置达到最强, 低层 700 hPa 以下转为西北急流, 与地形产生的强迫抬升作用, 机场出现强烈的上升运动。低层 850 的切变线和地面位于风向风速辐合区的存在, 有利于机场强对流的触发和维持。

## 参考文献

- [1] 高晓梅, 孙雪峰, 秦瑜蓬, 等. 山东一次强对流天气的环境条件和对流风暴特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 447-455.
- [2] 费海燕, 王秀明, 周小刚, 等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521.
- [3] 陈晓欣, 俞小鼎, 王秀明. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究: 时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报, 2022, 80(1): 67-81.
- [4] 张琳娜, 冉令坤, 李娜, 等. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 2018, 42(1): 178-191.
- [5] 王秀明, 周小刚, 俞小鼎. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 2013, 71(5): 839-852.
- [6] 郑艳, 俞小鼎, 蔡亲波, 等. “4-11”海南致灾雷暴大风环境场与多普勒雷达回波特征分析[J]. 热带气象学报, 2017, 33(6): 850-860.

- [7] 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.
- [8] 霍广勇, 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.
- [9] 庄晓翠, 屈信军. 北疆北部一次强对流天气爆发机制的综合诊断分析[J]. 新疆气象, 2005(S1): 14-18.
- [10] 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.
- [11] 赵俊荣. 天山北坡一次致灾冰雹的多普勒雷达回波特征分析[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(3): 14-18.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 郑玉萍, 郭建林. 乌鲁木齐地区雷暴的气候特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(1): 27-30.
- [15] 胡建军, 张利平, 王春红. 乌鲁木齐机场一次小尺度雷暴天气分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(3): 26-30.
- [16] 黄海波, 米永胜, 郑永光. 乌鲁木齐国际机场一次强雷暴天气分析[J]. 气象, 2006(7): 58-63+129.
- [17] 张利平. 乌鲁木齐国际机场一次强雷暴天气分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2007(6): 12-16.
- [18] 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.