

乌鲁木齐机场春季一次雷雨天气的中尺度分析

曼吾拉·卡德尔

新疆机场(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年10月9日; 录用日期: 2022年11月10日; 发布日期: 2022年11月18日

摘要

2022年5月27日乌鲁木齐机场出现了一次中雷雨天气过程, 对机场和终端区多个航班造成较强影响。本文利用常规观测资料、机场自动观测资料、NCEP再分析资料、微波辐射计资料、多普勒雷达资料对此次强对流天气进行诊断分析, 初步探讨此次强对流天气的形成机制。结果表明: 1) 强对流发生前夕, 中低层存在切变线和水平风的垂直切变。2) 中低层的对流不稳定为强对流过程提供了不稳定条件。3) 午后云量的增加使中层水汽不断汇集, 为雷暴的发生提供水汽条件。4) 从各类指数分布看, 乌鲁木齐周边累积了大量不稳定能量, 在大尺度强迫作用下克服了对流抑制而产生了对流。5) 微波辐射计资料中的液态水含量针对此次雷雨有较好的对应。

关键词

雷雨, CAPE, K指数, 水汽通量

Mesoscale Analysis of Thunderstorm Weather at Urumqi Airport in Spring

Mavlan Kader

Xinjiang Airport Group Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: Oct. 9th, 2022; accepted: Nov. 10th, 2022; published: Nov. 18th, 2022

Abstract

On May 27, 2022, a moderate thunderstorm occurred at Urumqi Airport, which had a strong impact on several flights at the airport and terminal area. In this paper, we make a diagnosis and analysis of the severe convective weather by using routine data, AWOS data, NCEP reanalysis data, the microwave radiometer data and the Doppler radar data, discussing the formation mechanism of the severe convective weather. The results show that: 1) Before the occurrence of strong convection, there are shear lines and vertical shear of horizontal wind in the middle and low levels. 2) The convective instability in the middle and low layers provides unstable conditions for the strong

convective process. 3) The increase of cloud cover in the afternoon makes the water vapor in the middle layer collect continuously, which provides the water vapor conditions for the occurrence of thunderstorms. 4) From the perspective of various exponential distributions, a large amount of unstable energy has accumulated around Urumqi, which overcomes the convective inhibition under the action of large-scale forcing and generates convection. 5) The liquid water content in microwave radiometer data has a good correspondence to this thunderstorm.

Keywords

Thunderstorm, CAPE, K-Index, Water Vapor Flux

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

对于航空飞行而言,雷雨是非常危险的天气,穿越任何雷暴都有可能造成飞行事故甚至机毁人亡的后果。飞行中遇到雷雨时,机长必须正确及时地使用机载气象雷达,判明雷雨的强度、性质、范围,以及移动方向、云底和云顶的高度,根据季节、飞行区域的不同特点,分析情况尽早决定绕飞或返航备降,并将所做出的决定立即报告空中交通管制部门并获得许可。乌鲁木齐机场气象台作为新疆地区气象中心,为空中交通管制和航空公司签派部门提供雷雨预警预报,间接为机组提供雷雨绕行服务。

雷雨是影响新疆民航夏季主要的灾害性天气之一,常常伴有大风、沙尘等现象。春夏季乌鲁木齐机场及终端区西南方向天山山区上空,午后至夜间易出现对流云及与之相伴的阵性风雨或雷暴等恶劣天气,导致航空器大面积绕飞[1]。乌鲁木齐国际机场地处天山北坡,夏季机场及其终端区内多发强对流,对机场的航班起降、终端区内进出港航路关键点有严重的影响,气象部门的从业人员对该地发生的强对流天气也做了大量的研究。赵玉洁等[2]对天津一次强对流过程的分析表明,低层比湿、水汽通量、相当位温 and 散度等物理量场在时间、空间上的配置与强对流的发生发展具有很好的对应关系。朱平[3]发现反射率因子质心的降低对雷暴大风的预报具有一定的指示意义。朱雯娜[4]等发现由于北疆沿天山一带中高层槽后干冷空气叠加在低层暖湿空气之上,从而具备有利的热力和动力条件导致乌鲁木齐机场雷雨发生。中尺度天气分析方法可以预测中小尺度强天气落区,但是中尺度数值预报模式缺乏有效的强对流天气指导产品。杜安妮[5]等通过模拟高分辨率的再分析资料发现,在大尺度强迫抬升和低层切变辐合共同作用有利于触发雷雨大风,地面中尺度辐合线促使对流云团进一步发展和维持。还有学者通过对地基微波辐射计资料、多普勒天气雷达资料、风廓线雷达资料等[6]-[11]观测资料分析,研究雷雨生消过程中各物理参数的变化规律。

中尺度气象学是甚短期预报和临近预报的理论基础。中尺度是指时间尺度和空间尺度比常规探空网的时空密度小,但比积云单体的生命期及空间尺度大得多的一种尺度,其空间尺度为 10^5 m,时间尺度为 10^4 s [12]。

本文旨在通过多种探测资料和数值模拟对 2022 年 5 月 27 日乌鲁木齐机场的雷雨天气过程进行中尺度分析,验证乌鲁木齐机场现有探测资料的可用性,以期加深对强对流天气中尺度系统的理解,为这类强对流天气的预报预警提供更多的科学依据和技术支撑,为空中交通管制部门、航空公司提供雷雨绕行服务。

2. 资料与方法

本文以常规观测资料、加密自动站资料、机场自动观测资料(下文简称 AWOS 资料)、METAR 报文、NCEP 再分析资料、多普勒雷达资料、激光雷达资料、微波辐射计资料为基础,利用天气学、中尺度气象学、大气物理等原理和方法,从环流条件、高低空系统配置、水汽条件、动力条件、层结条件等物理量场的特征,分析触发此次强对流天气的中尺度大气运动的特征,剖析乌鲁木齐机场强对流的中尺度系统的发展与变化。

3. 时空分布特征

3.1. 天气实况概述

受西北气流下的弱短波扰动影响,北疆西部、天山山区及其两侧、东疆地区出现了大范围的强对流天气。根据乌鲁木齐机场自动观测资料显示,2022年5月27日午后本场云量逐渐增加,并出现1~2分量的浓积云、对流云。乌鲁木齐机场于当日18:06~18:12出现中阵雨、短时弱雷雨,19:14~19:30再次出现中阵雨、中雷雨转弱雷雨,过程降水量2.8毫米。其中,12:30~18:14出现西北风5~8 m/s,阵风11~13 m/s,18:17出现西北风13 m/s。博乐机场15:38~17:00出现雷暴、弱雷雨;伊宁机场16:20~17:00出现偏东风11~12 m/s;哈密机场17:00出现偏北风13 m/s,阵风19 m/s;吐鲁番机场17:00~21:00出现偏西风10~14 m/s,阵风20 m/s;库尔勒机场22:30出现雷暴天气。乌鲁木齐因本场及终端区雷雨天气原因进出港延误多个架次。

3.2. 环流特征

强对流天气的生消以及加强都是在一定的大尺度环流背景条件下发生的[12],如图1(a)所示,2022年5月27日08时,强对流发生前夕500 hPa上,伊朗高压位于南亚北部,中亚冷槽稳定维持在巴尔喀什湖以西。中亚冷槽前部分裂短波,携带冷空气迅速影响天山山区。北疆为脊前西北气流,多短波活动,等温线与等高线垂直,冷平流明显,西北风风速增大,引导西伯利亚冷空气南下影响北疆区域,脊前短波槽自北疆西部一带快速东移。如图1(b)所示,2022年5月27日14时,短波槽东移至北疆东部至乌鲁木齐一线,冷暖空气在乌鲁木齐地区汇合,为此次机场强对流天气的发生提供不稳定条件。

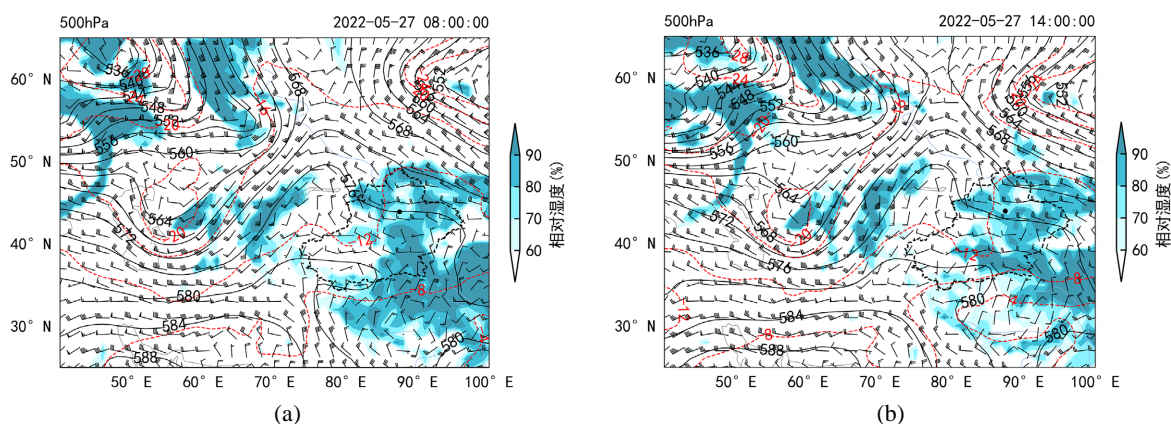


Figure 1. (a) 500 hPa synoptic situation at 08:00 on May 27; (b) 500 hPa synoptic situation at 14:00 on May 27

图 1. (a) 5月27日08时500 hPa高空形势; (b) 5月27日14时500 hPa高空形势

如图2(a)和图2(b)所示,2022年5月27日14时在700 hPa和850 hPa上,切变线位于乌鲁木齐地区附近,在乌鲁木齐地区附近有明显的风向风速辐合区,为强对流及雷暴大风提供了有利的动力条件。700

hPa 上北疆沿天山一带有偏西低空急流；850 hPa 上暖舌西伸至南疆盆地地区，湿舌位于东天山和北疆东部一带，为乌鲁木齐机场强对流天气的发展和维持提供了动力抬升和水汽条件。北疆大部具备热力不稳定条件，午后伊犁河谷 - 天山山区一线 850~500 hPa 温差增加 2℃ 左右，热力不稳定加强。

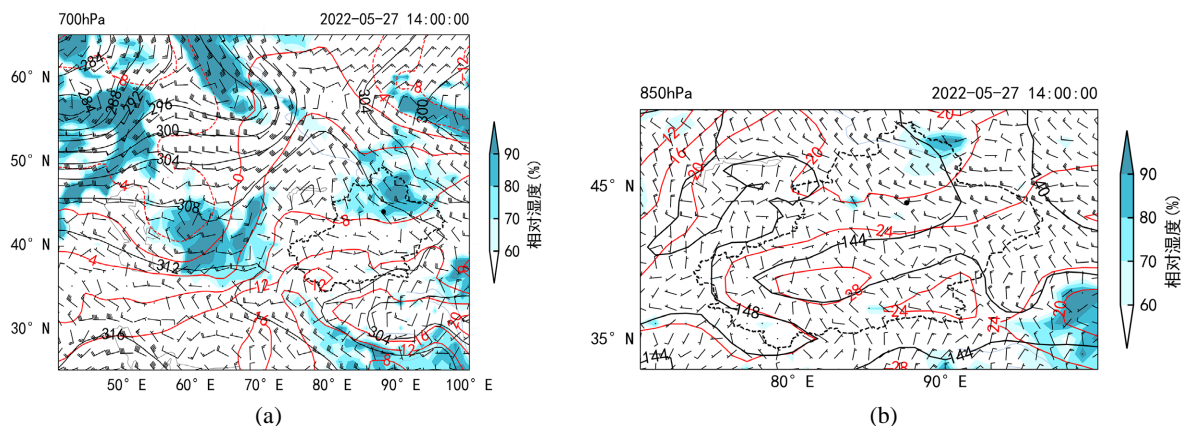


Figure 2. (a) 700 hPa synoptic situation at 14:00 on May 27; (b) 850 hPa synoptic situation at 14:00 on May 27
图 2. (a) 5 月 27 日 14 时 700 hPa 高空形势；(b) 5 月 27 日 14 时 850 hPa 高空形势

如图 3(a) 所示，在 2022 年 5 月 27 日 02 时地面图上，北疆位于里咸海高压前部，高压前部有小股弱冷空气入侵影响新疆西部地区。北疆西部有西北风和偏东风的弱辐合区。如图 3(b) 所示，在 2022 年 5 月 27 日 14 时地面图上，乌鲁木齐以北的北疆盆地为偏北风，乌鲁木齐与北疆盆地交界处有地面辐合线生成，风场结构为乌鲁木齐机场的雷暴提供了有利的触发机制。5 月 27 日 12 时以后乌鲁木齐机场地面最高气温均在 30℃ 以上，有利的气温为本次强对流天气的发生提供较好的能量条件。

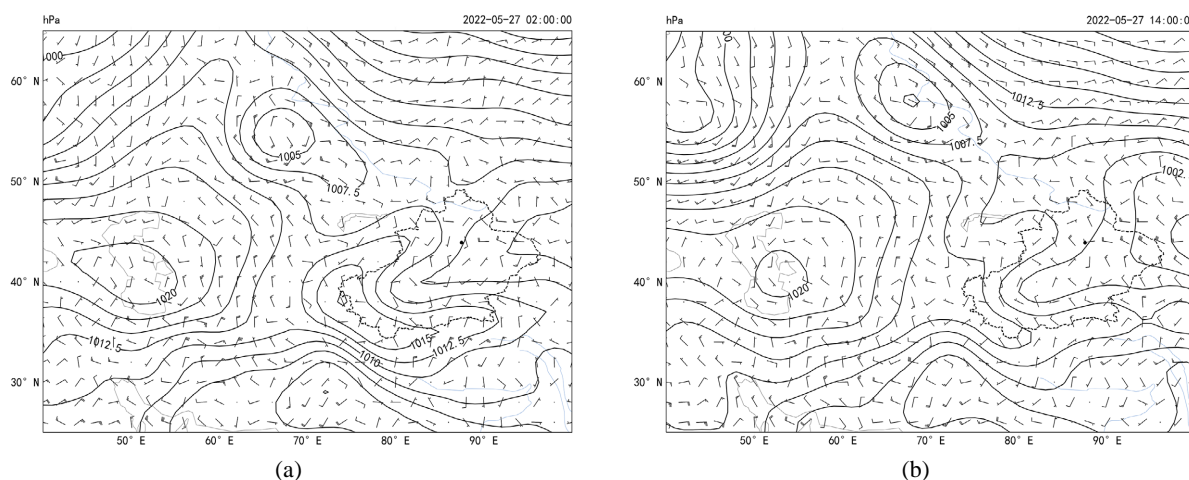


Figure 3. (a) Prebaratic chart at 02:00 on May 27; (b) Prebaratic chart at 14:00 on May 27
图 3. (a) 5 月 27 日 02 时地面形势；(b) 5 月 27 日 14 时地面形势

4. AWOS 温湿条件分析

如图 4 所示，第一段弱雷雨发生前期，相对湿度略有上升，07 方向相对湿度上升近 15%，07 号与 25 号跑道温度均下降 2℃~3℃。第二段弱雷雨发生前期要素变化比第一次剧烈，07 方向相对湿度由 30% 升至 50%，25 方向相对湿度由 30% 升至 60%，07 号与 25 号跑道温度下降超过 5℃。

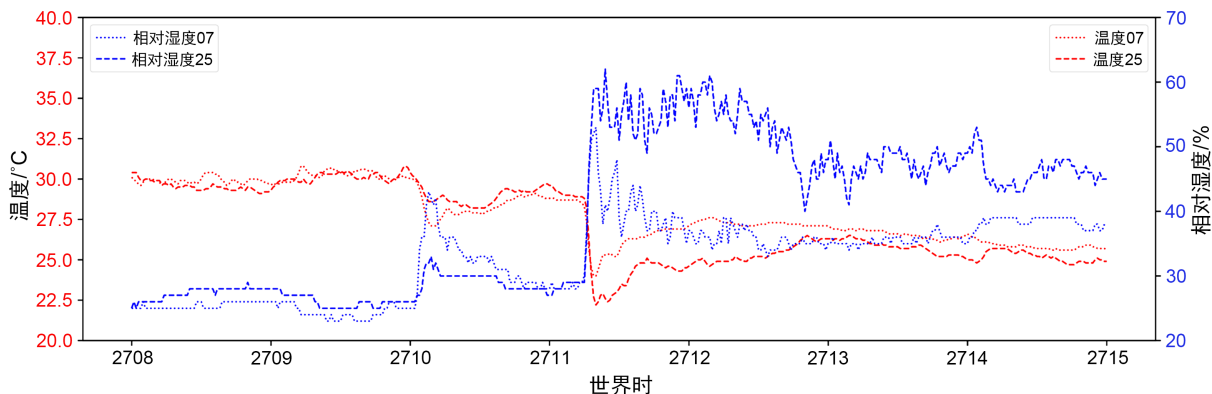


Figure 4. Chart of temperature and relative humidity of Urumqi Airport runway
图 4. 乌鲁木齐机场跑道温度和相对湿度图

弱雷雨来临时，25 方向出现短暂 11 m/s 阵风，其余无明显变化。第二段中雷雨发生前期，07 及 25 方向风速迅速加大，25 方向风速增幅达到 6 m/s，07 及 25 方向均出现 9~16 m/s 的阵风；雷雨发生时，风速迅速减小，25 风向顺时针旋转，从西北风转为偏北风，偏北风转为东南风。07 风向从西北风转为北风，北风转为西北风，西北风转为偏西风，风速减小。修正海平面气压在第二段雷雨期间出现升压，升幅大于 1 hPa。由 0% 升至 50%，25 方向相对湿度由 30% 升至 60%，07 号与 25 号跑道温度下降超过 5℃。

5. 物理量场分析

5.1. 水汽条件分析

5.1.1. 比湿和水汽时间剖面分析

雷雨发生时，常伴有强的水汽输送和强烈的水汽辐合。如图 5(a) 所示，通过分析 2022 年 5 月 27 日 20 时全疆比湿图可以看到，700 hPa 比湿场大值区位于乌鲁木齐地区、北疆北部、东疆，乌鲁木齐机场处于一明显的湿舌区域内，比湿达到了 $6.5\sim 7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，850 hPa 乌鲁木齐地区比湿达到 $7\sim 9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。如图 5(b) 乌鲁木齐机场水汽时间剖面图所示，2022 年 5 月 27 日 14 时后随着云量逐渐增多，水汽也不断汇集。水汽主要集中在中层 700~500 hPa，相对湿度达 90% 以上，有利的相对湿度为雷暴的发生提供了水汽条件。850 hPa 以下，14~20 时，风向由西北风转为西南风，低层有明显的风向风速辐合，为雷暴发生提供动力条件。700~925 hPa 存在水平风垂直切变，显著加强了触发雷暴的动力不稳定。

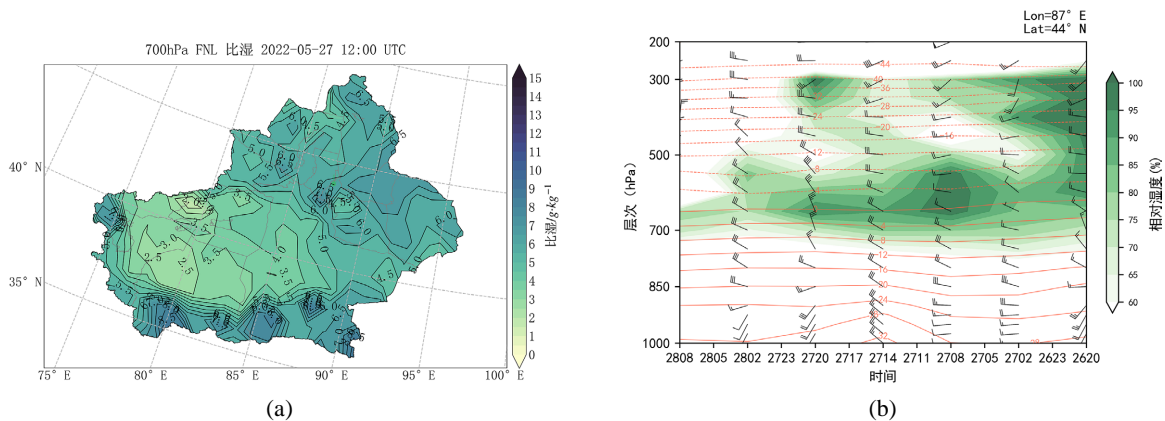


Figure 5. (a) 700 hPa Specific humidity chart of Xinjiang at 20:00; (b) Water vapor time profile at Urumqi Airport
图 5. (a) 20 时 700 hPa 全疆比湿图；(b) 乌鲁木齐机场水汽时间剖面图

5.1.2. 水汽通量分析

水汽通量即单位时间内通过单位面积所输送的水汽量[12]。水汽输送主要是指水平方向的水汽输送，其大小与空气密度，比湿有关。如图 6(a)所示，降水发生当日 27 日 20 时，500 hPa 水汽沿天山北侧向东输送，乌鲁木齐地区的水汽通量值在 $3.5 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ 左右。如图 6(b)所示，27 日 20 时 700 hPa 水汽通量明显增强，水汽辐合的大值区分布在乌鲁木齐地区、北疆东部、东疆北部一带，水汽输送主要从北疆西部向西输送到水汽辐合的大值区，水汽通量最大值达到 $8.5 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ 。在 700 hPa 图上，08 时乌鲁木齐 $T-T_d < 4^\circ\text{C}$ ，中低层水汽条件较好；14 时，中低层水汽通量带随西北气流东移，影响北疆西部 - 天山山区及其两侧 - 东疆地区；20 时，塔城 - 克拉玛依 - 乌鲁木齐一线 $T-T_d < 4^\circ\text{C}$ ，为大湿区，为雷暴发生提供有利水汽条件。

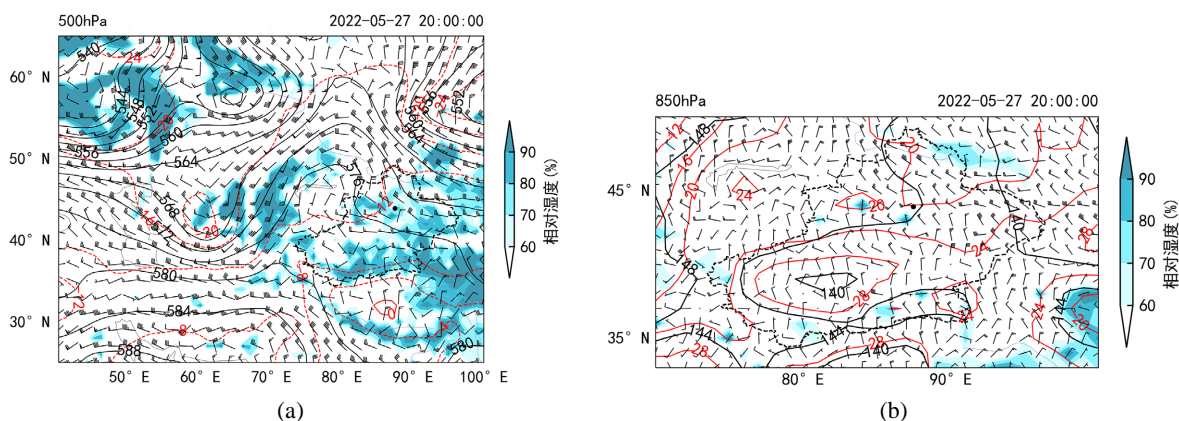


Figure 6. (a) 500 hPa water vapor flux at 20:00 on May 27; (b) 700 hPa water vapor flux at 20:00 on May 27

图 6. (a) 5 月 27 日 20 时 500 hPa 水汽通量图；(b) 5 月 27 日 20 时 700 hPa 水汽通量图

5.1.3. 液态水廓线分析

如图 7 所示，乌鲁木齐机场微波辐射计的液态水廓线表明：2022 年 5 月 27 日 18 时、19 时前后，本场液态水含量明显激增，最高达 $0.5 \text{ g}/\text{m}^3$ 以上，最强中心高度在 6 公里左右，并且第二段激增维持时间较第一段更长，与实况雷雨发生时间相吻合。

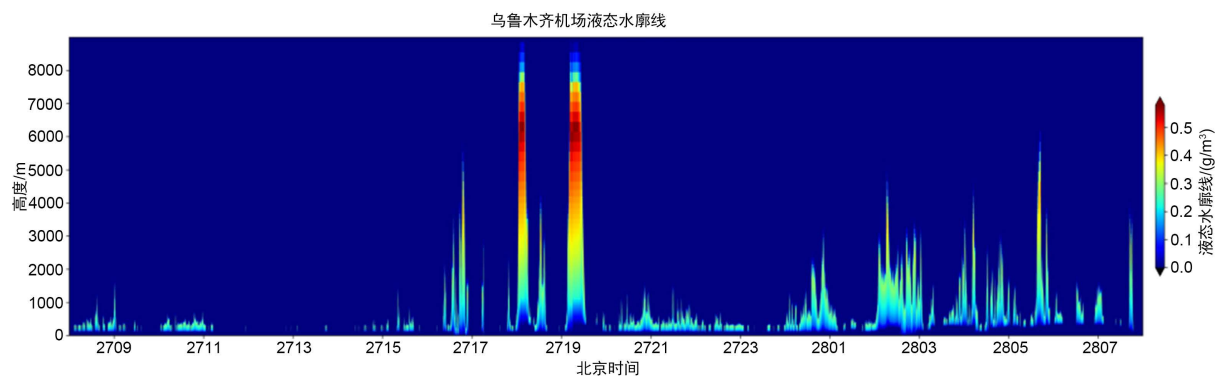


Figure 7. Liquid water profile of Urumqi Airport

图 7. 乌鲁木齐机场液态水廓线图

5.2. 层结条件分析

5.2.1. K 指数分析

K 指数可以反映大气的层结稳定情况。K 指数越大，层结越不稳定[12]。如图 8(a)所示，乌鲁木齐机

场 2022 年 5 月 27 日 K 指数表明：08 时 K 指数大值区位于北疆大部、南疆盆地南缘，其中伊犁河谷、天山山区 K 指数 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 。午后 K 指数明显增加，伊犁河谷、天山山区中段及北疆东部 K 指数达 $35^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。如图 8(b)所示，至 20 时上述大部区域 K 指数减小，局地山区 K 指数依旧维持。

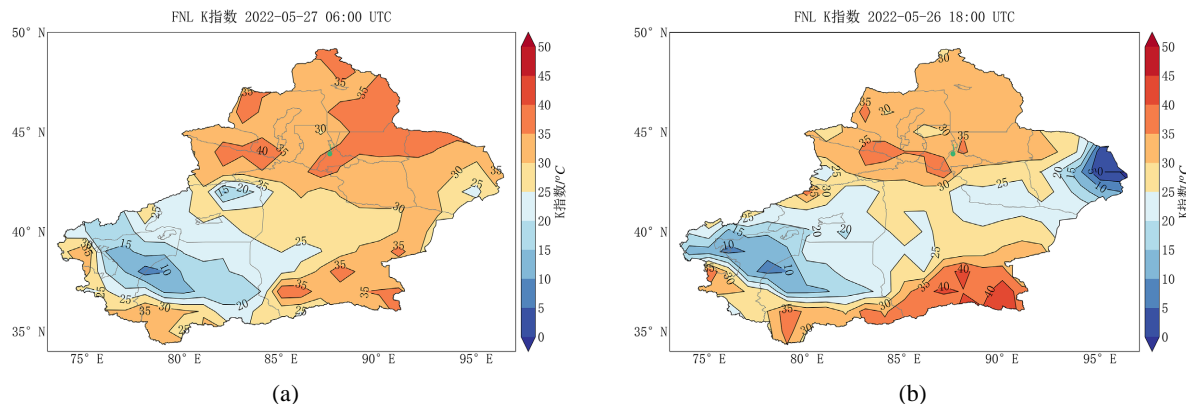


Figure 8. (a) K-index chart of Xinjiang at 08:00; (b) K-index chart of Xinjiang at 20:00

图 8. (a) 08 时全疆 K 指数图; (b) 20 时全疆 K 指数图

5.2.2. CAPE 指数分析

对流有效位能是评估垂直大气是否稳定、对流是否容易发展的指标之一[12]。如图 9(a)所示，27 日 14 时，新疆伊犁河谷、北疆北部、南北疆沿天山一带及天山山区的 CAPE 值在午后明显增加。其中伊犁河谷、塔城地区和阿勒泰地区 CAPE 值均在 400 J/kg 以上，天山山区及其两侧 CAPE 值在 $240\sim 280\text{ J/kg}$ 。如图 9(b)所示，至 20 时 CAPE 值明显减小，天山山区及其两侧 CAPE 值减小为 $80\sim 120\text{ J/kg}$ ，可见该区域累计的能量得到了一定释放。

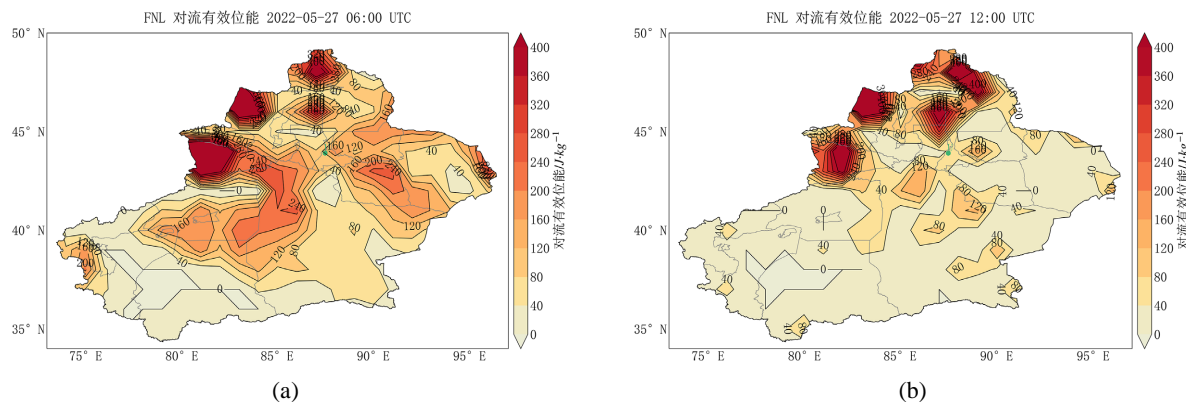


Figure 9. (a) CAPE chart of Xinjiang at 14:00; (b) CAPE chart of Xinjiang at 20:00

图 9. (a) 14 时全疆对流有效位能图; (b) 20 时全疆对流有效位能图

6. 雷达资料分析

如图 10(a)所示，17:42，终端区 $240^{\circ}\sim 290^{\circ}$ 方向 20~80 公里范围内出现 2 块回波强度为 $35\sim 50\text{ dBz}$ 的孤立对流单体；本场西北方向 20~30 公里处有一强度为 $30\sim 40\text{ dBz}$ 的小尺度对流单体快速发展加强。如图 10(b)所示，17:55，终端区偏西方向回波快速向东南方向移动，合并加强；本场西北侧对流单体快速东南下影响本场，相继出现中阵雨、短时弱雷雨天气。18:19，终端区回波强度减弱；本场西北侧的小尺度

对流单体发展加强，继续向东南方向移动。19:00，本场 300°方向 20 公里处小尺度对流云团发展迅速，回波强度为 35~50 dBz，快速向东南方向移动；19:14 几乎覆盖本场，出现中阵雨转中雷雨天气，期间伴随偏西北风 13 米/秒；19:33 对流云团强度略减弱，但范围扩大，本场转为弱雷雨天气，风速减小；19:39 以后，该对流云团继续向东南方向移动，强度再次加强为 35~50 dBz，后续将影响乌鲁木齐市。雷达强回波移动方向与 500 hPa 西北引导气流一致，且天气过程移动较快，强回波区主体路径明显。

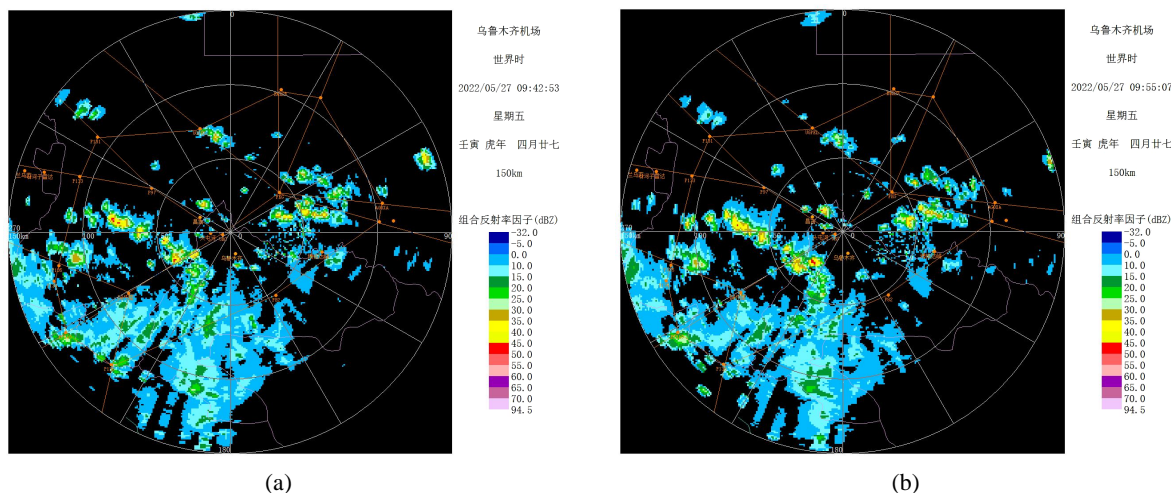


Figure 10. (a) Doppler radar chart on 17:42; (b) Doppler radar chart on 17:55

图 10. (a) 17:42 乌鲁木齐机场雷达图; (b) 17:55 乌鲁木齐机场雷达图

7. 结论

1) 不稳定层结方面：午后 14~20 时不稳定能量加强，伊犁河谷、天山山区中段及北疆东部 K 指数达 35℃~40℃，CAPE 值在 240~400 J/kg，伊犁河谷 - 天山山区 850~500 hPa 温差在 30℃以上，午后处于不稳定状态，热力不稳定性较强，在大尺度强迫作用下克服了对流抑制而产生了对流。

2) 动力条件方面：500 hpa 脊前短波槽自北疆西部 - 北疆东部 - 东疆一带快速东移，低层 850~700 hpa 切变线为雷暴发生提供动力条件，低层存在水平风垂直切变加强动力不稳定。

3) 水汽条件方面：午后云量的增加，使中层水汽不断汇集。中低层水汽通量带随着西北气流东移影响北疆西部 - 天山山区 - 东疆，为上述地区提供了丰富的水汽条件。微波辐射计资料中的液态水含量针对此次雷雨有较好的对应。

4) 雷达强回波移动方向与 500 hPa 西北引导气流一致，且天气过程移动较快，强回波区主体路径明显。

5) 此次雷暴为西北气流下的弱波动型，热力不稳定明显，雷暴云团孤立且分散，尺度小，生命史短，预报难度大。

参考文献

- [1] 周博坤. 北京首都机场两次连续雷暴日强对流过程分析和成因探讨[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [2] 赵玉洁, 徐灵芝, 余文韬. 一次强对流天气过程的诊断分析和多普勒雷达产品特征[J]. 内蒙古气象, 2005(3): 16-18.
- [3] 朱平. 青海高原致灾性对流天气遥感监测及预警方法研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. <https://doi.org/10.27248/d.cnki.gnjqc.2019.000746>
- [4] 朱雯娜, 王清平, 孙少明, 等. 乌鲁木齐机场一次连续性雷暴分析与气象服务保障[J]. 自然科学, 2017, 5(5):

424-429.

- [5] 杜安妮. 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[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(5): 888-897.
- [6] 吴芳芳, 王慧, 韦莹莹, 等. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象, 2009, 35(1): 55-64.
- [7] 张超, 贾健. 乌鲁木齐市短时强降水分布特征及环境条件分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 41-47.
- [8] 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.
- [9] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 万雪丽, 郭艳. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400-411.
- [10] 陈楠, 陈豫英, 王侃, 等. 一次强对流暴雨天气的环境条件及中尺度对流云团分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 84-90.
- [11] 杨晓霞, 胡顺起, 姜鹏, 等. 雷暴大风落区的天气学模型和物理量参数研究[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1057-1068.
- [12] 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.