

# 乌鲁木齐机场一次间歇性雷雨天气过程诊断分析

张宇翔, 杜安妮, 郭俊含, 朱国栋

民航新疆空管局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年8月9日; 录用日期: 2023年9月12日; 发布日期: 2023年9月20日

## 摘要

本文利用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP再分析资料, 通过对环流形势及影响系统、不稳定层结、水汽条件、抬升触发机制等方面进行初步诊断分析。结果表明: 1) 本次天气过程的环流背景: 西西伯利亚低涡稳定在 $80^\circ\text{E}60^\circ\text{N}$ 附近, 不断分裂短波槽影响北疆。地面冷高压主体位于乌拉尔山-咸海一带, 其前部不断分裂冷空气堆积在巴尔喀什湖南侧, 随后逐步入侵北疆, 15日~16日, 冷高压主体逐步东移, 冷空气进一步补充再次影响北疆大部。2) 本次天气过程具有持续时间久但不连续, 覆盖面积广且局地性强的特点。3) 高低空影响系统近乎垂直, 大气层结易形成“上冷下暖”的热力不稳定状态。4) 对流层中低层巴尔喀什湖南侧偏西、西南气流, 涡后脊前西北气流为北疆区域输送了一定的水汽。5) 垂直方向上风向随着高度先顺时针旋转再逆时针旋转, 说明低层有冷平流, 中层有暖平流, 表明大气层结处于位势不稳定状态, 有利于强对流天气的发生与维持。6) 对流层低层转为西北风或西北风风速增大, 有利于与地形结合, 促进垂直上升运动, 触发强对流天气。

## 关键词

强对流, 水汽条件, 不稳定层结, 垂直上升运动

## Diagnosis and Analysis of an Intermittent Thunderstorm in Urumqi Airport

Yuxiang Zhang, Anni Du, Junhan Guo, Guodong Zhu

Xinjiang ATMB CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Aug. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on the NCEP reanalysis data of  $1^\circ \times 1^\circ$ , this paper makes a preliminary diagnosis and analy-

sis of circulation situation and influence system, unstable stratification, water vapor conditions and trigger mechanism of uplift. The results show that: 1) The circulation background of this weather process: the low vortex in Western Siberia is stable around  $80^{\circ}\text{E}60^{\circ}\text{N}$ , and the short-wave trough affects northern Xinjiang constantly. The main body of surface cold high pressure is located in the Urals Mountains to the Aral Sea area, and the front of the cold air is constantly splitting and accumulating on the south side of Balkhash Lake, and then gradually invading northern Xinjiang. From 15th to 16th, the main body of cold high pressure gradually moved eastward, and the cold air further supplemented and affected most of northern Xinjiang again. 2) The weather process has the characteristics of long duration but discontinuity, wide coverage area but strong locality. 3) The effect of high and low space on the system is almost vertical, and the atmospheric junction is easy to form a thermal unstable state of "upper cold and lower warm". 4) The west-southwest air flow in the south side of Balkhash Lake in the middle and lower troposphere, and the northwest air flow in front of the rear vortex ridge transported some water vapor to the northern Xinjiang region. 5) The vertical upwind first rotates clockwise and then counterclockwise with height, indicating that there is a cold advection in the lower layer and a warm advection in the middle layer, indicating that the atmospheric junction is in a potential unstable state, which is conducive to the occurrence and maintenance of strong convective weather. 6) The lower troposphere becomes northwest wind or northwest wind speed increases, which is conducive to combining with terrain, promoting vertical upward movement and triggering strong convective weather.

## Keywords

Severe Convection, Water Vapor Condition, Unstable Stratification, Vertical Ascent Motion

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

雷暴等强对流天气是指起始突然、发展迅猛、伴随天气剧烈的灾害性天气，主要有雷暴大风、短时强降水、冰雹和龙卷等。对其分析和预报历来是气象服务的重点和难点。近年来，随着民航业快速发展，强对流天气对航空安全和航班正常率的影响愈发凸显，强对流天气中的雷雨及其所伴随的大风、短时强降水、低空风切变等天气对航空安全威胁巨大，极易造成机场大面积航班延误、备降甚至返航，不仅经济损失惨重，而且严重威胁飞行安全。因此，研究分析雷暴天气对保障飞行安全、降低经济损失具有重要意义。国内学者也愈发重视强对流天气的分析，并有了一定的成果[1]-[7]。

疆内学者对乌鲁木齐地区雷暴天气也做了一定的研究。赵德龙等[8]研究表明，近 33a 年来乌鲁木齐地区雷暴空间分布总体表现为山区多于平原、南部多北部少的特征，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。张茜等[9]研究表明在雷暴过程发生前后，微波辐射计的水汽、温度、湿度监测结果都有一定程度的增长或回落现象，对雷暴天气的发生有一定的指示作用。杜安妮等[10]研究表明乌鲁木齐机场为典型的温带干旱性气候，水汽条件较差，强对流天气预报中突出的难点是伴随的短时强降水的预报难度较大。在雷雨大风来临前、影响过程中及影响后期，会产生较强的跑道水平风切变，尤其前期和后期时段，对飞行危害极大。马超等[11]研究表明闪电定位资料对短临预报有一定的指示意义，当天山北坡某一地点附近出现 1 次闪电，且在 20 min 内增加至 3 次以上，则未来 2 h 内此地出现强对流天气的可能性较大。陈阳权等[12]研究表明 WRF 模式对鲁木齐机场终端区内一次强对流天气有

较强的模拟能力, 能够较好地描述该过程的环流形势及雷达回波发展特征。

乌鲁木齐机场本次雷雨天气过程持续时间较长, 虽不连续, 但涵盖了进港高峰时段, 雷雨覆盖面积广, 局地性强, 对关键导航点、航路造成了极大的限制, 严重影响航空运行秩序, 因此对本次过程进行剖析是很有必要的。本文利用  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 再分析资料, 通过对环流形势及影响系统、不稳定层结、水汽条件、抬升触发机制等方面进行初步诊断分析, 试图了解北疆区域及乌鲁木齐机场本次天气过程的发生机制, 从而为雷雨天气短临预报预警提供一些定性思考。

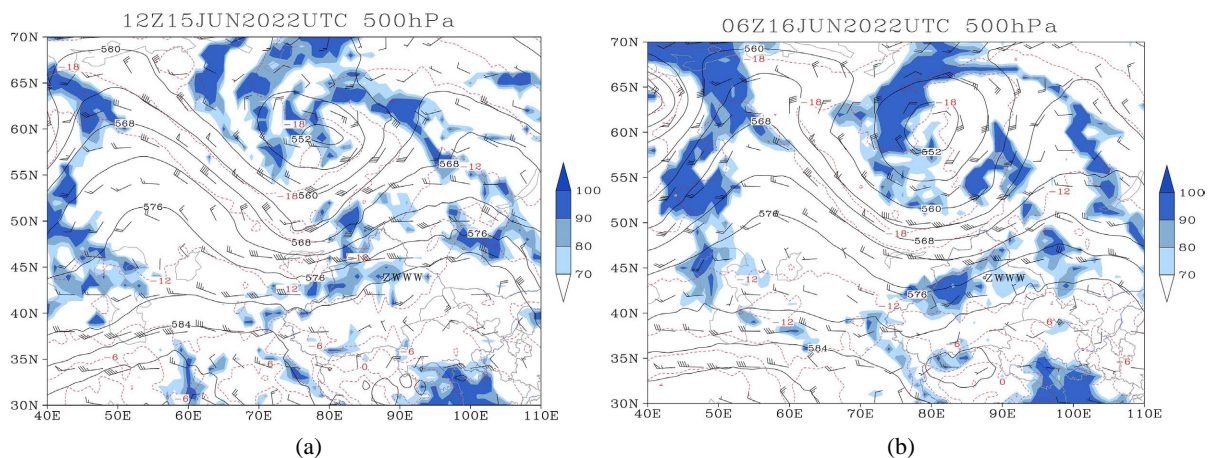
## 2. 天气实况及对飞行的影响

受西西伯利亚低涡影响, 2022 年 6 月 15 日~16 日, 北疆大部、天山山区及其南侧、南疆西部出现一次小到中雨, 局地山区为大雨, 伴 6~7 级西北大风天气过程。其中北疆西部、北疆沿天山一带、天山山区中段及其南侧部分区域出现雷暴或雷雨天气。

乌鲁木齐机场 6 月 15 日 21:30~6 月 16 日 05:00 出现雷暴, 其中 02:30 出现弱雷雨。期间以偏西风为主, 风速  $2\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。16 日 16:14~17:18 出现雷暴转弱雷雨, 17:44 出现中阵雨。19:30~20:30, 22:00~23:30 多次出现小阵雨。期间为西北风转偏西风, 风速  $4\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。16 日过程降水量为 4.0 mm。

6 月 15 日~16 日, 乌鲁木齐机场出港航班因天气原因延误航班 24 架次。

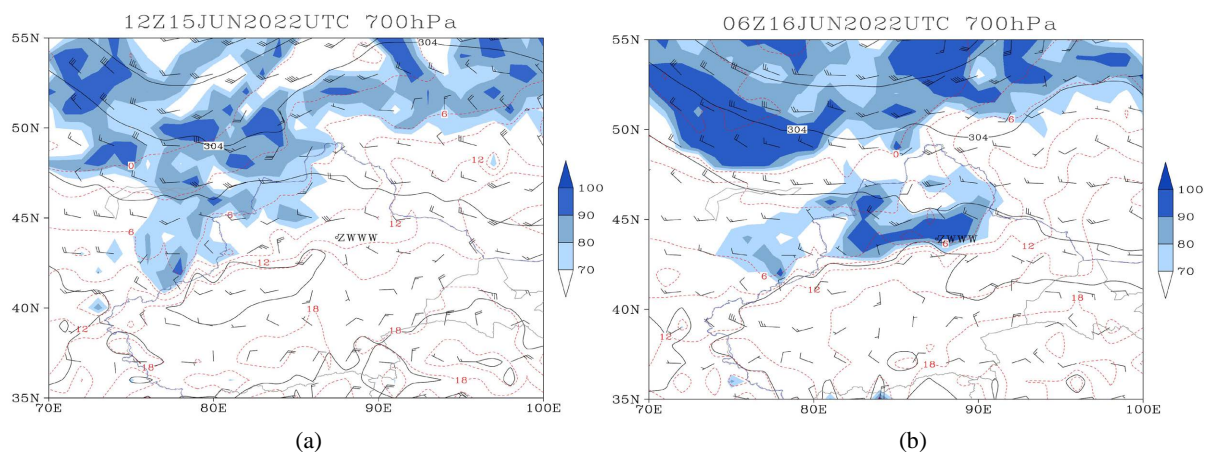
## 3. 环流形势及影响系统



**Figure 1.** Circulation pattern of 500 hPa at 20:00 on 15th (a) and 500 hPa at 14:00 on 16th (b) (geopotential height (black line: dagpm), temperature (red line:  $^\circ\text{C}$ ), relative humidity (coloring: %))

**图 1.** 15 日 20 时 500 hPa (a) 和 16 日 14 时 500 hPa (b) 环流形势图(位势高度(黑线: dagpm)、温度(红线:  $^\circ\text{C}$ )、相对湿度(填色: %))

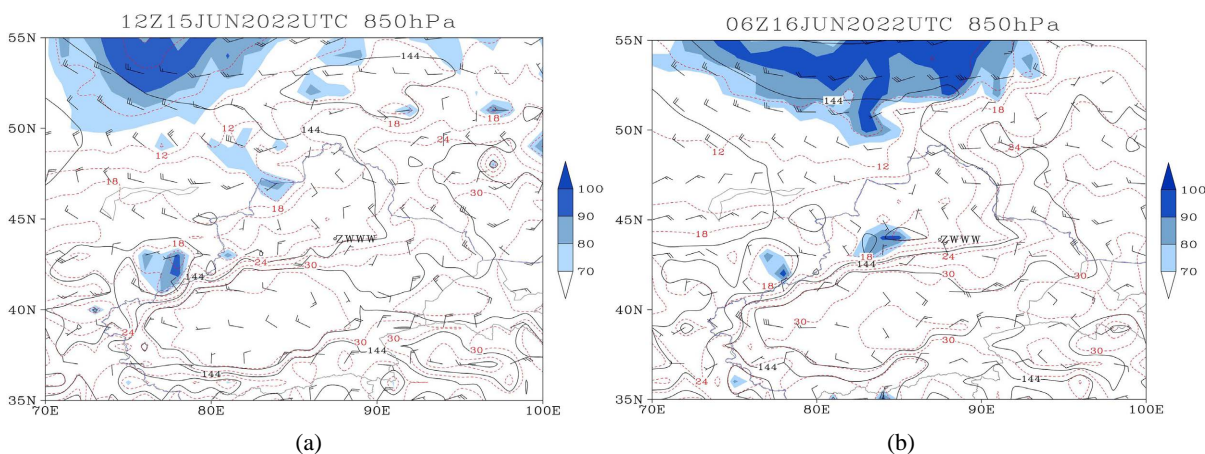
500 hPa 上, 13 日~14 日, 亚欧大陆中高纬度以径向环流为主。欧洲中部、乌拉尔山 - 咸海一带、蒙新高地为脊区控制。欧洲东部、西西伯利亚有低槽活动(新疆地区下游系统略)。欧中中部暖脊不断向东北方向发展, 冷空气向南输送使得东欧低槽向南加深并东移, 乌拉尔山 - 咸海一带暖脊向北发展, 脊线由东北西南向转为西北东南向, 脊前冷空气向南输送, 西西伯利亚低槽切涡, 15 日 08 时, 南北疆西部受低槽前西南气流控制, 14 时~20 时, 低涡主体稳定在  $80^\circ\text{E}60^\circ\text{N}$  附近, 不断分裂短波槽影响新疆北部、西部。巴湖南侧至新疆西部有一条西南风带, 风速不断加大至  $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 为新疆区域输送一定的水汽(图 1(a))。16 日 02 时~08 时, 低涡依旧稳定, 强度略有加强。16 日 14 时~17 日 08 时, 低涡主体仍稳定在  $80^\circ\text{E}60^\circ\text{N}$  附近, 中心强度为 552~556 位势什米, 不断有短波分裂, 影响北疆大部、南疆西部(图 1(b))。



**Figure 2.** Circulation pattern of 700 hPa at 20:00 on 15th (a) and 700 hPa at 14:00 on 16th (b) (geopotential height (black line: dagpm), temperature (red line: °C), relative humidity (coloring: %))

**图 2.** 15 日 20 时 700 hPa (a) 和 16 日 14 时 700 hPa (b) 环流形势图(位势高度(黑线: dagpm)、温度(红线: °C)、相对湿度(填色: %))

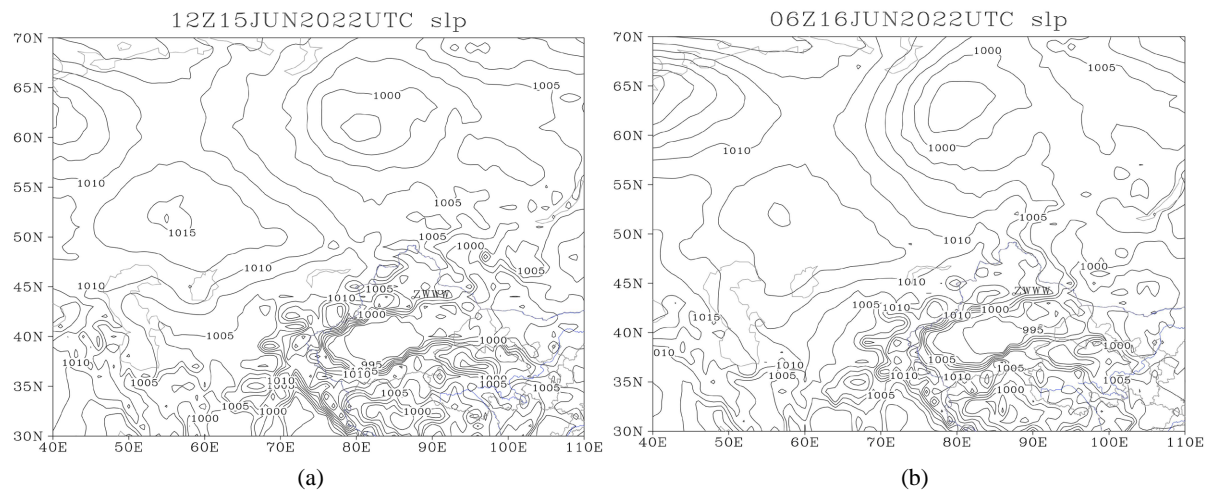
700 hPa 上, 15 日~16 日, 环流形势与 500 hPa 基本一致。西西伯利亚低涡主体稳定在 80°E60°N 附近, 不断分裂短波槽影响新疆北部西部(图 2(a))。16 日 08 时开始, 北疆有冷平流输送, 温度梯度增大, 锋区加强(图 2(b))。垂直方向上, 主要影响系统与 500 hPa 位置基本一致。由相对湿度场可知, 15 日 20 时开始, 北疆西部增湿, 相对湿度大于 70%, 其中伊犁河谷、天山山区西段部分区域大于 80%。16 日 14 时, 高湿区范围增大, 北疆西部、天山山区及其北坡大于 80%。



**Figure 3.** Circulation pattern of 850 hPa at 20:00 on 15th (a) and 850 hPa at 14:00 on 16th (b) (geopotential height (black line: dagpm), temperature (red line: °C), relative humidity (coloring: %))

**图 3.** 15 日 20 时 850 hPa (a) 和 16 日 14 时 850 hPa (b) 环流形势图(位势高度(黑线: dagpm)、温度(红线: °C)、相对湿度(填色: %))

850 hPa 上, 13 日~14 日, 环流形势与 700 hPa、500 hPa 基本一致。乌拉尔山 - 咸海一带、蒙新高地为脊区控制, 西西伯利亚有一低涡稳定在 80°E60°N 附近。15 日~16 日, 两脊合并加强, 新疆区域为脊前西北气流控制, 北疆有明显冷平流输送, 温度梯度增大, 等温线密集带呈东北 - 西南向位于天山山区一带, 锋区明显加强(图 3(a))。由相对湿度场可知, 850 hPa 水汽条件一般, 16 日 02 时至 16 日 14 时, 高湿区主要集中在伊犁河谷~天山山区西段(图 3(b))。16 日前半夜, 天山山区中段部分区域相对湿度大于 80%。

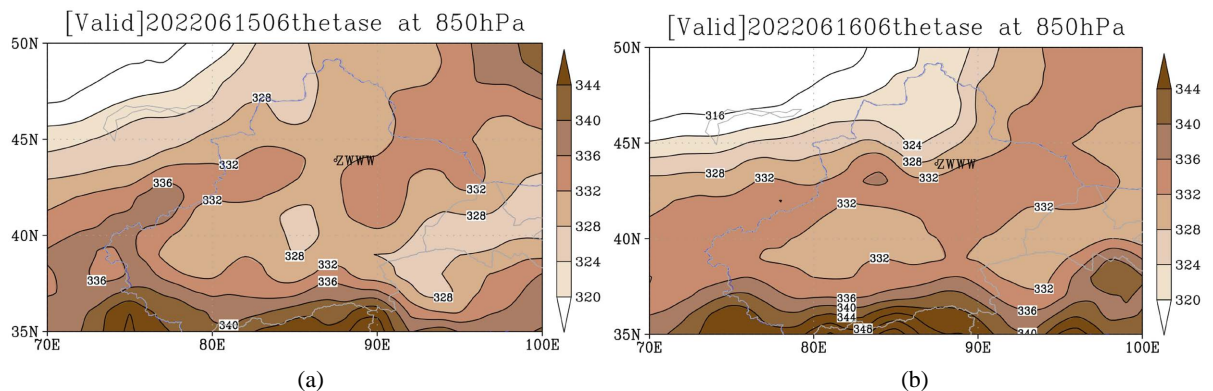


**Figure 4.** 20:00 on 15th (a) and 14:00 on 16th (b) sea level pressure field (pressure (black line: hPa))  
**图 4.** 15 日 20 时(a)和 16 日 14 时(b)海平面气压场(气压(黑线: hPa))

海平面气压场上, 13 日~14 日, 乌拉尔山 - 咸海一带为冷高压控制, 中心气压值由 1012 hPa 逐步增强至 1015 hPa, 其前部不断分裂冷空气堆积在巴湖南侧, 在 40°N 附近形成一中尺度高压, 中心强度 1010 hPa 左右。此时新疆大部为热低压控制。14 日白天, 冷空气开始入侵北疆, 15 日~16 日, 冷高压主体逐步东移至西西伯利亚, 冷空气进一步补充再次影响北疆大部(图 4(a), 图 4(b))。

## 4. 区域天气成因诊断分析

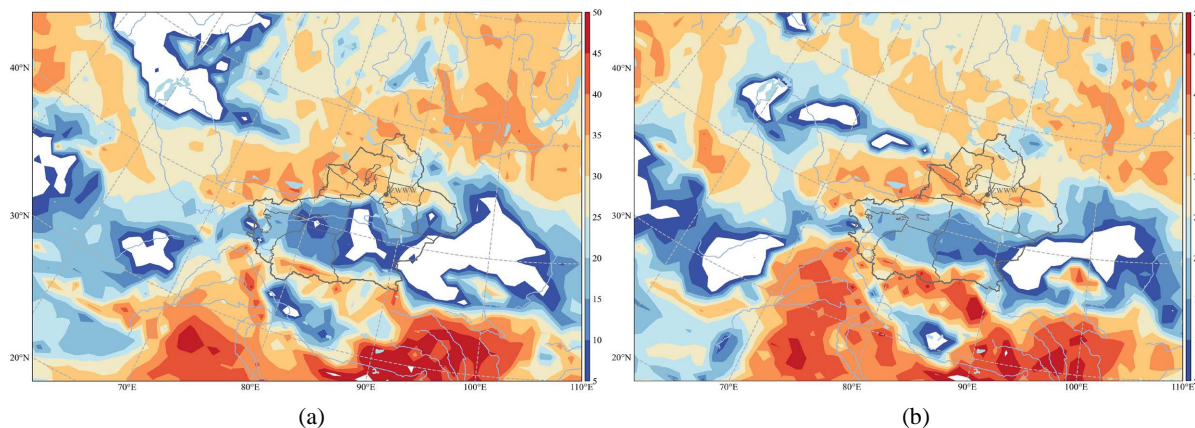
### 4.1. 不稳定层结



**Figure 5.** 850 hPa false equivalent potential temperature in Xinjiang region at 14:00 on 15th (a) and 14:00 on 16th (b) (unit: K)  
**图 5.** 15 日 14 时(a)和 16 日 14 时(b) 850 hPa 新疆区域假相当位温(单位: K)

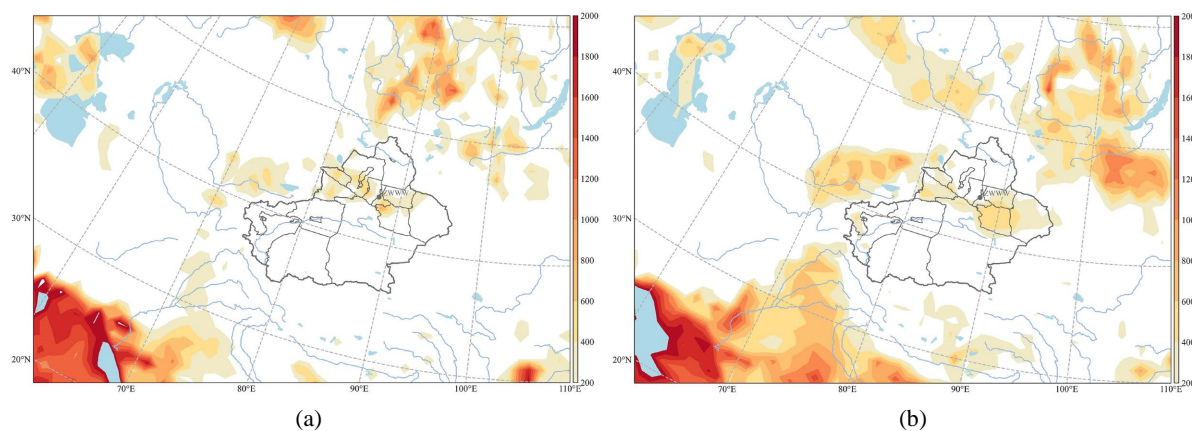
15 日~16 日假相当位温大值区从南疆西部山区一直延伸至伊犁河谷、天山山区及其两侧, 中心强度为 332~336K (图 5(a))。15 日 20 时~16 日 14 时乌鲁木齐机场周边处于高能中心, 强度为 328~332K (图 5(b)), 说明大气温湿条件适宜, 有较强的对流潜势。

15 日~16 日 K 指数大值区主要位于北疆西部、天山山区、南疆西部山区。其中伊犁河谷~天山山区西段部分区域大于 35°C (图 6(a))。大气层结处于热力不稳定状态, 有较强的对流潜势。15 日 20 时~16 日 20 时, 乌鲁木齐机场周边 K 指数为 30°C~35°C (图 6(b)), 有较强的对流潜势。



**Figure 6.** K index of Xinjiang region at 20:00 on 15th (a) and 20:00 on 16th (b) (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

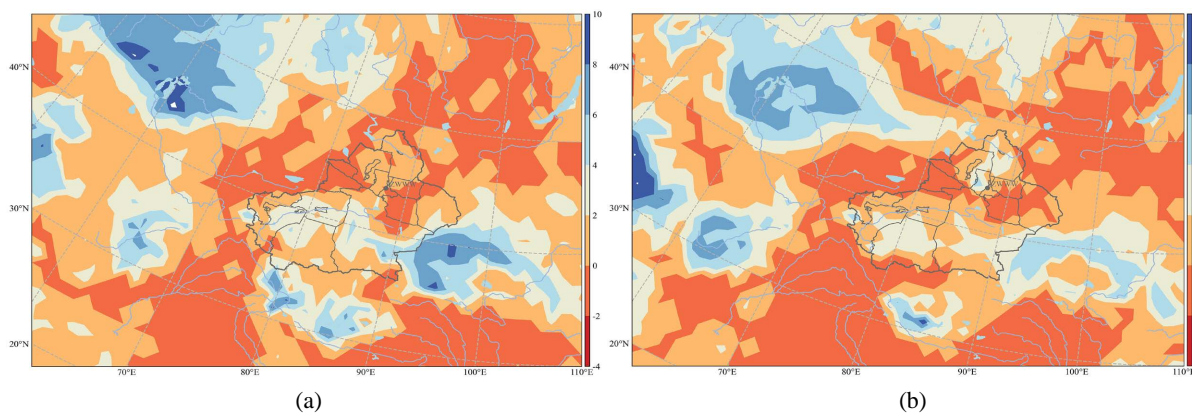
**图 6.** 15 日 20 时(a)和 16 日 20 时(b)新疆区域 K 指数(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )



**Figure 7.** Convective effective potential energy over Xinjiang at 20:00 on 15th (a) and 14:00 on 16th (b) (unit:  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

**图 7.** 15 日 20 时(a)和 16 日 14 时(b)新疆区域对流有效位能(单位:  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

15 日~16 日对流有效位能大值区主要位于北疆西部、天山山区及其两侧,多为  $200\sim 400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 7(a)),其中伊犁河谷、天山山区部分区域为  $400\sim 800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 7(b)),大气层结处于热力不稳定状态,有较强的对流潜势。



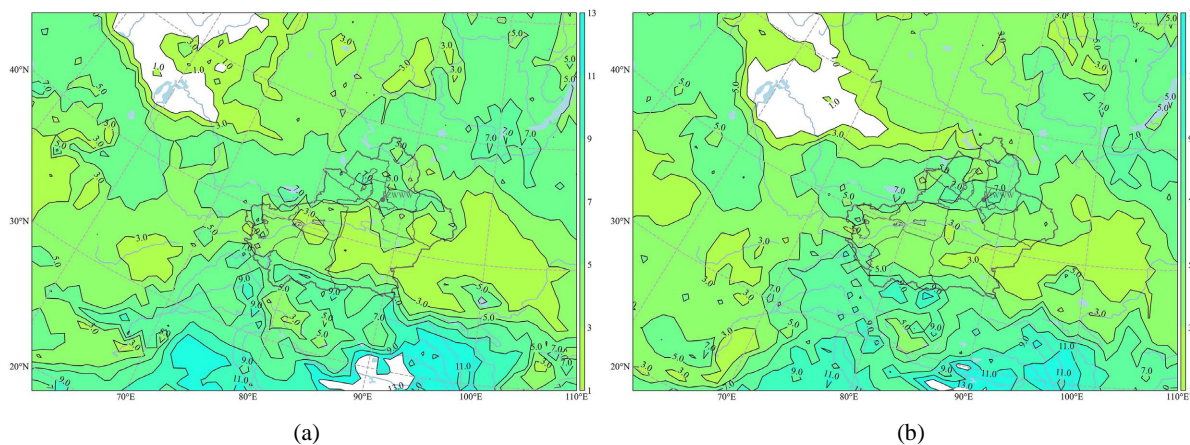
**Figure 8.** SI index of Xinjiang region at 14:00 on 15th (a) and 14:00 on 16th (b) (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

**图 8.** 15 日 14 时(a)和 16 日 14 时(b)新疆区域沙氏指数(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

15日午后、16日午后,伊犁河谷、天山山区部分区域沙氏指数多为 $0^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ ,大气层结处于热力不稳定状态,有较强的对流潜势(图8(a),图8(b))。

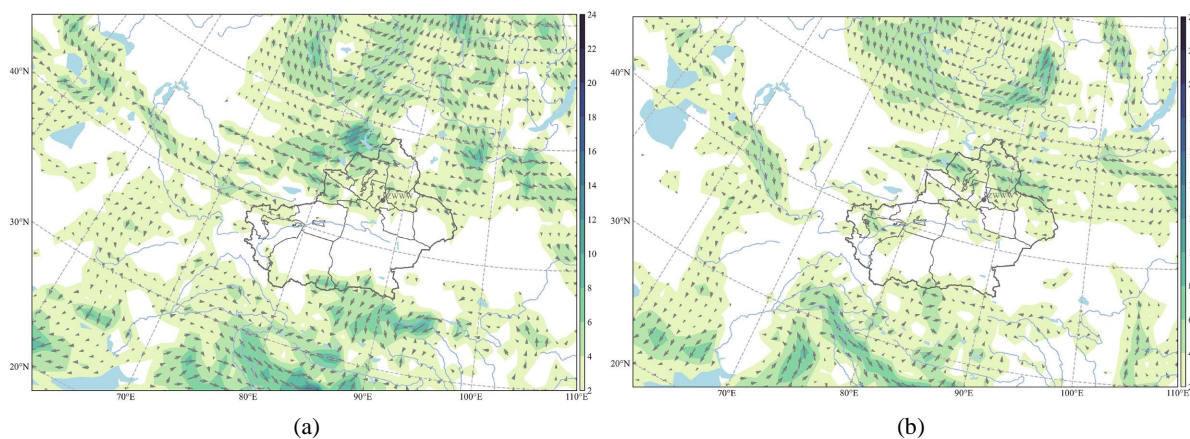
由以上各项指数可知,伊犁河谷、南疆西部山区、天山山区及其两侧大气状态不稳定,有较强的对流潜势,当其余条件适宜时,易发生强对流天气。

#### 4.2. 水汽条件



**Figure 9.** 700 hPa specific humidity of Xinjiang region at 14:00 on 15th (a) and 14:00 on 16th (b) (unit:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
**图 9.** 15日14时(a)和16日14时(b) 700 hPa 新疆区域比湿(单位:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

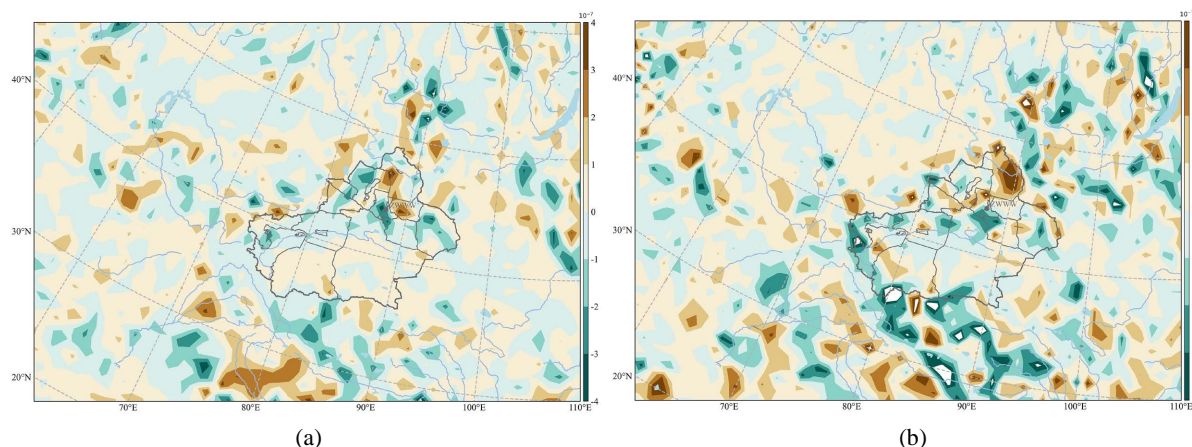
由比湿场可知,700 hPa上,15日傍晚~17日凌晨水汽条件较好,北疆大部比湿大于 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图9(a)),伊犁河谷-天山山区部分区域比湿大于 $7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图9(b))。850 hPa上(图略),15日傍晚~17日凌晨水汽条件良好,北疆大部比湿大于 $7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,阿克苏地区北部山区-伊犁河谷,天山山区中段部分区域比湿大于 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。



**Figure 10.** 700 hPa Water vapor flux in Xinjiang region at 20:00 on 15th (a) and 14:00 on 16th (b) (unit:  $\times 10^{-3}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
**图 10.** 15日20时(a)和16日14时(b) 700 hPa 新疆区域水汽通量(单位:  $\times 10^{-3}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

由水汽通量场可知,700 hPa上,15日午后至16日午后,巴尔喀什湖一带有 $4\sim 8\times 10^{-3}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值区,偏西、西南气流将来自于中亚地区的水汽源源不断输送至向北疆西部、北部(图10(a))。

16日午后至17日凌晨,水汽主要来自槽后西北、偏北气流,一直输送至北疆偏东区域(图10(b))。850 hPa上(图略),水汽沿槽后脊前西北、偏西气流,不断向北疆区域输送。



**Figure 11.** 700 hPa (a) divergence of water vapor flux over Xinjiang at 08:00 on 16th and 850 hPa (b) divergence of water vapor flux over Xinjiang at 14:00 on 16th (unit:  $\times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 11.** 16 日 08 时新疆区域 700 hPa (a)水汽通量散度和 16 日 14 时新疆区域 850 hPa (b)水汽通量散度(单位:  $\times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

由水汽通量散度场可知,15日傍晚至16日傍晚,阿克苏地区北部山区、伊犁河谷-天山山区西段(图11(a))、天山山区中段及其两侧低层有明显的水汽辐合(图11(b)),辐合中心在伊犁河谷、天山山区中段及其两侧,最大值为 $-2\sim-4 \times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由上可知,伊犁河谷、天山山区及其两侧、南疆西部山区有较好的水汽条件,易发生雷暴大风、短时强降水等强对流天气。

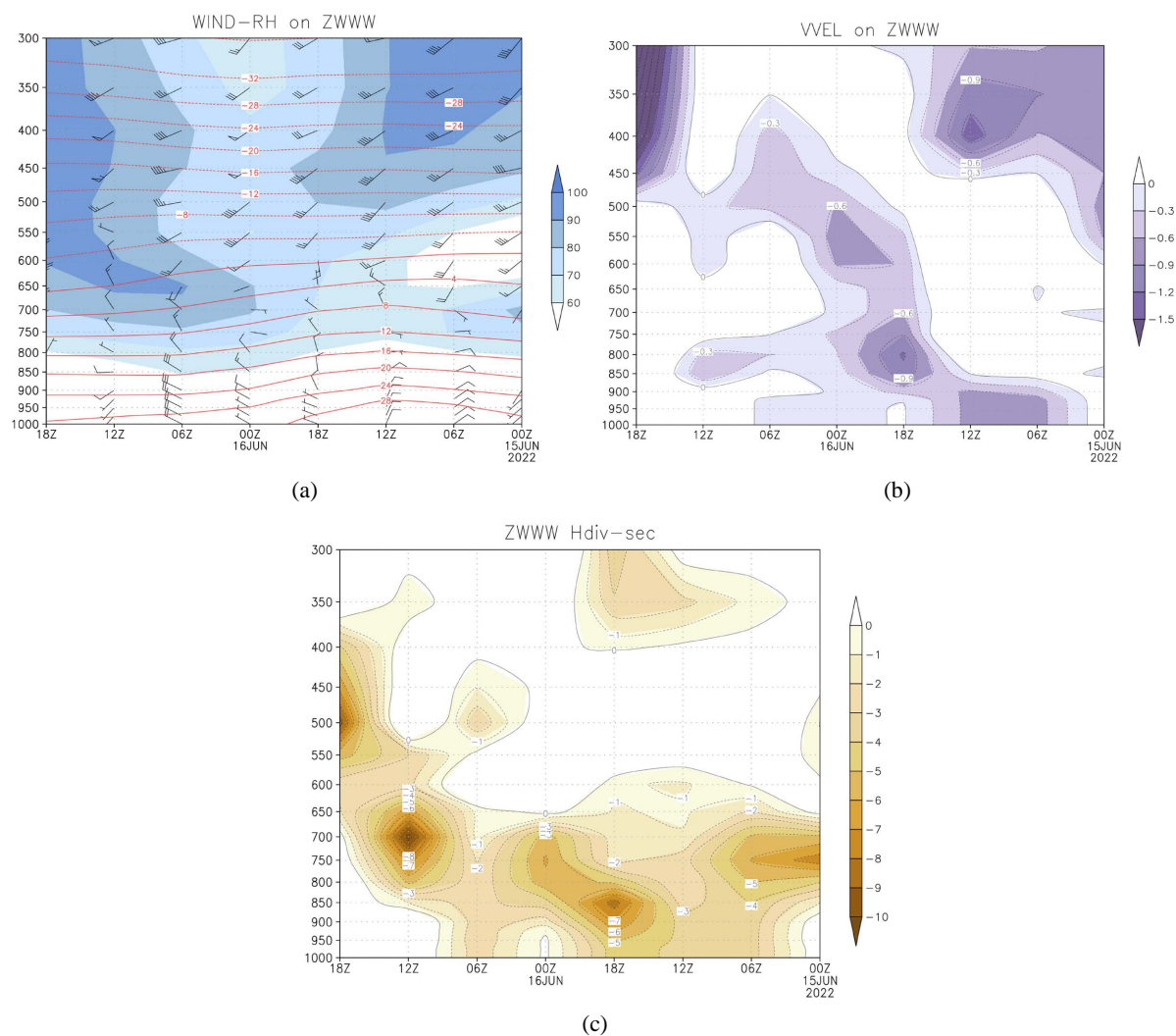
## 5. 本场天气成因诊断分析

由本场风温湿的时间剖面图可知(图12(a)),15日午后至16日凌晨,本场低层相对湿度不足70%,中层相对湿度为70%~80%,水汽条件一般。15日14时~20时,600~700 hPa风向由西南风逐渐转为西北风,说明有短波活动,且相对湿度变为70%~80%,期间本场出现了雷暴天气。16日02时,本场上空地面至600 hPa,风向随着高度先顺时针旋转再逆时针旋转,说明低层有冷平流,中层有暖平流,中层相对湿度进一步增大为80%~90%,这种温湿配置表明大气层结处于位势不稳定状态,有利于强对流天气的发生与维持。16日08时~14时,本场上空低层西北风风速不断加大,有利于与地形结合,增强上升运动,触发对流天气。16日14时~20时,600~700 hPa有短波活动,且低层不断增湿,同时中层水汽趋于饱和,期间本场出现了雷雨天气,短时中阵雨。由风向随高度的变化可知,此时大气层结也处于位势不稳定状态,湿层与不稳定层结也更加深厚,因此对流天气更加剧烈。

由本场垂直速度的时间剖面图可知(图12(b)),15日20时~16日14时本场低层垂直速度为 $-0.3\sim-1.5 \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,表明低层存在垂直运动上升区。16日14时后,低层变为下沉运动区,可能是由于降水的拖曳作用所导致。

由本场水平散度的时间剖面图可知(图12(c)),15日20时~16日02时本场中低层为辐合区且逐渐加强,850 hPa有散度为 $-7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐合中心,此时本场地面至850 hPa为东北风转西北风,表明风向与地形结合,增强了辐合上升运动,有利于触发对流天气。16日08时~16日14时,本场地面至850 hPa为弱辐合区且逐渐增强,此时本场低层西北风也由 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至 $8\sim 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。14时后辐合减弱,18时前





**Figure 12.** Time profile of wind, temperature, relative humidity (a) (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , %); vertical velocity (b) (unit:  $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ), horizontal divergence; (c) (unit:  $\times 10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at Urumqi Airport

**图 12.** 乌鲁木齐机场风、温度、相对湿度(a)(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , %), 垂直速度; (b)(单位:  $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 水平散度; (c)(单位:  $\times 10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$ )的时间剖面图

后本场地面至 850 hPa 变为辐散区, 同时本场低层风向转为偏西或西南风, 风速也减小。由此可见, 就乌鲁木齐机场而言低层转为西北风或者西北风风速加大有利于垂直上升运动的加强, 为对流天气的触发提供了动力条件。

## 6. 结论

- 1) 本次天气过程的环流背景: 西西伯利亚低涡稳定在  $80^{\circ}\text{E}60^{\circ}\text{N}$  附近, 不断分裂短波槽影响北疆。地面冷高压主体位于乌拉尔山 - 咸海一带, 其前部不断分裂冷空气堆积在巴尔喀什湖南侧, 随后逐步入侵北疆, 15 日~16 日, 冷高压主体逐步东移, 冷空气进一步补充再次影响北疆大部。
- 2) 本次天气过程具有持续时间久但不连续, 覆盖面积广但局地性强的特点。
- 3) 高低空影响系统近乎垂直, 大气层结易形成“上冷下暖”的热力不稳定状态。
- 4) 对流层中低层巴尔喀什湖南侧偏西、西南气流, 涡后脊前西北气流为北疆区域输送了一定的水汽。

5) 垂直方向上风向随着高度先顺时针旋转再逆时针旋转,说明低层有冷平流,中层有暖平流,表明大气层结处于位势不稳定状态,有利于强对流天气的发生与维持。

对流层低层转为西北风或西北风风速增大,有利于与地形结合,促进垂直上升运动,触发强对流天气。

## 参考文献

- [1] 许皓琳, 郑佳锋, 姜涛, 等. 乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究[J]. 气象, 2020, 46(11): 1440-1449.
- [2] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 2014, 40(4): 389-399.
- [3] 文雪. 2022年6月26日新津机场雷雨大风天气过程分析[J]. 民航学报, 2023, 7(2): 60-63.
- [4] 朱华东. 对首都机场地区一次雷雨天气过程的初步分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(10): 2.
- [5] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
- [6] 李典南, 徐海, 许东蓓. 双流机场雷暴天气预报方法研究[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(6): 17-25.
- [7] 蔡雪薇, 谌芸, 沈新勇, 等. 冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J]. 气象, 2019, 45(5): 621-631.
- [8] 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.
- [9] 张茜, 孙少明, 王清平, 朱雯娜, 范大伟. HTG-3 微波辐射计资料在乌鲁木齐国际机场雷暴天气中的应用初探[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(4): 119-128.
- [10] 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]. 气象水文海仪器, 2021, 38(4): 59-62.
- [11] 马超, 周雅蔓, 李伟. 闪电定位资料在天山北坡强对流天气短临预警中的分析及应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 49-55.
- [12] 陈阳权, 杜安妮, 丁旭, 等. 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.