

乌鲁木齐机场多相态降水特征与预报判据浅析

刘 倩

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: 2024年12月13日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

乌鲁木齐国际机场位于欧亚大陆腹地, 其温带大陆性干旱气候和复杂地形导致多相态降水天气频发。本文基于2022年11月9~10日和2024年4月12~13日两场典型降水过程, 综合多源数据, 剖析了降水相态转变的动力与热力机制。研究表明, 降水相态转变由高空槽移动、冷平流、水汽输送及地形协同作用驱动。温度场对降水相态转变起决定性作用, 850 hPa温度变化是关键指标; 水汽通量散度变化与相态转变密切相关, 低层水汽辐合减弱和中层辐散增强是重要信号。动力条件分析表明, 低层强上升运动和辐合是降雨的关键条件, 中层辐合减弱和上升运动减小是雨转雨夹雪的特征, 低层辐合与中层辐散同时存在时可能预示冰粒天气。本研究为乌鲁木齐机场降水相态预报提供了动力与热力判据, 建议重点监测低层散度极值区、中层垂直速度梯度及温度变化趋势, 并结合0°C层高度动态调整阈值。研究结果旨在为提高乌鲁木齐机场降水相态预报准确率、保障航空飞行安全提供有力的理论依据与技术支持。

关键词

乌鲁木齐机场, 相态转变, 降水, 航空飞行安全

Analysis of Multi-Phase Precipitation Characteristics and Forecasting Criteria at Urumqi Airport

Qian Liu

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

Received: Dec. 13th, 2024; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

Located in the heart of the Eurasian continent, Urumqi International Airport experiences frequent

文章引用: 刘倩. 乌鲁木齐机场多相态降水特征与预报判据浅析[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 621-634.

DOI: 10.12677/ojns.2025.133065

multi-phase precipitation events due to its temperate continental arid climate and complex topography. This study investigates the dynamic and thermodynamic mechanisms driving precipitation phase transitions through two typical precipitation events occurring on November 9~10, 2022 and April 12~13, 2024, utilizing multi-source data. The results demonstrate that precipitation phase transitions are driven by the combined effects of upper-level trough movement, cold advection, moisture transport, and topographic influences. The temperature field plays a decisive role in phase transitions, with 850 hPa temperature variations serving as a key indicator. Changes in water vapor flux divergence show close correlation with phase transitions, where weakened low-level moisture convergence and enhanced mid-level divergence emerge as significant signals. Dynamic analysis reveals that strong low-level upward motion and convergence are critical for rainfall formation, while reduced mid-level convergence and diminished vertical motion characterize the rain-to-sleet transition. The coexistence of low-level convergence and mid-level divergence may indicate impending ice pellet weather. This study establishes dynamic and thermodynamic criteria for precipitation phase forecasting at Urumqi Airport, recommending focused monitoring of extremum zones in low-level divergence, vertical velocity gradients at mid-levels, and temperature trends, combined with dynamic adjustment of thresholds based on 0°C level height variations. These findings provide theoretical foundation and technical support for improving precipitation phase prediction accuracy and ensuring aviation safety at Urumqi International Airport.

Keywords

Urumqi Airport, Phase Transformation, Precipitation, Aviation Flight Safety

Copyright © 2025 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

在航空运输领域,机场所地的天气状况,尤其是降水相态的变化,对航班的正常起降及飞行安全具有至关重要的影响。在秋冬和冬春季节转换时,降雪过程往往伴有多种相态共存的情况,不同降水相态(如降雨、雨夹雪、降雪等)会显著改变机场跑道的摩擦系数和能见度等关键飞行条件。随着航空业的快速发展,精准把握机场周边天气变化规律及降水相态特征的需求日益迫切。

在全国范围内,众多学者对不同地区的降水相态变化进行了深入研究。例如,漆梁波等[1]对东部地区不同降水相态对应的温度和厚度进行了统计分析,提出了温度和厚度因子的识别判据。此外,利用微波辐射计资料分析降水、冰雹及大雾等天气的研究也取得了诸多成果,为深入理解天气过程提供了有力支持[2]-[7]。

在新疆地区,学者们也开展了相关研究。张俊兰等[8]分析了北疆降水相态转换的判识和成因,指出中低层温度变化是预报北疆春季降水相态转换的关键因子。祝小梅等[9]则统计分析了新疆北部降水相态的识别判据,为后续研究提供了重要参考。近年来,针对乌鲁木齐地区的降水相态特征,研究逐渐深入。李海花等[10]对比分析了乌鲁木齐春季两次强降水过程的相态特征,指出中低层温度和水汽条件对降水相态转换有重要影响。蒋慧敏等[11]研究了乌鲁木齐不同相态级别降水的变化特征,发现降水量级越高,降水的变异系数越大,且冷季降水分布比暖季更不均匀。此外,陈阳权[12]对乌鲁木齐机场一次初雪天气过程进行了分析,指出低层温度的快速下降是雨雪相态转换的关键因素。黄海波[13]则分析了乌鲁木齐机场一次高影响冻雨天气,揭示了“过冷暖雨机制”在冻雨形成中的作用。

然而,针对乌鲁木齐机场的降水相态变化研究仍相对有限。乌鲁木齐机场地理位置特殊,气候环境复杂,其降水相态变化具有独特规律,对航班运行影响显著。因此,本研究聚焦于乌鲁木齐机场的降水相态变化,通过分析两场相态转变的天气个例,探讨相关气象要素特征及相态转换机制,旨在进一步揭示其内在规律和影响因素,为提升相关气象服务保障水平贡献力量。

2. 气候背景

乌鲁木齐位于欧亚大陆腹地,属于典型的温带大陆性干旱气候,其地形复杂,尤其是天山山脉的分布,使得该地区大气环流特征独特。冬季,受西伯利亚冷空气的持续影响,乌鲁木齐呈现出寒冷干燥的气候特点;而夏季,西风带带来的暖湿气流与冷空气频繁交汇,为多相态降水的形成提供了条件。

乌鲁木齐的降水相态与季节变化密切相关。冬季,降水主要以降雪形式出现,积雪深厚且持续时间长,这不仅影响跑道的摩擦系数,还增加了机场除雪作业的难度。春季,随着气温回升,冻雨或雨夹雪天气频发,这种复杂的降水相态会迅速降低能见度,增加飞行风险。夏季,降水多为液态,但雷暴天气常伴随冰雹,对飞行安全构成直接威胁。进入秋季,降水逐渐减少,天气趋于干燥,降水相态主要表现为从液态降水向无降水的过渡。

这种独特的气候背景和降水相态的季节性变化,对乌鲁木齐国际机场的飞行安全和运行效率提出了更高的要求。机场气象部门需要密切关注气象要素的变化,及时发布准确的气象预报和预警信息,以保障航空运输的安全和顺畅。

3. 多相态降水案例概述

(一) 案例一: 2022 年 11 月 9~10 日乌鲁木齐机场多相态降水过程分析

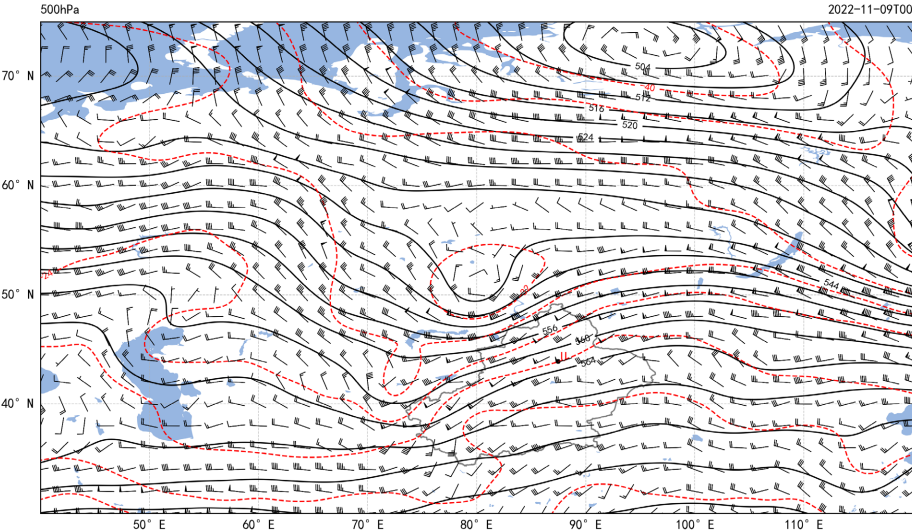
天气实况: 2022 年 11 月 9 日,强冷空气致北疆出现大范围的雨雪天气,伊犁河谷至北疆沿天山一带以降雪为主,南疆西部山区局地降水量达 23.7 mm,达暴雪量级。11 月 9~10 日,乌鲁木齐机场历经雨转雨夹雪转雪天气。2022 年 11 月 9 日 06:00 乌鲁木齐机场出现小雨天气,期间偏西风转西北风,风速 3~7 m/s,当日 17:00 由小雨转为雨夹雪,降雨持续 10.5 小时。18:00 又由雨夹雪转为小雪天气,直至 10 日 03:30 小雪转为少云天气。整个过程降水量 15.2 mm,降雨时段(06:00~16:30)降水量达中雨量级,降雪时段(17:00~24:00)达中雪量级,且此次过程无新增积雪深度。

环流形势: 500 hPa: 8 日 20 时,亚欧大陆中纬度呈“两脊两槽”形势,新疆区域为槽前西南气流控制。9 日 08 (如图 1(a)所示),东欧脊顶低槽发展致乌脊减弱东移,巴湖低槽加深东移并分裂。9 日 20 时,环流经向度减弱,北支槽影响北疆,南支槽移至南疆西部。10 日 08 时,新疆区域转为偏西、西北气流控制。

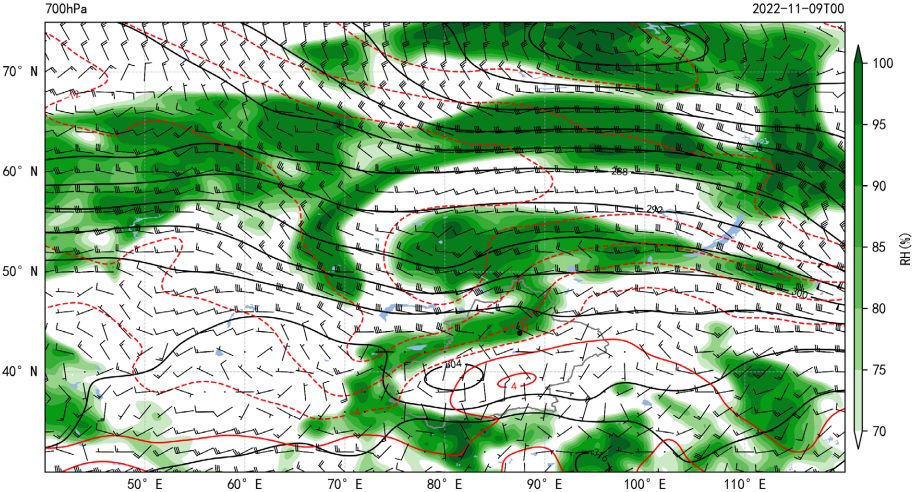
700 hPa: 环流形势与 500 hPa 类似且垂直方向略微后倾。8 日 20 时,新疆位于槽前,有冷平流向南北疆西部输送。9 日 08 时(如图 1(b)所示),北疆受短波槽影响,南疆西部为气旋性环流,冷平流持续,锋区加强,0℃线南压。9 日 20 时,短波槽移至东疆,锋区强,0℃线基本移出新疆区域。10 日 08 时,北疆转偏西气流,南疆有短波槽,锋区减弱。

850 hPa: 8 日 20 时,北疆有短波槽,南疆有低压,冷平流向南北疆西部输送,锋区加强。9 日 08 时(如图 1(c)所示),巴湖西南侧形成闭合高压,北疆为高压前沿西北气流控制,南疆西部转西北偏西气流。9 日 20 时,冷高压控制北疆西部,锋区南压。10 日 08 时,北疆地区基本为冷高压控制,锋区略有减弱。

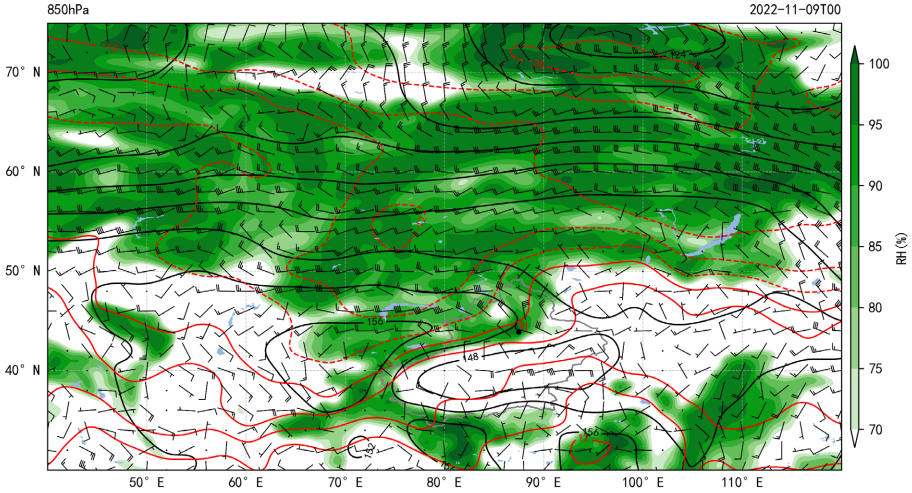
地面: 08 日白天,冷高压位于里海-咸海一带,强度大于 1032 hPa,新疆区域位于冷高压前部。至 9 日(如图 1(d)所示)后半夜,冷高压不断增强东移影响新疆区域,中心强度一度大于 1036 hPa。10 日白天北疆地区基本为冷高压控制。冷高压沿偏西路径入侵新疆区域。



(a)



(b)



(c)

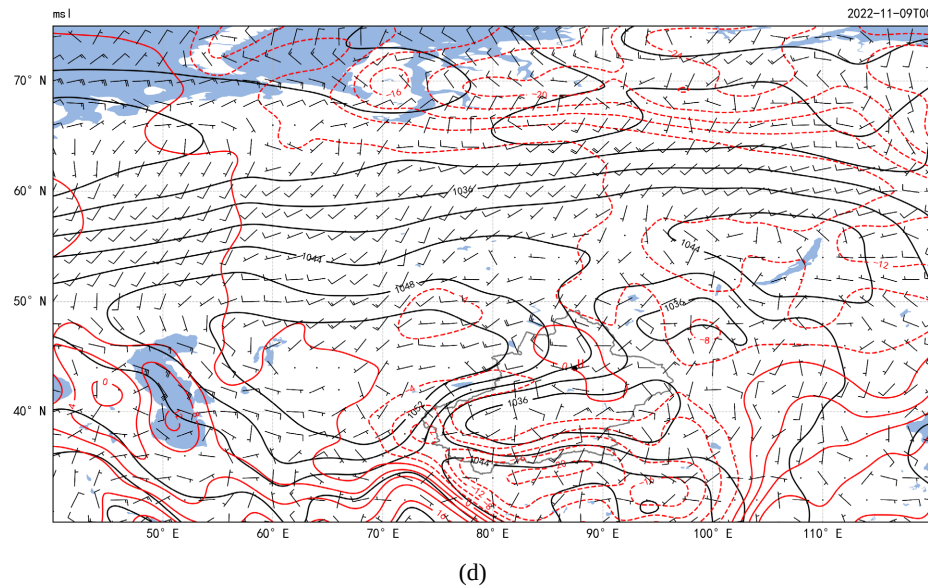


Figure 1. Synoptic conditions at 08:00 on November 9, 2022, at 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c), and surface (d)
图 1. 2022 年 11 月 9 日 08:00 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c)和地面(d)天气形势

(二) 案例二：2024 年 4 月 12~13 日乌鲁木齐机场雨转雪伴大风沙尘天气过程

天气实况：2024 年 4 月 12~13 日，高空槽东移南下引发北疆降水、大风沙尘及降温，部分地区气温降至 0℃ 以下，山区达 -5℃~-10℃。北疆西部、北部及天山中段北坡出现雨雪天气，局地达中雨或中雪。4 月 12 日，乌鲁木齐机场在三小时内经历了复杂多变的天气过程，由小雨转为雨夹雪再转为雪，并出现了一个时次的冰粒。12 日 16:00 乌鲁木齐机场出现小阵雨，16:30 转变为小雨。18:30，小雨转为小雨夹雪，到 19:14 又转为冰粒天气。整个过程降水量 3 毫米，无新增积雪深度。

500 hPa：2024 年 4 月 11 日 20 时，欧亚中高纬“一脊一槽”，乌拉尔山高压脊，里咸海至西西伯利亚低槽，新疆受平直西风控制。脊后暖平流推动脊东移，脊前偏北气流(44 米/秒)动量下传，冷空气南下，低槽加深。12 日 08 时(如图 2(a)所示)，低槽移至巴湖北部；14 时影响北疆西部，环流转经向；20 时移至北疆偏东；13 日 08 时移出东疆，新疆转西北气流。

700 hPa：12 日 02 时，低槽位于巴湖北部至西西伯利亚，西南急流(20~22 米/秒)向北疆输水汽。08 时(如图 2(b)所示)低槽影响北疆西部，锋区加强；20 时移至北疆东部；13 日 02 时移出新疆。

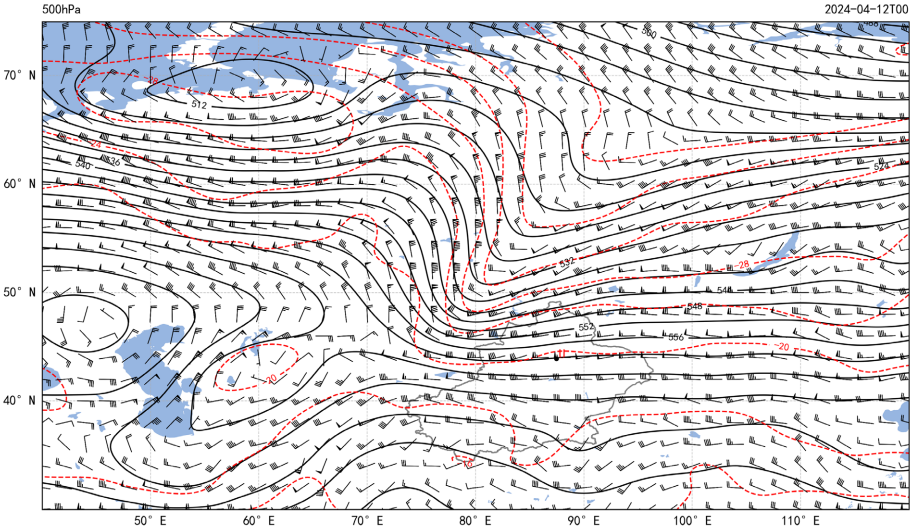
850 hPa：12 日 02 时，低槽位于北疆西部、北部，新疆地区受弱气压场控制。巴湖北部温度槽落后，冷平流强，降温显著。08 时(如图 2(c)所示)，低槽东移，槽后西北风增强至 12~14 米/秒，冷空气入侵北疆地区。

地面冷高压：12 日 08 时(如图 2(d)所示)，里海 - 巴湖冷高压控制；14 时东移，北疆气压梯度增大，锋生明显，锋线移至北疆偏东，伴大风。13 日 02 时，高压中心移至北疆北部，锋线移出东疆。北疆盆地风力较强，但降水较弱或无降水的出现，使得沙砾大量悬浮于空中无法快速沉降，因而造成了大范围的沙尘天气。

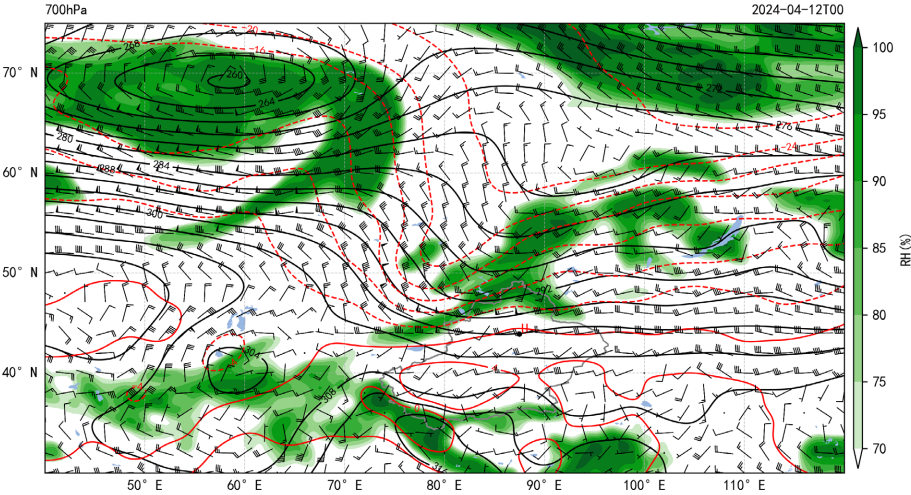
4. 乌鲁木齐降水相态转变机制分析

4.1. 环流形势

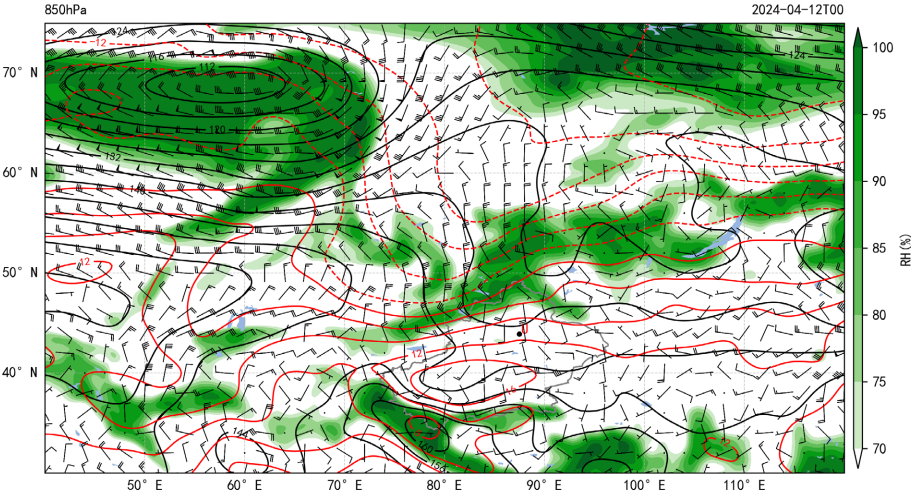
乌鲁木齐机场的降水相态转变受环流形势的协同作用控制，包括高空槽移动、冷平流作用、水汽输送及地形影响。高空槽的移动是降水相态转变的关键驱动因素。



(a)



(b)



(c)

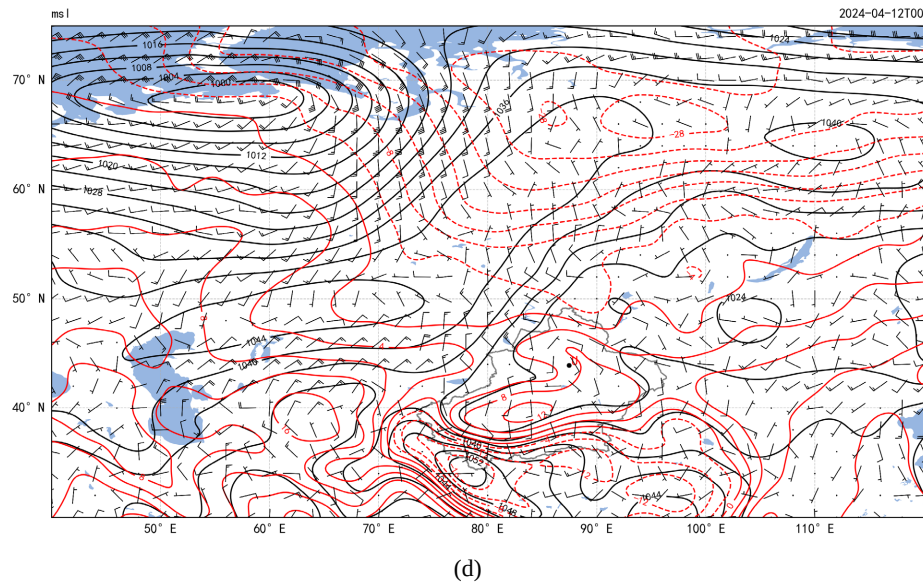


Figure 2. Synoptic conditions at 08:00 on April 12, 2024, at 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c), and surface (d)
图 2. 2024 年 4 月 12 日 08:00 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c) 和地面(d)天气形势

高空槽的移动是降水相态转变的关键驱动因素。2022 年 11 月 9~10 日, 巴尔喀什湖低槽分裂东移, 槽前西南气流输送水汽, 促使降水从雨转为雨夹雪, 最终转为雪; 2024 年 4 月 12~13 日, 西西伯利亚低槽东移, 北疆环流由纬向转为经向, 导致降水从雨转为雨夹雪, 再转为冰粒。高空槽的移动通过改变气流性质及其槽前辐合、槽后辐散作用, 直接影响降水的强度和相态。

冷平流南下是降水相态转变的核心动力。冷平流不仅加强锋区, 还使 0℃ 等温线南压, 导致低层温度下降, 进而引发降水相态转变。2022 年 11 月 9~10 日, 持续的冷平流使降水从雨转为雪; 2024 年 4 月 12~13 日, 较强的冷平流促使降水从雨转为雨夹雪, 最终转为冰粒。冷平流的强度和持续时间是决定相态转变的关键。

水汽输送和湿度条件对降水相态转变起到辅助作用。2022 年 11 月 9~10 日, 充足的水汽输送和高湿配合冷平流, 促使降水转为雪; 2024 年 4 月 12~13 日, 尽管比湿较低, 但稳定的水汽输送仍支持降水相态从雨转为雨夹雪和冰粒。水汽条件虽非决定性因素, 但其供应充足与否直接影响降水的形成和维持。

乌鲁木齐机场位于天山北坡, 地形抬升作用增强了降水强度。冷空气南下与地形共同作用, 促使降水相态从雨转为雪或冰粒。地形抬升不仅增加了水汽凝结率, 还通过增强上升运动进一步促进降水形成。此外, 地形对局地环流的改变也影响了降水的分布和强度。

综上所述, 乌鲁木齐机场的降水相态转变是高空槽移动、冷平流作用、水汽输送及地形影响协同作用的结果。其中, 冷平流的强度和持续时间是决定性因素, 而水汽条件和地形抬升则起到重要的辅助作用。这些因素的综合作用使得降水相态在不同天气过程中表现出显著变化, 对机场运行和飞行安全具有重要影响。

4.2. 风、温、湿条件

风场、温度场及湿度场的协同作用是降水相态转变的关键驱动因素。风场的变化, 诸如风向转为西北风及风速增强, 通过动力条件和水汽输送影响降水的形成与维持。2022 年 11 月 9 日(如图 3(a)所示), 底层风向从偏西风转为西北风, 风速为 3~7 m/s, 配合低层冷平流和高湿度(>90%), 促使降水相态由雨转为雪; 2024 年 4 月 12 日(如图 3(b)所示), 低空由偏南风转为西北风, 风速达 16~18 m/s, 伴随 700 hPa 和 850 hPa 显著降温(分别从 2℃ 降至 -3℃、-4℃ 降至 -12℃)及 850 hPa 相对湿度上升至 90%, 导致降水相态

由雨转为雨夹雪。温度场的垂直分布和变化，如冷平流南下及 0℃ 线位置，直接决定了降水相态的转变，而湿度场的高值则为降水的发生和维持提供了必要条件。因此，在预报中应综合监测风场、温度场及湿度场的变化，特别是风向转变、温度垂直分布及低层湿度，以提高降水相态转变的预报准确性。

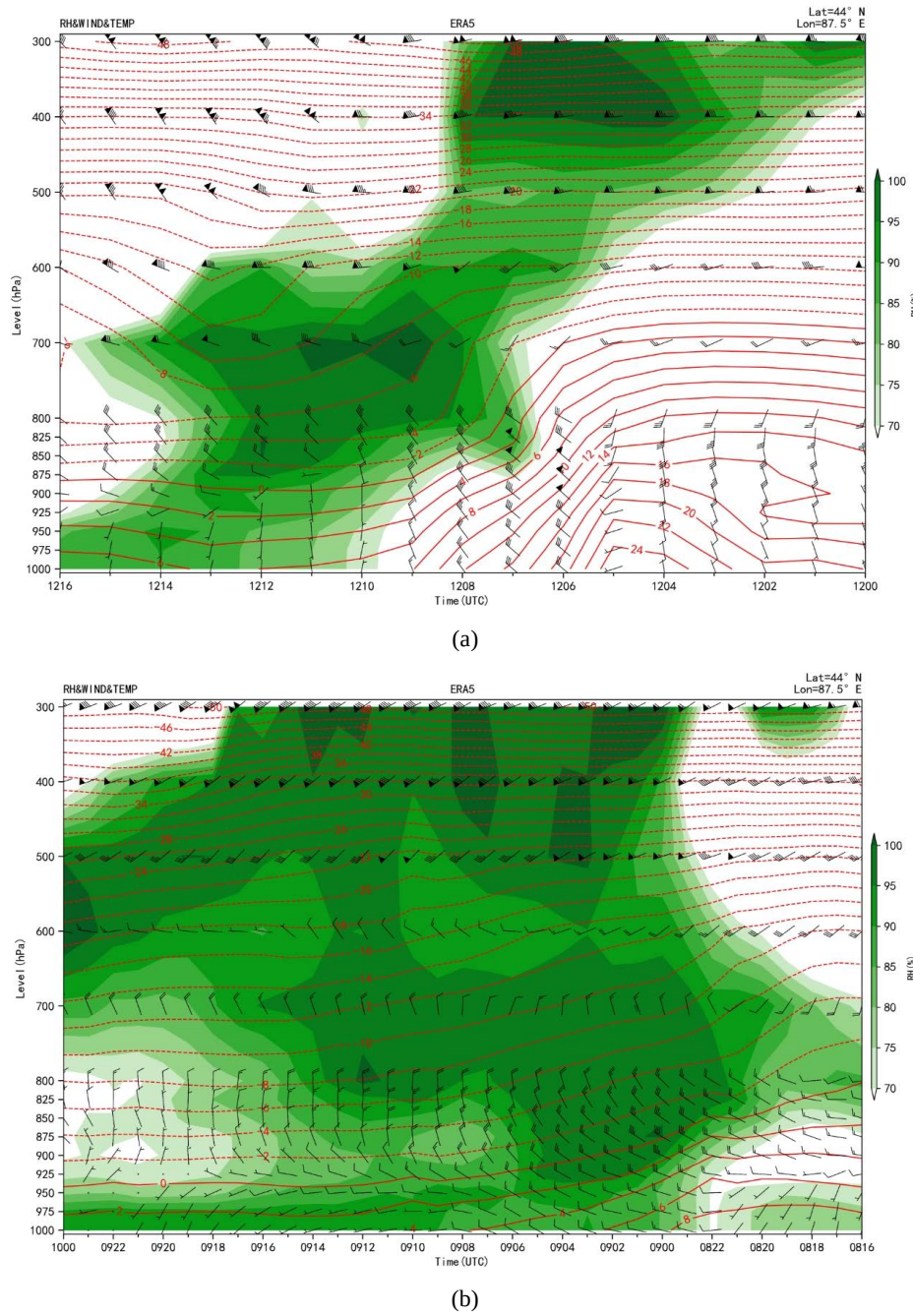


Figure 3. Wind, temperature, and humidity profiles for November 8~10, 2022 (a) and April 12, 2024 (b)
图 3. 2022 年 11 月 8~10 日(a)、2024 年 4 月 12 日风温湿廓线(b)

4.3. 温度层结

温度场对乌鲁木齐机场降水相态转变具有决定性影响。2022 年 11 月 8 日~10 日(如图 4(a)所示), 850

hPa 温度从 2℃降至-6℃，跑道温度从 6℃~7℃降至-1℃，降水相态依次由降雨(850 hPa 温度 > 0℃)转为雨夹雪(温度 ≈ 0℃)，最终转为降雪(温度 < 0℃)。2024 年 4 月 11 日~13 日(如图 4(b)所示)，850 hPa 温度由 15℃骤降至-4℃，跑道温度从 10℃升高至 20℃后快速降至 4℃，降水相态由降雨转为雨夹雪，并短暂出现冰粒，最终转为降雪。温度变化趋势直接主导相态转变：850 hPa 温度持续下降易导致降雨转雪，而在 0℃ (-2℃至 2℃)附近波动则可能形成雨夹雪或冰粒。因此，预报中需重点关注 850 hPa 及跑道温度的变化趋势，结合数值预报模式、历史个例及多源数据，以提高降水相态转变的预报准确性。

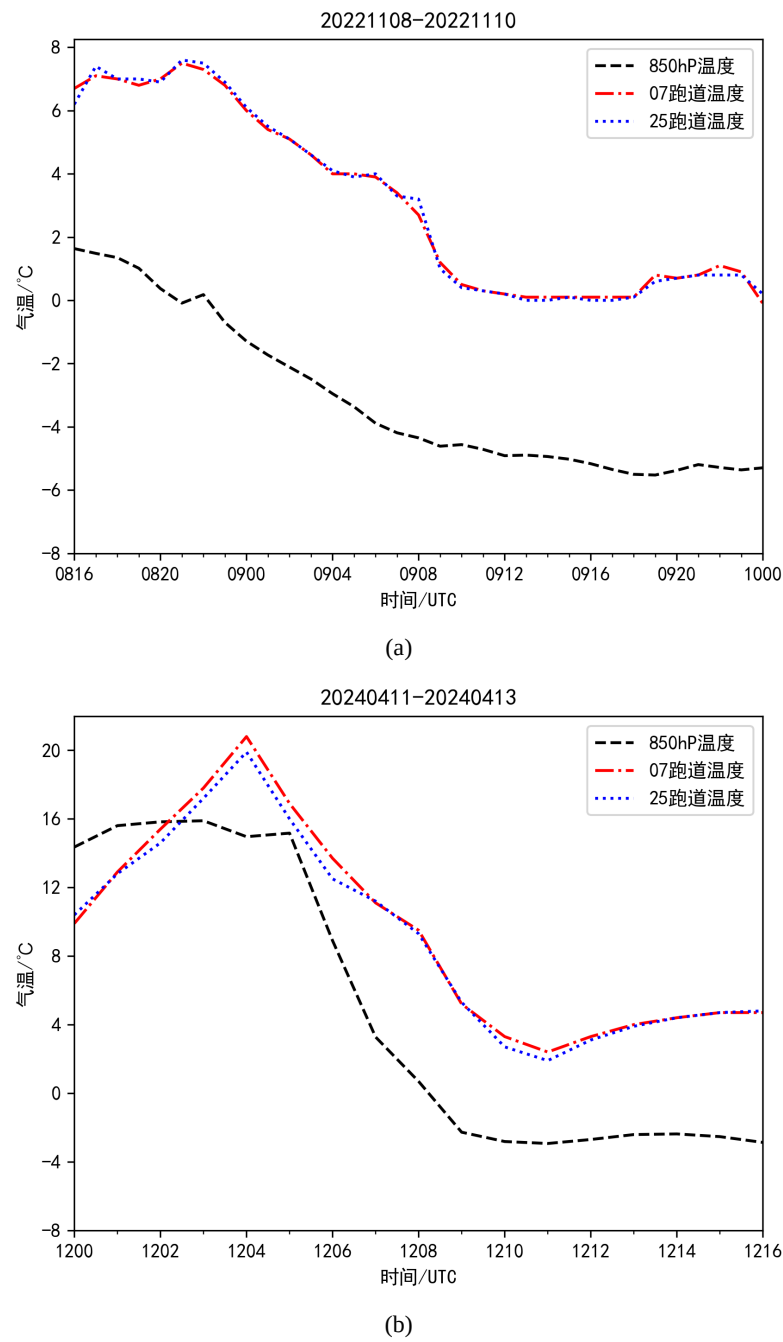


Figure 4. Temperature at 850 hPa and Runways 07/25 at Urumqi Airport for November 8~10, 2022 (a) and April 12, 2024 (b)
图 4. 2022 年 11 月 8~10 日(a)、2024 年 4 月 12 日(b)乌鲁木齐机场 850 hPa 及 07/25 号跑道温度

4.4. 水汽条件

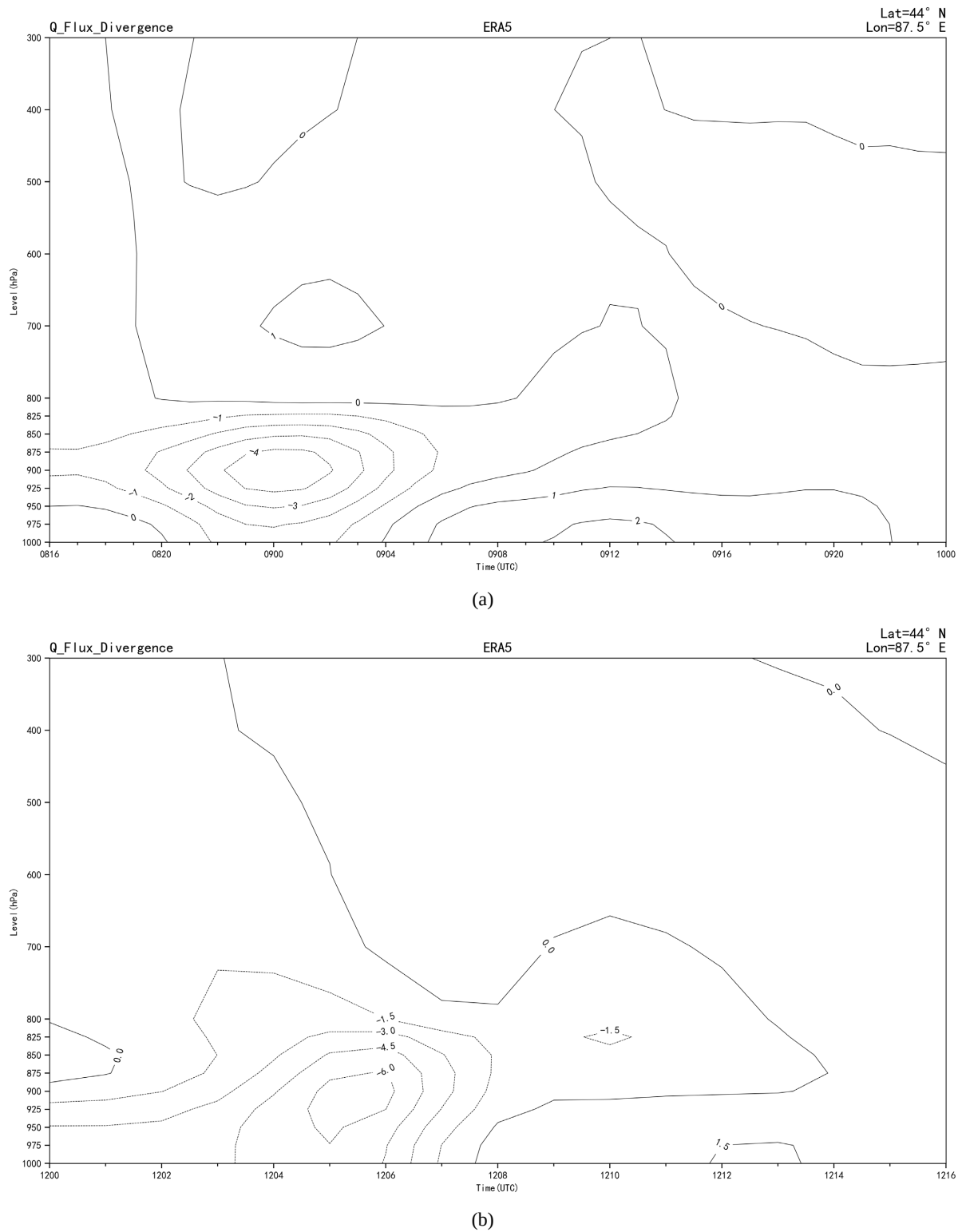


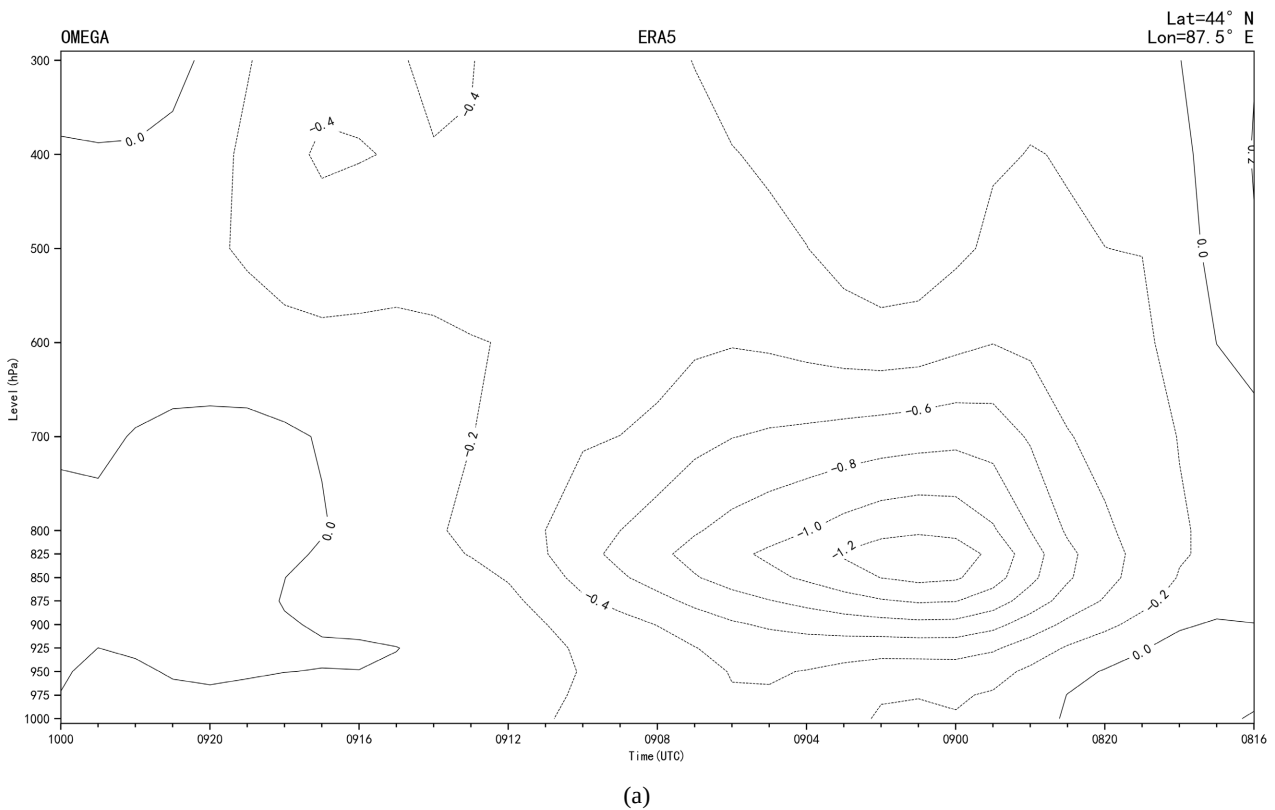
Figure 5. Moisture flux divergence at Urumqi Airport for November 8~10, 2022 (a) and April 12, 2024 (b)
图 5. 2022 年 11 月 8~10 日(a)、2024 年 4 月 12 日(b)乌鲁木齐机场水汽通量散度图

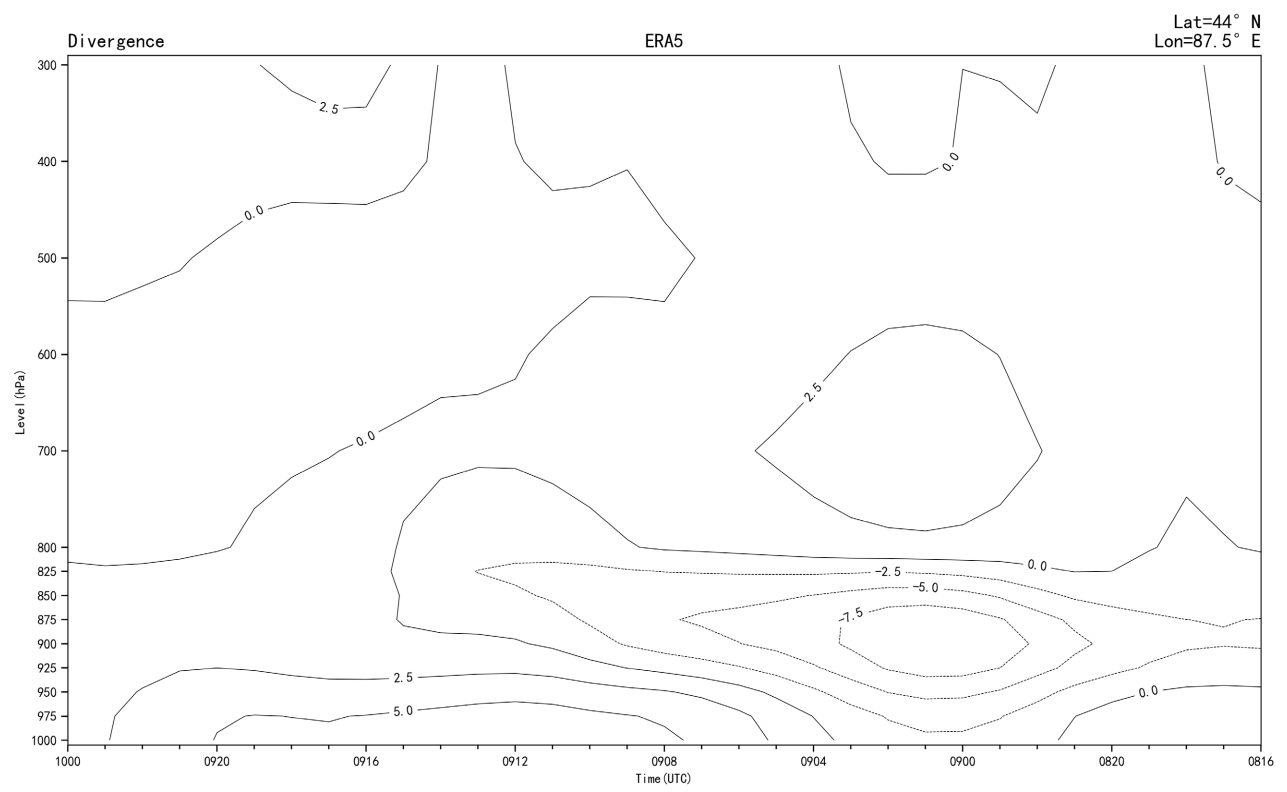
在乌鲁木齐机场,降水相态转变与水汽通量散度的变化密切相关。2024年4月12日(如图5(a)所示)个例显示,雨转雨夹雪时低层水汽辐合减弱、中层开始辐散,雨夹雪转冰粒时中层和高层辐散进一步增强;2022年11月9~10日(如图5(b)所示)个例表明,雨转雨夹雪时低层水汽辐合减弱、中层辐散增强,雨夹雪转雪时中层辐散进一步加剧、低层辐合持续减弱。低空较强的水汽通量辐合是降雨发生的重要条件,而中层水汽通量散度从辐合到辐散的转变及低空辐合的减弱,是降水相态从雨向雨夹雪、雪转变的关键信号。总体而言,乌鲁木齐机场降水相态转变过程中,雨转雨夹雪时低层水汽辐合减弱、中层开始辐散,雨夹雪转雪或冰粒时中层和高层辐散增强、低层辐合持续减弱。水汽通量散度在低层减弱、中层和高层增强的波动趋势,为降水相态转变提供了重要的预报参考。

4.5. 动力条件

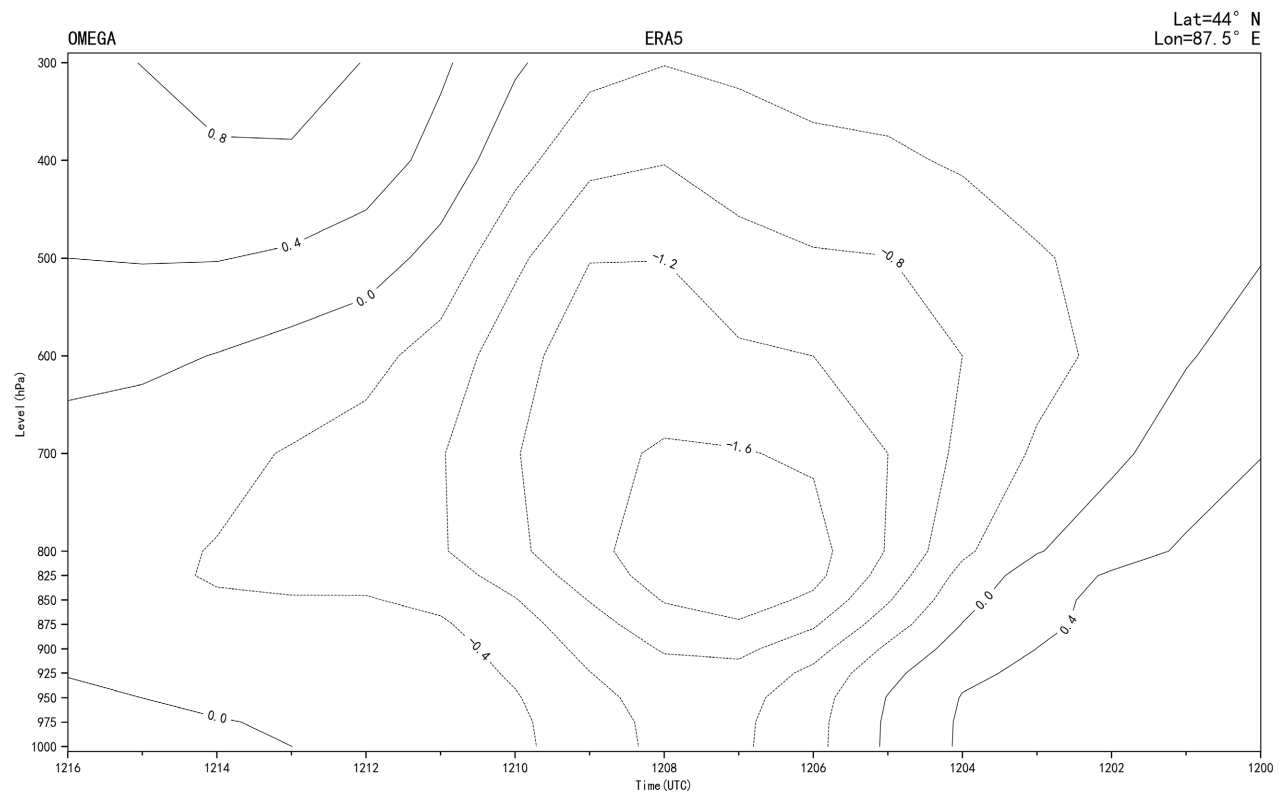
基于乌鲁木齐机场两次典型降水过程的观测数据,发现垂直运动与散度场变化对降水相态转变起到了关键作用。在2022年11月9日的天气过程中(如图6(a)、图6(b)所示),20:14当低层(850~950 hPa)出现 -0.4 Pa/s 的下沉运动配合 $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐合时,降水由雨转为雨夹雪;4分钟后当下沉增强至 -0.8 Pa/s 且辐合减弱时,完全转为降雪。类似地,在2024年4月12日的过程中(如图6(c)、图6(d)所示),18:30当低层下沉运动达 -1.6 Pa/s 、辐合达 $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时出现雨夹雪;19:14当下沉进一步增强至 -7.2 Pa/s 且中层(700~800 hPa)转为辐散时,降水相态转变为冰粒。

通过分析两场天气过程的垂直速度(ω)和散度数据,发现低层(850~950 hPa)强上升运动(垂直速度0.0到 0.4 Pa/s)和辐合(散度 -7.5 到 $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)是降雨或小阵雨发生的关键条件;中层(700~800 hPa)辐合减弱(散度 -0.4 到 $-0.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)和上升运动减小(垂直速度0.4到 0.0 Pa/s)是雨转雨夹雪的显著特征;而低层辐合(散度 -1.2 到 $-0.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)与中层辐散(散度 -0.8 到 $-0.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)同时存在时,可能预示冰粒天气的形成。





(b)



(c)

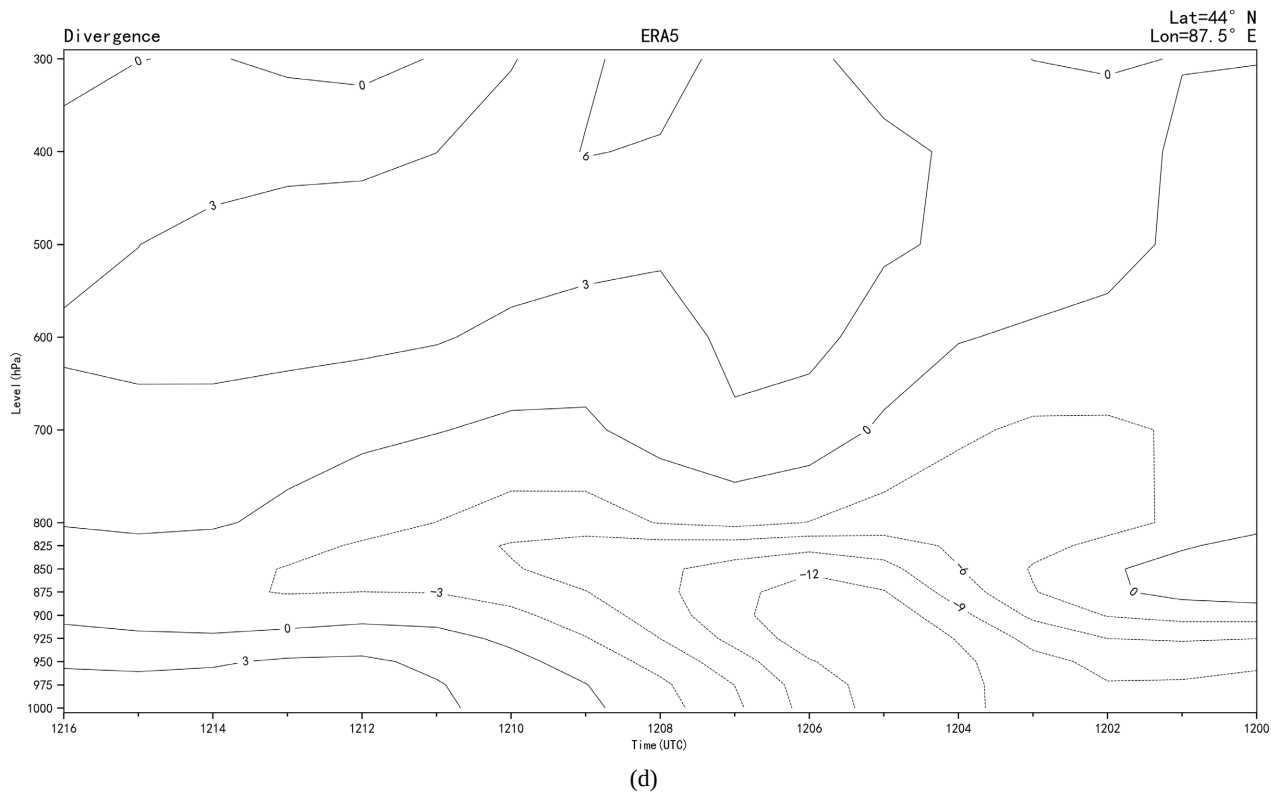


Figure 6. Vertical velocity and divergence at Urumqi Airport for November 8~10, 2022 (a) (b) and April 12, 2024 (c) (d)
图 6. 2022 年 11 月 8~10 日(a) (b)、2024 年 4 月 12 日(c) (d)乌鲁木齐机场垂直速度和散度图

5. 结论

乌鲁木齐国际机场位于欧亚大陆腹地，其温带大陆性干旱气候和复杂地形导致多相态降水天气频发。本文基于 2022 年 11 月 9~10 日和 2024 年 4 月 12~13 日两场典型降水过程，综合多源数据，剖析了降水相态转变的动力与热力机制，主要结论如下：

- 1、降水相态转变由高空槽移动、冷平流、水汽输送及地形协同作用驱动。高空槽改变气流性质，冷平流南下使 0℃ 等温线南压，水汽输送和湿度条件影响降水维持，地形抬升增强降水强度。
- 2、温度场对降水相态转变起决定性作用。850 hPa 温度持续下降致降雨转雪，0℃ 附近波动则可能形成雨夹雪或冰粒。
- 3、降水相态转变与水汽通量散度变化密切相关。雨转雨夹雪时，低层水汽辐合减弱、中层开始辐散；雨夹雪转雪或冰粒时，中层和高层辐散增强。
- 4、低层(850~950 hPa)强上升运动(垂直速度 0.0 到 0.4 Pa/s)和辐合(散度 -7.5 到 $-2.5 \times 10^{-5} s^{-1}$)是降雨的关键条件；中层(700~800 hPa)辐合减弱和上升运动减小是雨转雨夹雪的特征；低层辐合与中层辐散同时存在时，可能预示冰粒天气。

本研究为乌鲁木齐机场降水相态预报提供了动力与热力判据，建议监测低层散度极值区、中层垂直速度梯度及温度变化趋势，并结合 0℃ 层高度动态调整阈值。未来需拓展样本量，完善判别标准，提升预报精准度，进一步保障航空运行安全与效率。

参考文献

[1] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 气象, 2012, 38(1): 96-102.

-
- [2] 王健, 吕新生, 赵克明, 等. 地基微波辐射计对乌鲁木齐市暴雨天气过程的观测分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(3): 45-49.
 - [3] 韩珏靖, 张飞, 张臻, 等. MP-3000A 型地基微波辐射计的资料质量评估和探测特征分析[J]. 气象, 2015, 41(2): 226-233.
 - [4] 汪小康, 徐桂荣, 院琨. 不同强度降水发生前微波辐射计反演参数的差异分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(3): 227-233.
 - [5] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象, 2014, 40(2): 216-222.
 - [6] 王丽娟, 王俊超, 何明琼, 等. 基于微波辐射资料的一次高速公路段强浓雾过程监测分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(4): 330-336.
 - [7] 赵金霞, 范苏丹, 朱晓晶. 微波辐射计资料在大雾预报预警中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(3): 31-35.
 - [8] 张俊兰, 万瑜, 闵月. 乌鲁木齐“2015.12.11”极端暴雪天气的综合分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(1): 1-10.
 - [9] 祝小梅, 白婷, 齐元元. 新疆北部降水相态的识别判据研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 7-12.
 - [10] 李海花, 张云惠, 赵玲, 等. 基于微波资料的乌鲁木齐春季两次强降水相态对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(6): 54-61.
 - [11] 蒋慧敏, 刘春云, 贾健. 乌鲁木齐不同相态级别降水的变化特征分析[J]. 农业与技术, 2020, 40(9): 102-106.
 - [12] 陈阳权. 乌鲁木齐机场 2021 年“10.06~07”初雪天气过程及雨雪转化成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(5): 866-875.
 - [13] 黄海波. 乌鲁木齐机场一次高影响冻雨天气分析[J]. 自然科学, 2022, 10(6): 980-985.