

2024年2月西安机场一次罕见冻雨伴冰粒天气过程分析

张高杰

中国民用航空西北地区空中交通管理局气象中心, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月14日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月18日

摘要

基于欧洲预报中心再分析资料、实况观测数据以及探空数据对西安机场一次罕见冻雨伴冰粒的天气过程进行了分析, 结果表明: 700 hPa低空急流和850 hPa的切变辐合为冻雨天气的发生提供了暖层、水汽和抬升条件; 本次冻雨天气过程的形成机制为融化机制, “冷-暖-冷”的层结结构是冻雨产生的一个必要条件, 且三个层次均需达到一定的厚度; “冷-暖-冷”的温度层结背景下, 若中层暖层温度低于0°C, 易出现阵性霰天气。

关键词

西安机场, 冻雨, 过程分析

Analysis of a Rare Freezing Rain Accompanied by Ice Particles Weather Process at Xi'an Airport in February 2024

Gaojie Zhang

Meteorological Center of Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 14th, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 18th, 2025

Abstract

Based on the reanalysis data from the European Forecasting Center, observational data, and

radiosonde data, an analysis was conducted on a rare weather process of freezing rain accompanied by ice particles at Xi'an Airport. The results indicate that the low-level jet stream at 700 hPa and the shear convergence at 850 hPa provided the conditions of warm layer, water vapor, and lift for the occurrence of freezing rain. The formation mechanism of this freezing rain weather process is the melting mechanism, and the "cold-warm-cold" stratification structure is a necessary condition for the generation of freezing rain, with all three layers needing to reach a certain thickness. Under the "cold-warm-cold" temperature stratification background, if the temperature of the middle warm layer is below 0°C, it is prone to occur with gusty sleet weather.

Keywords

Xi'an Airport, Freezing Rain, Process Analysis

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

按照《民用航空气象地面观测规范》，冻雨是指过冷水滴与地面地物相碰而即刻冻结的降水现象。冻雨降落在跑道上，会在其表面形成光滑冰层，显著降低跑道的摩擦系数，增加飞机的起降滑跑距离；此外，降落在机体表面的冻雨，会引起飞机机翼、引擎进气口及传感器表面结冰，导致升力损失、引擎喘振或仪表数据失真。严重或者长时间的冻雨天气有时会造成机场的关闭。因此，冻雨是冬季影响航空安全、正常运行的重要航危天气之一。

高辉、赵思雄、李登文等[1]-[3]对冻雨出现时的环流背景场进行了分析，研究表明中纬度大尺度环流持续异常配合西风带上异常活跃的波动，容易出现大范围冰冻雨雪天气。冻雨多出现在锋面附近，地面多为偏东北风的冷平流。冻雨的形成机制可以分为融化机制和暖雨机制。融化机制以 0°C 为界将温度层结分为“冰晶层-暖层-冷层”，具有强逆温层；而暖雨机制则没有冰晶层，水汽在暖层中形成大雨滴后，直接进入近地面冷层，形成过冷却水，降落地面形成冻雨。欧建军等[4]利用全国观测资料和探空资料对 2008~2010 年的全国冻雨过程进行研究，发现融化机制的冻雨占总数 27%，南方以暖雨机制为主，北方以融化机制为主。两种机制中，暖层在冻雨过程中都起着至关重要的作用。马晓刚等[5]分析了暖层与冻雨落区的关系，并以此建立了冻雨落区的基本概念模型。此外，许多学者[6]-[9]针对冻雨天气典型个例，围绕冻雨过程的影响系统、温度垂直结构特征、形成机制及预报技术等方面展开了深入研究，并得出一些有益的结果，对提升当地的预报准确率有显著效益。

有关冻雨的研究主要集中在南方，北方地区特别是西北地区机场，由于冻雨出现次数少，研究较少。本文主要通过实况观测资料、再分析资料以及探空资料的综合分析，对西安机场一次雨转冻雨转雪并伴冰粒的一次罕见天气过程进行分析，目的在于揭示雨、冻雨、雪伴冰粒相态转换过程中的环流特征以及温度层结特征，为后续冻雨的预报提供个例参考，进而提供预报准确率。

2. 资料介绍

西安机场现有南北两个飞行区，两条南北平行跑道分别为 23 跑道和 05 跑道，两者相距约 2100 米。南北两条跑道在跑道两端以及中间点共部署有 6 套自动观测探测设备，可以探测风、温度、云量、云高、跑道视程、主导能见度以及降水量等物理量。目前西安机场采用北跑道南端(05L)的探测数据作为西安机

场的基准数据。本文所采用的资料为欧洲预报中心 $0.125^{\circ} * 0.125^{\circ}$ 的再分析资料，西安机场 05L 探测数据以及机场附近泾阳探空站的探空数据。

3. 天气实况以及航班正常率

2024 年 2 月 20 日，西安机场出现了小雨转冻雨转小雪伴阵性霰的复杂天气过程，冻雨天气为机场近 15 年来首次出现。从表 1 西安机场 20~21 日的降水实况，可以看出：20 日 11:50 (北京时，下同) 开始出现连续性小雨天气，20 日 16:56 转化为冻雨天气，随着冷空气的逐渐渗透，20:52 降水相态由冻雨转化为小雪，后续维持小雪或阵性霰天气，冻雨持续时间 3 小时 56 分钟。受降雪和冻雨天气影响，机体大量积冰，西安机场 20 日除冰 388 架次，21 日除冰 320 架次(见表 2)。大量航班除冰，造成西安机场大面积航班延误，20 日、21 日机场始发出港正常率分别 49.58%、50.99%，放行正常率分别为 62.76%、67.55%；22 日机场增加除冰设备和人员，正常率才逐渐恢复到 85.23%。

Table 1. Weather conditions of Xi'an Airport on February 20~21

表 1. 西安机场 2 月 20~21 日天气实况

日期	2 月 20 日			2 月 21 日	
时间	11:50~16:56	16:56~20:52	20:52~24:00	00:00~13:35	18:35~24:00
天气现象	-RA	-FZRA	-SHGS/-SN	-SN	-SHGS/-SN
积雪深度	无积雪	无积雪	无积雪	2 cm	2 cm

Table 2. Normal flight rates and deicing conditions at Xi'an Airport from February 20 to 22

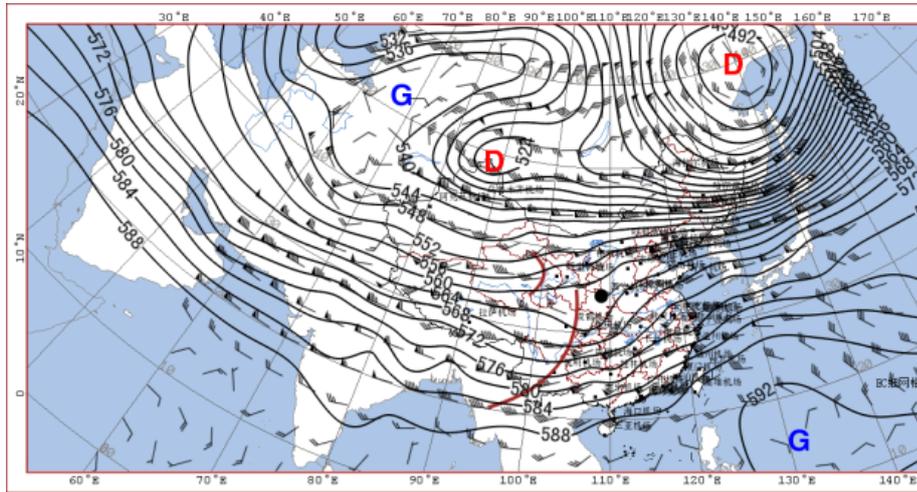
表 2. 西安机场 2 月 20~22 日航班正常率以及除冰情况

日期	放行正常率	始发正常率	进港正常率	出港正常率	除冰航空器架次	跑道除冰情况
2 月 20 日	62.76%	89.44%	52.41%	49.58%	388	无除冰
2 月 21 日	67.55%	43.97%	59.07%	50.99%	320	北跑道除冰 13 分钟
2 月 22 日	85.23%	90.79%	71.46%	75.32%	345	无除冰

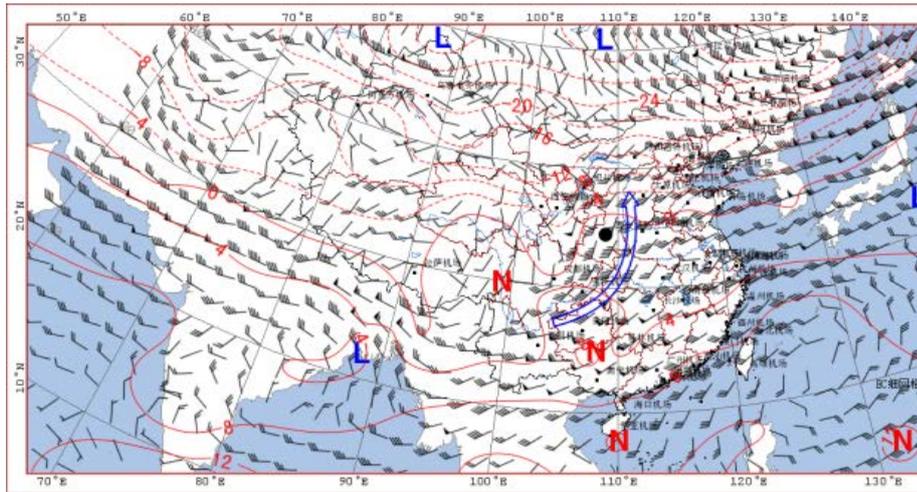
4. 形势场分析

20 日 08 时，500 hPa (图 1(a)) 高纬为一槽一脊，东亚大槽强度偏弱；中纬度大部分地区为平直偏西气流的控制，南支槽受下游弱脊影响，移动缓慢，稳定的维持在四川至广西东部。高原东部不断有短波槽生成，东移至关中地区与南支槽叠加，在陕西中南部至广西南部汇合为一宽广的低压槽。这种环流形势有利于冷空气经槽后西北气流不断进入陕西中南部地区。700 hPa (图 1(b)) 在华北地区有一明显的高压脊，脊后西南气流与上游西北气流在关中地区形成一明显切变线并长时间维持。陕西关中地区西南气流强盛，最大风速达到 18 米/秒，达到低空急流标准。西安机场位于此低空急流的左侧，不断有暖湿平流输送至机场上空，在机场附近形成明显的暖脊，温度达 2°C 以上，为冻雨的形成提供了暖层条件。与 700 hPa 相对应，850 hPa (图 1(c)) 在西安机场南部有气旋式中心开始形成，一致的偏南或东南气流为机场提供了充足的水汽条件，机场附近在 20 日 08 时相对湿度维持在 90% 以上。地面上(图 1(d))，冷高压位于蒙古中部，西安机场位于冷高压的底前部，地面为稳定的东北风，不断有冷空气回流，这与李登文等[3]介绍的冻雨形成的天气形势相一致。在上述环流背景下，容易出现长时间的降水天气，但是降水相态是如何

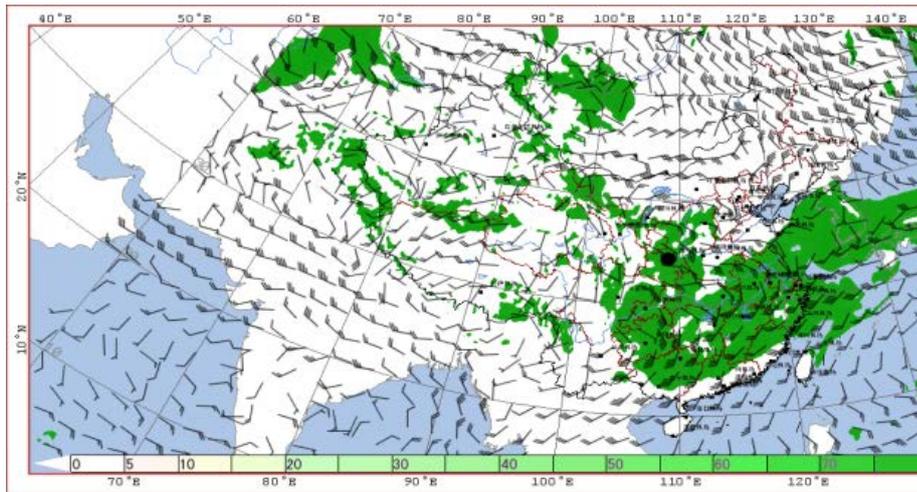
转换的，还需要通过温度层结的分布来进行定性分析。



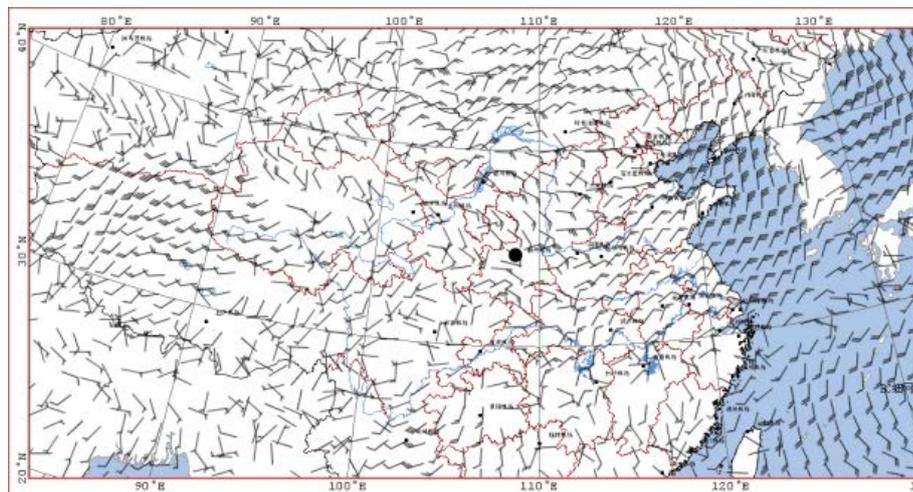
(a)



(b)



(c)



(d)

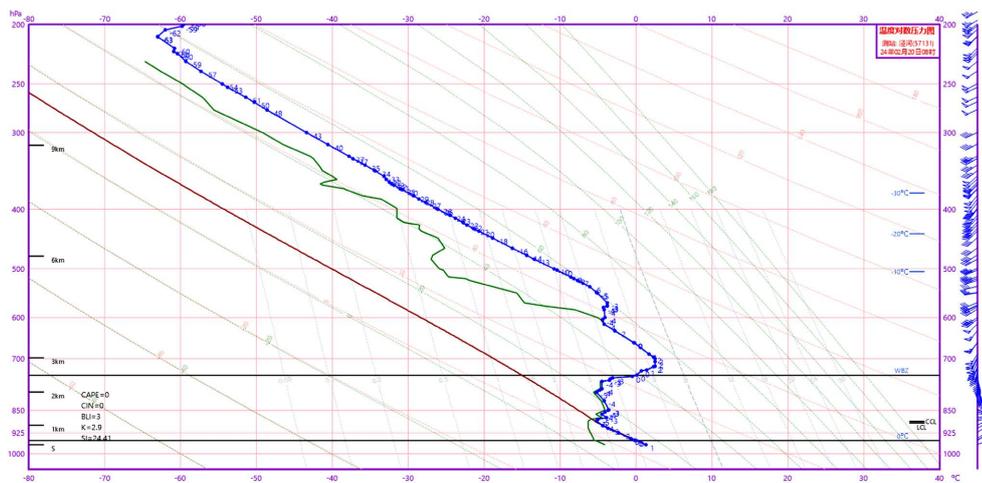
Figure 1. Situation map at 08:00 (Beijing Time) on February 20, 2024. ((a) 500 hPa Wind field and height field; (b) 700 hPa Wind field and temperature field; (c) 850 hPa Wind field and humidity zone with relative humidity $\geq 90\%$; (d) 10 m Ground wind field) (where ● represents the location of Xi'an Airport)

图 1. 2024 年 2 月 20 日 08 时(北京时)形势图。((a) 500 hPa 风场和高度场; (b) 700 hPa 风场和温度场; (c) 850 hPa 风场和相对湿度 $\geq 90\%$ 的湿度区; (d) 地面 10 m 风场)(●为西安机场所在位置)

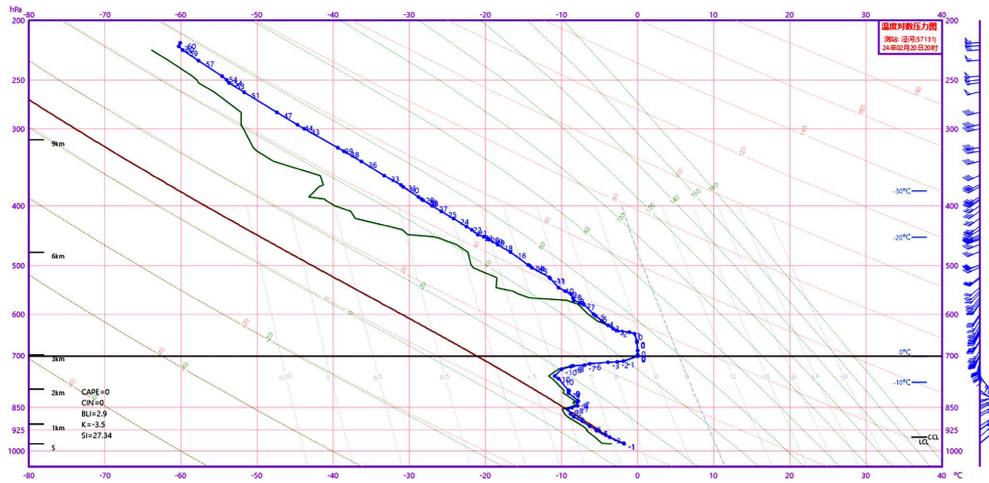
5. 温度层结分析

图 2 给出了 2024 年 2 月 20~21 日西安机场上空的温度、湿度廓线垂直分布。可以看出，在 20 日 08 时，西安机场上空 600 hPa (4 KM) 以下温度露点差为 0°C ，水汽接近饱和和状态。2.5~3 km 处有一明显的逆温层，逆温层最高气温在 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，厚度达 500 米，但此时地面温度在 2°C 左右，西安机场上空为“冷-暖”的温度层结，雨滴在下降至地面附近不会再次冻结，因此降水相态以雨为主。

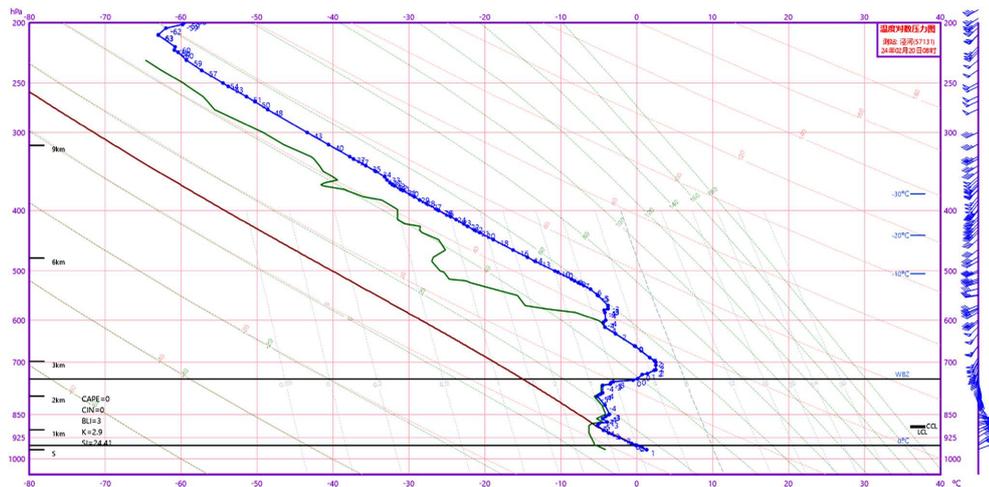
图 3 给出了西安机场 2 月 20 日 15 时~2 月 23 日 18 时气温和道面温度的温度变化情况。可以看出：气温和道面温度在整个降水过程中，具有明显的日变化，道面温度的日变化幅度明显强于气温的日变化。20 日道面温度始终维持在 0°C 以上，故没有产生积雪；21 日 00 时之后道面温度低于 0°C ，开始逐渐产生积雪；在 20~23 日的 12~18 时道面温度均在 0°C 以上，为降雪提供了较好的融化条件，因此整个降雪过程中，积雪深度始终维持在 2 cm。



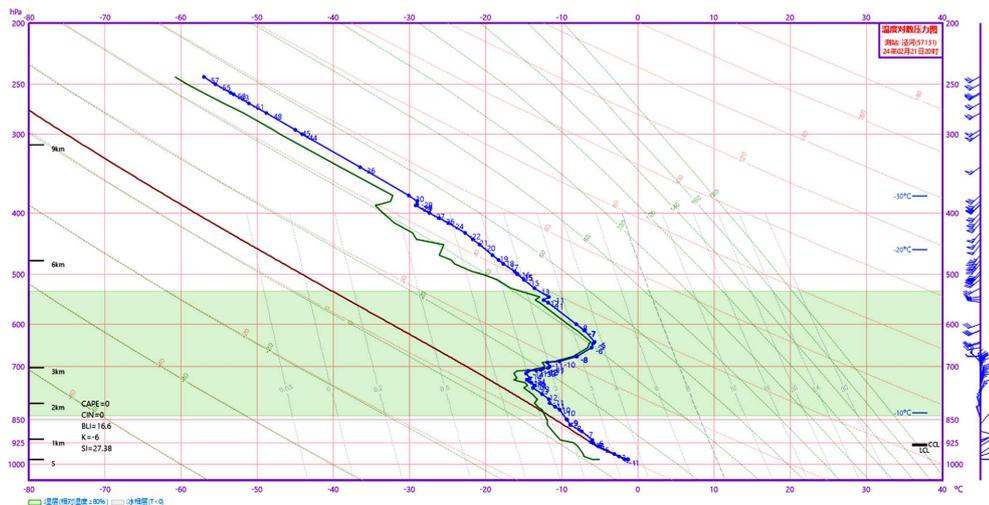
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2. Sounding map of Jingyang station ((a) 08:00 on the 20th; (b) 20:00 on the 20th; (c) 08:00 on the 21st; (d) 20:00 on the 21st)

图 2. 泾阳站探空图((a) 20 日 08 时; (b) 20 日 20 时; (c) 21 日 08 时; (d) 21 日 20 时)

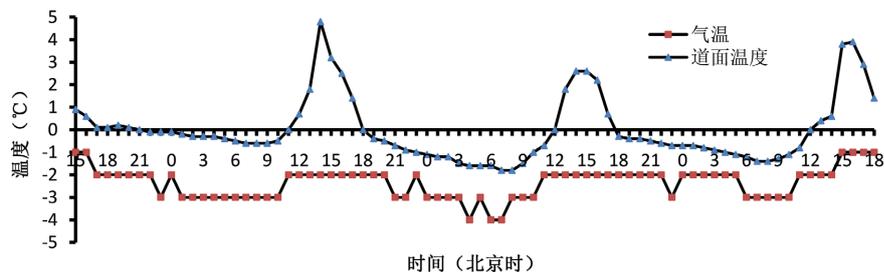


Figure 3. Temperature and pavement temperature of Xi'an Airport from 15:00 on February 20 to 18:00 on February 23
图 3. 西安机场 2 月 20 日 15 时~2 月 23 日 18 时气温和道面温度

随着地面冷空气回流,地面温度在 15 时已降至 -1°C ，“冰晶层-暖层-冷层”的温度层结已经形成,但当时地面附近冷层厚度较薄,降水相态依然为小雨。在大约 2 小时之后,20 日 16:56 地面温度持续下降并维持在 -2°C ,地面冷层厚度加强,水汽在冰晶层形成小冰粒,然后在暖层再次融化为小水滴,水滴进入近地面冷层后,迅速冷却形成过冷水滴或冰粒,降落到地面形成冻雨。由此可见,本次冻雨天气过程的形成机制为融化机制。“冷-暖-冷”的温度层结只是冻雨产生的一个必要条件,冻雨的出现还需满足三个层次均达到一定的厚度。依靠“冷-暖-冷”层结的建立时间是不能用来判断冻雨出现时间的,但是却可以作为降水相态可能转变的有效信号。

图 2(b)~(d)可以看出,20 日 20 时随着冷空气的逐渐渗透,700 hPa 温度降低至 0°C 以下,融化层消失,西安机场上空整层都处于 0°C 以下,降水相态逐渐由冻雨转化为雪;由此可见,融化层的温度可以作为冻雨相态转变的有效信号。此外,20 日 20 时之后,虽然西安机场上空整层的温度都处于 0°C 以下,但是受 700 hPa 西南急流持续输送暖平流影响,逆温层在整个降水过程中依然存在,即“冷-暖-冷”的垂直温度层结依然存在。此时,虽然不会形成冻雨,但这种温度层结符合“高架雷暴”的层结特征,逆温层之上,冷暖空气产生对流,易形成阵性降水甚至雷暴天气,西安机场于 20 日 21:56~23:25 以及 21 日 18:35~19:42 分别出现了阵性的小冰粒天气便是与这种温度层结相对应。

6. 动力条件分析

图 4 给出了西安机场上空垂直速度和涡度的高度-时间剖面图,可以看出在整个降水过程中,在

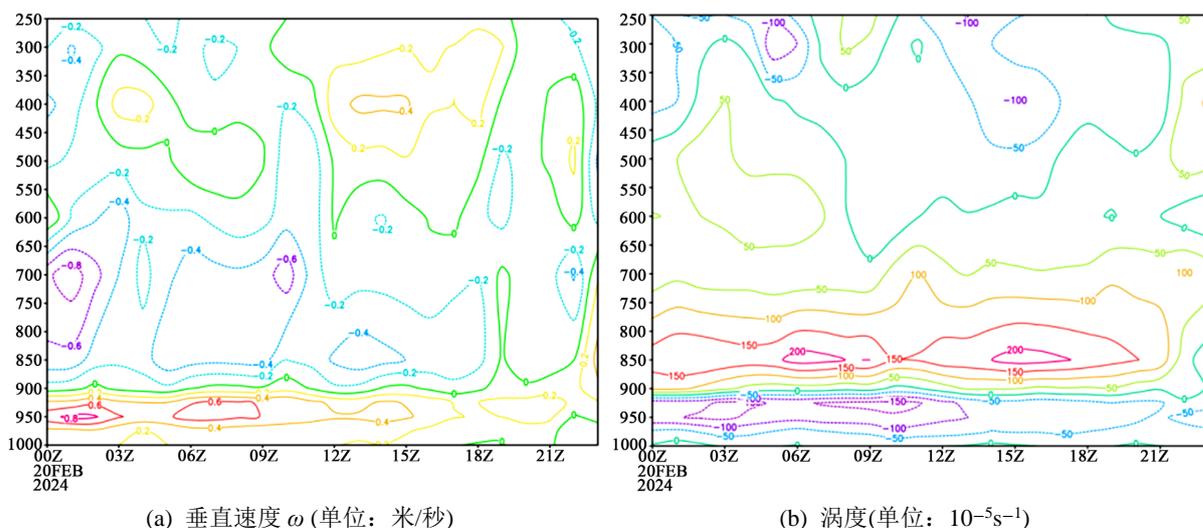


Figure 4. Altitude time profile of Xi'an Airport (34.5N, 108.5E) (UTC)
图 4. 西安机场(34.5N, 108.5E)高度-时间剖面图(世界时)

700~850 hPa 高度, $\omega < 0$, 涡度 > 0 , 为辐合上升区; 而在 400~500 hPa 为主要的辐散下沉区。这表明, 700 hPa、850 hPa 切变线为本次连续性降水提供了持续上升的动力条件。伴随不断的高空槽移过西安机场, 引起 400~500 hPa 的冷空气下沉, 700~850 hPa 暖湿空气上升, 冷暖空气对流运动也是小雪过程中出现阵性霰的动力机制。

7. 总结

1) 700 hPa 低空西南急流和 850 hPa 的切变辐合为西安机场本次冻雨天气的发生提供了充足水汽和动力抬升条件。

2) 700 hPa 持续的暖平流输送, 是形成本次冻雨天气暖层结构的主要原因。

3) 本次冻雨天气过程的形成机制为融化机制。“冷-暖-冷”的层结结构只是冻雨产生的一个必要条件, 冻雨的出现需要三个层次均达到一定的厚度。

4) 在“冷-暖-冷”的温度层结背景下, 若中层暖层温度低于 0°C , 虽然不会出现冻雨, 但易出现小冰粒等阵性降水天气。

参考文献

- [1] 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 101-106.
- [2] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 351-367.
- [3] 李登文, 乔琪, 魏涛. 2008 年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J]. 高原气象, 2009, 28(5): 1140-1148.
- [4] 欧建军, 周毓荃, 杨棋, 等. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 692-699.
- [5] 马晓刚, 曲晓波, 李月安, 等. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立[J]. 气象, 2010, 36(9): 68-73.
- [6] 韩冬. 桃仙机场一次冻雨伴随冰粒天气过程诊断分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2019, 30(2): 45-48+53.
- [7] 王兴菊, 李启芬, 王芬, 等. 贵州省 2008 年与 2022 年年初低温雨雪冻雨天气过程对比分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(5): 8-16.
- [8] 王兴菊, 李启芬, 王芬, 等. 贵州省 2008 年与 2022 年年初低温雨雪冻雨天气过程对比分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(5): 8-16.
- [9] 周庶, 汪卫平, 丁立国, 等. 贵州省近 36a 冻雨气候特征及一次冻雨天气分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(6): 60-65.