

邱贵强,赵桂香,王扬,等,2026.山西垣曲一次严重致灾电线积冰形成机制分析[J].气象,52(5):608-620. Qiu G Q,Zhao G X,Wang Y,et al,2026. Analysis on the formation mechanism of a serious disaster process caused by wire icing in Yuanqu, Shanxi Province[J]. Meteor Mon,52(5):608-620(in Chinese).

山西垣曲一次严重致灾电线积冰形成机制分析*

邱贵强¹ 赵桂香¹ 王扬¹ 卫甜² 郝婧宇¹

1 山西省气象台,太原 030006

2 中国人民解放军 63729 部队,太原 030031

提 要: 2023 年 12 月中旬,山西经历一次低温雨雪冰冻天气过程,其中 13 日山西南部垣曲县电线积冰给全县生活生产带来严重影响。利用常规气象观测、多普勒天气雷达和 ERA5 再分析资料,对此次严重致灾电线积冰过程的形成机制进行分析。结果表明:垣曲县致灾电线积冰属于雨雾混合凇类型,是前期短时间冻雨和随后长时间冻雾共同作用的结果,冻雾作用更为显著。500 hPa 北支锋区中乌拉尔山高压脊前横槽和鄂霍次克海附近深厚冷涡稳定少动,横槽底部短波槽快速东移影响山西,而南支锋区中 700 hPa 西南急流强盛,850 hPa 东北—西南向冷槽位于华北上空,地面河套倒槽强烈发展与回流形势相互作用,西南暖湿气流沿着低层冷空气垫爬升,为垣曲冻雨和冻雾的形成提供了有利的大尺度环流背景。垂直方向上“上暖下冷”温度平流配置,使得温度从低空到高空呈现“冷-暖-冷”分布结构,且中层温度高于 0℃ 而低层低于 0℃,短波槽扰动产生的垣曲短时间冻雨属于融化机制。“上湿下干”湿度平流配置和下沉运动共同导致低层大气高度饱和,加之逆温持续,促使垣曲冻雾长时间维持,丰富的过冷却水滴先后经历两次快速增长,不断碰撞电线表面冰层,致使积冰不断增厚。东南气流沿喇叭口地形迎风坡抬升,也对电线积冰增厚起到一定的促进作用。

关键词: 电线积冰,雨雾混合凇,逆温,融化,冷空气垫

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.122001

Analysis on the Formation Mechanism of a Serious Disaster Process Caused by Wire Icing in Yuanqu, Shanxi Province

QIU Guiqiang¹ ZHAO Guixiang¹ WANG Yang¹ WEI Tian² HAO Jingyu¹

1 Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006

2 Unit 63729 of the People's Liberation Army, Taiyuan 030031

Abstract: In mid-December 2023, Shanxi Province experienced a weather event of low temperature, rain, snow and icing. On 13 December, wire icing occurred in Yuanqu County located in southern Shanxi, significantly disrupting people's lives and production activities. Using conventional meteorological observations, Doppler weather radar data and the ERA5 reanalysis datasets, this paper investigates the formation mechanism of this serious disaster event caused by wire icing. The results show that this wire icing event in Yuanqu was of the mixed rime and glaze type, which was caused by the combined effects of short-duration freezing rain in the early stage and prolonged freezing fog in the subsequent period. Freezing fog played a more significant role than freezing rain. In the north frontal zone at 500 hPa, the horizontal trough in front of the high pressure ridge near the Ural Mountains and a deep cold vortex near the Sea of Okhotsk both remained stable with less movement. The short-wave trough ahead of the bottom of the

* 山西省基础研究计划(202203021211080、202403021221338、202403021222496)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2025-017)和山西省气象局重点项目(SXKZDTQ20256329)共同资助

2025 年 4 月 30 日收稿; 2026 年 4 月 10 日收修定稿

第一作者:邱贵强,主要从事灾害性天气分析及预报技术研究. E-mail: qiugq06@lzb. ac. cn

horizontal trough moved rapidly eastward into Shanxi, while in the south frontal zone, the southwest jet stream at 700 hPa was strong. The cold trough in the northeast-southwest direction at 850 hPa was located over North China, and the surface inverted-trough in Hetao Area developed violently, interacting with the return-flow weather pattern. Besides, the southwest warm-humid airflow ascended along the low-level cold air cushion, providing a favorable large-scale circulation background for the formation of freezing rain and freezing fog in Yuanqu. The temperature advection configuration of “upper warming and lower cooling” in vertical direction led to a “cold-warm-cold temperature” structure in Yuanqu from low to high levels, with the mid-level temperature above 0°C and the lower-level temperature below 0°C . The short-term freezing rain in Yuanqu, triggered by the short-wave trough, was attributed to the melting mechanism. The vertical humidity advection configuration of “wet above and dry at bottom”, coupled with sinking motion together made the lower atmosphere highly saturated. Additionally, temperature inversion continued in the lower atmosphere. These conditions collectively facilitated the long-term persistence of freezing fog in Yuanqu. Abundant supercooled water droplets that had two phases of rapid growth continuously impinged on the wire surfaces, causing ice accretion to become thickened progressively. Southeasterly airflow ascended along the windward slopes of the horn-shaped terrain, and also played a certain role in promoting the thickening of accretion on wires.

Key words: wire icing, mixed rime and glaze, temperature inversion, melting, cold air cushion

引言

电线积冰是一种自然灾害,是指雨淞、雾凇凝附在电线上或湿雪冻结在电线上的现象(中国气象局,2003)。雾凇是水汽直接凝华或过冷却雾滴直接冻结在物体上形成的冰晶物,通常在气温低于 -5°C ,湿度大或出现轻雾、雾时形成。而雨淞是过冷却雨滴接触低温物体表面后直接冻结而成的冰层,通常在气温介于 $-5\sim-1^{\circ}\text{C}$,有降雨时出现(霍治国等,2021)。电线积冰严重时,会导致断线、塔架坍塌或断裂等,继而造成电力中断,严重影响人民生活生产活动,造成国民经济损失。我国电线积冰以雾凇型积冰和雨淞型积冰为主,雾凇型积冰多出现在北方地区,如新疆(李元鹏等,2010),而雨淞型积冰在南方地区多发(赵珊珊等,2010),如江西(赵文灿等,2018)。由于雨淞型积冰较雾凇型积冰所造成的危害更大,因此对雨淞的关注和研究相对更多。

雾凇出现时大多伴有雾(顾光芹等,2012),当雾中的气温低于 0°C 时,为冻雾,根据空气达到饱和的具体机制不同,雾通常可分为辐射雾、平流雾、锋面雾、蒸汽雾、上坡雾等,尽管类型不同,但形成均与大气层结稳定、近地层较湿、地面风速较小等气象条件密切相关(吴洪等,2000;肖瑶等,2024)。

雨淞由冻雨导致,冻雨的形成通常可以用经典

的融化机制(Stewart,1985)来解释,即高空的冰晶或雪花首先下落至高于 0°C 的暖层中充分融化,随后下落至低于 0°C 的冰冻层中成为过冷却水滴,最终与地面或其他物体碰撞后发生冻结,在该机制中,融化层是必需的,温度从低空到高空为“冷-暖-冷”三层结构。但实际上,有些冻雨过程高空并没有出现融化层(Bocchieri,1980),Huffman and Norman(1988)研究发现冻雨还存在着过冷却暖雨机制,在该机制中,整层气温低于 0°C ,雨滴形成过程中无固态水凝物参与,过冷却水滴在冰冻环境中直接降至地面形成冻雨。一般来说,暖雨机制产生的冻雨云顶高度普遍不高(低于3 km),而融化机制的冻雨云顶相对较高,可达9 km(欧建军等,2011)。我国冻雨的形成存在上述两种机制,北方地区以经典的融化机制为主,如2020年11月和2021年11月东北两次冻雨过程(王宁等,2023);南方地区则存在两种机制,如2008年1月湖南和贵州冻雨过程(陶玥等,2012)、2018年1月安徽南部两次冻雨过程(王传辉等,2020)。冻雨在我国出现最多的地区是贵州,从贵州、湖南、江西到浙江存在一条冻雨带,发生频次自西到东递减(康丽莉等,2021),总体表现出山区多发的特点(许爱华等,2011;康丽莉等,2017)。根据温度垂直结构,李登文等(2009)将贵州冻雨分为单层、二层和三层结构,单层结构的整层气温低于 0°C ,为冷性逆温层;二层结构是指冷层之上存在融

化层,为暖性逆温层;三层结构从低空到高空为“冷-暖-冷”层结构,该结构对应经典的融化机制。可见,冻雨的发生通常有逆温层出现(陶诗言和卫捷,2008;黄小玉等,2008;张芳华等,2024),但融化层并非必要,当低层冷中心的冷平流很强时,仍可能出现较强冻雨(杜小玲等,2010)。

冻雨的发生离不开暖湿气流输送(陈媛等,2024;赵俊虎等,2025),一方面有利于形成降水,另一方面有利于形成逆温层。另外,地面冷空气也是形成冻雨的必要条件,其对冻雨范围、强度有着重要影响。在2005年2月湖南特大冰冻过程中,因地面冷空气偏弱,地表冰冻并不明显(王晓兰等,2006)。吴古会等(2012)发现,冷空气入侵路径不同,导致贵州冻雨范围有差异,当有偏北路径的冷空气时,贵州中西部比只有偏东路径冷空气时受影响明显,这是2011年贵州中西部的雨雪冰冻强度超过2008年的原因之一。

山西雾凇、雨凇、冻雨、电线积冰等现象相对较少,相关研究基本处于空白阶段,预报技术和经验不足为此类天气的预报预警服务工作带来极大挑战。因此,本研究利用常规气象观测、多普勒天气雷达和大气再分析资料,对2023年12月13日山西南部垣曲县严重致灾电线积冰过程的形成机制进行研究,以期提炼山西电线积冰的关键预报预警指标,进而提高气象防灾减灾服务能力。

1 资 料

本文所用的资料包括:(1)国家级自动气象观测站(除河南卢氏站为探空站外)逐时观测的天气现象、降水、气温、风、相对湿度、能见度等地面实况;(2)全国高空观测资料;(3)全国多普勒天气雷达拼图和反演产品;(4)欧洲中期天气预报中心提供的ERA5(ECMWF reanalysis version 5)再分析资料,时间分辨率为1 h,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,用于计算和分析环流形势、相对湿度、垂直速度、液态含水量、温度平流等。

2 电线积冰致灾情况及类型判断

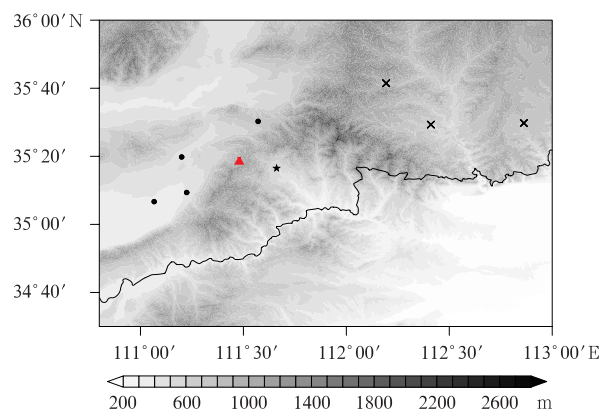
2023年12月中旬,山西出现一次大范围低温雨雪冰冻天气过程。受其影响,13日18时(北京时,下同)左右,山西南部垣曲县4条高压输电线路

全部出现覆冰故障,造成全县范围电力中断,4条线路在同一时间段断电,情况实属罕见,对当地交通、工农业生产及人民生活等产生严重影响。直至17日07时,受雨雪冰冻灾害影响的12座变电站才全部恢复供电。

垣曲县地势西北高、东南低,境内北部高峻,南部低缓,东跨王屋山,西踞中条山,北接太行山,三面环山,南临黄河,中部为山间盆地,总体呈北窄南宽的喇叭口形分布。中条山呈东北—西南走向,东起垣曲县东北边的舜王坪,西至永济市西南角的首阳山,东西绵延约为220 km,南北宽度约为80 km,山脉整体海拔在1200~2300 m,最高峰舜王坪海拔达2322 m,输电线路故障位置(图1中▲所示)位于垣曲县城以西25 km的中条山腹地,平均海拔为1200 m。

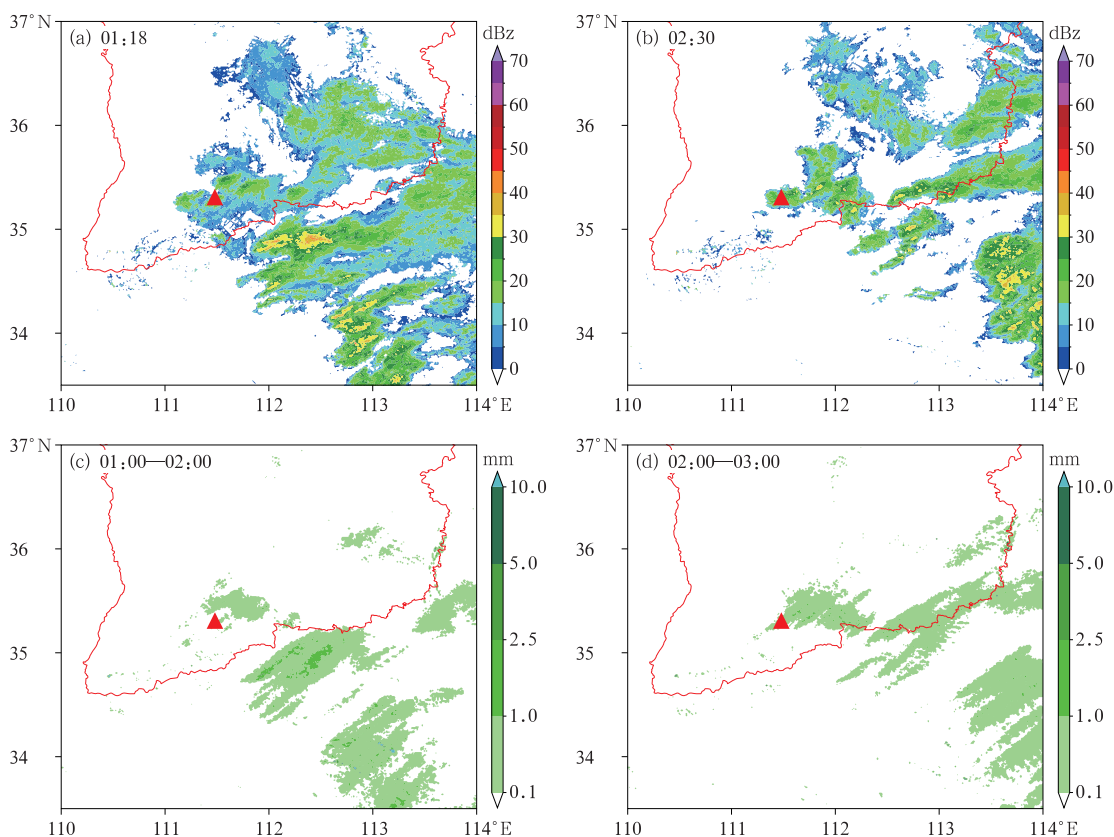
逐时降水观测显示,12月13日01—06时,在垣曲县以西的运城城区、夏县、闻喜县和以北的绛县4个站(图1中实心圆所示)均出现小雨,降水量为0.1~0.6 mm。通过雷达回波演变(图2a,2b)可看出,13日01—03时,雷达回波自西南向东北方向移过电线积冰事发地附近,但回波强度较弱,最大为20 dBz左右。结合雷达定量降水估测结果(图2c,2d),13日01—02时和02—03时电线积冰事发地附近降水量均不足1 mm。因此,推断位于中条山腹地的事发地附近在13日01—03时极有可能出现了弱降水。

垣曲站(图1中★所示)海拔高度为505 m,自12月12日00时至电线积冰严重致灾时(13日18时)



注:图中▲为垣曲电线积冰致灾事发地位置,★为垣曲站,•为出现降水的站点,×为出现雾凇的站点,下同。

图1 垣曲电线积冰致灾事发地附近地形高度
Fig. 1 Terrain height around the location of disaster caused by wire icing in Yuanqu County



注:红线为山西省界。

图 2 2023 年 12 月 13 日(a,b)雷达组合反射率因子和(c,d)雷达 1 h 定量降水估测

Fig. 2 Radar composite reflectivity factor at (a) 01:18 BT and (b) 02:30 BT and 1 h quantitative precipitation estimation during (c) 01:00 BT–02:00 BT and (d) 02:00 BT–03:00 BT 13 December 2023

期间并无降水观测记录,由该站气象要素的逐时演变(图 3)可看出,12 月 12 日 20 时至 13 日 20 时,地面温度介于 $-2.9 \sim -1.1^{\circ}\text{C}$,为持续东南风,风速总体较小,基本在 $1.0 \sim 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度始终维持 100%,大气为饱和状态,持续存在雾,最低能见度为 0.3 km,达到浓雾标准。另外,13 日 07 时,垣曲县以东的晋城城区、阳城、沁水 3 个站(图 1 中×所示,

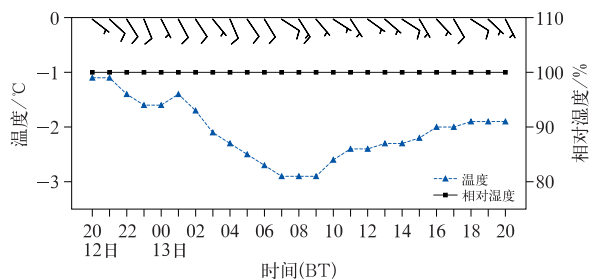


图 3 2023 年 12 月 12 日 20 时至 13 日 20 时垣曲站气象要素演变

Fig. 3 Variation of meteorological elements at Yuanqu Station from 20:00 BT 12 to 20:00 BT 13 December 2023

海拔高度较垣曲站高 165~385 m),气温较垣曲站更低,介于 $-5.0 \sim -3.5^{\circ}\text{C}$,均观测到厚度为 27 mm 的雾凇;14 日 00 时,垣曲县及周边相继出现降水,14 日 07 时,垣曲站、沁水站出现厚度为 27 mm 的雨凇,晋城城区站、阳城站出现厚度为 28 mm 的雾凇,14 日 20 时,垣曲站、晋城城区站出现厚度为 28 mm 的雨凇。

气温和降水是影响低温雨雪冰冻的关键因子,气温低、降水量大有利于冰冻天气发生(谷秀杰等, 2025)。考虑到 13 日 18 时垣曲县电线积冰严重致灾是在降水过后 15 h 左右才出现,且降水量较小,持续时间较短,仅靠如此弱的降水很难造成如此严重的灾害,同时,事发地以东的区域有雾存在且观测到雾凇,另外,研究表明高海拔地区更容易出现雾凇(陈百炼等,2014)。综合以上观测及分析推断,垣曲县 2023 年 12 月 13 日严重致灾的电线积冰现象是前期短时间冻雨和随后长时间持续冻雾共同作用的结果,属于雨雾混合凇类型。

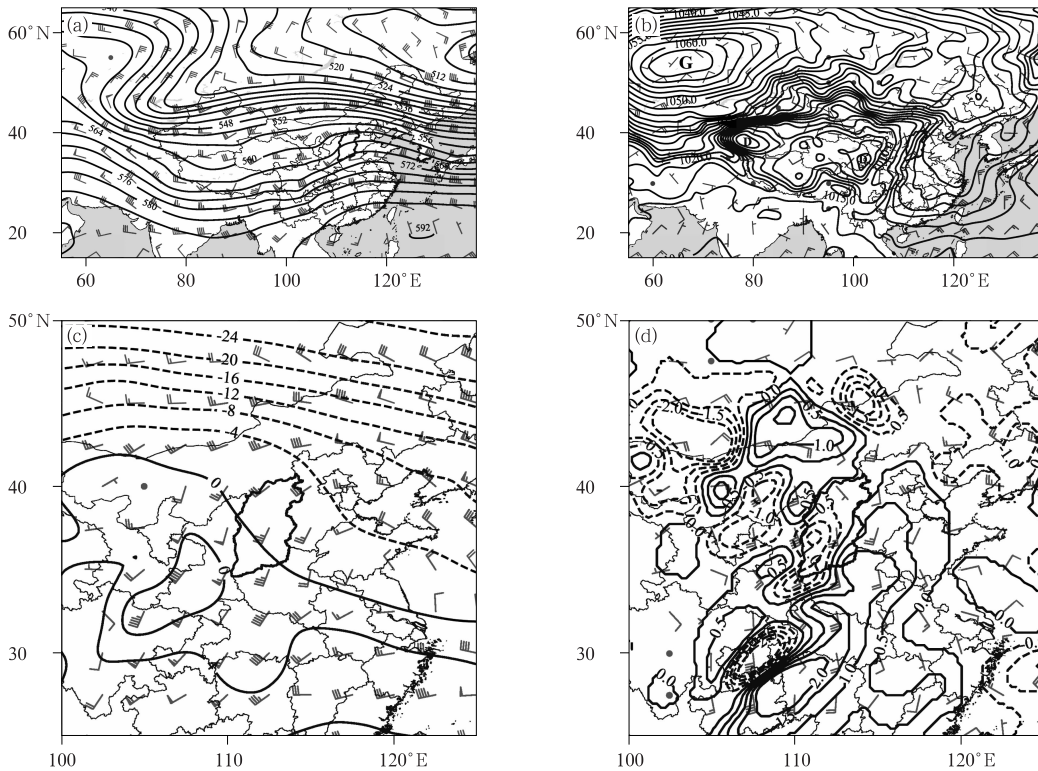
3 电线积冰形成的气象条件

电线积冰通常发生在有利的环流背景下,由于不同地区之间会存在一定差异,因此,做好所关注地区历史个例的环流形势分析及归纳总结(胡艳楠等,2017)尤为重要,将有助于不断提升预报预警服务能力。另外,电线积冰的形成还与大气层结及气温、风速等气象要素关系密切(牛生杰等,2021)。

3.1 环流背景

2023年12月12日20时,高空500 hPa(图4a)亚欧中高纬度环流呈“两槽一脊”型,乌拉尔山附近有高压脊向北发展,脊前环流经向度较大,偏北气流引导冷空气南下,在贝加尔湖至巴尔喀什湖一带的

横槽内不断积聚,鄂霍次克海附近有深厚冷涡维持,我国中低纬度地区主要受南支槽前的西南气流影响,北支锋区中横槽底前部的近乎平直气流与南支锋区中的西南气流交汇,在内蒙古西部至甘肃东部一带存在西北—东南向的短波槽波动;对应地面上(图4b)乌拉尔山附近有冷高压形成,中心强度达到1062.5 hPa,贝加尔湖附近存在中心强度为1040 hPa的分裂冷高压,冷空气经我国东北后以东路路径入侵华北至南方地区,同时,河套地区有明显倒槽向东北方向发展,山西受近乎东西向气压梯度控制。13日08时,随着横槽有所旋转南下和南支槽略有东移,短波槽波动逐渐移至内蒙古中部至山西北部地区,地面分裂冷高压中心强度不断增强,山西地区东西向气压梯度增大,且回流形势变得明显,有利于冷高压底部的偏东风将水汽向山西地区输送。



注:图 b 中 G 为高压中心, D 为低压中心。

图 4 2023 年 12 月 12 日 20 时环流形势场

(a) 500 hPa 高度场(等值线,单位: dagpm)和风场(风羽), (b) 海平面气压场(等值线,单位: hPa),
(c) 700 hPa 温度场(等值线,单位: °C)和风场(风羽), (d) 850 hPa 温度平流
(等值线,单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(风羽)

Fig. 4 Circulation pattern at 20:00 BT 12 December 2023

(a) geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind (barb) at 500 hPa, (b) sea level pressure (contour, unit: hPa), (c) temperature (contour, unit: °C) and wind (barb) at 700 hPa, (d) temperature advection (contour, unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind (barb) at 850 hPa

700 hPa 上(图 4c)无明显切变线,但水汽输送通道畅通,有西南气流一直延伸到华北地区,为山西南部冻雨、冻雾的形成提供水汽条件,急流位于四川和贵州交界至陕西北部一带,夜间急流强度进一步增强,13 日 08 时四川达川站风速高达 $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时,随着高空短波槽波动东移,急流前部逐渐东压至河南西部至安徽西部一带;温度场上,在河套地区存在暖脊,山西受暖平流影响,有利于中层出现暖层。850 hPa 上(图 4d)偏南气流逐渐增强,且在 13 日 08 时达到急流标准,湖南怀化站风速达到 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,内蒙古中西部存在暖式切变线,受其影响,在切变线附近及南侧的山西中北部地区出现降水,而山西南部由于离切变线位置较远,动力抬升条件总体较差,仅山西东南地区 5 个站观测到不足 0.5 mm 的弱降水;山西大部受冷平流影响,呈东北—西南向带状分布,更低层大气同样表现出类似特征,另外,冷平流带的西北部和东南部主要受暖平流影响,冷暖平流共同作用,最终表现出东北—西南

向冷舌经华北平原向南伸展,有利于低层冰冻层的形成与维持。

3.2 降水条件

由中低层相对湿度和垂直速度的时间演变(图 5)可看出,12 月 13 日 02 时,山西南部上空 700 hPa 垂直速度最大为 $-0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,为弱上升运动,相对湿度达 95% 以上;900 hPa 相对湿度达 90% 以上,大气接近或达到饱和,但上升运动较弱,这样的配置条件即使产生降水,降水量也非常小。受高空短波槽波动东移和 700 hPa 大风速带东移北推,13 日 08—18 时,700 hPa 陕西至山西南部有干舌不断发展加强,电线积冰致灾事发地附近相对湿度逐渐降至 60% 左右,且表现为下沉或弱上升运动;对应 900 hPa 上,尽管相对湿度持续保持 90% 以上,但垂直速度基本维持在 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,为弱下沉运动,如此高低空动力和水汽条件配置不利于 13 日白天山西南部出现明显降水。

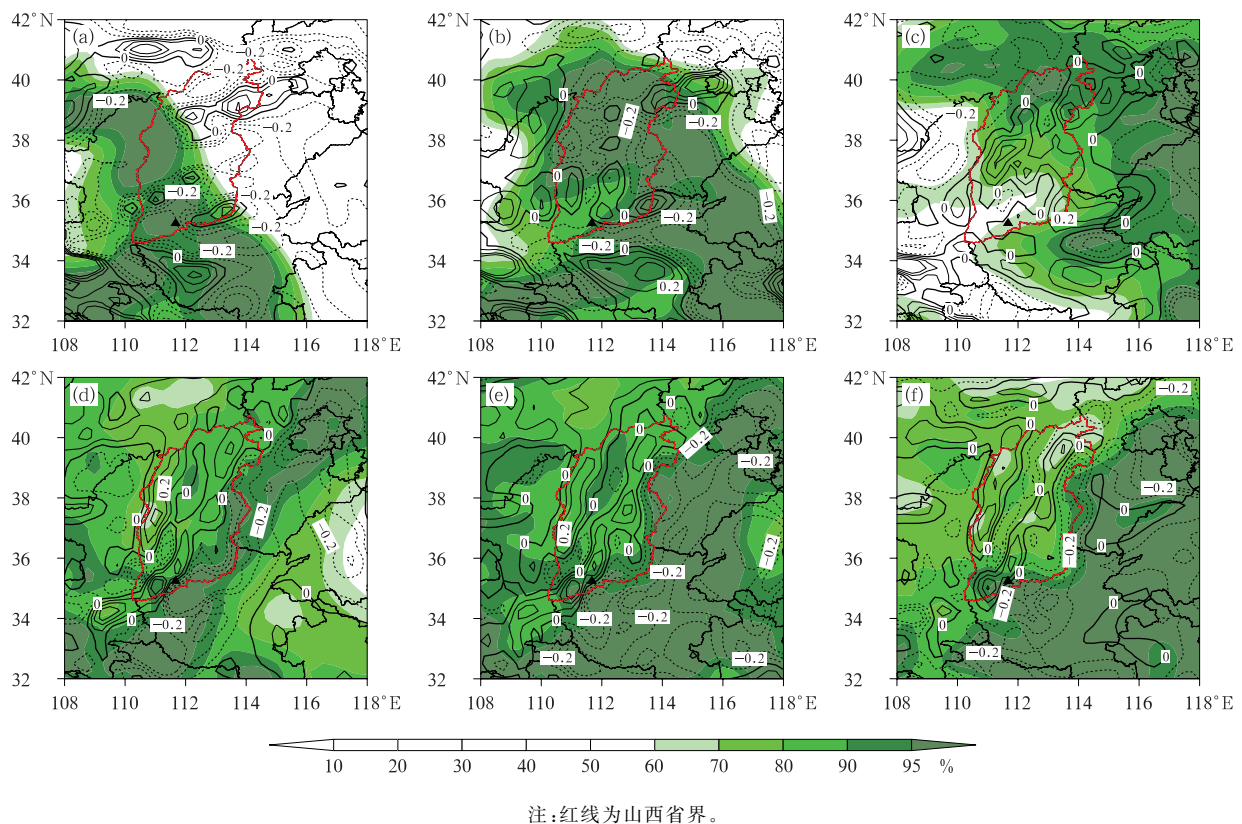
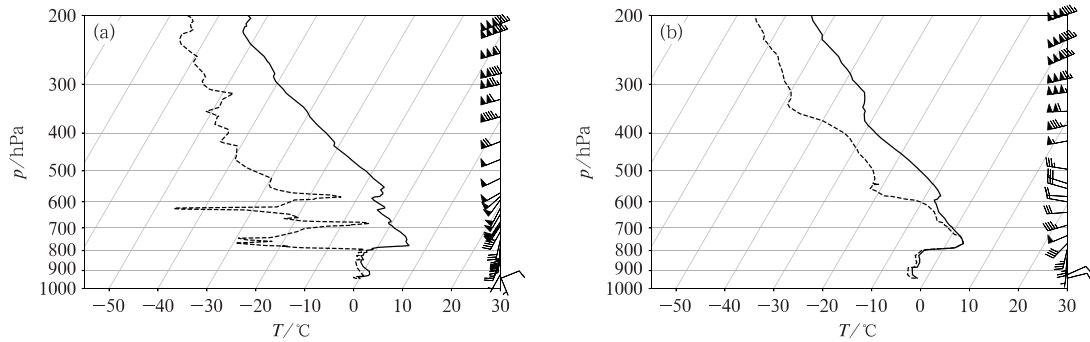


图 5 2023 年 12 月 13 日(a,d)02 时,(b,e)08 时,(c,f)14 时的(a~c)700 hPa 和 (d~f)900 hPa 相对湿度(填色)以及垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Relative humidity (colored) and vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a~c) 700 hPa and (d~f) 900 hPa at (a, d) 02:00 BT, (b, e) 08:00 BT, (c, f) 14:00 BT 13 December 2023

河南卢氏站探空(图 6)显示,12月12日20时,地面温度为 0.1°C ,近地层 $938\sim 920\text{ hPa}$ 存在浅薄逆温层,厚度仅为 150 m ,逆温层顶温度为 1.6°C ,其上 $824\sim 777\text{ hPa}$ 还存在明显且深厚的逆温层,厚度达到 549 m ,逆温层顶温度为 6.2°C ; 794 hPa 以下温度露点差在 2°C 以内,大气接近或达到饱和;近地

层风速为 $4.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。13日08时, $824\sim 777\text{ hPa}$ 逆温层厚度有所增厚,达到 622 m ,逆温层顶温度降至 3.4°C ,逆温层以下的气温均低于 0°C ,地面温度为 -1.9°C ;同时,饱和层厚度明显变厚,向高空伸展到 613 hPa ,近地层风速为 $4.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见,大气层结在向着有利于冻雨、冻雾形成的方向发展。



注:实线为温度曲线,虚线为露点温度曲线。

图 6 2023年12月(a)12日20时和(b)13日08时河南卢氏站 $T-\ln p$ 图

Fig. 6 $T-\ln p$ diagram at Lushi Station in Henan Province at

(a) 20:00 BT 12 and (b) 08:00 BT 13 December 2023

综上所述,12月13日凌晨,随着高空短波槽快速东移过境山西,强盛的西南暖湿急流在东移北推过程中沿着低层冷空气垫爬升,为降水出现提供了主要的动力抬升条件,但由于中上层上升运动较弱,且湿度条件快速转差,导致山西南部仅出现短时间的微弱降水,之后直至垣曲电线积冰严重致灾,该地区上空相对湿度持续呈现“上干下湿”的垂直分布结构,同时,逆温层稳定维持,共同为冻雾的形成提供了有利条件。

3.3 大气层结和微物理特征

为进一步探究冻雨、冻雾的形成机制,下面对垣曲电线积冰致灾事发地附近的大气温、湿度和微物理特征进行诊断分析。

3.3.1 温度层结

电线积冰的厚度和维持时间与逆温层关系密切(高辉等,2008;胡艳楠等,2017)。图7为垣曲电线积冰致灾事发地附近水平风场、温度和温度平流的时间-高度分布。可以看出:

冻雨阶段:12月13日01—03时,温度从低空到高空表现为“冷-暖-冷”三层结构,低层为冰冻层,高于 0°C 的暖层位于 $825\sim 700\text{ hPa}$,强度较强,中心值高达 4°C ,有利于高空固态水凝物下落至该层时得到充分融化。

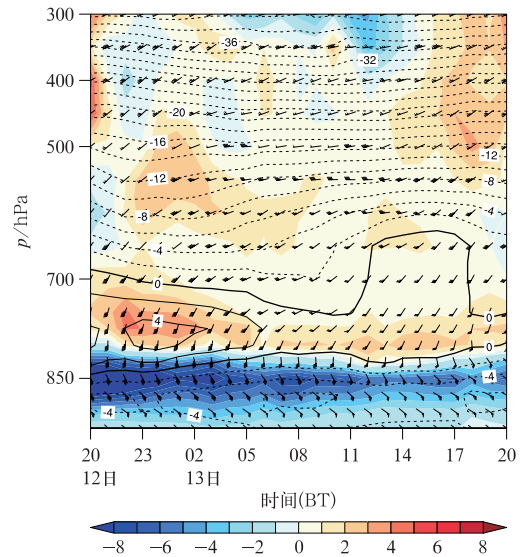


图 7 2023年12月12—13日垣曲电线积冰致灾事发地附近水平风场(风羽)、温度(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和温度平流(填色,单位: $10^{-4}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$)的时间-高度分布

Fig. 7 Temporal-height evolution of horizontal wind (barb), temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) and temperature advection (colored, unit: $10^{-4}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$) near the location of disaster caused by wire icing in Yuanqu County during 12—13 December 2023

冻雾阶段:13 日 04 时后,暖层的上边界缓慢降低,而下边界缓慢升高,进而使得暖层厚度逐渐降低,同时,暖中心强度也逐渐减弱;06 时,暖中心值降至 2℃ 以下;09—11 时,暖层厚度最为浅薄,仅存在于 800~750 hPa;之后,暖层上边界快速升高,而下边界略微降低,暖层厚度明显增厚;13—17 时,暖层上边界伸展到 650 hPa 以上,此时,暖层厚度最厚;18 时后,暖层上边界迅速降低;19 时,暖层厚度基本消失。在上述演变过程中,温度从低空到高空持续表现为“冷-暖-冷”三层结构,暖层之下持续为冰冻层。

综上,13 日垣曲电线积冰在致灾前的冻雨和冻雾阶段,持续存在中层暖层和低层冰冻层,呈现逆温结构。中层暖层的出现为冻雨的形成提供良好的热力条件,其作用主要是将上层降落的固态水凝物充分融化为液态,而低层冰冻层主要是使得过冷却水滴接触到地面或物体后发生冻结。

逆温层是冻雨、冻雾出现的必要条件。为进一步分析逆温层出现成因,通过温度平流配置可知,13 日垣曲电线积冰致灾前 17 h 内,825~650 hPa 为西南风,受持续暖平流影响,而 825 hPa 以下层次为东南风,受持续冷平流影响。在整个过程中,低层冷平

流强度始终较上层暖平流要强。因此,垣曲上空持久稳定的逆温结构及中层暖层、低层冰冻层的出现,不仅与中层西南暖平流有关,也与低层东南冷平流关系密切。

3.3.2 湿度层结

图 8a 为垣曲电线积冰致灾事发地附近相对湿度、垂直速度和温度的时间-高度分布。可以看出:

冻雨阶段:12 月 12 日 20 时后,700~600 hPa 湿平流快速增强,且随着时间推移,湿平流极值中心逐渐降低;13 日 00 时,极值中心下降至 775~750 hPa;01—03 时,垣曲从地面到云顶呈现“湿-干-湿”三层垂直分布结构,即近地层相对湿度在 90% 以上,接近或达到饱和状态,受下沉运动控制,800 hPa 附近存在干层,相对湿度在 80% 以下,700 hPa 附近受前期强湿平流影响,相对湿度达 90% 以上,同时有上升运动配合,此时对应冻雨出现,但由于上升运动较弱,云层厚度浅薄,因此,降水强度相对较弱。

冻雾阶段:13 日 04 时后,饱和层高度由 700 hPa 逐渐下降至 750 hPa,且 700 hPa 附近上升运动逐渐转为下沉运动,总体向不利于降水出现的方向发展,另外,随着 800 hPa 附近逐渐转湿,750 hPa 以下的相对湿度均达 90% 以上,尤其 825~750 hPa 达 95%

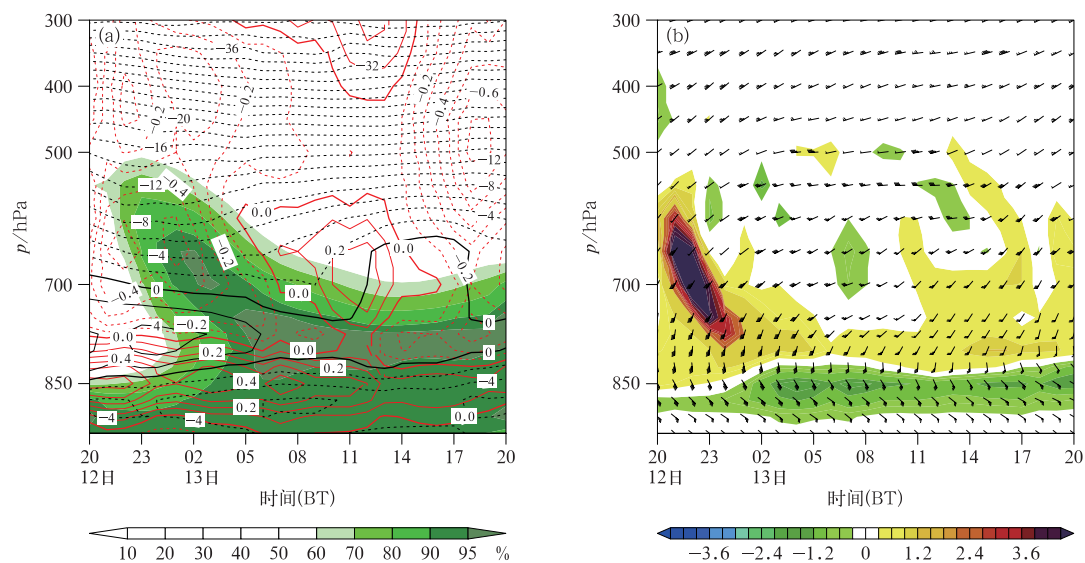


图 8 2023 年 12 月 12—13 日垣曲电线积冰致灾事发地附近(a)相对湿度(填色)、垂直速度(红色等值线,单位:Pa·s⁻¹)、温度(黑色等值线,单位:℃)和(b)水平风场(风羽)、比湿平流(填色,单位:10⁻⁴g·kg⁻¹·s⁻¹)的时间-高度分布

Fig. 8 Temporal-height evolutions of (a) relative humidity (colored), vertical velocity (red contour, unit: Pa·s⁻¹), and temperature (black contour, unit: °C), (b) horizontal wind (barb) and specific humidity advection (colored, unit: 10⁻⁴ g·kg⁻¹·s⁻¹) near the location of disaster caused by wire icing in Yuanqu County during 12—13 December 2023

以上,有利于出现冻雾,这样“上干下湿”的垂直分布结构稳定维持至 18 时。

综上,13 日垣曲电线积冰致灾前,先是中层空气达到饱和,且配合有弱上升运动,微弱冻雨导致电线积冰开始出现;之后,中低层持续接近或达到饱和状态,出现冻雾,过冷却水滴不断在电线上冻结、增厚。

将 750 hPa 以下的饱和层细分为上下两层,分析发现两层达到饱和的成因存在差异。图 8b 进一步给出了垣曲电线积冰致灾事发地附近水平风场和比湿平流的时间-高度分布,结合图 7 温度平流配置可看出,饱和层的上层(825~750 hPa 附近)为湿平流和暖平流,湿平流会导致比湿增加,且在 775 hPa 附近出现大值区(图略),有利于增加空气相对湿度,而暖平流会使得相对湿度降低,因此,该层饱和和主要是湿平流作用所致;饱和层的下层(825 hPa 以下)为干平流和冷平流,干平流会使得空气相对湿度降低,而冷平流会导致温度降低,进而增加相对湿度,另外,比湿呈现“上大下小”的垂直分布(图略),下沉运动也会使得局地比湿增加,有利于空气达到饱和,因此,该层饱和和主要是冷平流和比湿的向下输送共

同作用所致。

3.3.3 微物理特征

即使在同一天气系统影响下,如果不同冻雨区的层结特征不同,那么云微物理结构也会存在差异(陶玥等,2012),因此,有必要对该次过程的微物理特征进行具体分析,进而深入理解此次冻雨天气的形成机制。图 9 为垣曲电线积冰致灾事发地附近不同水凝物粒子含量和温度的时间-高度分布。可以看出:

冻雨阶段:12 月 12 日 20—21 时,垣曲低空液态水含量在 875~850 hPa 出现大值中心,强度达 $24 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时,高空开始有液态水(过冷却水)、冰水和雪水共存且呈增加趋势;13 日 00 时,高空液态水含量先达到极大值($16 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),出现在 600 hPa;1 h 后,冰水含量在同一高度出现大值中心,强度为 $2 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时,在其正下方 700~650 hPa 出现雪水含量大值中心,强度达 $4 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,持续 1~2 h;02 时,850~750 hPa 雨水含量中心值达 $1 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时对应中条山高海拔地区出现降水;03 时,雨水含量中心值继续增大,且 $1 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等值线触地,

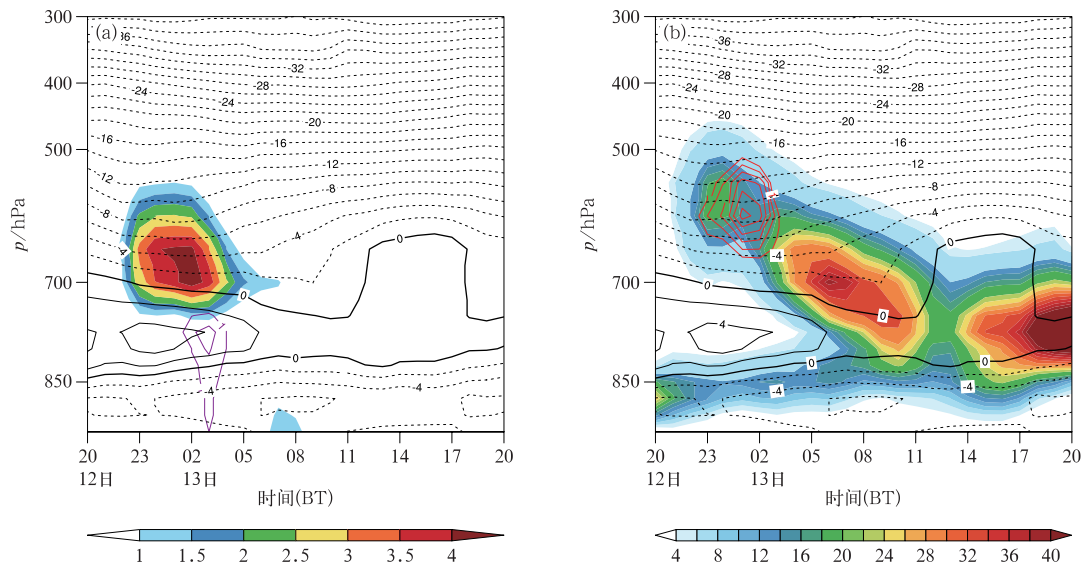


图 9 2023 年 12 月 12—13 日垣曲电线积冰致灾事发地附近温度(黑色等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)以及(a)雨水(紫色等值线)、雪水(填色)含量(单位: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和(b)冰水(红色等值线)、液态水(填色)含量(单位: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)时间-高度分布

Fig. 9 Temporal-height evolutions of (a) rain water content (purple contour, unit: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), snow water content (colored, unit: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the temperature (black contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), and (b) ice water content (red contour, unit: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), liquid water content (colored, unit: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and temperature (black contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) near the location of disaster caused by wire icing in Yuanqu County during 12—13 December 2023

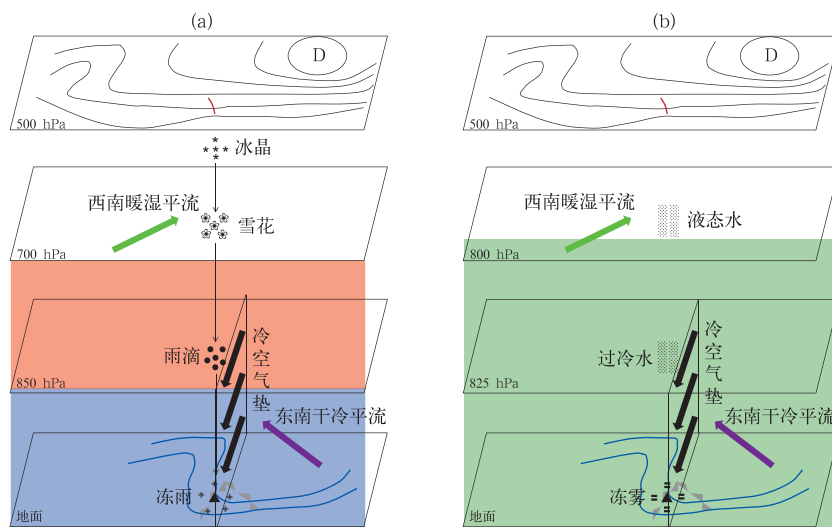
此时对应中条山低海拔地区也出现降水,这与前述分析的降水时间吻合。如果将相对湿度高于 84% 的区域定义为云顶(欧建军等,2011),那么云顶温度在 -8°C 左右(图 8a),在冰-水共存的混合云中,冰晶会通过贝吉龙过程吸收过冷却水中的水汽而不断增长,在其下落过程中会与过冷却水滴碰撞进一步增长为雪晶,结合温度廓线来看,雪晶继续下落至暖层后发生充分融化,融化后的雨滴下降至下面的冰冻层中,当碰及物体或地面时发生冻结,因此,此次冻雨的形成属于融化机制。

冻雾阶段:13 日 03 时后,随着上升运动减弱,且上升运动区高度下降,高空冰水和雪水含量逐渐降低,雨水含量在 04 时降至 $1 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,对应降水结束,此时 600 hPa 附近液态水含量开始增加;之后,随着上升运动区高度进一步下降,液态水含量极大值中心位置降低;06 时,液态水含量达到极大值($36 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),此时中心位置下降至 700 hPa;之后至 12 时,液态水含量极大值中心位置进一步下降至 750 hPa;13—14 时,液态水含量中心值逐渐减弱至 $20 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;之后,850~700 hPa 液态水含量呈快速增加趋势;18 时,中心值增大至 $40 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

综上,13 日垣曲电线积冰致灾前 17 h 内,垣曲上空先经历了冰相粒子的形成和不断增长过程,待固态水凝物下落至暖层充分融化后,在低层冰冻层中以过冷却水滴的形式继续下落至地面形成冻雨,进而导致电线积冰;之后,持续且丰富的过冷却水滴,尤其在 13 日早晨至上午和下午至致灾时这两个快速增长阶段,不断碰撞已结冰的电线,致使积冰不断增厚,最终致灾。

4 电线积冰形成机制的概念模型

根据前述分析,总结了 2023 年 12 月 13 日垣曲严重致灾电线积冰过程中冻雨和冻雾形成机制的概念模型(图 10),500 hPa 北支锋区中乌拉尔山高压脊前横槽和鄂霍次克海附近深厚冷涡稳定少动,横槽底部短波槽快速东移影响山西,南支锋区中槽前 700 hPa 西南急流不断向山西输送暖湿气流,850 hPa 上有东北—西南向冷温度槽位于华北地区,地面上河套地区有倒槽发展,与东路冷空气共同形成回流形势,山西正好处于冷暖空气交汇区,西南暖湿气流沿着低层冷空气垫爬升,为垣曲冻雨、冻雾及电线积冰的出现提供了有利的大尺度环流背景。



注:黑色实线为位势高度,红色实线为短波槽,蓝色实线为海平面气压,灰色三角阴影为地形,D为低压中心;背景色:红色阴影为气温高于 0°C 的暖层,蓝色阴影为气温低于 0°C 的冰冻层,绿色阴影为相对湿度 90% 以上的湿层。

图 10 垣曲电线积冰致灾事发地附近(a)冻雨和(b)冻雾形成机制的概念模型

Fig. 10 Diagram of conceptual model for the formation mechanism of (a) freezing rain and (b) freezing fog near the location of disaster caused by wire icing in Yuanqu County

中层持续受暖平流影响,有利于大气增温,出现高于 0°C 的暖层,而低层持续受冷平流影响,有利于低层温度低于冰点,由此形成的逆温结构稳定维持,为垣曲冻雨、冻雾及电线积冰的出现提供了必要的温度层结构。

冻雨机制:垣曲上空 $750\sim 600\text{ hPa}$ 有强湿平流输送,在上升运动作用下, 600 hPa 附近有冰晶不断增长为雪花,雪花下落至 $825\sim 700\text{ hPa}$ 的暖层后得到充分融化,融化后的雨滴继续下落至 825 hPa 以下的冰冻层中变为过冷却形式,待过冷却雨滴接触电线后迅速冻结,形成冻雨,导致电线积冰发生,由于强湿平流持续时间短,云层浅薄,致使降水强度较弱。

冻雾机制:垣曲上空 $825\sim 700\text{ hPa}$ 持续有湿平流输送,主要是水汽增多致使该层大气饱和,而 825 hPa 以下持续有冷平流输送,且有下沉运动所引起的水汽输送相配合,因此,该层大气饱和和主要是温度下降和垂直运动共同作用所致。 750 hPa 以下大气持续达到或接近饱和,在逆温层结下的冰冻层中形成冻雾,长时间丰富的过冷却水滴致使电线积冰不断增厚,最终致灾。

另外,地形对电线积冰的形成也有着重要影响(霍治国等,2021),当风速超过 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,电线积冰增长率与风速有较明显的正比关系(罗宁等,2008),同时,迎风向电线积冰增长大于顺风向(曼世超等,2018)。东南气流沿喇叭口地形的迎风坡抬升,使得该地区更容易形成雨淞和雾淞,有利于电线积冰持续增厚,进而出现覆冰故障。

5 结论与讨论

2023年12月中旬,山西出现一次明显低温雨雪冰冻天气过程,其中13日傍晚垣曲县出现电线积冰,并造成严重影响。针对此次严重致灾的电线积冰过程,利用常规气象观测、多普勒天气雷达和大气再分析资料,对其形成的气象条件进行详细分析,并总结归纳其形成物理机制。主要得到如下结论:

(1)垣曲县严重致灾的电线积冰现象属于雨雾混合淞类型,是前期短时间冻雨和随后长时间冻雾共同作用的结果。

(2)北支锋区中乌拉尔山高压脊前横槽和鄂霍次克海附近深厚冷涡稳定少动,横槽底部短波槽快速东移影响山西,南支锋区中槽前强盛的中低层

西南暖湿气流不断向山西输送水汽, 850 hPa 上有东北—西南向冷温度槽位于华北地区,地面河套倒槽发展与东路冷空气共同形成回流形势,暖湿气流沿着低层冷空气垫爬升,为垣曲冻雨和冻雾的出现提供了有利的大尺度环流背景。

(3)逆温层是形成冻雨和冻雾的必要条件。中层暖平流和低层冷平流共同作用,使得温度从低空到高空呈现“冷-暖-冷”垂直分布结构,且中层温度高于 0°C ,可将下落的固态水凝物融化为液态,而低层温度低于 0°C ,有利于过冷却水滴在接触地面或其他物体时发生冻结。

(4)垣曲冻雨的形成属于融化机制,由于短波槽快速过境,饱和层厚度浅薄,且上升运动总体不强,致使降水强度较弱,且持续时间较短,短时冻雨导致垣曲电线积冰开始出现。持续冻雾对电线积冰致灾起到关键作用,中层湿平流、低层冷平流和下沉运动共同使得中低层大气始终维持高度饱和状态,丰富的过冷却水滴先后经历两次快速增长,不断在已积冰的电线上冻结,导致积冰不断增厚,并最终致灾。另外,东南气流在喇叭口地形的迎风坡发生抬升,对电线积冰增厚也起到促进作用。

山西冰冻天气发生总体偏少,上述结论仅基于个例分析得出。今后需加强历史个例积累,充分利用数值模拟、机器学习、人工智能模型等技术,不断加深对冰冻天气形成机理的认识,提高其预报预警能力,同时,应加强与电力部门合作和资料共享,逐步提升气象防灾减灾服务水平。

参考文献

- 陈百炼,吴战平,张艳梅,等,2014. 贵州冬季电线积冰及其天气成因分析[J]. 气象,40(3):355-363. Chen B L, Wu Z P, Zhang Y M, et al, 2014. Analysis on wires icing and its weather conditions in Guizhou Province[J]. Meteor Mon, 40(3): 355-363 (in Chinese).
- 陈媛,周玉淑,杨帅,等,2024. 西南地区一次典型冰冻雨雪复合极端灾害天气事件的环流特征及降水相态差异分析[J]. 大气科学,48(2):417-430. Chen Y, Zhou Y S, Yang S, et al, 2024. Analysis of circulation characteristics and precipitation phase difference during an extreme freezing rain and snow weather event in Southwest China[J]. Chin J Atmos Sci, 48(2): 417-430 (in Chinese).
- 杜小玲,彭芳,武文辉,2010. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象,36(5):92-97. Du X L, Peng F, Wu W H, 2010. Distribution and cause on frequent freezing rain zone in Guizhou[J]. Meteor Mon, 36(5): 92-97 (in Chinese).

- 高辉,陈丽娟,贾小龙,等,2008.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析Ⅱ.成因分析[J].气象,34(4):101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al, 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: Ⅱ. Possible climatic causes[J]. Meteor Mon, 34(4): 101-106(in Chinese).
- 顾光芹,田国强,梁秀慧,等,2012.河北省雾凇和雨凇气候特征及气象条件分析[J].气象,38(5):561-568. Gu G Q, Tian G Q, Liang X H, et al, 2012. Analysis of climatic features and meteorological conditions of rime and glaze in Hebei[J]. Meteor Mon, 38(5): 561-568(in Chinese).
- 谷秀杰,田金华,王友贺,等,2025.河南低温雨雪冰冻气象等级及时空特征[J].气象,51(3):313-323. Gu X J, Tian J H, Wang Y H, et al, 2025. Meteorological grade and its spatio-temporal characteristics of cryogenic freezing rain and snow in Henan Province [J]. Meteor Mon, 51(3):313-323(in Chinese).
- 胡艳楠,牛生杰,吕晶晶,等,2017.湖北电线积冰统计分析及积冰逆温层结研究[J].气候与环境研究,22(1):35-44. Hu Y N, Niu S J, Lü J J, et al, 2017. Statistical analysis and inversion study on ice accretion in Hubei Province[J]. Climatic Environ Res, 22(1):35-44(in Chinese).
- 黄小玉,黎祖贤,李超,等,2008.2008年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析[J].气象,34(11):47-53. Huang X Y, Li Z X, Li C, et al, 2008. Analysis on extreme freeze catastrophic weather of Hunan in 2008[J]. Meteor Mon, 34(11):47-53(in Chinese).
- 霍治国,李春晖,孔瑞,等,2021.中国电线积冰灾害研究进展[J].应用气象学报,32(5):513-529. Huo Z G, Li C H, Kong R, et al, 2021. Review on disaster of wire icing in China[J]. J Appl Meteor Sci, 32(5):513-529(in Chinese).
- 康丽莉,邓芳萍,岳平,等,2017.一种浙江省冻雨落区的推算方法[J].气象,43(6):756-761. Kang L L, Deng F P, Yue P, et al, 2017. A new method of calculating falling zone of freezing rain in Zhejiang[J]. Meteor Mon, 43(6):756-761(in Chinese).
- 康丽莉,姜瑜君,邓芳萍,等,2021.中国南方地区冻雨落区分析及推算[J].气象,47(9):1122-1134. Kang L L, Jiang Y J, Deng F P, et al, 2021. Analyses and calculation of freezing rain falling zone in southern China[J]. Meteor Mon, 47(9):1122-1134(in Chinese).
- 李登文,乔琪,魏涛,2009.2008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,28(5):1140-1148. Li D W, Qiao Q, Wei T, 2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of southern China in early 2008 [J]. Plateau Meteor, 28(5):1140-1148(in Chinese).
- 李元鹏,赵逸舟,江远安,等,2010.新疆电线积冰的特性、时空分布及气象条件分析[J].沙漠与绿洲气象,4(5):20-23. Li Y P, Zhao Y Z, Jiang Y A, et al, 2010. Characteristics, spatial and temporal distribution of wire icing in Xinjiang and corresponding meteorological condition[J]. Desert Oasis Meteor, 4(5):20-23(in Chinese).
- 罗宁,文继芬,赵彩,等,2008.导线积冰的云雾特征观测研究[J].应用气象学报,19(1):91-95. Luo N, Wen J F, Zhao C, et al, 2008. Observation study on properties of cloud and fog in ice accretion areas[J]. J Appl Meteor Sci, 19(1):91-95(in Chinese).
- 曼世超,卢会国,蒋娟萍,等,2018.一次电线积冰个例的数据处理及关联度分析[J].气象科技,46(2):237-244. Man S C, Lu H G, Jiang J P, et al, 2018. Data processing and correlation analysis of a wire icing case[J]. Meteor Sci Technol, 46(2):237-244(in Chinese).
- 牛生杰,王天舒,吕晶晶,等,2021.电线积冰及路面温度研究的新进展[J].大气科学学报,44(4):485-495. Niu S J, Wang T S, Lü J J, et al, 2021. New advances in research on power line icing and pavement temperature[J]. Trans Atmos Sci, 44(4):485-495(in Chinese).
- 欧建军,周毓荃,杨棋,等,2011.我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J].高原气象,30(3):692-699. Ou J J, Zhou Y Q, Yang Q, et al, 2011. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China[J]. Plateau Meteor, 30(3):692-699(in Chinese).
- 陶诗言,卫捷,2008.2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J].气候与环境研究,13(4):337-350. Tao S Y, Wei J, 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China[J]. Climatic Environ Res, 13(4):337-350(in Chinese).
- 陶玥,史月琴,刘卫国,2012.2008年1月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征[J].大气科学,36(3):507-522. Tao Y, Shi Y Q, Liu W G, 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China in January 2008[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3):507-522(in Chinese).
- 王传辉,姚叶青,苗开超,等,2020.安徽省南部两次冻雨天气过程对比分析[J].气象,46(2):169-178. Wang C H, Yao Y Q, Miao K C, et al, 2020. Contrastive analysis of two freezing rain processes in southern Anhui Province[J]. Meteor Mon, 46(2):169-178(in Chinese).
- 王宁,云天,布和朝鲁,等,2023.中国东北地区两场罕见冻雨过程的对比分析[J].大气科学,47(4):1267-1282. Wang N, Yun T, Bueh C, et al, 2023. Comparative analysis of the two unusual freezing rain events in Northeast China[J]. Chin J Atmos Sci, 47(4):1267-1282(in Chinese).
- 王晓兰,李象玉,黎祖贤,等,2006.2005年湖南省特大冰冻灾害天气分析[J].气象,32(2):87-91. Wang X L, Li X Y, Li Z X, et al, 2006. Analysis of freezing-hazard event in 2005 in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 32(2):87-91(in Chinese).
- 吴古会,彭芳,崔庭,等,2012.2011年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析[J].气象,38(3):291-299. Wu G H, Peng F, Cui T, et al, 2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011[J]. Meteor Mon, 38(3):291-299(in Chinese).
- 吴洪,柳崇健,邵洁,等,2000.北京地区大雾形成的分析和预报[J].应用气象学报,11(1):123-127. Wu H, Liu C J, Shao J, et al, 2000. Analysis and forecast on fog formation in Beijing Area[J]. J Appl Meteor Sci, 11(1):123-127(in Chinese).
- 肖瑶,史一丛,李宁,等,2024.河南省春季一次大范围强浓雾特征分析[J].气象,50(10):1256-1267. Xiao Y, Shi Y C, Li N, et al,

2024. Study of characteristics of a typical regional heavy fog in spring in Henan Province[J]. Meteor Mon, 50(10): 1256-1267 (in Chinese).
- 许爱华, 刘波, 郑婧, 等, 2011. 江西冻雨气候特征分析及频发地带成因探讨[J]. 暴雨灾害, 30(1): 6-10. Xu A H, Liu B, Zheng J, et al, 2011. Climatic characteristics and cause on frequent freezing rain zone in Jiangxi[J]. Torr Rain Dis, 30(1): 6-10(in Chinese).
- 张芳华, 许先煌, 权婉晴, 等, 2024. 2024 年春运期两次极端雨雪冰冻天气过程对比分析[J]. 暴雨灾害, 43(4): 371-383. Zhang F H, Xu X H, Quan W Q, et al, 2024. Comparison of two extreme rainfall/snowfall and freezing weather events during the Spring Festival transportation period in 2024[J]. Torr Rain Dis, 43(4): 371-383(in Chinese).
- 赵俊虎, 赵语欣, 贾小龙, 等, 2025. 2024 年 2 月华东和华中大范围低温雨雪冰冻灾害的成因和可预报性分析[J]. 气象, 51(1): 17-29. Zhao J H, Zhao Y X, Jia X L, et al, 2025. Causes and predictability of the high-impact large-scale cryogenic freezing rain and snow weather in East China and Central China in February 2024 [J]. Meteor Mon, 51(1): 17-29(in Chinese).
- 赵珊珊, 高歌, 张强, 等, 2010. 中国冰冻天气的气候特征[J]. 气象, 36(3): 34-38. Zhao S S, Gao G, Zhang Q, et al, 2010. Climate characteristics of freezing weather in China[J]. Meteor Mon, 36(3): 34-38(in Chinese).
- 赵文灿, 龙余良, 阙志萍, 等, 2018. 江西省电线积冰特征及温度层结分析[J]. 气象科技, 46(1): 178-181. Zhao W C, Long Y L, Que Z P, et al, 2018. Characteristic and temperature stratification of wire icing in Jiangxi[J]. Meteor Sci Technol, 46(1): 178-181(in Chinese).
- 中国气象局, 2003. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2003. Ground Meteorological Observation Specification [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Bocchieri J R, 1980. The objective use of upper air soundings to specify precipitation type[J]. Mon Wea Rev, 108(5): 596-603.
- Huffman G J, Norman G A, 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon Wea Rev, 116(11): 2172-2182.
- Stewart R E, 1985. Precipitation types in winter storms[J]. Pure Appl Geophys, 123(4): 597-609.

(本文责编: 王婷波)