

孟雪峰,孙永刚,霍志丽,等.内蒙古一次极端暴雪事件中冻雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):22-30.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



内蒙古一次极端暴雪事件中冻雨成因分析

孟雪峰¹,孙永刚^{1*},霍志丽¹,萨日娜²,孔文甲¹,刘梦迪³

(1.内蒙古气象台,内蒙古 呼和浩特 010051;2.内蒙古气象服务中心,内蒙古 呼和浩特 010051;
3.通辽市气象台,内蒙古 通辽 028000)

摘要:利用常规观测资料、地面自动站资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料及雷达资料等对2020年11月18—19日发生在内蒙古东南部罕见历史极值特大暴雪事件背景下的通辽市冻雨灾害天气成因进行分析。结果表明:(1)冻雨发生时地面气象要素特征为地面气温稳定,降水量和降水强度较小。(2)存在典型的“冷—暖—冷”层结特征,近地层930~860 hPa存在强逆温层,气温 0°C 以上和 0°C 以下两个层结在探空 $T-\ln P$ 图中面积相当。(3)近地层冷垫是强冷高压南侵,受到江淮气旋和地形阻挡,在平原地区堆积形成,有持续的冷空气补充。(4)中层暖区融化层在700、850 hPa低涡前部,西南暖湿低空急流顶端到达冷垫上空并沿冷垫爬升叠置,持续的暖平流特征明显。(5)地面冷垫与中层暖层之间有明显的锋区特征,雷达观测在冻雨区具有回波强度增大的特征。

关键词:极端暴雪;冻雨;“冷—暖—冷”层结;云图特征

中图分类号:P458.121

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)04-0022-09

雨雪相态转换是一个复杂的科学问题,也一直是天气预报的难点,冻雨是 $<0^\circ\text{C}$ 的过冷却液态水滴降落到 0°C 以下裸露的物体上形成的一层冰层,是一种高影响灾害性天气。目前国内对2008年南方冻雨研究较多,杨贵明等^[1]认为冷暖气团长期对峙是“低温雨雪冰冻”天气持续的主要原因,指出华南地区上空静止少动的锋生中心,正是低温雨雪冰冻期间准静止锋长期稳定的原因之一。杨贵明等^[2]从冻雨灾害持续原因,初步分析了2008年初“低温雨雪冰冻”天气的主要特点和环流特征,指出南方冻雨形成逆温层稳定,融化层厚度较厚,是长时间冻雨天气的主要原因之一。王凌等^[3]对2008年南方低温雨雪冰冻天气与同期历史进行了比较,得出与日最高气温异常偏低和持续低温日有关。高辉等^[4]对2008年1月我国南方大范围低温雨雪冰冻天气从气候角

度进行成因分析,得出逆温层不断加强并长时间维持是大范围冻雨持续出现的主要原因。马晓刚等^[5]对南方冻雨进行了诊断分析,指出地面准静止锋是冰冻雨雪主要天气系统,逆温层、西南暖湿气流及北方强冷空气的不断补充是冻雨形成条件。王东海等^[6]利用新型卫星CloudSat的星载云廓线雷达(CPR)资料分析了冻结、凝华和冰雾粒子的附着增长的物理过程和对流层极涡变化及伴随的强天气事件的先期信号,是中长期预报的研究方向。江杨等^[7]对2008年初中国南方地区冻雨的温度层结进行数值模拟,指出较大的逆温梯度是冻雨区别于降水相态垂直温度场的明显特征。多位专家^[8-13]对南方冻雨气候规律和形成机制进行了研究,主要是对南方冻雨形成和持续机制、冻雨的冰晶物理过程和数值模拟的研究,指出南方冻雨的形成与冷空气持续补充、干湿层结等特征相关。

2020年11月17日08时—20日08时,受较强暖湿气流和冷空气共同影响,内蒙古全区大部出现了入冬以来影响范围最广、降水(尤其降雪)强度最大的雨雪天气过程。共有15站出现极端降雪事件,

收稿日期:2021-05-26;修回日期:2021-11-22

作者简介:孟雪峰(1965—),女,正高级工程师,主要从事天气预报分析与研究。E-mail:502996453@qq.com

通信作者:孙永刚(1967—),男,正高级工程师,主要从事灾害性天气机理研究。E-mail:sunyonggang5522@163.com

其中赤峰市阿鲁科尔沁旗、通辽市包含舍伯吐、科左中旗等 7 个站突破历史极值,出现极端暴雪事件。本次暴雪天气伴有复杂的雨雪相态转换,加之雪后强烈的寒潮大风使得灾害异常严重。特别是处于暴雪中心的通辽市南部地区,降雪前出现冻雨天气,进一步加大了灾害影响。本次强降雪对当地交通运输、电路通讯、城市运行、粮食管护、牧区牲畜管理等造成重大影响。据统计,赤峰市 10 个旗县区、通辽市 6 个旗县区、锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗出现雪灾,致使房屋、大棚、棚圈、钢化结构厂棚等垮塌受损,牛羊死亡等,直接经济损失超 30 000 万元。此外,受强风雪天气影响,全市中小学停课,部分企业停工。

在雨雪转换季节,大雪暴雪背景下冻雨的出现往往加重了灾害的影响。目前针对我国北方冻雨特征和成因研究不多,本文针对内蒙古东南部这次高影响冻雨天气过程进行研究,以提高对我国北方冻雨发生发展规律的认识,为雨雪转换重大气象灾害的预警服务工作提供科技支撑。

1 灾情分析

2020 年 11 月 18 日 08 时—19 日 08 时,内蒙古锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市出现大范围极端暴雪、特大暴雪气象灾害。赤峰市、通辽市有 7 个旗县突破暴雪历史极值,赤峰市阿鲁科尔沁旗连续 2 d 突破历史极值,最大降水量出现在通辽市开鲁县保安农场站,为 69.0 mm。最大小时降雪出现在通辽市奈曼旗青龙山,为 5.9 mm。大暴雪区域积雪深度达 20 cm 以上,通辽市最大积雪深度达 28 cm。此次暴雪天气过程伴随复杂的雨雪相态转换,出现雨、冻雨、霰、雨夹雪、雪等天气现象。另外,18 日 20 时—19 日 20 时暴雪后期,强冷空气南下,大部地区出现风雪寒潮天气。乌兰察布市、锡林郭勒盟、赤峰市最低气温下降 14~16℃,西乌珠穆沁最低气温达-25.9℃,24 h 降温达 16.3℃,极大风速达 28.9 m/s(11 级),伴随暴风雪等恶劣天气,使得这次暴雪灾害极为严重。

值得关注的是,此次极端暴雪中心的通辽市南部地区,在 18 日 13—20 时,出现了持续性冻雨天气(表 1),内蒙古库伦旗持续时间长达 7.5 h。冻雨出现在大兴安岭东侧和吉林市西南部的平原地区,呈东北西南走向的带状分布,从内蒙古东南部一直延伸到吉林西南部(图 1),冻雨发生时段该区域地面盛行偏东或东东北风,风力不大。冻雨形成结冰现象,随后地面气温快速下降转为暴雪天气,风雪寒潮天气加重了灾害。

表 1 各站冻雨持续时间

站名	冻雨持续时间	冻雨时段总 降水量/mm	过程降 水量/mm
科左后旗	18 日 13—20 时	7.4	26.7
库伦旗	18 日 11:00—18:30	7.5	33.4
青龙山	18 日 14—19 时	10.0	31.8
长春	18 日 18 时—19 日 03 时	10.5	26.9
双辽	18 日 17—23 时	8.7	27.8

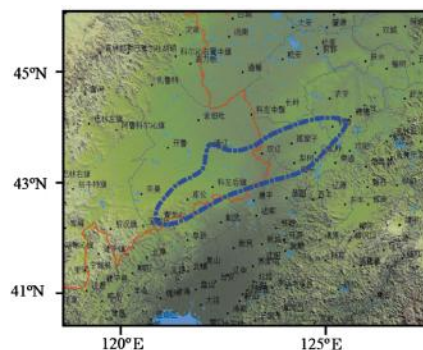


图 1 2020 年 11 月 18 日冻雨区域(蓝线)

2 天气形势分析

在 500 hPa 欧亚大陆“两槽一脊”背景下(图 2a),受北方冷空气与江淮气旋北上带来的西南暖湿气流共同影响,我国华北和东北大部产生超历史极值强降雪天气过程。18 日 08—20 时 500 hPa(图 2a)高纬度地区不断有横槽南压,有冷空气渗透补充(冷中心为-40℃),低纬度副热带高压摆动,逐步东移北上。108°E 西风槽与南支槽形成南北阶梯槽同位相叠加,东移影响内蒙古中东部大部;槽前西南急流强盛深厚,冻雨区位于旺盛的西南暖湿气流顶端。700 hPa(图 2b)110°E 低涡配合西风槽发展东移,低纬度北伸的西南暖湿急流强盛,冻雨区位于暖湿气流顶端、暖切变北端约 2 个纬距、0~4℃等温线之间。850 hPa(图 2c)低纬度低涡不断东北移,低涡前部暖湿气流持续加强北伸,偏东急流带来的冷空气使得在内蒙古东南部形成弱温度槽,并与西南急流交汇,温度槽前偏东急流与西南急流交汇处正是冻雨发生区。地面(图 2d)为北高南低形势,北部冷高压向南入侵,与北上加强的江淮气旋顶部交汇,形成地面静止锋,冻雨区恰好位于地面静止锋区一线、地面冷高压控制、对流层低层暖湿气流爬升区域中。由于系统稳定少动,这一天气形势配置一直持续到夜间,入夜后环境温度整体下降,冻雨结束转为降雪。

中纬度西风槽与南支槽同位相叠加并东移,使

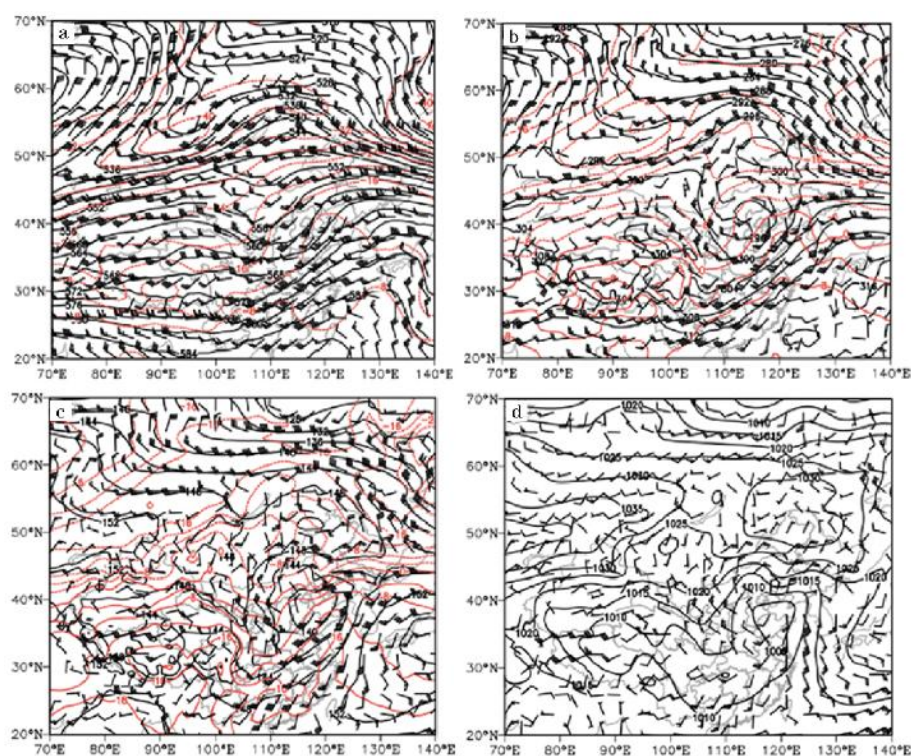


图2 2020年11月18日14时高度场(黑色等值线,单位:dagpm)、温度场(红色等值线,单位:℃)、风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a为500 hPa,b为700 hPa,c为850 hPa,d为海平面气压场(黑色等值线,单位:hPa)和风场)

得来源于低纬的水汽向高纬度输送,高空槽前低层存在低涡和地面气旋,低涡前侧存在强的西南急流,低涡和地面气旋在高空槽引导下向东北方向移动。低涡和地面气旋异常偏强是产生历史极端降水条件的大尺度背景特征。在有利的降水形势中,地面强冷高压南侵,与对流层中低层西南暖湿气流叠置,构建了冻雨形成的重要条件“冷—暖—冷”垂直结构。北方强盛的地面冷高压,从小兴安岭东侧东北平原向南侵入至燕山北和长白山以西受阻堆积,形成冷垫,是冻雨形成的重要条件之一。对流层中低层低涡前强盛的暖湿急流顶端到达冷垫并爬升,持续的暖平流在冷垫上形成一个暖层即融化层,是冻雨形成的另一重要条件,对北方来讲暖层建立这一条件更为重要。此外,需要有基础气温和气温日变化的配合,使得冷垫气温 $<0^{\circ}\text{C}$,暖层气温 $>0^{\circ}\text{C}$,并且有一定的层厚足以使得降水发生相态变化。18日入夜冻雨转为降雪并非系统配置变化所致,而是因为入夜环境温度整体下降的原因。本次冻雨天气的形成是多种条件配合,预报难度很大。

3 冻雨观测特征

3.1 地面气象要素演变特征

为了认识冻雨发生的基本环境条件,分析地面气象要素观测数据及其演变特征。选取了冻雨发生区的科左后旗(图3a),冻雨发生时段为13—20时,从降水量看,基本是降水初始阶段,地面气温稳定在 $-0.7\sim-1.0^{\circ}\text{C}$,波动很小,降水量较小,雪强在 1.2 mm/h 以下,累计降水量为 5.4 mm 。20时转为降雪后,气温开始骤降,降雪强度和量级也明显增大,出现 3.4 mm/h 的雪强。过程中温度露点差 $<4^{\circ}\text{C}$,湿度大,气压一直持续下降。23时气压达到最低值,此时雪强最大。选取了同为暴雪区未出现冻雨的赤峰站,全降雪过程中,地面气温变化波动较大,没有稳定时段,且均 $<-2^{\circ}\text{C}$ 。温度露点差 $<4^{\circ}\text{C}$,湿度大,气压一直持续下降,低值系统移来,气压达到最低值对应雪强最大,具有典型的降水要素特征。

通过分析冻雨发生区沿线的科左后旗、库伦旗、青龙山、长春、双辽对比无冻雨的赤峰(图3b)等地地面气象站逐小时气象要素和降水量变化特征表明,冻雨发生时段,各站地面气温稳定、波动较小,基本维持在 $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$,可能与雨滴释放热量成为过冷雨滴和地面冷高压南侵降温平衡相关。同我国北方预报指标与南方的“当中低空存在逆温层时,地面 0°C 线就是冻雨发生的标志线^[9]”略有差异。转雪后,气

温均出现快速下降。各站温度露点波动幅度不大且温度露点差均 $<4^{\circ}\text{C}$,空气湿度越大,水汽越饱和,冻雨持续的有利条件与降水相同。地面气压呈现持续下降趋势,降水强度增大,在出现最强降水前冻雨结束。本次冻雨发生在主体降水过程的开始时段,降水量和降水强度较小,降水量约占总量的25%(表1)、强度在 2 mm/h 以下。

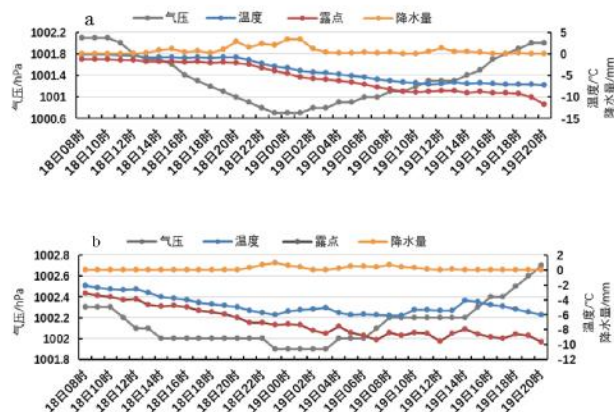


图3 2020年11月18日08时—19日20时逐小时降水量(黄线,单位:mm)、温度(蓝线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、露点(紫线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、气压(灰线,单位:hPa)变化
(a为科左后旗,b为赤峰;时间均为北京时间)

3.2 高空探测特征

分析冻雨发生区18日08时长春探空 $T-\ln P$ (图4a)及模式探空可见,与通辽相似,550~450 hPa存在干区,湿层深厚到达550 hPa,存在双逆温层结。近地层940 hPa(-2°C)~910 hPa(4°C)存在强逆温;800~935 hPa为暖层,最高气温为 4°C ,935~1000 hPa为冷层,最低气温为 -2°C , 0°C 以上和 0°C 以下两个层结在探空 $T-\ln P$ 图中面积相当, 0°C 以上暖区略大。对比分析无冻雨发生的赤峰探空 $T-\ln P$ (图4b)及模式探空可知,湿层深厚到达400 hPa,高层无明显的干冷空气侵入,近地层860 hPa(-4°C)~800 hPa(0°C)存在强逆温;750~840 hPa为暖层,最高气温为 0°C ;840~930 hPa为冷层,最低气温为 -4°C ,关键是冷暖层都在 0°C 以下,没有融化层存在。进一步分析18日14时冻雨发生时段各站模式探空具有相同的结论。

通过对比发生冻雨的长春探空站与未发生冻雨的赤峰探空站的 $T-\ln P$ 图可知,冻雨发生前与发生阶段长春探空主要特征相似,表现为:湿层深厚,湿层延伸至高空约550 hPa,高空550~450 hPa存在干冷空气侵入的特点(图4a)。分别在550 hPa和近地

层900 hPa存在双逆温层结,近地层逆温更强。上部逆温层为干湿分界,逆温层之下湿度很大,逆温层之上湿度迅速减小,干暖空气有利于稳定层结,抑制低层湿空气向上扩散,对冻雨天气的维持起到不可忽视的作用^[2]。而550~450 hPa中高层干冷空气的侵入抑制了低层湿空气向上扩散,对冻雨天气的出现和维持起到了关键作用。近地层930 hPa(-4°C)~860 hPa(3°C)存在强逆温,层结是“冷—暖—冷”。上层冷区湿度大,水汽形成雪花飘落,进入中层暖区温度 $>0^{\circ}\text{C}$,使雪(过冷水)在下落的过程中融化为雨滴,下落进入下层冷区温度 $<0^{\circ}\text{C}$,雨滴成为过冷水滴,降落到地面或物体表面立即冻结,形成冻雨。可见强逆温层是冻雨天气主要的垂直特征,其关键在于中间的暖区融化层,需要有一定的层厚和 $>0^{\circ}\text{C}$ 的气温足以融化雪,其层厚100 hPa左右,在920~820 hPa,最高气温在 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。另一个关键在于下层冷冻层,层厚100 hPa左右,层次在地面至900 hPa上下,最低气温在 $-2\sim -4^{\circ}\text{C}$ 。两个层结在探空 $T-\ln P$ 图中面积相当。对比没有出现冻雨的赤峰探空(图4b),具备深厚湿层的强降水特征,近地层虽然有逆温层结构存在,但温度整层都 $<0^{\circ}\text{C}$,没有融化层,出现暴雪天气。可见,“冷—暖—冷”垂直结构特征是冻雨形成的重要指标,在深厚湿层的降水有利条件下,高层冷区是常态,预报的关键在于中层的暖区、近地层的冷垫结构的形成和维持。另外要关注基础温度状况和气

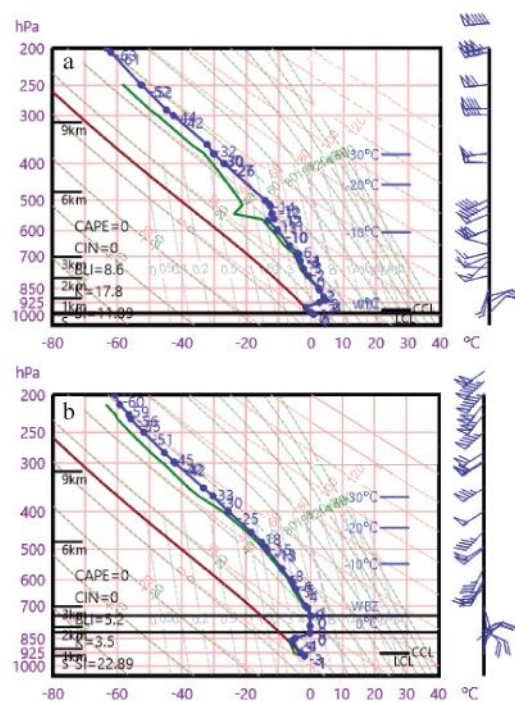


图4 2020年11月18日08时 $T-\ln P$ 探空图
(a为长春,b为赤峰)

温日变化特征的预报。

4 冻雨成因分析

冻雨形成的必要条件是“冷—暖—冷”垂直结构特征,且需要持续较长时间,这一垂直结构特征的形成条件是预报冻雨天气的关键。

4.1 近地层冷垫

近地层冷垫是冻雨形成的重要层结,在融化层形成的雨滴进入冷垫后形成过冷雨滴,环境温度需要在 0°C 以下,且不能过低,层厚适中。由18日08时地面图可知,地面冷高压中心位于贝加尔湖以东,中心强度为 $1\,042.5\text{ hPa}$,与江淮气旋北上的中心为 $1\,005.0\text{ hPa}$ 在 118°E 南北对峙。冷空气分两路南下,北路为主体南下后期形成寒潮天气;东北路为分支南下,从小兴安岭东侧东北平原向南侵入至燕山北和长白山西,受到江淮气旋(暖气团边缘为锋区)和地形阻挡,在平原地区堆积形成冷垫(可见高压倒脊),北方不断有冷空气补充到高压边缘,直至20时长时间稳定维持,成为冻雨形成的重要条件。

由沿 122°E 和 43°N 温度、相对湿度剖面图可见,在近地层 925 hPa 存在明显的低温冷垫层,冷中心达 -4°C (图5a、5c),冷舌明显从北向南延伸出去,

与上层 850 hPa 温差 $>4^{\circ}\text{C}$ (图5)。由沿 122°E 和 43°N 温度平流剖面图可知,在近地层 925 hPa 存在明显的冷平流,特别是冻雨发生的平原地区为冷平流中心(图6),强度达 $-15\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,冷平流的存在对近地层冷垫的维持起到关键作用。从温度平流垂直时间演变及 700 、 850 hPa 平面图可见,冻雨发生时段,近地层 925 hPa 存在明显的冷平流长时间维持的现象。随后,冷平流上升至 850 hPa ,冻雨结束转为降雪,后期出现整层的冷平流,爆发寒潮天气。

近地层冷垫的形成和维持是冻雨形成的必要条件,主要是由冷空气的侵入堆积,并不断有冷空气补充,且持续稳定少动。冷空气不能太强,厚度适中且不能过厚,否则冷空气将快速南下移过,则无法形成近地层冷垫。

4.2 中层暖区(融化层)

中层暖区融化层是冻雨形成的关键层结,高空冷区形成的雪进入融化层后成为雨滴,环境温度需要在 0°C 以上,且层高不能过低,层厚适中。由18日08时 700 、 850 hPa 高空图可知,在 700 、 850 hPa 低涡及其南支槽前部,西南暖湿气流旺盛,这支低空急流顶端到达冷垫上空并沿冷垫爬升,使得近地层冷垫上叠加了暖湿层即融化层,持续的暖湿气流使得

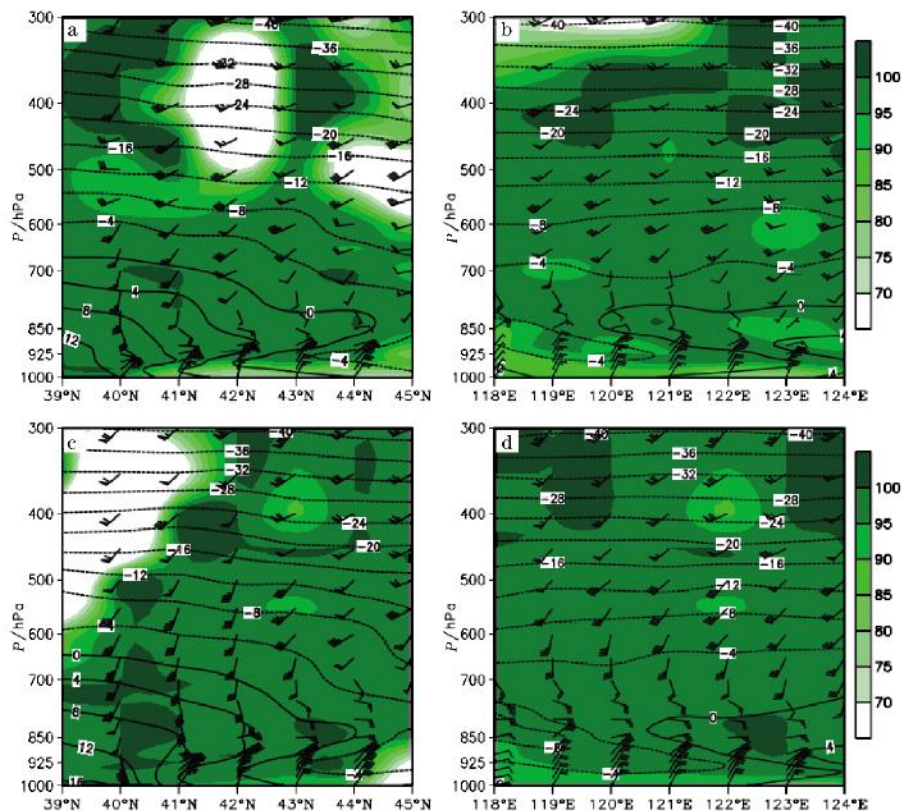


图5 2020年11月18日温度(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(填色,单位:%)、风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)垂直剖面
(a为08时沿 122°E ,b为08时沿 43°N ,c为14时沿 122°E ,d为14时沿 43°N)

融化层长时间稳定持续。

由沿 122°E 和 43°N 温度、相对湿度剖面图(图 5)可知,在对流层低层 850 hPa 存在明显的暖层,暖中心达到 4 °C,暖舌明显由南向北延伸,与下层 925 hPa 的温差>4 °C,700 hPa 以上层结是气温在 0 °C 以下的冷区。由沿 121°E 和 43°N 温度平流剖面图(图 6)可知,对流层整层几乎为暖平流,低层 850 hPa 存在明显的暖平流中心,强度达 $15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,暖平流的存在对近地层冷垫之上暖区的维持起到关键作用。由温度平流随时间演变剖面图可见,冻雨发生时段,对流层 850 hPa 暖平流长时间维持,随后,暖平流层上升至 800 hPa,冻雨结束转为降雪。

中层暖区的形成和维持是冻雨形成的必要条件,主要是由对流层中低层的暖湿低空急流持续在冷垫之上爬升形成,一方面形成了位于冷垫之上的暖层,另一方面也是降水形成的重要水汽输送条件。

4.3 冷垫与融化层的锋区特征

形成“冷—暖—冷”垂直结构的冷垫与融化层叠置,是不同性质的气团交汇,具备锋区特征。由沿 122°E 和 43°N 垂直风切变剖面图可见,对流层低层的风切变很大,以 850 hPa 为界,由 850 hPa 以下近地面层盛行的 NNE 风,风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,转为 850 hPa 以上的 SSE 风,风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其分别对应地面冷

高压控制的冷气团冷垫和上层的暖湿气团。可见强风切变反应了两类不同性质的气团叠置,是层结特征的重要标准和指标。分析沿 122°E 和 43°N 假相当位温剖面图及随时间演变(图 7)可见,在冷暖气团交界层次有密集的假相当位温线,锋区特征明显。在地面冷垫与融化层存在明显的锋区特征,是冻雨发生有利层结条件的重要特征。

4.4 雷达观测特征

18 日 15:50 在 2.4°仰角强度图出现 0 °C 层亮带(图 8a),出现时间为 13:43—16:38,持续 3 h 左右,对应冻雨出现的时间。不排除因为秋冬季 0 °C 层较低导致雷达站靠近 0 °C 层,较低仰角观测时出现 0 °C 层亮带,但主要原因还是冰粒外表的融化层反射率大,反射率因子回波突然增加而形成“0 °C 亮带”。由 17:05 雷达反射率因子 0.5°仰角强度图(图 8b)可知,回波明显分成南北两部分,北面边缘模糊,强度分布均匀,是典型的稳定性降水回波;南部在大片均匀分布的回波中夹有较强单体回波,是典型的絮状回波,并且有>45 dBZ 的回波,最强回波达 55 dBZ,说明融化层中有雨水的反射率贡献,因此冻雨区对应的回波强于雪的回波。反射率因子>45 dBZ、最强回波达 55 dBZ、且有絮状回波,是冻雨出现的特征。而无冻雨出现的暴雪区是层云稳定

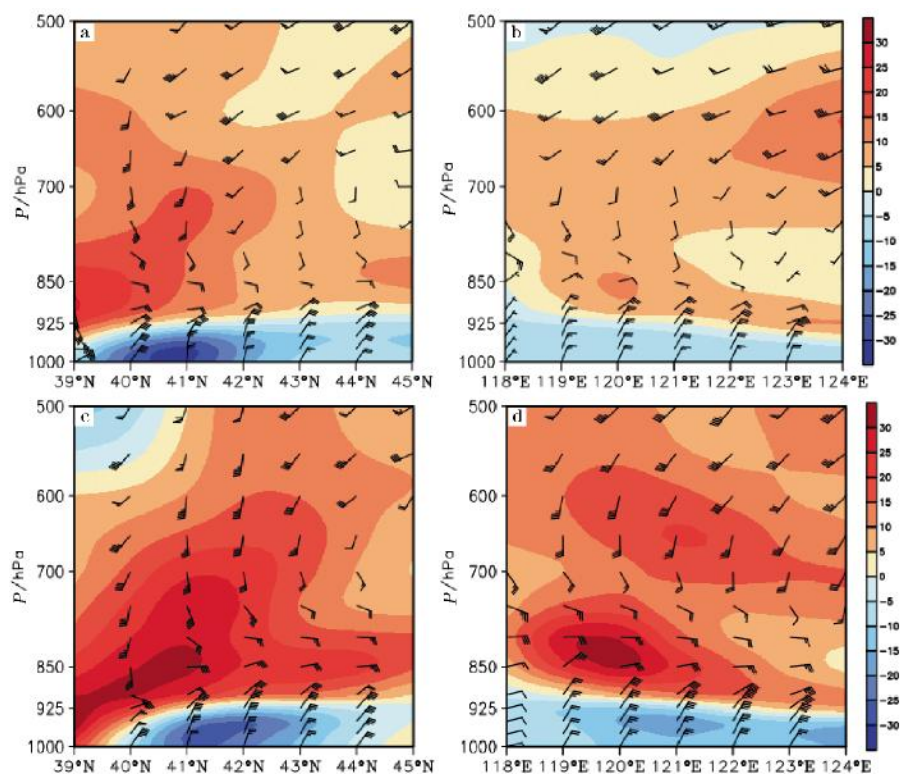


图 6 2020 年 11 月 18 日温度平流(填色,单位: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)垂直剖面
(a 为 08 时沿 121°E, b 为 08 时沿 43°N, c 为 14 时沿 121°E, d 为 14 时沿 43°N)

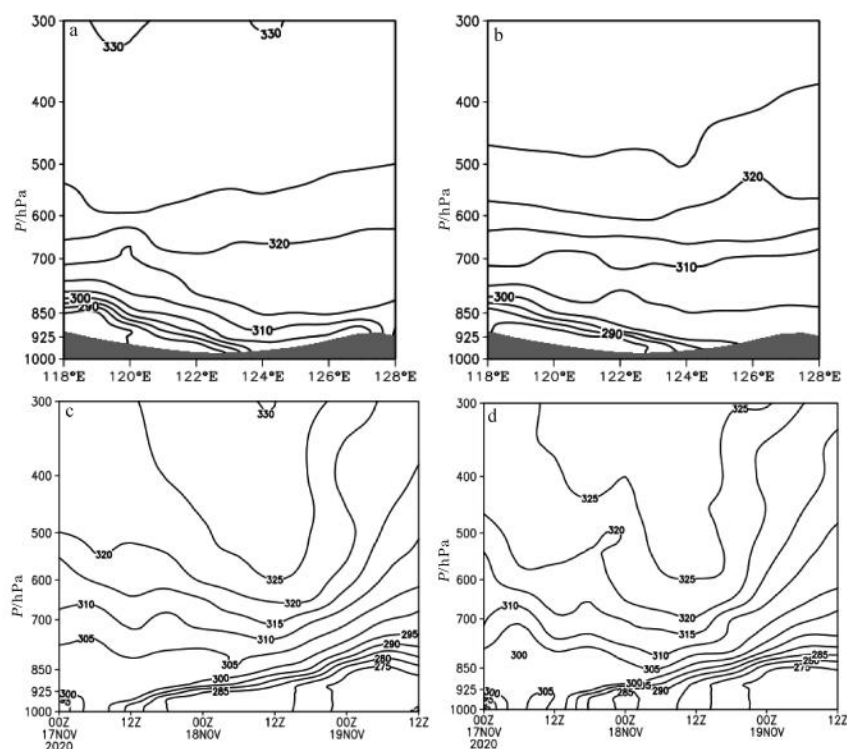


图7 2020年11月18日14时假相当位温(等值线,单位:K)和地形高度(阴影)垂直剖面、2020年11月17日08时—19日20时假相当位温(等值线,单位:K)随时间变化垂直剖面(a为沿42°N,b为沿43°N,c为42°N、122°E,d为43°N、121°E)

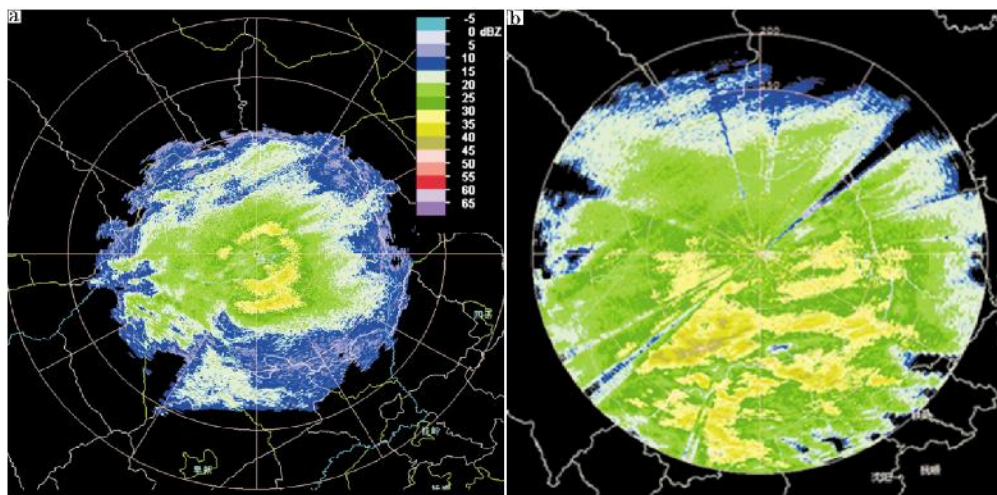


图8 2020年11月18日15:50时(a,2.4°仰角)、17:05时(b,0.5°仰角)通辽站反射率因子

性降水回波,反射率一般在15~30 dBZ。

5 结论

利用常规观测资料、地面自动站资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料及雷达资料等对2020年11月18—19日发生在内蒙古东南部罕见特大暴雪事件背景下的通辽市冻雨灾害天气成因进行分析,得出如下主要结论:

(1)冻雨天气地面气象要素演变特征:冻雨发生

时段,各站地面气温稳定,波动较小,基本维持在 $-1 \sim -2^\circ\text{C}$ 。转雪后,气温均出现快速下降,温度露点差 $<4^\circ\text{C}$,空气湿度越大,水汽越饱和。地面气压呈现持续下降趋势,降水强度增大。冻雨降水量和降水强度较小,占总量的25%,强度 $<2\text{ mm/h}$ 。

(2)大气探空层结特征:在550 hPa和近地层900 hPa存在双逆温层结构。550 hPa以下为深厚湿层,高空550~450 hPa存在干冷空气侵入。近地层930 hPa(-4°C)~860 hPa(3°C)存在强逆温层,存在

典型的“冷—暖—冷”冻雨形成的有利层结特征。暖层在 920~820 hPa,其厚度约 100 hPa,气温为 0℃以上,最高气温在 2~4℃。冷垫层地面~920 hPa,气温为 0℃以下,最低气温在-2~-4℃。在探空 T - $\ln P$ 图中两层的正负气温面积相当。

(3)近地层冷垫是由于地面强冷高压南侵,有持续的冷空气补充,受地形阻挡影响,自小兴安岭东侧东北平原向南侵入至燕山北和长白西侧,因江淮气旋(暖气团边缘为锋区)和地形阻挡,在平原地区堆积形成冷垫。在近地层 925 hPa 存在明显的低温冷垫层,冷舌中心达到-4℃。925 hPa 的冷平流对近地层冷垫的维持起到关键作用。冷空气强度适中,不能太强,地形在冷暖空气稳定对峙中也起到关键作用。

预报着眼点:地面冷高压强度、移动,冷空气不能过强,与南支低值系统的相互作用,保持稳定对峙。天气关键区是冷高压与暖倒槽边缘的锋区强度。地形对冷高压移动路径和停留堆积的影响,关键点是冷空气沿山谷低洼处流动,受山脉地形阻挡形成停留堆积。冷垫层厚 100 hPa 左右,不能过厚,气温达到 0℃以下,中心气温为-2~-4℃,地面气温为-1~-2℃,要关注环境气温的日变化影响。冷空气不断补充,存在明显的近地层冷平流,使冷垫长时间维持,冷平流中心强度为 $-10 \times 10^{-5} \sim -20 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4)中层暖区融化层是由于 700、850 hPa 低涡前部、西南暖湿低空急流旺盛、长时间稳定持续、顶端到达冷垫上空并沿冷垫爬升叠置形成。在对流层低层 850 hPa 存在明显的暖层,暖舌中心达 4℃,850 hPa 存在暖平流,中心为 $15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,暖平流对融化层的建立和持续起到关键作用。

预报着眼点:暖湿低空急流足够强盛,达到低空急流标准,并稳定持续,其顶端到达冷垫上空。有持续的暖平流,850 hPa 达到 $10 \times 10^{-5} \sim 20 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,存在深厚的暖湿层,配合强烈的上升运动。暖层 $>0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的层次要达到 100 hPa 左右,暖舌中心达到 2~4℃,同时关注环境气温的日变化影响。

(5)“冷—暖—冷”垂直结构中冷垫与融化层具有明显的锋区特征。对流层低层的风切变大,925~700 hPa 风切矢量达到 $20 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对流层低层具有明显的等位温线密集区。这一锋区特征是很好的

预报指标,关键点是锋区持续稳定,并对应冻雨层结条件。

(6)通过雷达反射率强度可以区分冻雨区和降雪区域,冻雨区回波强度明显较强。本次冻雨区对应的回波强度 $>45 \text{ dBZ}$,最强达到 55 dBZ,明显大于降雪区的回波强度,而纯降雪雷达反射率一般在 15~30 dBZ。

参考文献:

- [1] 杨贵名,毛冬艳,孔期.“低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析[J].气象学报,2009,67(4):652-665.
- [2] 杨贵名,孔期,毛冬艳,等.2008年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J].气象学报,2008(5):836-849.
- [3] 王凌,高歌,张强,等.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I:气候特征与影响评估[J].气象,2008(4):95-100.
- [4] 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 II.成因分析[J].气象,2008(4):101-106.
- [5] 马晓刚.2008年1月我国南方罕见冰冻雨雪灾害性天气诊断分析[J].气象与环境学报,2009,25(1):23-26.
- [6] 王东海,柳崇健,刘英,等.2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J].气象学报,2008(3):405-422.
- [7] 江杨,叶金印,何志新,等.2008年初我国南方地区大范围冻雨过程的温度层结特征[J].暴雨灾害,2017,36(6):566-572.
- [8] 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.
- [9] 丁一汇,王遵亲,宋亚芳,等.中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J].气象学报,2008(5):808-825.
- [10] 漆梁波.我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J].气象,2012,38(7):769-778.
- [11] 甘文强,蓝伟,杜小玲,等.2018 年 1 月底至 2 月初贵州低温雨雪天气成因初探[J].暴雨灾害,2018,37(5):410-420.
- [12] 史昀,贾新军.2016 年 12 月克拉玛依一次罕见冻雨天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(2):76-83.
- [13] 吴哲红,陈贞宏,白慧.2011 年与 2008 年贵州低温雨雪冰冻天气锋区特征对比[J].干旱气象,2013,31(4):763-770.

Cause Analysis of Freezing Rain in an Extreme Snowstorm in Inner Mongolia

MENG Xuefeng¹, SUN Yonggang¹, HUO Zhili¹, SA Rina², KONG Wenjia¹, LIU Mengdi³

(1.Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010051, China;

2.Inner Mongolia Meteorological Service Center, Hohhot 010051, China;

3.Tongliao Meteorological Observatory, Tongliao 028000, China)

Abstract Based on conventional observations, ground automatic station data, NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, radar and other multi-source data, the causes of the freezing rain disaster in Tongliao on 18–19 November 2020 were analyzed under the background of rare historical extreme snowstorm events in southeast Inner Mongolia. The results show that: (1) During the freezing rain period, the surface meteorological elements are characterized by stable temperature, less precipitation and lower rainfall intensity. (2) There is a typical “cold–warm–cold” stratification, which exists a strong inversion layer from 930 to 860 hPa near the ground. The two stratifications of temperature above and below 0°C are similar in the radiosonde $T-\ln P$. (3) Near-surface cold pad is formed by southward invasion of strong cold high pressure, blocked by Jianghuai cyclone and terrain in plain area, and gets continuous near-surface cold advection supplement. (4) The melting layer in the middle warm zone is at the front of the 700 and 850 hPa vortexes. The top of the southwest warm–wet low-level jet reaches over the cold pad and is formed by climbing and stacking along with the cold pad. The continuous warm advection has obvious characteristics. (5) There are obvious frontal characteristics between the near-surface cold pad and melting layer in the middle warm zone, and radar observation has obvious characteristics of increasing echo intensity in the freezing rain area.

Key words extreme snowstorm; freezing rain; “cold – warm – cold” stratification; cloud image characteristics