

李晓婷,高松影,刘利民,等. 东北冷涡背景下辽宁两次强降雨雪过程对比分析[J]. 陕西气象,2025(5):1-9.

文章编号:1006-4354(2025)05-0001-09

东北冷涡背景下辽宁两次强降雨雪过程对比分析

李晓婷¹,高松影²,刘利民³,王 丽¹,姜 新¹

(1. 铁岭市气象局,辽宁铁岭 112000;2. 丹东市气象局,辽宁丹东 118000;

3. 沈阳农业大学,沈阳 110000)

摘要:应用常规观测资料、ERA5 再分析资料,对比分析辽宁省 2021 年 11 月 6—9 日(过程一)、2023 年 11 月 5—6 日(过程二)两次东北冷涡背景下强降雨雪天气过程的环流演变、环境特征及雨雪相态成因。结果表明:(1)两次雨雪天气过程均发生在东北冷涡配合气旋东移北上的环流背景下。过程一冷涡迅速发展缓慢移动,低空环流路径偏北,高低空急流在辽宁省中部叠置;过程二冷涡强度较弱、移动快,低空环流路径偏东,高低空急流在辽宁省中部和北部叠置。两次过程叠置时间和位置与强降水时段和降水量大值区对应。(2)随水汽、动力条件增强两次过程均出现强降水,过程一垂直风切变更强且降水持续时间更长,过程二 700 hPa 以下比湿更大,降水效率更高。(3)两次天气过程均存在雨雪转换,降水相态差异明显。过程一降水前辽宁省平均气温接近常年,冷空气强,暖湿气流在冷垫上爬升,逆温层维持 9 h,降水相态复杂,出现冻雨或冰粒;过程二降水前辽宁省平均气温较常年同期偏高,雨雪转换时冷暖层厚度相近,且冷暖层温度差较小,先雨后雪,降水相态简单。

关键词:东北冷涡;强降水;降水相态;逆温层

中图分类号:P468

文献标识码:A

东北冷涡是影响我国东北地区的重要天气系统,它位于东北上空,是一种大型的、结构复杂的涡旋系统,其持续活动会引起明显的气温和降水异常^[1],造成的强降水具有明显的局地性和不对称性^[2]。东北冷涡一年四季均可出现^[3],产生的暴雨、暴雪、强对流和低温等灾害性天气给人们的生产生活带来极大影响^[4-7]。黄丽君等^[8]对 2000—2019 年东北冷涡统计发现,东北冷涡更易出现在暖季的 5—7 月,冷季的 2—3 月和 10—11 月出现频次较少。在以往的东北冷涡研究中多以暖季暴雨和强对流为主^[9-12],对冷季降水研究甚少。冷季降水对电力交通、农林牧渔业会产生重要影响,特别是雨雪相态转换的天气,降水相态复杂多样,易引发气象灾害^[13-21]。对降水相态的研究,一直是气象学者关注的重点。王璐璐等^[22]通过垂直方向上大气温度变化对苏南两次天气过程

降水相态进行分析,指出近地面降温可以判别苏南地区的雨和雪;郑丽娜等^[23]分析 2021 年 2 月黄河中下游两次暴雪相态转换过程后也指出近地层的温度变化,特别是 2 m 气温对相态的转换有一定的指示性。近年来东北地区相态转换天气过程逐渐受到关注。徐红等^[24]对辽宁地区 2011—2020 年雨雪转换天气过程统计分析,将雨雪转换天气过程分为空中槽、北上气旋、低涡切变、冷平流和回流 5 大类型,并指出地面 2 m 气温、0 °C 层高度、抬升凝结高度、抬升凝结高度气温和地面 2 m 气温差等气象因子对辽宁地区降水相态判别有帮助;高松影等^[25]对丹东冬季降水相态判据研究表明 850 hPa 以下温度条件对降水相态形成有重要影响,850 hPa 0 °C 线能区分雨和雪的大致范围,925 hPa 0 °C 线能区分雨夹雪、雨、雪的大致范围;阎琦等^[26]对辽宁省 2018 年两次雨转暴雪过

收稿日期:2024-07-07

作者简介:李晓婷(1991—),女,汉族,黑龙江穆稜人,硕士,工程师,主要从事天气预报预警技术与方法研究。

基金项目:辽宁省气象局“东北冷涡背景下短时强降水预报预警技术研究”(ZD202332)

程进行分析,认为提高雨雪转换时间的预报能力,能进一步提高降雪量预报的准确程度。

在全球变暖的背景下,我国雨雪相态转换的天气过程逐渐增多,但东北冷涡引起的强降雨天气并不多见。强降雨天气由于降水强度大、降水相态复杂多样,往往会引发更严重的气象灾害,造成巨大的经济损失。2021年和2023年的11月初,辽宁省出现了两次东北冷涡背景下的强降雨天气,本文将利用逐小时地面观测资料和高分辨率欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析全球气候数据资料,对两次强降雨天气成因进行分析,以期提高强降水的预报能力和复杂雨雪相态变化预判能力。

1 资料

选取资料为2021年11月6—9日、2023年11月5—6日辽宁省国家级气象站逐小时2 m气温、降水量常规观测气象资料;欧洲中期天气预报中心第五代逐小时大气再分析全球气候数据(ERA5),其水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,气象要素为温度、比湿、水平风场、海平面气压、位势高度等。

2 天气实况

2021年11月6—9日,辽宁省出现历史罕见特大暴雪、雨雪冰冻、寒潮和大风天气(过程一)。全省平均降水量41.1 mm,39个气象站出现特大暴雪,20个气象站最大积雪深度达到30 cm以上,最大降雪量为80.3 mm,出现在鞍山站,积雪深度为53 cm。7日午后至夜间辽宁省大部地区出现冻雨、霰或冰粒。

2023年11月5—6日,辽宁省出现大范围雨雪天气(过程二)。全省平均降水量41.2 mm,5日大部地区出现大雨,局部出现暴雨,6日凌晨至白天自西向东陆续转雪,中西部地区出现大雪到暴雪,北部地区局部出现大暴雪。最大降水量为59.6 mm,出现在辽阳县站。

两次过程均出现在初冬,时间相近且均发生在东北冷涡背景下,过程平均降水量相近且均出现雨雪转换。不同之处在于过程一出现了大范围冻雨天气,后期以降雪为主,降雪量大,持续4 d;过程二先雨后雪,持续2 d。过程一降水量大值区在辽宁省中部(图1a),过程二降水量大值区在辽宁省中部和北部(图1b)。

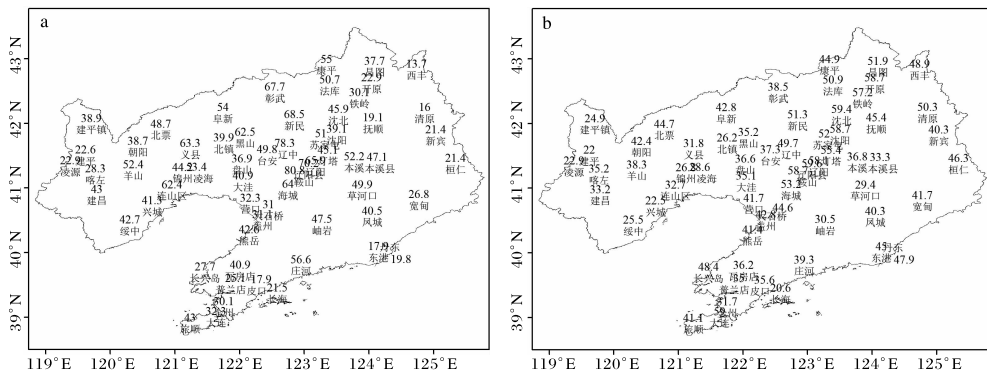


图1 辽宁两次强降雨雪过程降水量空间分布图(a 2021-11-06T08—09T20, b 2023-11-05T08—07T08;审图号为GS(2022)1873号)

3 天气背景对比

3.1 中高层环流形势演变

图2为2021年11月6—9日和2023年11月5—6日中高层环流形势。过程一降水前,500 hPa高度场为两脊一槽形势,贝加尔湖南侧和东北地区为高压脊,蒙古国为东西向的长波槽。200 hPa上 25°N 至 35°N 之间自西向东存在大于 50 m/s

的急流,同时在高空槽东侧存在大于 30 m/s 的急流(图略)。7日20时500 hPa横槽在华北转竖后发展形成中心强度为544 dagpm、冷中心为一 32°C 的低涡(图2a)。低涡东侧200 hPa急流东移并加强。8日20时500 hPa高空槽发展为强度为524 dagpm的东北冷涡(图2b),200 hPa急流东移至朝鲜。9日14时东北冷涡达到

最强(图 2c),共形成 7 条闭合等高线,中心强度为 520 dagpm,冷中心温度维持,东移至东北地区中部,辽宁省位于东北冷涡后部。此时冷涡东侧 200 hPa 急流继续东移,大于 40 m/s 的急流范围收缩。

过程二降水前,500 hPa 高度场 25°N 至 30°N 有暖性高压,蒙古国上空形成中心强度为 540 dagpm 的东北冷涡(图略)。200 hPa 上 25°N 至 38°N 之间和冷涡东侧 41°N 至 48°N 之间存在西南东北走向的 >50 m/s 的急流。5 日 20 时 500 hPa 东北冷涡东移到内蒙古中部(图 2d),冷中心强度为 -34 °C,冷涡东侧 200 hPa 大于 50 m/s 的急流范围增大为 38°N 至 51°N。6 日 08 时 500 hPa 冷涡东移南压到华北北部(图 2e),中心强度下降

4 dagpm,冷中心迅速减弱为 -28 °C。冷涡南侧和东侧 200 hPa 上大于 50 m/s 的急流不断接近。6 日 20 时 500 hPa 冷涡到达吉林省(图 2f),中心强度加强为 528 dagpm。冷涡南侧和东侧 200 hPa 上大于 50 m/s 的急流出现汇合。

两次天气过程均是在东北冷涡背景下产生,冷涡最强盛时过程一的中心强度和冷中心温度均比过程二强。过程一冷涡南侧 200 hPa 大于 50 m/s 的急流稳定维持在 25°N 至 35°N 之间,冷涡东侧的急流先加强,后减弱,对冷涡的移动速度影响较小。过程二冷涡南侧和东侧 200 hPa 大于 50 m/s 的急流呈西南东北方向,两侧急流不断发展,比过程一更接近冷涡中心,加速冷涡移动。

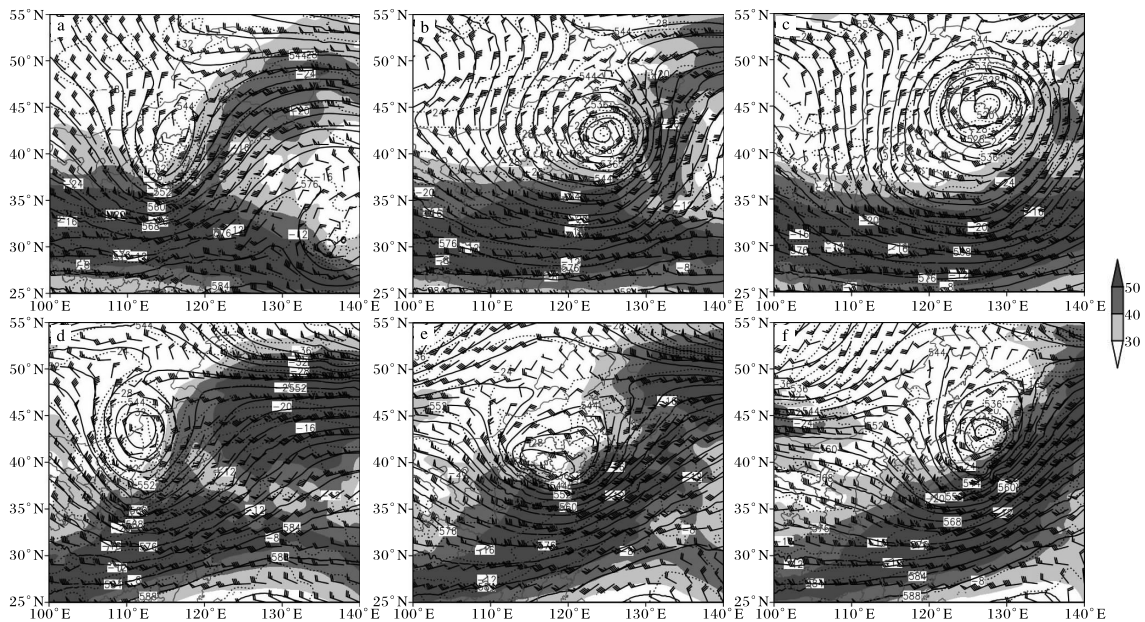


图 2 辽宁两次强降雨过程中 200 hPa 急流(阴影,单位为 m/s),500 hPa 高度场(黑色实线,单位为 dagpm)、温度场(黑色虚线,单位为 °C)、风场(风羽,单位为 m/s)(a 2021-11-07T20,b 2021-11-08T20,c 2021-11-09T14,d 2023-11-05T20,e 2023-11-06T08,f 2023-11-06T20;审图号为 GS(2022)1873 号)

3.2 对流层环流演变

过程一降水前,700 hPa 上东北至华北形成低值系统,925 hPa 华北地区形成闭合环流;7 日 20 时 700 hPa 华北地区形成低涡(图 3a),其东南侧 925 hPa 上闭合环流风速增强;8 日 20 时 700 hPa 低涡增强为 5 条闭合等高线(图 3b),且东移至东北地区。925 hPa 上环流风速再次增强,中心在 700 hPa 低涡中心北部,即 925 hPa 环流移速大于 700 hPa 低涡;9 日 14 时 700 hPa 上低涡

与 925 hPa 上环流东移北上并减弱(图 3c)。

过程二降水前,700 hPa 上在蒙古国形成低涡,华东地区 925 hPa 上形成闭合环流;5 日 20 时 700 hPa 上的低涡东移至内蒙古(图 3d),925 hPa 上环流风速增强东移至辽宁省南部;6 日 08 时 700 hPa 低涡加强迅速东移至东北地区(图 3e),925 hPa 上环流东移北上至辽宁省东部,环流中心与低涡中心几乎重合,6 日 20 时 700 hPa 低涡和 925 hPa 环流继续东移并减弱(图 3f)。

对比可知过程一 700 hPa 低涡发展迅速, 925 hPa 环流移动速度较低涡快且路径偏北; 过程二前期 700 hPa 低涡与 925 hPa 环流距离远, 后

期低涡增强程度低于过程一, 且 925 hPa 环流移动路径偏东。

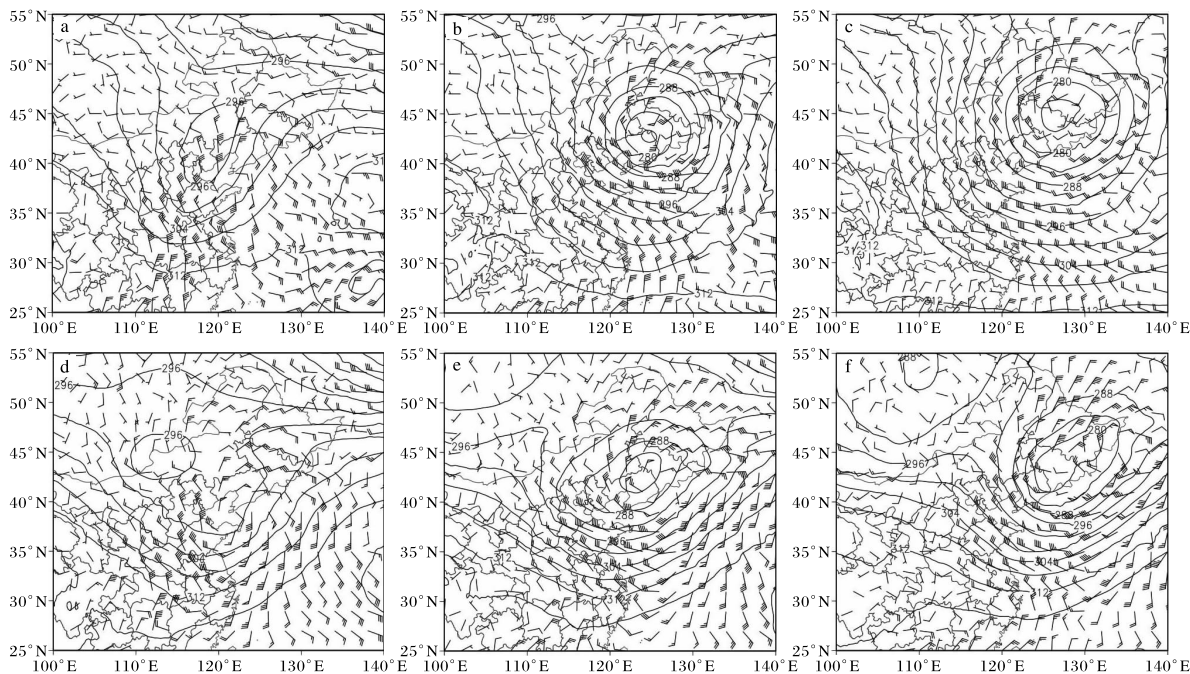


图3 辽宁两次强雨雪过程中 700 hPa 高度场(黑色线,单位为 dagpm)、925 hPa 风场(风羽,单位为 m/s)

(a 2021-11-07T20, b 2021-11-08T20, c 2021-11-09T14, d 2023-11-05T20, e 2023-11-06T08, f 2023-11-06T20;审图号为 GS(2022)1873 号)

3.3 地面气旋演变

过程一降水前地面上华东北部形成地面倒槽, 华中地区形成冷锋(图略); 7 日 20 时地面倒槽与冷锋在黄海北部结合形成气旋(图 4a), 中心强度为 1 014 hPa, 辽宁省位于气旋顶部, 此时降水强度明显增加; 8 日 20 时气旋达到最强(图 4b), 中心强度为 996 hPa, 东移至吉林省, 辽宁省位于气旋后部; 9 日 14 时气旋逐渐减弱(图 4c), 中心强度为 1 002 hPa, 缓慢移动至黑龙江省。

过程二 5 日 08 时在华东地区形成气旋(图略), 中心强度 1 011 hPa; 5 日 20 时气旋中心强度加强为 1 002 hPa(图 4d), 东移北上至黄海北部, 辽宁省位于气旋顶部, 降水强度增加; 6 日 08 时气旋中心强度下降至 993 hPa(图 4e), 东移至吉林省南部, 辽宁省位于气旋后部; 6 日 20 时气旋缓慢移动至黑龙江省南部(图 4f)。

两次过程气旋中心气压 24 小时均下降 18 hPa, 气旋爆发程度相同, 但过程二中心气压更低, 两次

雨雪过程中气旋加强东移北上明显增加了降水强度。

4 强雨雪成因对比

4.1 850 hPa 水汽输送

过程一降水开始, 辽宁省 800 hPa 以下比湿均大于 2 g/kg。随着低涡形成发展, 7 日 20 时, 辽宁中南部 850 hPa 水汽通量 $>10 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (图 5a), 2 g/kg 比湿层升至 600 hPa, 辽宁省中部和南部 800 hPa 以下的比湿从 2 g/kg 增至 4 g/kg 以上(图 5c)。8 日 20 时, 850 hPa 形成的闭合环流中, 向辽宁中部输送的水汽通量仍超过 $5 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (图 5b), 900 hPa 以下的比湿超过 2 g/kg。

过程二降水开始, 辽宁省中部和南部 900 hPa 以下比湿均大于 6 g/kg, 5 日 20 时, 辽宁省南部水汽通量超过 $15 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (图 5d), 2 g/kg 比湿层升至 500 hPa, 辽宁省南部 800 hPa 以下的比湿超过 8 g/kg(图 5f)。6 日 08 时, 辽宁省中部

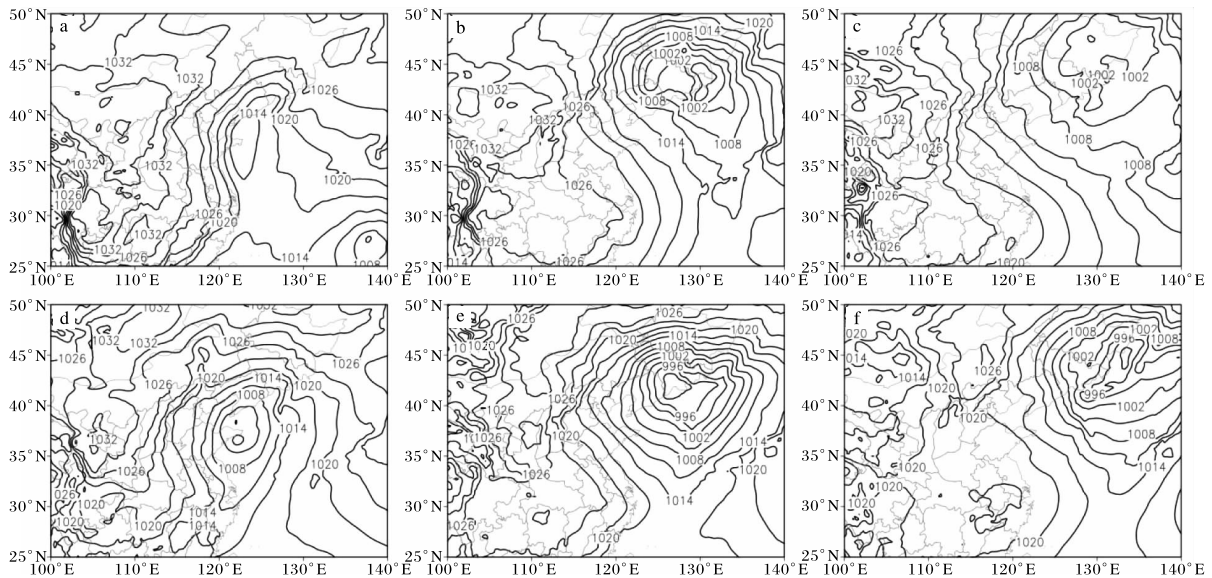


图4 辽宁两次强降雨雪过程中海平面气压(黑色线,单位为 hPa;a 2021-11-07T20,b 2021-11-08T20, c 2021-11-09T14,d 2023-11-05T20,e 2023-11-06T08,f 2023-11-06T20;审图号为 GS(2022)1873 号)

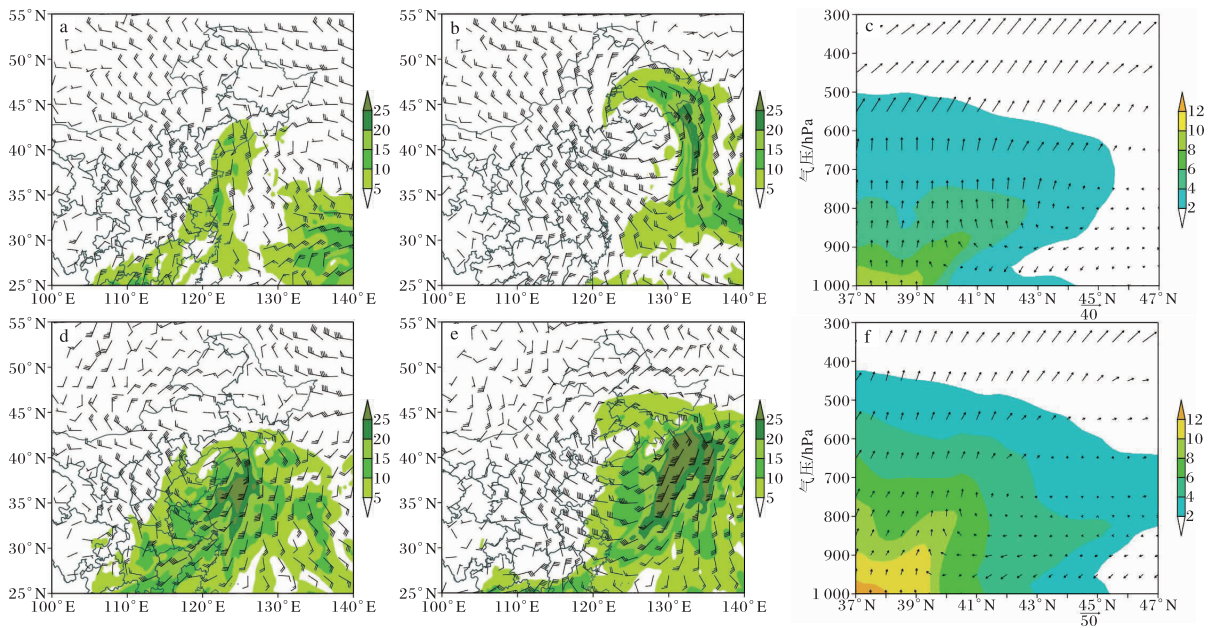


图5 辽宁两次强降雨雪过程中 850 hPa 水汽通量(阴影,单位为 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 和风(风羽,单位为 m/s)(a 2021-11-07T20,b 2021-11-08T20,d 2023-11-05T20,e 2023-11-06T08;审图号为 GS(2022)1873 号)及沿 123°E 比湿(填色,单位为 g/kg)和风(箭头,单位为 m/s)的纬度-高度垂直剖面(c 2021-11-07T20;f 2023-11-05T20)

和北部 850 hPa 受东北气流影响,向其输送的水汽通量仍超过 $5 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (图 5e), 750 hPa 以下的比湿超过 2 g/kg 。

两次降水过程都有海洋的暖湿水汽输送,但在暖性高压的背景下,过程二大于 $5 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 的水汽通量范围更大、量级更高,垂直方向上湿层更厚。过程一持续 4 d,过程二持续 2 d,但两次降

水过程全省平均降水量均超过 40 mm。

4.2 高低空急流配置

过程一中,7 日 20 时 300 hPa 高空急流东移南压呈现“S”型弯曲(图 6a),辽宁省 850 hPa 东南部出现偏南风低空急流(风速大于 12 m/s)。辽宁省中部位于低空急流左前方辐合区,与高空急流入口右侧辐散区叠置,低空急流不仅可以使

上升运动增强,还为降水输送了来自黄海、渤海的暖湿空气,辽宁省中部降水强度明显增强。8日20时300 hPa高空急流加强且出现反气旋式弯曲(图6b),850 hPa急流强烈发展。9日14时300 hPa高空急流断裂(图6c),辽宁省850 hPa偏北低空急流减弱,对辽宁省的影响逐渐减小。

过程二中,5日20时300 hPa高空急流东移呈现“S”型弯曲(图6d),850 hPa渤海北部出现东南低空急流,有利于辽宁省中部和北部低层水汽输送。辽宁省中部和北部位于低空急流左前方辐

合区,与高空急流入口的右侧辐散区叠置,促进垂直环流发生发展,降水强度增加。6日08时300 hPa高空急流断裂,850 hPa低空急流加强(图6e),辽宁省中部降水强度减弱。6日20时300 hPa高空急流东移北上(图6f),850 hPa辽宁省偏北低空急流加强。

高空急流呈现“S”型弯曲,高空急流入口右侧辐散区与低空急流左前方辐合区叠置使两次过程降水强度明显增强。高低空急流叠置时低空急流存在的差异,使降水量大值区存在差异。

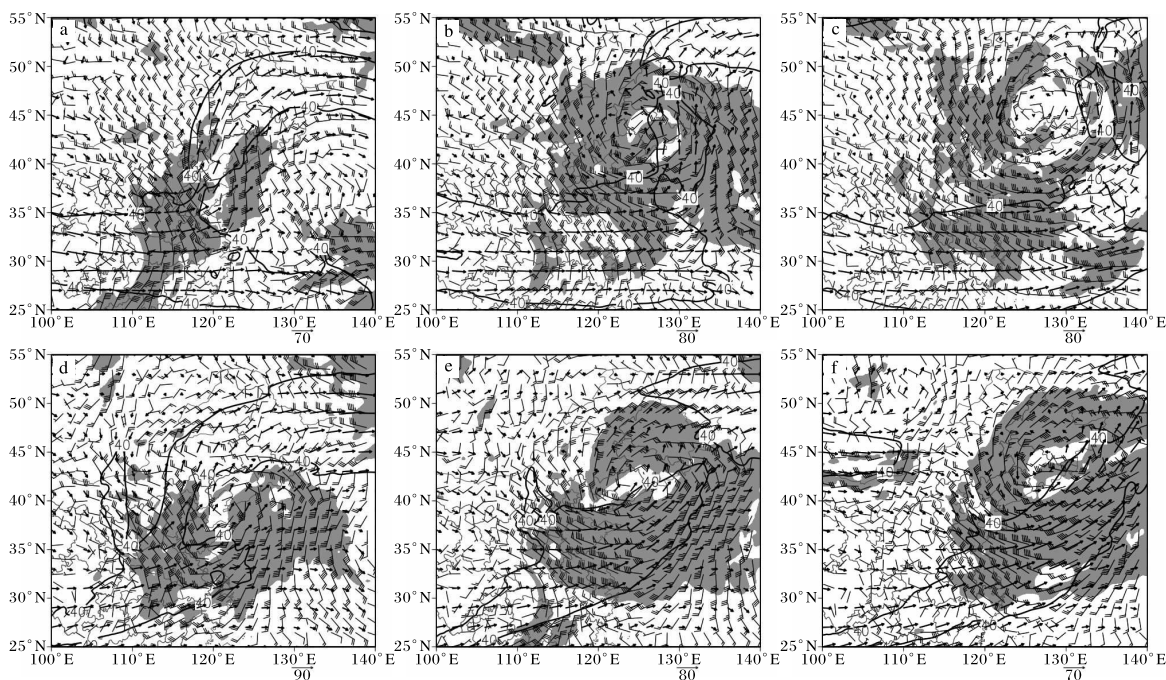


图6 辽宁两次强雨雪过程中300 hPa高空急流(黑色线,风速大于40 m/s)和850 hPa低空急流(灰色填充,风速大于12 m/s)(a 2021-11-07T20, b 2021-11-08T20, c 2021-11-09T14, d 2023-11-05T20, e 2023-11-06T08, f 2023-11-06T20;审图号为GS(2022)1873号)

4.3 强降水时段的环境条件

鞍山站在辽宁省中部,纬度 41.1°N 、经度 123.0°E ,且均处于两次天气过程降水量的大值区,由于探空站距离鞍山站过远不具代表性,本节将通过距离鞍山站最近的ERA5格点(41.0°N 、 123.0°E)的探空资料对强雨雪过程的环境条件进行分析。

过程一中,7日08时(图7a)950~850 hPa存在温差为 9°C 的逆温层,925 hPa以下为东北风,风速最大为10 m/s,形成冷垫。850 hPa附近西南暖湿气流沿冷垫爬升,风速为11 m/s,0~3 km

和0~6 km垂直风切变分别为20.7 m/s和29.9 m/s,此时抬升凝结高度在800 m左右,925~700 hPa比湿为2.7~3.5 g/kg,但相对湿度低于80%。7日17时(图7b)950~850 hPa仍存在逆温层,850 hPa西南风加强为14 m/s,925~700 hPa比湿为2.5~3.2 g/kg,低层比湿增大,相对湿度超过80%,抬升凝结高度在500 m左右,0~3 km和0~6 km垂直风切变增大至30.0 m/s和36.4 m/s,动力和水汽条件增强,鞍山站开始降水。8日01—06时降水强度最大(图8a),此时逆温层增厚(图7c),925 hPa偏北风增大到15 m/s,850 hPa比湿

减弱为 $1.5 \sim 3.7 \text{ g/kg}$, 700 hPa 比湿增强为 $2.4 \sim 3.8 \text{ g/kg}$, 湿层略增厚, 抬升凝结高度为 300 m 左右, $0 \sim 3 \text{ km}$ 垂直风切变和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变最大为 32.9 m/s 和 48.2 m/s , $00 \sim 06$ 时降水量为 39.3 mm 。

过程二中, 5 日 08 时(图 7d) 950 hPa 以下温度为 10°C , 850 hPa 以下以东南风为主, 750 hPa 以上为西南风, $0 \sim 3 \text{ km}$ 和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变分别为 10.9 m/s 和 28.1 m/s , 抬升凝结高度在 600 m 左右, $925 \sim 700 \text{ hPa}$ 比湿为 $2.1 \sim 5.9 \text{ g/kg}$, 但相对湿度为 $30\% \sim 80\%$ 。 5 日 15 时, 950 hPa 以下温度略降低(图 7e), 925 hPa 以下转为东北风, 850 hPa 附近为西南风, 风速为 9 m/s , $0 \sim 3 \text{ km}$ 和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变增大到 24.5 m/s 和 30.9 m/s ,

抬升凝结高度降低为 300 m 左右, $925 \sim 700 \text{ hPa}$ 比湿增大为 $4.9 \sim 6.5 \text{ g/kg}$, 相对湿度超过 80% , 鞍山站出现降水。 5 日 $20 \sim 23$ 时为最强降水时段, 1 h 降水量超过 5.0 mm (图 8b), 850 hPa 以下为东北风(图 7f), 风速最大为 13 m/s , $0 \sim 3 \text{ km}$ 和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变最大为 23.3 m/s 和 28.4 m/s , 850 hPa 以下比湿为 $5.2 \sim 6.5 \text{ g/kg}$, 700 hPa 比湿增强为 $5.4 \sim 5.9 \text{ g/kg}$, 抬升凝结高度为 200 m 左右, 4 h 降水量达到 37.6 mm 。

对比两次天气过程, 辽宁省中部湿层深厚, 抬升凝结高度低, 水汽条件充沛, 强的垂直风切变提供了动力条件。 强降水阶段, 过程一垂直风切变比过程二大, 但过程二 700 hPa 以下比湿比过程一大, 过程二的降水效率更高, 说明水汽条件对强

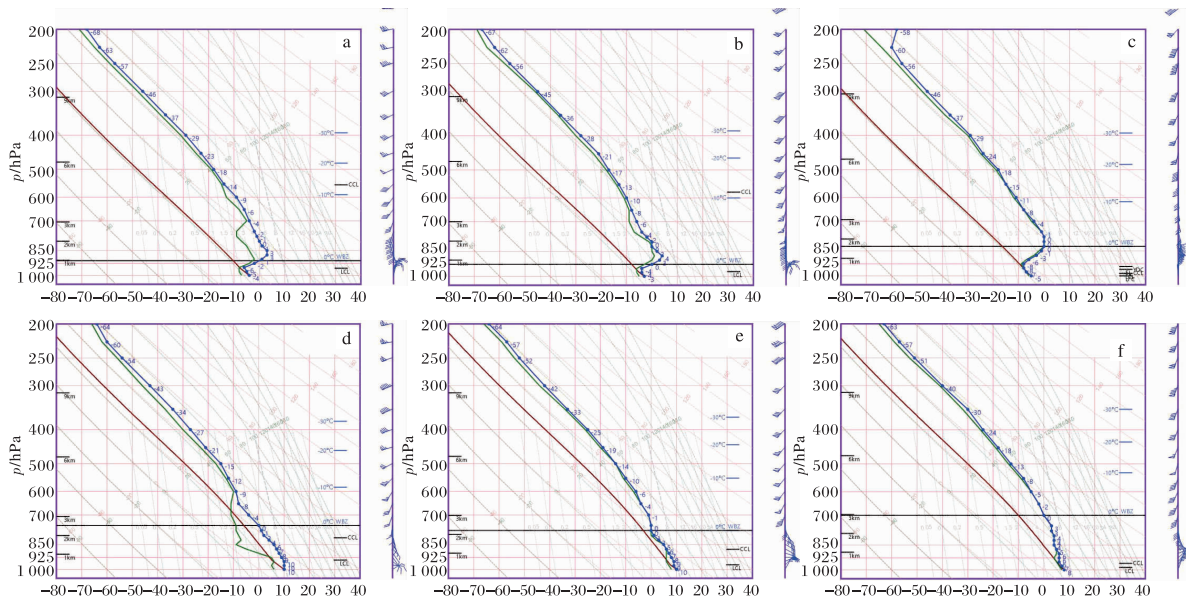


图7 辽宁两次强降雨雪过程中距离鞍山站最近的 ERA5 格点探空图(a 2021-11-07T08;b 2021-11-07T17;c 2021-11-08T01;d 2023-11-05T08;e 2023-11-05T15;f 2023-11-05T21)

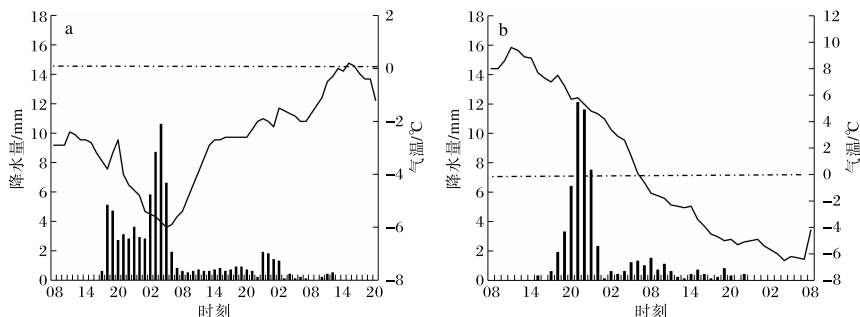


图8 辽宁两次强降雨雪过程中鞍山站逐时降水量(条形,单位为 mm)和气温(折线,单位为 $^\circ\text{C}$)变化(a 2021-11-07T08—09T20,b 2023-11-05T08—07T08;虚线为 0°C 线)

降水的作用更大。

5 雨雪相态成因对比

过程一中,鞍山站总降水量为 80.8 mm,总降雪量为 80.3 mm,相态转换出现在 7 日夜间,观测站不能自动识别冻雨,但观测到物体结冰可判断出现冻雨。过程二鞍山站总降水量 58.7 mm,总降雪量为 11.0 mm,观测站识别到雨转雨夹雪转雪时间出现在 6 日 03—06 时。通过距离鞍山站最近的 ERA5 格点数据对雨雪相态转换进行详细分析。

沿鞍山站 123.0°E 做温度、风随纬度变化的垂直剖面。过程一 6 日 08 时锋面随高度向北倾斜(图略),锋区内存在明显的等温层,1 000~850 hPa 0℃线在 43.0°N 几乎垂直。随着冷锋向南推进,锋区内出现逆温层且逐渐增宽增厚,锋面坡度不断减小,7 日 17 时鞍山站开始降水,此时鞍山站(41.0°N)800 hPa 以下存在明显逆温(图 9a),1 000~925 hPa 为 -4~0℃,以东北风为主,925~800 hPa 为 0~4℃,为西南风,偏南暖湿气流在冷垫上爬升。冷层(0℃以下)厚度为 75 hPa,暖层(0℃以上)厚度为 125 hPa,降水粒子经过暖层时为液态,而冷层浅薄不至于造成水滴再次冻结,此时 2 m 气温为 -3.5℃(图 8a),过冷却水滴降到 0℃以下会造成结冰,形成冻雨。7 日 22 时鞍山站 1 000~950 hPa 为 (-6~-2)℃,900~800 hPa 为 0~4℃,暖层厚度减弱为 100 hPa,冷层强度增强,厚度达 100 hPa,此时可能出现冰粒。

过程二中,5 日 08 时锋面随高度逐渐向北倾斜,锋区内 42.5°N~46.0°N 存在逆温层,5 日 15 时鞍山站开始降水,此时鞍山站(41.0°N)800 hPa 以下均为 0℃以上,降水相态为纯雨。随着冷空气南下,6 日 04—06 时 800 hPa 以下偏北风增强(图 9b),800 hPa 以下出现逆温层,975~900 hPa 为 -2~0℃,900~800 hPa 为 0~2℃,暖层比冷层厚 25 hPa,但温度接近 0℃,鞍山站出现雨夹雪。06 时后鞍山站相态转为雪,此时 800 hPa 以下转为西北风(图略),1 000~800 hPa 温度为 0℃以下,2 m 气温为 0℃以下(图 8b)。

两次过程虽然发生时间相近,但气候背景不同。过程一降水前 15 d 全省平均气温 8.8℃,接近常年同期。降水过程中 2 m 气温均小于 0℃,过程二降水前 15 d 全省平均气温 11.8℃,较常年同期偏高 3.3℃,6 日 06 时前 2 m 气温均高于 0℃。过程一低涡移动速度明显滞后于气旋,900 hPa 以上的偏南风与 900 hPa 以下的偏北风均较大,且风向差接近 180°,0~4℃逆温层持续时间长达 9 h;过程二低涡移动紧跟气旋,随着偏北风的加强,偏南风逐渐减弱,暖层厚度为 100 hPa,与过程一相同,但温度偏低 2℃,仅持续 3 h。过程一 1 000~800 hPa 温度转为 0℃以下的时间是 8 日 02 时,8 日 06 时 800 hPa 以下转为北风,从过程二转雪后垂直温度和风的特征判断过程一转为纯雪的时间应为 8 日 06 时。

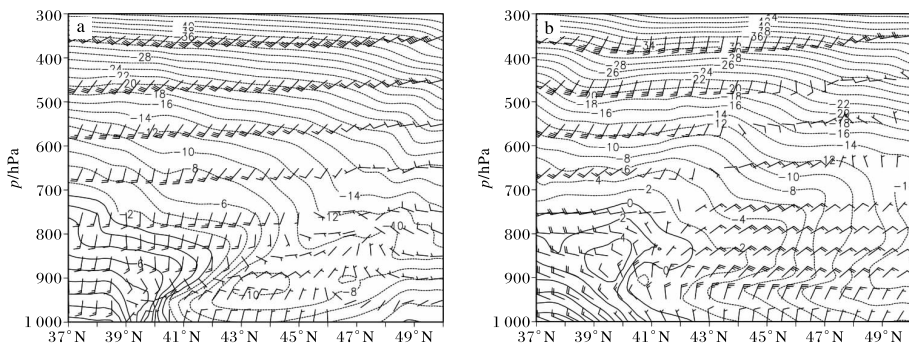


图9 辽宁两次强降雨雪过程中沿 123°E 温度(等值线,单位为℃)和风(风羽,单位为 m/s)的纬度-高度剖面图(a 2021-11-07T17;b 2023-11-06T05)

6 结论

(1)两次强降雨雪天气形成原因共同点是:东北冷涡东移加强、低空环流和地面气旋东移北上、海洋暖湿空气向北输送、辽宁省处在高低空急流叠置区。

(2)强降雨雪天气存在的差异原因是:过程一冷涡中心比过程二低 8 dagpm、冷中心温度低 4℃,200 hPa 高空急流与冷涡配合使过程二冷涡移动速度较快;过程一 925 hPa 环流和地面气旋向北

移动的分量大,过程二向东移动的分量大;过程一低空急流对辽宁省中部辐合和水汽输送有利,过程二对中部和北部有利。高低空急流叠置时间和位置与强降水阶段和降水量大值区对应。

(3)暖性高压的背景使过程二水汽输送和比湿优于过程一,虽然能量和动力条件弱,但降水效率较过程一更高,说明水汽条件对降水的作用更大;中层水汽增加有利于降水增强。

(4)两次天气过程均存在雨雪转换,但降水相态存在差异。过程一冷空气楔入低层,暖湿气流在冷垫上爬升,“冷-暖-冷”的垂直结构持续9 h,逆温层温度为 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$,出现雨、冻雨、雪等降水相态;过程二降水前平均气温较常年同期明显偏高,锋面随高度逐渐向北倾斜,逆温层温度为 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$,仅持续3 h,出现雨、雨夹雪和雪三种相态。

参考文献:

- [1] 孙建华,周玉淑,傅慎明,等. 近十年我国涡旋系统的研究进展[J]. 大气科学,2024,48(1):228-260.
- [2] 胡鹏宇,徐爽,耿世波,等. 一次冷涡背景下沈阳地区雷暴大风过程的特征分析[J]. 气象与环境学报,2023,39(5):9-18.
- [3] 周琳. 东北气候[M]. 北京:气象出版社,1991:122.
- [4] 杨雪艳,秦玉琳,张梦远,等. 基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究[J]. 大气科学学报,2018,41(4):475-482.
- [5] 胡开喜,陆日宇,王东海. 东北冷涡及其气候影响[J]. 大气科学,2011,35(1):179-191.
- [6] 郝立生,何丽烨,马宁. 东北冷涡气候特征及其对海河流域夏季降水的影响[J]. 气象学报,2023,81(4):559-568.
- [7] 曹玲,徐士琦,杨雪艳,等. 夏季东北冷涡气候特征及其对吉林省大豆生育期的影响[J]. 沙漠与绿洲气象,2022,16(5):135-143.
- [8] 黄丽君,崔晓鹏. 2000—2019年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布[J]. 大气科学,2023,47(6):1925-1938.
- [9] 蒋大凯,王江山,阎琦,等. 1961—2010年5—9月东北冷涡气候特征及其对辽宁气温的影响[J]. 气象与环境学报,2012,28(2):5-9.
- [10] 李瑞萍,王秀明,李树文,等. 一次冷涡背景下天气尺度系统对强对流环境场的影响[J]. 海洋气象学报,2024,44(1):76-87.
- [11] 侯淑梅,朱晓清,史茜,等. 冷涡背景下山东省“5·17”极端强对流天气环境条件分析[J]. 气象,2023,49(11):1328-1342.
- [12] 马洪燕,蒋松林,盛升旺,等. 一次东北冷涡的天气学分析及基于 HYSPLIT_4 模式的水汽通道特征[J]. 中低纬山地气象,2023,47(4):1-10.
- [13] 杨艺萍,张丽娟,王承伟. 1961—2017年黑龙江大—暴雪天气形势诊断及其变化特征[J]. 灾害学,2023,38(4):211-218.
- [14] 宿秋兰,郑丽娜. 2020年初山东一次雨转暴雪天气过程分析[J]. 陕西气象,2021(1):15-20.
- [15] 谷秀杰,邵宇翔,王友贺,等. 一次暴雪成因及相态演变分析[J]. 陕西气象,2018(4):12-17.
- [16] 孙欣,蔡芴宁,陈传雷,等. “070304”东北特大暴雪的分析[J]. 气象,2011,37(7):863-870.
- [17] 汪卫平,曹蔚,周毓,等. 2008年贵州省持续性雨淞过程气候成因分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(5):11-18.
- [18] 崔慧慧,李荣,郜彦娜,等. “7·20”郑州极端特大暴雨降水细节特征和成灾过程研究[J]. 灾害学,2023,38(2):114-120+149.
- [19] 胡燕平,单铁良,武威. 河南省两次不同季节暴雪过程的对比分析[J]. 陕西气象,2019(3):18-24.
- [20] 王宁,云天,布和朝鲁,等. 中国东北地区两场罕见冻雨过程的对比分析[J]. 大气科学,2023,47(4):1267-1282.
- [21] 许金萍,刘琨,李云. 浙江一次强降雨雪过程大气环流特征及成因分析[J]. 干旱气象,2022,40(5):857-867.
- [22] 王璐璐,钱俊龙,王丽芳,等. 苏南两次回流天气过程形势特征和降水相态分析[J]. 气象科学,2023,43(6):807-819.
- [23] 郑丽娜,李恬,孙骞,等. 2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因[J]. 海洋气象学报,2022,42(3):48-56.
- [24] 徐红,房一禾,陈军庆,等. 辽宁地区雨雪转换天气的判别和分析[J]. 气象科学,2023,43(2):262-269.
- [25] 高松影,李慧琳,宋丽丽,等. 丹东冬季降水相态判据研究[J]. 气象与环境学报,2014,30(2):38-44.
- [26] 阎琦,崔锦,杨青. 2018年辽宁两次雨转暴雪过程对比分析[J]. 干旱气象,2019,37(6):944-953.