

蔡雪薇, 谌芸, 沈新勇, 等, 2019. 冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J]. 气象, 45(5): 621-631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2019. Cause analysis of different types of severe convective weather under cold vortex background[J]. Meteor Mon, 45(5): 621-631 (in Chinese).

冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析^{*}

蔡雪薇^{1,2} 谌芸^{1,2} 沈新勇² 郑永光¹ 陶亦为¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

提 要: 利用常规气象观测资料、自动站资料、卫星、雷达和 NCEP 再分析资料, 针对 2015 年 8 月 22 日冷涡背景下华北东北部和黄淮地区同时出现的不同类型强对流天气, 对比分析引发不同天气的两种中尺度对流系统的演变过程及冷涡背景下不同强对流天气的成因。具体结论如下: (1) 同一冷涡背景下, 华北东北部位于冷涡中心外围西南象限和地面冷高压前沿, 触发的分散性多单体风暴位于冷涡外围的涡旋云系中, 引发以短时强降水为主的强对流天气; 黄淮地区位于冷涡后部和地面冷锋前, 槽后晴空区的多个对流单体, 合并后形成人字形飑线系统引发短时强降水、冰雹和雷暴大风天气; (2) 环境热力和水汽的差异为形成不同的强对流天气提供了前提条件: 华北东北部受高层暖脊影响, 地面高压后部的偏东气流带来水汽输送, 整层暖湿的条件利于产生强降水; 黄淮地区高层有补充干冷空气, 利于热力不稳定条件发展, 但黄淮地区低层水汽不足, 风雹天气在较干环境场中不易被触发; (3) 引发不同强对流天气的对流触发机制不同, 两处的初始对流均受同一地面辐合线影响, 但华北东北部在地形抬升与辐合线共同作用下不断新生单体; 黄淮地区的初始局地热对流形成后, 其前沿的辐散流出与环境风形成新的辐合, 使原辐合线断裂和转向; (4) 出现不同强对流天气时垂直风切变不同, 黄淮风雹区的中层垂直风切变更显著, 有利于形成持续性的强风暴; 强对流天气发生时, 华北东北部中低层风场的演变与天气尺度系统的变化有关, 黄淮地区中低层风的垂直分布与中尺度对流系统的发生发展有关。

关键词: 冷涡, 强对流, 飑线

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.003

Cause Analysis of Different Types of Severe Convective Weather Under Cold Vortex Background

CAI Xuewei^{1,2} CHEN Yun^{1,2} SHEN Xinyong² ZHENG Yongguang¹ TAO Yiwei¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Using conventional meteorological data, automatic weather station data, satellite data, radar data and NCEP reanalysis data, and focusing on the different types of severe convective weather that occurred in the northeast of North China and Huanghuai Region in the background of cold vortex on 22 August 2015, the evolution process of two mesoscale convective systems caused by different weathers

^{*} 国家自然科学基金项目(41175048, 41530427, 41375051), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB453201)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306076)共同资助

2018 年 1 月 23 日收稿; 2018 年 9 月 30 日收修定稿

第一作者: 蔡雪薇, 主要从事强对流预报研究. Email: caixw@cma.gov.cn

通信作者: 谌芸, 主要从事中尺度天气研究. Email: chenyun@cma.gov.cn

and reasons of different severe convective weather with cold vortex are analyzed in this paper. The results show that: (1) With same cold vortex, Northeast of North China is located in southwest quadrant of cold vortex and in front of ground cold high pressure. Dispersive multi-cell storm lies in vortex cloud at the periphery of cold vortex, leading to severe convective weather dominated by short-term heavy rainfall. Huanghuai Region is in the rear of cold vortex and ahead of cold front on ground. Multiple convective cells form in clear sky behind the trough, forming a herringbone squall line which leads to heavy rainfall, thunderstorm and hail. (2) The differences of environmental heat and water vapor provide a condition for the formation of different severe convective weathers. The northeast of North China is affected by high-level warm ridge, and eastward airflow at the back of ground high pressure brings water vapor. The whole layer in warm and humid conditions is conducive to generating intense precipitation. The upper air over Huanghuai Region gets supplementary dry and cold air, which benefits the development of thermal instability. However, the low-level water vapor in the region is not enough, so strong wind and hail are not easily triggered in the dry environment. (3) The convection triggering mechanisms for different severe convections are different. Both initial convections are triggered along the same ground convergence line, but with the terrain lifting, new cells are continuously generated in northeast of North China. After initial local geo-thermal convection in Huanghuai Region is formed, the divergent outflow at leading edge forms a new convergence with ambient wind, causing the original convergence line to break and turn. (4) When there are different severe convections, the vertical wind shear in the mid level of severe convection over Huanghuai is significant, which is helpful for the formation of a persistent severe storm. When severe convective weather occurs, the evolution of middle and lower winds in northeast of North China is related to the change of synoptic scale systems. The vertical distribution of middle and lower winds in Huanghuai Region is related to the occurrence and development of mesoscale convective system.

Key words: cold vortex, severe convection, squall line

引言

东北冷涡是我国重要的天气尺度系统之一,能够为中尺度对流系统的发展提供有利的天气背景和物理条件(朱乾根等,2007),冷涡的形成、发展、维持和消亡期均有可能伴随强对流天气(孙力等,1994;白人海和孙人罡,1997;白人海和谢安,1998;张立祥和李泽椿,2009)。易笑园等(2010)发现,冷涡中心与研究代表点的距离与对流性天气的强弱有关,距离冷涡不同位置可发生不同类型的强对流天气。统计显示华北地区降雹、飏线以及中尺度对流系统在冷涡的不同发展阶段均可形成,形成的位置也不相同(张仙等,2013;杨珊珊等,2016;王磊等,2013)。前期已有很多关于冷涡背景下飏线发生的环境条件的分析研究(丁一汇等,1982;陈涛等,2013;钟水新等,2013),廖晓农等(2009)指出在蒙古低涡低槽、东北冷涡横槽以及西来槽背景下,华北地区产生雷暴大风并伴有冰雹的概率较高,罗玲等(2011)和郑媛

媛等(2011;2014)针对东北冷涡对江南和江淮地区强对流的影响也分别进行系统分析,将强对流天气分为冷涡槽前型和槽后型。

当出现短时强降水(小时雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、冰雹和雷暴大风(风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)等强对流天气时均具有不同的环境场和中小尺度特征;由于中尺度数值模式对冷涡过境减弱后的干环境场中触发的强对流天气往往漏报,因此,依靠大尺度环境场的潜势预报信息研究冷涡对不同类型强对流天气的潜势预报影响,仍对目前强对流分类预报业务工作具有重要意义。此前大部分研究针对成熟冷涡系统,在不同个例中分析其对中尺度系统的影响(王华等,2007;李云川等,2008),加深了我们对相关机理的认识,然而缺乏对于同一冷涡背景下不同位置产生不同类型强对流个例的对比分析。

由于热力和水汽分布的气候特征不同,华北北部易出现风雹天气而黄淮地区多发生短时强降水天气,本文选取一次与之不同的个例,2015年8月22日在冷涡影响下,华北东北部出现分散性短时强降

水为主的强对流天气;黄淮地区出现呈线状分布的短时强降水、冰雹和雷暴大风等强对流天气。当日值班预报员漏报了华北强降水,低估了黄淮风雹的强度,因此,本文针对易被忽视的冷涡后部强对流预报问题,着眼于研究产生不同类型强对流天气的两种中尺度对流系统形成发展的演变过程,并初步分析冷涡背景下形成不同强对流天气的原因。

1 强对流天气特点

如图1所示,2015年8月22日11—23时,华北和黄淮地区出现大范围闪电活动并均以负闪为主,华北东北部的降水区出现闪电约4970次,正闪百分比仅为6.5%左右;分散性短时强降水为主的强对流天气的主要影响时段为14—18时,最大小时雨强出现在河北秦皇岛,达 $47\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。尽管出现短时强降水的总站数小于黄淮地区,但小时雨强超过 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的比例高于黄淮地区。

黄淮风雹区的闪电次数约为5861次,密度较华北东北部更大,其中正闪较北部对流明显增多,正闪比例超过30%,这与冰雹和雷暴大风天气的出现有关(郅秀书等,2014)。黄淮地区午后到傍晚出现多站次风雹天气(图1b),其中河南淇县出现 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (9级)雷暴大风,山东和河南局地出现直径超过10 mm冰雹,累积降雨量普遍达到大雨量级;自动站监测从午后到傍晚,短时强降水天气逐渐增强,在

18—20时达顶峰,此时小时雨强在 $20\sim 50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大小时雨强出现在山东梁山,达 $67\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,说明强的风雹天气先于强的短时强降水发生。

2 中尺度对流系统特征

2.1 不同类型中尺度对流云的发展演变

日本葵花8号静止卫星的红外云图显示(图2),东北地区涡旋云系特征明显,中心位于吉林东北部;8月22日午后,河北东北部的分散对流云团形成于冷涡中心外围的涡旋云系中,云团随着冷涡旋转并缓慢向南移动,于16时前后合并,其云顶亮温始终低于 -52°C ,强盛的云顶一直发展维持至20时;黄淮地区的对流云团形成于冷涡后部的晴空区,山东的两处对流云团在14时左右生成,发展和移动速度较快,持续时间短;其中山东西北部的云团呈长椭圆形,具有冷涡背景下出现区域性雷暴大风的云型特征(方翀等,2014);河南北部的分散对流云团生成后,与山东西北部的云团在18:30左右合并,云团内低云顶亮温区呈东北—西南向的线状,其北侧高层云砧随冷涡系统的移动向东北方向收缩。

产生不同类型强对流天气的中尺度对流系统分别为多单体风暴和飑线,华北黄淮地区雷达回波演变显示(图3),河北东北部的分散性短时强降水天气,由分散性的对流单体引发,并形成多单体风暴,

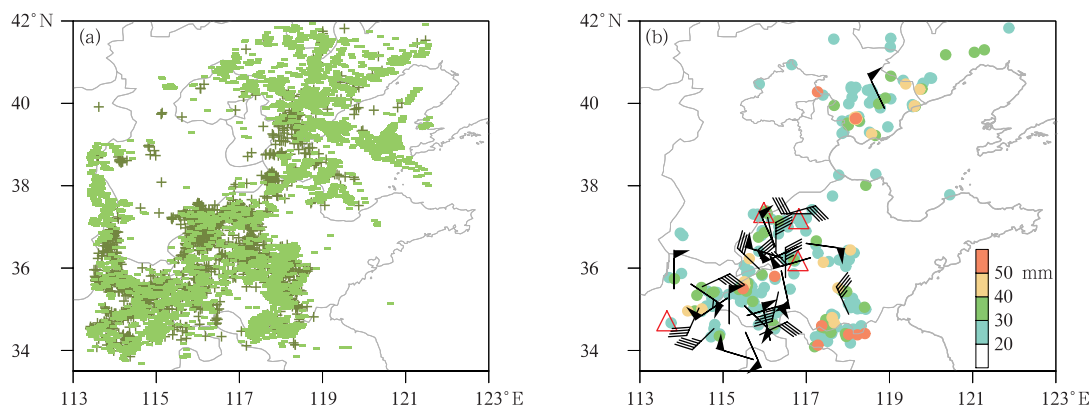


图1 2015年8月22日11—23时闪电观测实况(a,黄绿色:负闪,深绿色:正闪)和短时强降水、雷暴大风、冰雹(b,彩色圆点:小时降水量,红色三角:冰雹,黑色风向杆: $\geq 17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风)

Fig. 1 Lightning observation in East China during 11:00–23:00 BT 22 August 2015

(a, yellow green: negative flash, dark green: positive flash), hourly rainfall, thunderstorm, hail from 08:00 BT 22 to 08:00 BT August 23 (b, colored dot: hourly precipitation, red triangle: hail, black wind bar: $\geq 17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

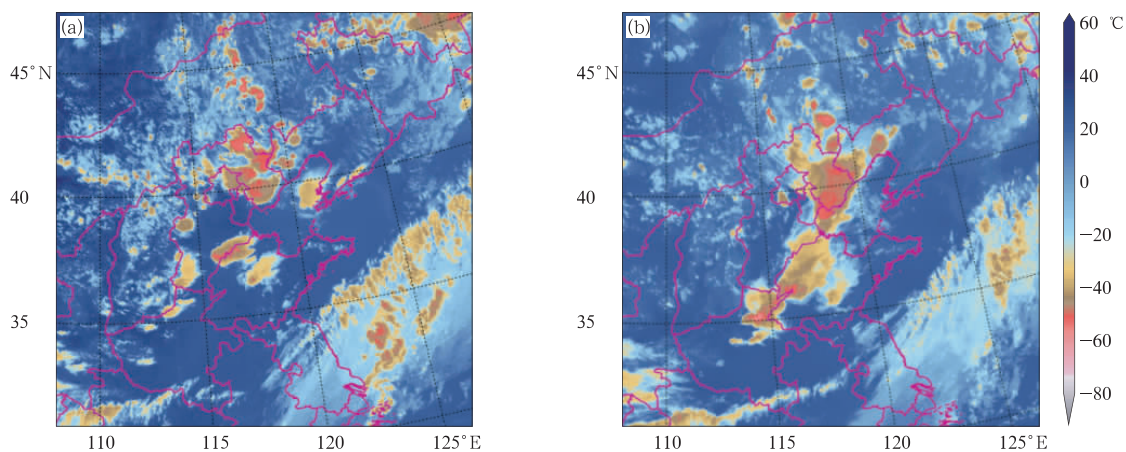


图 2 2015 年 8 月 22 日 15 时(a)和 18:30(b)日本葵花 8 号红外云图

Fig. 2 HMS8 IR cloud images from Japan at 15:00 BT (a), 18:30 BT (b) 22 August 2015

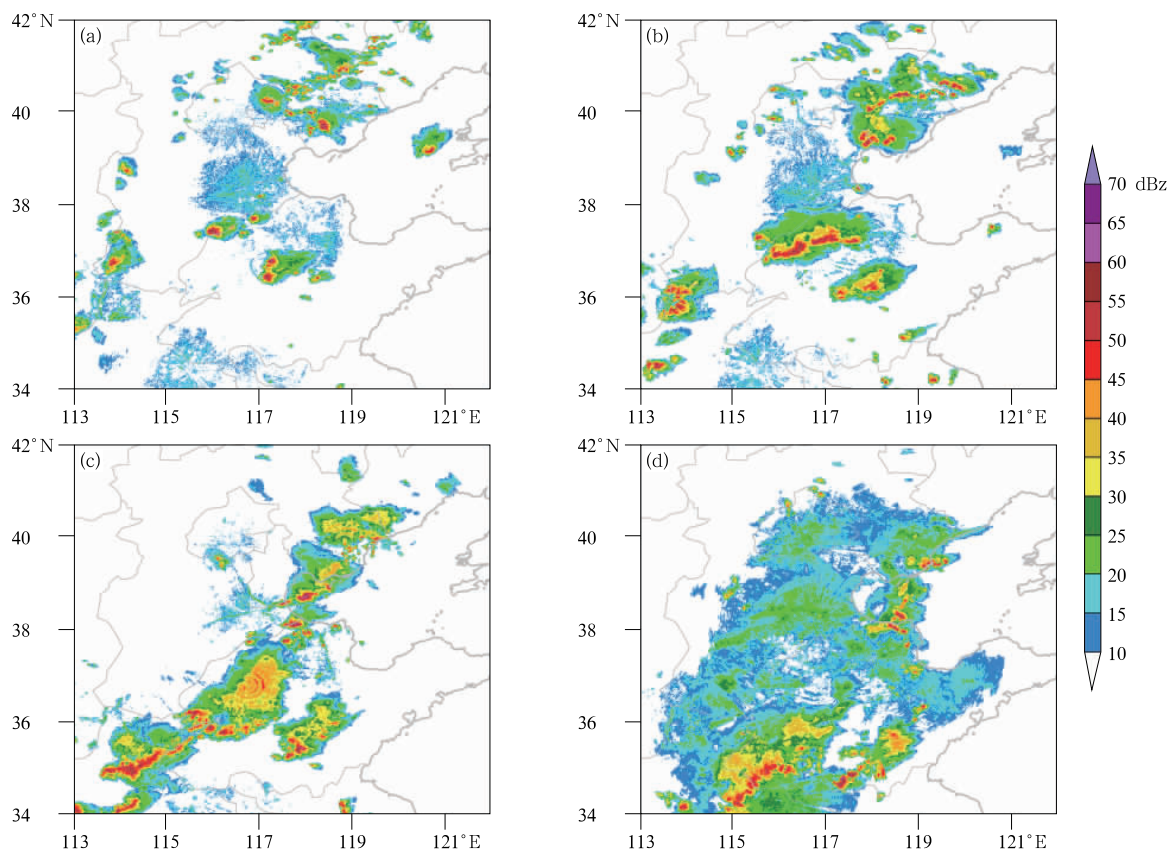


图 3 2015 年 8 月 22 日 14 时(a)、16 时(b)、18:30(c)和 20:18(d)雷达组合反射率拼图

Fig. 3 Radar reflectivity mosaic images in North China at 14:00 BT (a), 16:00 BT (b), 18:30 BT (c) and 20:18 BT (d) 22 August 2015

缓慢地向南移动。黄淮地区的多个对流单体缓慢移动合并形成呈线状排列的对流单体族,长与宽之比大于 5 : 1,符合对炮线的一般定义(俞小鼎等, 2006)。下文将通过对单站雷达资料分析,了解两处对流生成发展的过程及不同类型强对流天气的雷达

特征。

2.2 北部多单体风暴触发与维持

8 月 22 日午后,河北东北部的分散性对流单体触发并缓慢向南移动,15 时秦皇岛雷达 0.5°仰角基

本反射率(图4)显示唐山附近的分散性对流单体强回波中心最大值超过 55 dBz。河北东北部的对流发展旺盛,回波顶近 12 km,强质心位于 6 km 左右(图略),并具有超过 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的垂直液态水含量,具有类雹暴结构的短时强降水回波特征(孙继松等,2014),由于对流尺度较小,实况显示以分散的短时强降水天气为主。

2.3 南部对流触发、发展与合并

对流单体首先在山东北部触发,并逐渐形成小尺度线状系统。15:58(图5a,5c,5d),山东济南雷达 0.5° 仰角基本反射率显示回波中心超过 55 dBz,在冰雹区域附近有明显负径向速度,最大垂直液态

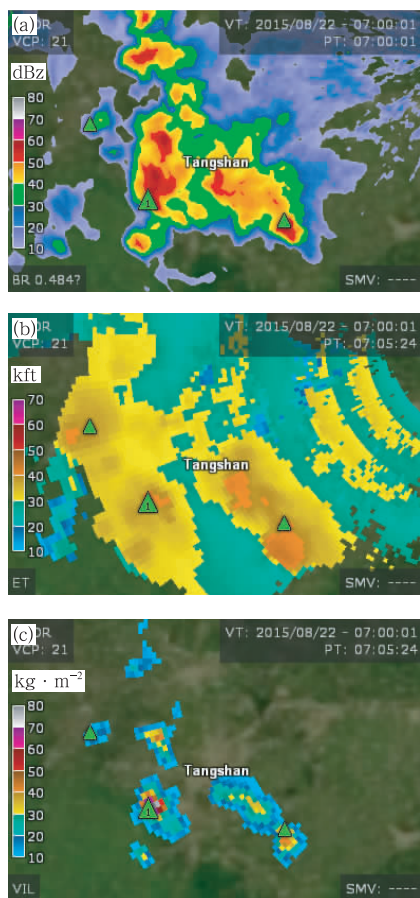


图4 2015年8月22日15时秦皇岛雷达 0.5° 仰角基本反射率(a)、回波顶高(b, 1 kft=0.3 km)和垂直液态水含量(c)

Fig. 4 Reflectivity factor at 0.5° elevation (a), echo top height (b, 1 kft=0.3 km) and VIL (c) of Qinhuangdao Radar at 15:00 BT 22 August 2015

水含量也达到 $47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,在出现冰雹地区,沿对流移动方向的反射率和径向速度剖面显示,回波顶高达12 km,3 km左右的低回波质心与出现风雹时伴随短时强降水有关,最强回波超过 60 dBz,质心附近径向速度垂直分布显示出流与入流的垂直分量形成垂直环流,有利于冰雹的产生,15:57 山东北部出现冰雹天气。此外,实况还出现雷暴大风天气,与主体回波前沿的阵风锋对应。

16 时左右,河南北部新生分散对流单体,并在缓慢东移中合并,形态趋于线状,16:44 濮阳雷达显示(图略)北侧安阳回波向东南方向移动,南侧郑州回波向东北方向移动;两处回波均存在较高的质心和回波顶,在其合并发展过程中,安阳回波前沿出现阵风锋(图略),与实况雷暴大风天气相符。

18:34 山东西部的东西走向回波与河南北部的东北—西南走向回波合并成人字形飑线(图5b),其中河南回波发展较强盛,山东回波趋于减弱,与2009年“6·3”飑线的人字形飑线类似,但强度明显偏弱(王秀明等,2012)。19:35 合并后,基本反射率减弱,对流强度减弱,但仍然伴随短时强降水天气。

3 不同类型强对流天气的成因分析

东北冷涡为不同类型强对流天气的形成提供了不同的大尺度环境场,下文将具体分析大尺度背景场提供的水汽、热力、动力抬升和垂直风切变等中尺度环境条件方面的差异,探索不同类型强对流天气的形成原因。

3.1 冷涡发展演变和天气形势

8月20—21日为冷涡发展至成熟阶段,21日08时,蒙古冷涡东移形成东北冷涡,500 hPa 低压中心降低至 566 dagpm,冷中心为 -14°C ;8月22日,强对流天气过程发生在冷涡由成熟期转为消亡期阶段,冷涡强度略微减弱但仍有闭合等值线,中心明显向东北方向收缩;此时华北和黄淮地区位于冷涡的西南象限,强对流天气多发(杨珊珊等,2016)。

22日08时(图6a),我国中高纬 500 hPa 高度场为两槽一脊,在东南沿海台风的影响下,副热带高压东退,东北冷涡中心位于吉林中部,低涡及其高空槽影响我国中东部大部分地区。华北地区处于高空冷涡中心外围,整层无明显冷空气且水汽充沛;黄淮地区受高空槽后西北气流控制,具有前倾槽结构,中

层有补充干冷空气,低层水汽条件弱。

强对流天气发生前,两区域受同一低层切变线和地面辐合线影响,华北地区位于地面冷高压前沿,地面辐合线在由于天气尺度系统形成的温度和湿度

梯度区内生成,沿辐合线生成对流并产生强降水天气;黄淮地区处于冷高压前部的暖低压带中,地面辐合线沿密集的等露点线分布,并最先在湿舌顶端形成对流系统和冷池,出现风雹天气(图 6b)。

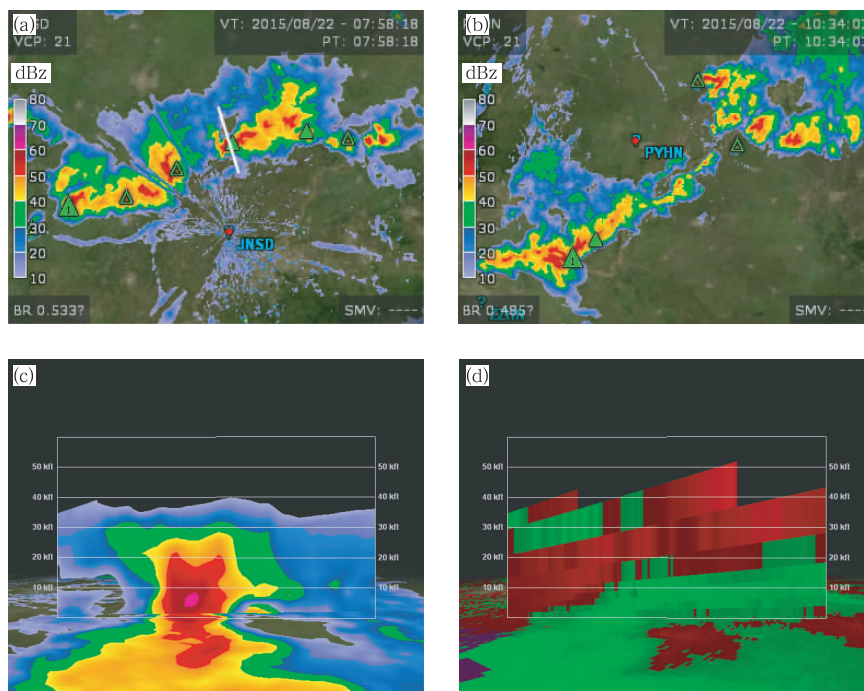


图 5 2015 年 8 月 22 日 15:58 济南雷达 0.5°仰角基本反射率(a)、沿图 5a 白色实线自南向北的基本反射率垂直剖面(c,单位:dBz)、径向速度垂直剖面(d,单位: $\text{kts} \cdot \text{h}^{-1}$, $1 \text{ kts} \cdot \text{h}^{-1} = 0.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)和 18:34 濮阳雷达 0.5°仰角基本反射率(b)

Fig. 5 Reflectivity factor at 0.5° elevation (a), reflectivity (c, unit: dBz) and radial velocity (d, unit: $\text{kts} \cdot \text{h}^{-1}$, $1 \text{ kts} \cdot \text{h}^{-1} = 0.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) profiles along the white solid line in Fig. 5a from south to north of Jinan Radar at 15:58 BT and reflectivity factor at 0.5° elevation (b) of Puyang Radar at 18:34 BT 22 August 2015

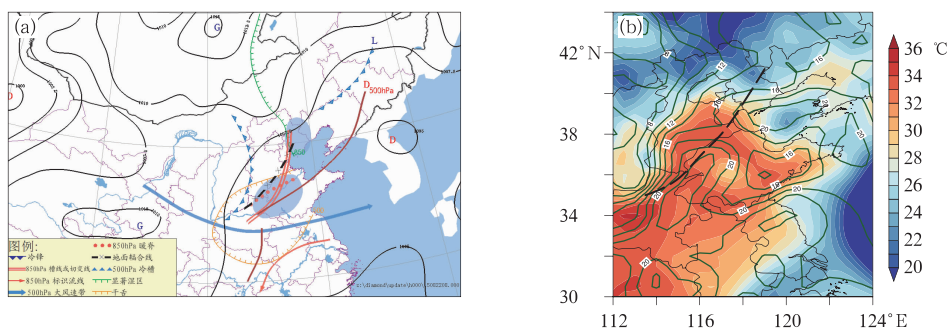


图 6 2015 年 8 月 22 日 08 时大尺度环境背景场(a,阴影:强对流发生区域)和 14 时(b)地面温度(阴影)、露点(绿色实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和地面辐合线(黑色虚线)

Fig. 6 Large-scale environmental background at 08:00 BT (a, shaded area; severe convective weather area) and temperature (shaded area), dew point (green solid line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and convergence line (black dashed line) on surface at 14:00 BT (b) 22 August 2015

3.2 中尺度环境条件对比分析

3.2.1 水汽条件

由于两处对流位于冷涡的不同位置,高低层的水汽条件也不同。如图7,华北东北部高低层相对湿度均较大,850 hPa比湿达到 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,整层暖湿的维持使对流系统在湿环境场中触发产生降水;黄淮地区处于中纬度西风急流附近,干冷空气补充使500 hPa相对湿度小于40%,对流发生前08时,低层850 hPa水汽条件不足,相对湿度不足70%,比湿仅为 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,山东还位于地面干区内,对流单体在干环境场中触发并形成干下击暴流。22日傍晚,由于冷涡强度和位置的变化,低层偏东气流和西南气流加强增加了水汽输送,使山东和河南低层850 hPa相对湿度增至70%以上,比湿增至 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与高层干空气形成上干下湿的垂直结构,有利于出现风雹天气(孙继松等,2014)。此外,低层水汽条件的改善也加强了短时强降水的强度和范围。因此,尽管两处对流沿同一切变线生成,但低层不同的水汽条件使强对流触发环境不同,高层水汽条件的差异导致强对流天气类型不同。

3.2.2 热力不稳定条件

22日08时对流发生前(图7a),华北东北部在500 hPa上处于冷中心与后部补充冷空气之间的暖脊中,尽管受西北气流控制但无明显冷平流,区别于一般冷涡后部西北气流带来冷平流的背景场,850与500 hPa的温度差为 $26\sim 28^{\circ}\text{C}$,满足出现短时强降水天气时的热力不稳定条件;黄淮地区高层有补充干冷空气侵入,形成温度和湿度的梯度区,与低层850 hPa暖脊配合,温度差超过 30°C ,垂直方向热力不稳定条件好,有利于风雹天气出现。22日20时(图7b),冷涡中心强度略减弱并向东北方向收缩,北部降水区的温度和湿度分布也随之缓慢移动,黄淮和江淮地区热力环境条件均无明显变化。

探空曲线也验证了两处的高低层的热力和水汽分布差异(图8)。对流触发前,22日08时,河北乐亭探空显示中层以下整层相对较湿,对流有效位能超过 $1800\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,K指数为 39°C ,有利于出现短时强降水为主的强对流天气(魏东等,2011),此外,一定的高低层湿度差和 0°C 层与 -20°C 层的高度也具有出现局地风雹天气的条件。山东章丘探空显示水汽条件偏弱;对流有效位能不足 $800\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,较

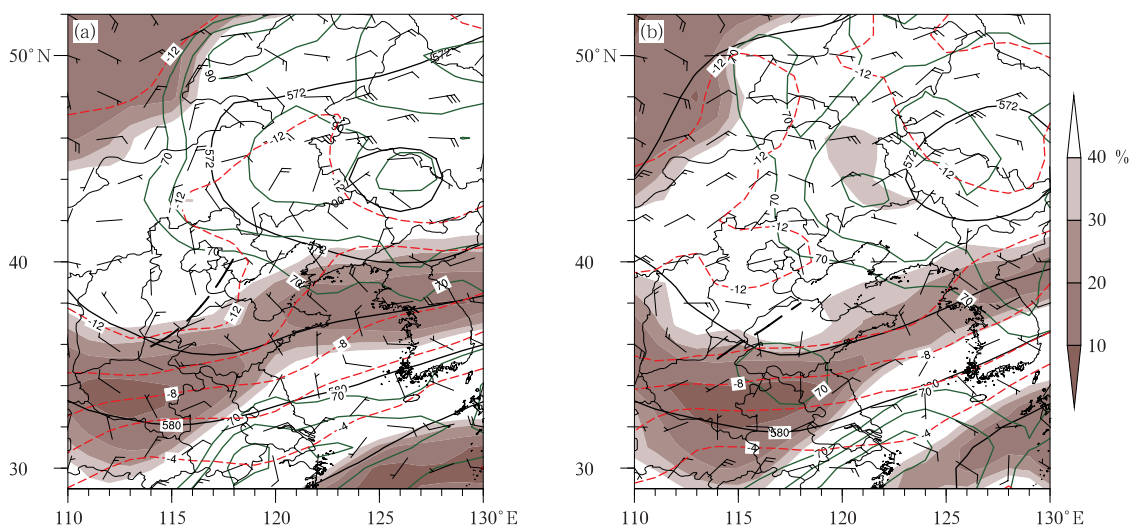


图7 2015年8月22日08时(a)和20时(b)500和850 hPa NCEP再分析资料形势场
(黑实线: 500 hPa等高线,单位:dagpm,红虚线: 500 hPa等温线,单位: $^{\circ}\text{C}$,黑色虚线: 850 hPa切变线,
绿色实线: 850 hPa相对湿度,单位:%,阴影: 500 hPa相对湿度 $\leq 40\%$)

Fig. 7 The distribution of 500 hPa and 850 hPa wind field simulated
by NCEP_GFS at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 22 August 2015

(black solid lines: potential height at 500 hPa, unit: dagpm; red dashed lines: temperature at 500 hPa, unit: $^{\circ}\text{C}$;
black dashed lines: shear line at 850 hPa; green solid lines: relative humidity at 850 hPa, unit: %;
shaded areas: relative humidity $\leq 40\%$ at 500 hPa)

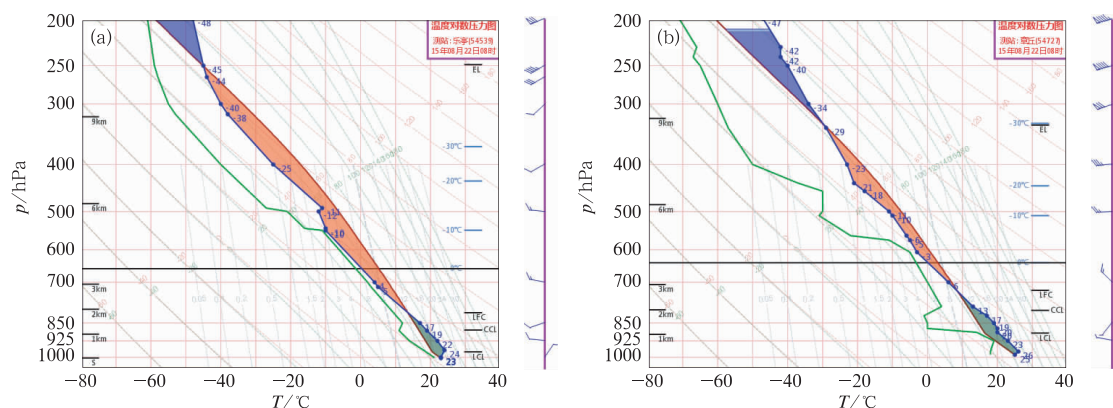


图 8 2015 年 8 月 22 日 08 时河北乐亭(北部回波)(a)、山东章丘(南部对流山东段)(b)探空曲线

Fig. 8 Sounding curves of Laoting (northern convection) (a), Zhangqiu (southern convection in Shandong) (b) at 08:00 BT 22 August 2015

北部偏弱,对流发展的高度更低;边界层出现逆温层,对近地面水汽和热力条件均有所改善,并有明显的不稳定能量积累,雷蕾等(2011)研究表明逆温层有利于冰雹天气出现;总之,对流发生前风雹区尽管有较强的高低层温差,但受水汽条件的限制,自由对流高度和抬升凝结高度分别为 700 和 800 hPa 左右,均高于北部对流,热力和水汽条件的不同显示出触发条件的差异,引发黄淮风雹天气的对流单体被触发的难度更大,而一旦被触发,支持对流发展增强的环境场条件优于华北东北部。

3.2.3 动力抬升和触发机制

由于冷涡中心减弱并向东北方向移动,低层偏东气流明显加强;华北东北部的低层风场由西北风转为东北风控制,黄淮的切变线转为东北—西南走向。

如图 9,强对流天气发生前,两区域位于同一地面辐合线上,但随着系统的发展,地面辐合线断裂,北段辐合线仍然呈南北向缓慢向东移动;南段辐合线呈东北—西南走向,并在移动中转为东西向。华北东北部的对流由偏北风和偏东风在地形作用下辐合形成;黄淮的对流由西北风和西南风作用下辐合形成,发展过程中其前沿的辐散出流与环境风形成新的辐合,使原辐合线断裂,并在南压过程中转变为东西向的地面辐合线。

3.2.4 垂直风切变

华北和黄淮地区的低层切变线均位于中层高空槽后,具有前倾槽的垂直结构,但是由于环境风场的速度和大小不同,产生的垂直风切变也不同(张建军等,2016);根据图 8 探空资料计算可知,22 日 08

时,华北东北部和黄淮地区的 0~6 km 环境风垂直切变分别约为 6 和 11.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,略低于强雷暴大风环境参数统计的平均值 14.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (费海燕等,2016),但也可作为区分一般雷暴天气和强雷暴大风天气的环境参数依据(杨新林等,2017),说明垂直风切变的差异与对流天气的类型和强度有关。由于探空资料时间分辨率较粗,因此可利用风廓线雷达数据分析出现不同类型强对流天气的高低层风场演变和垂直风切变的差异(图 10)。

天津宝坻的风廓线雷达显示(图 10a),在降水发生发展时期整层风场无明显变化,3 km 以上为西北风控制,以下为东北风,风速均小于 6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;3 km 附近风随高度逆转,有弱冷平流。16:30,强降水减弱,中高层西北风转为偏北气流并向低层扩展,低层 0~3 km 的风速和风向均无明显变化,近地面偏东风加强至 12 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。高低层风场的变化是由天气系统的变化导致,由于高层风速较小,因此 0~6 km 的垂直风切变较小。

山东济南的垂直风场变化较明显(图 10b)。强对流天气发生前,2 km 以上为西北偏北风,0.5~2 km 的低层为弱西南风,近地面边界层则是偏东风。14 时后对流系统发生发展,出现风雹天气,低层风场转为东南风,中高层 6 km 左右的西北风风速加大至 10 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,高空急流的增强使 0~6 km 最大垂直风切变超过 12.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了高空辐散,有利于对流系统的发展维持。18 时前后,对流系统主体移出济南,中高层西北风减弱,低层 1 km 以下转为强烈的偏西风,中低层风场的变化与对流系统自身发展有关。强的垂直风切变通过改变垂直

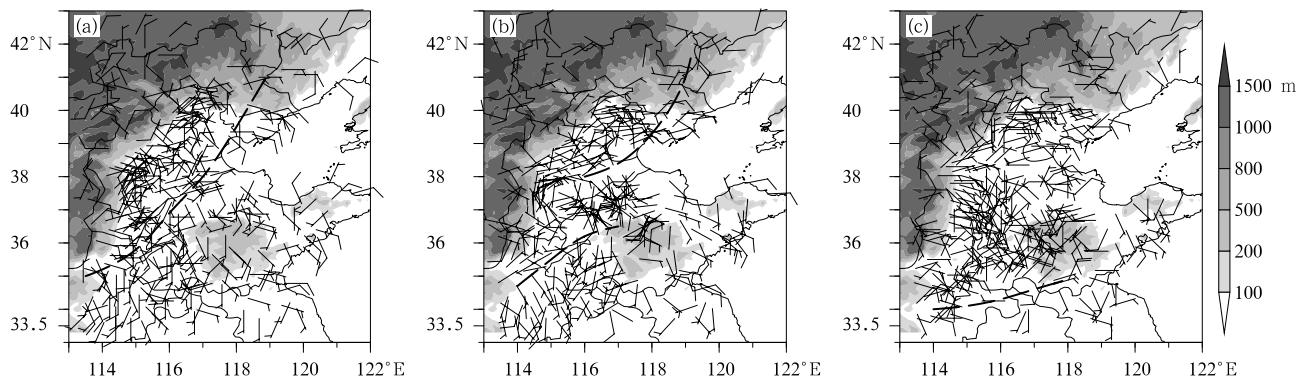


图 9 2015 年 8 月 22 日 14 时(a)、17 时(b)和 20 时(c)自动站风场、
地面辐合线(黑色虚线)和地形高度(阴影)

Fig. 9 The wind of automatic weather station, convergence line (black dashed lines)
and terrain height (shaded area) at 14:00 BT (a), 17:00 BT (b)
and 20:00 BT (c) 22 August 2015

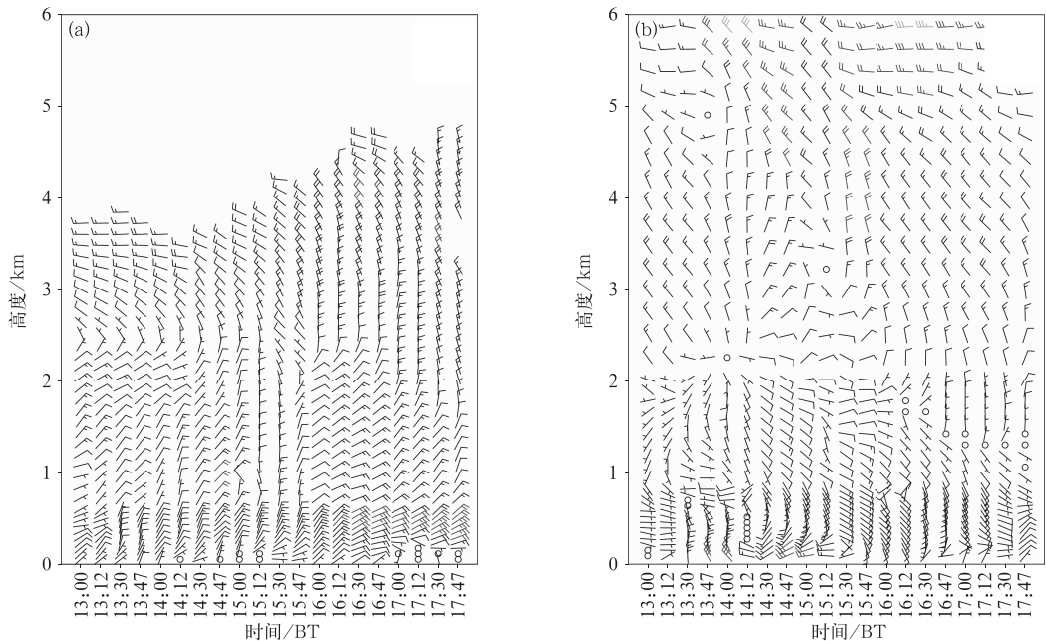


图 10 2015 年 8 月 22 日 13—18 时天津(a)和济南(b)风廓线演变

Fig. 10 Wind profile evolution in Tianjin (a) and Jinan (b) from 13:00 BT
to 18:00 BT 22 August 2015

运动和高低层辐散来使一般雷暴发展为持续性的强风暴。

4 结论与讨论

根据上述对冷涡背景下不同中尺度对流系统的对比分析得到以下结论:

(1) 东北冷涡处于成熟至消亡期,华北东北部

位于高空冷涡中心外围西南象限和地面冷高压前沿,分散性多单体风暴在天气尺度的温湿梯度区生成后缓慢向南移动,引发以分散性短时强降水为主的强对流天气;黄淮地区位于高空冷槽后部和地面冷锋前的暖低压带,前倾槽结构明显,对流在地面暖脊和湿舌区生成,孤立分散的对流单体形成于晴空区,移速较快,以中尺度系统发生发展的机制合并后形成人字形飑线系统,产生短时强降水、冰雹和雷暴

大风等多种强对流天气。

(2) 河北东北部受低涡冷中心与后部补充冷空气之间的暖脊影响,整层相对暖湿,降水沿近地面辐合线在湿环境场中发生;山东北部的高层补充干冷空气配合低层暖脊加强垂直热力不稳定,但水汽条件较北部偏弱,自由对流高度较高,风雹天气在较干环境中发生,强对流的触发难度较大。

(3) 两类对流均沿同一地面辐合线生成,北段南北向的辐合线在地形和锋面作用下形成;南段辐合线呈东北—西南走向,沿辐合线上生成热对流,其前沿的辐散出流与环境风形成新的辐合,使原辐合线断裂。

(4) 强天气发生前,华北东北部的中低层垂直风切变明显小于黄淮,说明风雹地区的动力不稳定条件更好;发展时期,华北东北部的中低层风场变化不大,其演变与天气尺度系统的变化有关,黄淮的中低层风场随时间的变化快,与对流系统的发生发展有关;强垂直风切变使一般雷暴发展为持续性强风暴雨。

本文对引发两类强对流天气的中尺度对流系统触发、发展演变过程及冷涡背景下形成不同类型强对流天气的原因有一定了解,对于中尺度系统的内部结构演变以及冷涡对不同中尺度对流系统移动传播等过程的影响也有初步研究(蔡雪薇等,2018),下一步将继续利用数值模式的模拟结果详细分析冷涡对中尺度对流系统发展的作用。

参考文献

- 白人海,孙永罡,1997. 东北冷涡中尺度天气的背景分析[J]. 黑龙江气象, (3): 6-12. Bai R H, Sun Y G, 1997. The background and analysis study of mesoscale weather of the cold vortex in Northeast China[J]. Heilongjiang Meteor, (3): 6-12(in Chinese).
- 白人海,谢安,1998. 东北冷涡过程中的飑线分析[J]. 气象, 24(4): 37-40. Bai R H, Xie A, 1998. Analysis of squall lines occurring in cold vortices over Northeast China[J]. Meteor Mon, 24(4): 37-40(in Chinese).
- 蔡雪薇,谌芸,沈新勇,等,2018. 冷涡对两类对流系统结构演变作用的个例模拟对比分析[J]. 气象, 44(6): 790-801. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2018. Comparative simulation analysis of the effect of cold vortex on structural evolution of two types of mesoscale convective systems[J]. Meteor Mon, 44(6): 790-801(in Chinese).
- 陈涛,代刊,张芳华,2013. 一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J]. 气象, 39(8): 945-954. Chen T, Dai K, Zhang F H, 2013. Study on ambient condition and initialization mechanism of convection in a severe squall line storm event in North China[J]. Meteor Mon, 39(8): 945-954(in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982. 我国飑线发生条件的研究[J]. 大气科学, 6(1): 18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al, 1982. A study of the genesis conditions of squall-line in China [J]. Sci Atmos Sin, 6(1): 18-27(in Chinese).
- 方翀,郑永光,林隐静,等,2014. 导致区域性雷暴大风天气的云型分类及统计特征分析[J]. 气象, 40(8): 905-915. Fang C, Zheng Y G, Lin Y J, et al, 2014. Classification and characteristics of cloud patterns triggering regional thunderstorm high winds[J]. Meteor Mon, 40(8): 905-915(in Chinese).
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 42(12): 1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,魏东,2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 37(2): 136-141. Lei L, Sun J S, Wei D, 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(2): 136-141(in Chinese).
- 李云川,张迎新,崔粉娥,2008. 两次东北冷涡天气异同的成因分析[J]. 气象, 34(12): 54-62. Li Y C, Zhang Y X, Cui F E, 2008. A composite diagnostic study of the weather differences caused by northeast cold vortex [J]. Meteor Mon, 34(12): 54-62(in Chinese).
- 廖晓农,于波,卢丽华,2009. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象, 35(9): 18-28. Liao X N, Yu B, Lu L H, 2009. Climatology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing[J]. Meteor Mon, 35(9): 18-28(in Chinese).
- 罗玲,胡亮,何金海,等,2011. 东北冷涡背景下浙江省两次强降水过程的对比分析[J]. 气象与环境学报, 27(6): 35-42. Luo L, Hu L, He J H, et al, 2011. Comparison of two rainstorm processes in Zhejiang Province caused by northeast cold vortex[J]. J Meteor Environ, 27(6): 35-42(in Chinese).
- 郅秀书,刘冬霞,孙竹玲,2014. 闪电气象学研究进展[J]. 气象学报, 72(5): 1054-1068. Qie X S, Liu D X, Sun Z L, 2014. Recent advances in research of lightning meteorology [J]. Acta Meteor Sin, 72(5): 1054-1068(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社: 84-95. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Strong Convective Weather Forecasting—China Strong Convective Weather Forecast Manual [M]. Beijing: China Meteorological Press: 84-95(in Chinese).
- 孙力,郑秀雅,王琪,1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报, 5(3): 297-303. Sun L, Zheng X Y, Wang Q, 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China[J]. J Appl Meteor Sci, 5(3): 297-303(in Chinese).
- 王华,孙继松,李津,2007. 2005年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象, 33(2): 49-56. Wang H, Sun J S, Li J, 2007. A

- comparative analysis on two severe hail events in Beijing urban district in 2005[J]. Meteor Mon, 33(2): 49-56(in Chinese).
- 王磊, 湛芸, 张仙, 等, 2013. 冷涡背景下 MCS 的统计分析[J]. 气象, 39(11): 1385-1392. Wang L, Chen Y, Zhang X, et al, 2013. Statistical analysis of mesoscale convective system in the context of cold vortex[J]. Meteor Mon, 39(11): 1385-1392(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 等, 2012. “6·3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象, 31(2): 504-514. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al, 2012. Study on the formation and evolution of “6·3” damage wind[J]. Plateau Meteor, 31(2): 504-514(in Chinese).
- 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等, 2011. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J]. 气象, 37(4): 412-422. Wei D, Sun J S, Lei L, et al, 2011. Comparative analysis of three kinds of sounding data in the application of the severe convective weather[J]. Meteor Mon, 37(4): 412-422(in Chinese).
- 杨珊珊, 湛芸, 李晟祺, 等, 2016. 冷涡背景下飑线过程统计分析[J]. 气象, 42(9): 1079-1089. Yang S S, Chen Y, Li S Q, et al, 2016. Analysis of squall lines under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon, 42(9): 1079-1089(in Chinese).
- 杨新林, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 43(7): 769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7): 769-780(in Chinese).
- 易笑园, 李泽椿, 李云, 等, 2010. 长生命史冷涡影响下持续对流性天气的环境条件[J]. 气象, 36(1): 17-25. Yi X Y, Li Z C, Li Y, et al, 2010. Analysis of environmental conditions of continuous severe convective weather events caused by long life cold vortex[J]. Meteor Mon, 36(1): 17-25(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M], 北京: 气象出版社: 122. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principle and Application[M], Beijing: China Meteorological Press: 122(in Chinese).
- 张建军, 王咏青, 钟玮, 2016. 飑线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J]. 大气科学, 40(4): 689-702. Zhang J J, Wang Y Q, Zhong W, 2016. Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines [J]. Chin J Atmos Sci, 40(4): 689-702(in Chinese).
- 张立祥, 李泽椿, 2009. 东北冷涡研究概述[J]. 气候与环境研究, 14(2): 218-228. Zhang L X, Li Z C. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China [J]. Climatic Environ Res, 14(2): 218-228(in Chinese).
- 张仙, 湛芸, 王磊, 等, 2013. 冷涡背景下京津冀地区连续降雹统计分析[J]. 气象, 39(12): 1570-1579. Zhang X, Chen Y, Wang L, et al, 2013. Statistical analysis of continuous hailfall under the background of cold vortex in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Meteor Mon, 39(12): 1570-1579(in Chinese).
- 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等, 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 高原气象, 37(7): 795-801. Zheng Y Y, Yao C, Hao Y, et al, 2011. The short-time forecasting and early-warning research on severe convective weather under different type of large-scale circulation background[J]. Plateau Meteor, 37(7): 795-801(in Chinese).
- 郑媛媛, 张雪晨, 朱红芳, 等, 2014. 东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究[J]. 高原气象, 33(1): 261-269. Zheng Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al, 2014. Study of squall line genesis with northeast cold vortex[J]. Plateau Meteor, 33(1): 261-269(in Chinese).
- 钟水新, 王东海, 张人禾, 等, 2013. 一次冷涡发展阶段大暴雨过程的中尺度对流系统研究[J]. 高原气象, 32(2): 435-445. Zhong S X, Wang D H, Zhang R H, et al, 2013. Study of mesoscale convective system in heavy rainstorm process at a cold vortex development stage [J]. Plateau Meteor, 32(2): 435-445(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理[M]. 北京: 气象出版社: 374. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Weather Theory and Method (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press: 374(in Chinese).