

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 Lixiang, Li Zechun. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 218-228.

东北冷涡研究概述

张立祥^{1,2} 李泽椿³

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 辽宁省气象局, 沈阳 110001

3 国家气象中心, 北京 100081

摘要 简述了东北冷涡的形势特征、气候特征、天气特征与强对流特征; 回顾、综述了东北冷涡形成、发展、维持、消退期的研究成果, 特别是东北冷涡强对流特征的研究进展; 讨论了东北冷涡强降水、强天气等预报业务的难点及其研究方面存在的问题。认为: 需要依靠现代雷达、卫星等观测设备和数值模拟手段, 加强东北冷涡暴雨及强天气机制研究, 提高东北冷涡天气的预报水平。

关键词 东北冷涡 中尺度系统 降水机制 暴雨预报

文章编号 1006-9585 (2009) 02-0218-11 **中图分类号** P447 **文献标识码** A

A Summary of Research on Cold Vortex over Northeast China

ZHANG Lixiang^{1,2} and LI Zechun³

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Liaoning Provincial Meteorological Bureau, Shenyang 110001*

3 *National Meteorological Center, Beijing 100081*

Abstract The circulation characteristic, climate characteristic, weather characteristic and severe convection characteristic of cold vortex over Northeast China (NECV) are briefly described and the results of forming phase, developing phase, maintaining phase and weakening phase of NECV are reviewed and summarized, especially the research on severe convection characteristics. The puzzle in operational weather forecast such as heavy rain, severe weather is also discussed. It is necessary to do further research of the mechanism of heavy rain and severe weather in NECV by using modern observational data such as radar and satellite and tool of numerical simulation to improve the weather forecasting level of NECV.

Key words cold vortex over northeastern China, mesoscale convective system, rainfall mechanism, forecast of heavy rain

1 引言

东北冷涡 (NECV) 是我国东北地区特有的

天气系统, 是造成东北地区低温冷害、持续阴雨洪涝、突发性强对流天气的重要天气系统, 对东北地区的天气气候有重大影响。东北冷涡的基本定义如下: 500 hPa 天气图上, ($35^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$,

115°E~145°E) 范围内有闭合等高线, 配合有冷中心或冷槽, 具有能够持续维持 3 d 或 3 d 以上的低压环流系统。

东北冷涡一年四季均可出现(周琳等, 1991), 据 1956~1990 年的资料统计, 4~10 月东北地区范围内 37% 的时间受冷涡影响, 特别是夏季(6~8 月) 受冷涡影响的天气占 42% (孙力等, 1994)。冷涡活动有明显的季节变化(朱其文等, 1997a), 6 月最多, 平均达 44.9%, 所以 6 月是东北冷涡活动的盛期, 也是东北的冷涡雨季, 其次是 7 月。平均每次冷涡过程持续 4 d 左右, 最长可达 13 d。东北冷涡是影响东北地区前夏天气的主要环流系统, 其盛期几乎与江淮梅雨同期。

东北冷涡在东北地区的频发性、持续性决定了它对东北地区天气气候的重大影响。从行星尺度讲, 东北夏季 70% 的低温时段是由冷涡造成的(丁士晟, 1983); 近 40% 的东北冷涡能够产生连续阴雨天气(孙力, 1997), 1998 年松嫩流域特大洪涝灾害的主要影响系统就是反复出现和维持的东北冷涡。从天气尺度讲, 冷涡生成初期大多是典型的温带气旋, 产生区域性降水以稳定性或混合性为主, 是重要的强降水型。然而东北冷涡最引人关注的特点是其诱发中小尺度系统的突发性和反复性(连续几天在一个地区附近产生短时暴雨等强对流天气)。在东北冷涡的形成、发展、持续甚至消退期均可伴随暴雨、冰雹、雷暴、短时大风, 甚至龙卷等强对流天气。东北的雷暴日数由冷涡引发的最多(唐晓玲等, 1997), 64% 的飏线与冷涡过程有关, 冷涡降雹占东北总降雹日数近一半, 由于对流系统尺度小, 其突发性、连续性、降水量级、落区预报的高难度性是东北其他任何天气系统不可比拟的。

王东海等(2007) 针对东北暴雨的研究成果与存在问题进行了研究与讨论, 特别是针对东北冷涡暴雨研究的综述认为: 冷涡是影响我国东北地区的主要天气系统之一, 它是大尺度环流形势在东北地区特定条件下的产物, 冷涡的形成、滞留和填塞对大气环流又起着重要的反馈作用, 是东亚重要的天气系统。由于对东北冷涡暴雨的研究过去多集中在冷涡的天气气候特征、天气尺度特征、中尺度系统发生发展的天气尺度背景和诊断分析及预报方面, 因此目前对东北冷涡暴雨的

预报仍很困难, 因为东北暴雨涉及到各种不同纬度和尺度的环流系统, 以及它们之间的相互作用。随着以雷达、卫星探测和稠密观测网为核心的现代气象观测系统的不断加强, 已有条件有能力对东北强降水天气系统进行中尺度结构机理及其预测方法的探讨。

提高东北冷涡强对流降水的预报质量, 是东北地区天气预报业务中亟需解决的一个问题, 也是一个工作难点。为了解决这个问题, 气象科学工作者对东北冷涡的天气背景、降水特点进行了大量研究, 并取得了一批研究成果。目前, 随着数值预报的发展, 预报员可以得到比较满意的对东北冷涡天气尺度环流形势的预报; 但由于目前对东北冷涡诱发中尺度系统的机制以及对中尺度系统发生、发展和演变规律缺乏足够的认识, 使得预报员缺乏相应的中尺度系统预报技术, 造成对东北冷涡产生的中尺度对流天气事件预报能力仍然很低。本文重点分析了多年来我国在东北冷涡研究方面的成果, 并对目前研究中存在的问题进行了讨论。

2 东北冷涡的形成、影响及与其他天气尺度系统的相互作用

东北冷涡是在东亚阻塞形势下于东北地区发生的较为深厚的冷性低值系统, 其基本环流特征是对流层中高层为闭合系统, 由中高纬度基本西风气流中的深槽向低纬完全分离, 在东北区域上空形成东北冷涡。因此, 东北冷涡是与阻塞高压互为生消的。东北冷涡系统移动缓慢, 能在局地维持数天, 因而能很大程度地影响其控制区域的天气状况。

东北冷涡的形成与大型环流的分布和演变有密切关系(朱其文等, 1997b), 极涡、副高、印巴低压、青藏高原高压、北非高压等系统的有利配置是各类阻塞形成的根本天气学条件; 东西两半球的桥式打通必然导致大气环流的异常, 阻塞形势的建立, 引发东北冷涡的形成。极地是东北冷涡形成的冷空气源地。在东北冷涡形成前 1~3 d, 从里海至我国大陆东部, 500 hPa 形势场中 40°N 附近的纬带上有明显的西风急流区, 此为东北冷涡的形成先兆(黄秀娟等, 1997)。

东北冷涡持续性活动是导致东北地区夏季低温的一个十分关键的因子(孙力等, 2000a), 同时对降水也有重要影响。利用 1956~1997 年的资料统计分析表明, 夏季是东北冷涡活动比较集中的季节, 但是其出现的年际变化较大, 图 1 给出了 1956~1997 年 6~8 月东北冷涡出现天数的变化情况, 包括总冷涡出现天数、中涡出现天数。平均来说, 每年夏季出现冷涡 39 d, 其中最多可达 68 d (1957 年), 最少只有 19 d (1994 年)。对夏季东北冷涡活动天数与东北地区地面气温进行相关分析表明, 东北冷涡出现的次数与东北地区气温呈反相关分布, 冷涡发生频率高, 东北地区出现低温。中涡(低压中心出现在 40°N~50°N 之间的冷涡)的出现频率对春末夏初的东北地区旱涝有一定影响, 中涡活动频繁时, 东北地区降水偏多。

东北冷涡的持续性活动不只是区域尺度而是整个北半球环流异常的一个重要组成部分。分析 5~8 月东北冷涡活动多寡年的 500 hPa 同期高度距平合成场, 发现其差异显著(刘宗秀等, 2002)。冷涡活跃年夏季 500 hPa 高度场会出现以东北地区为中心的南北向和东西向分布的“+、-、+”距平波列, 其与东亚阻高势力偏强而西太平洋副高位置偏南等大尺度环流背景相联系。在对流层中上层, 高空西风急流有明显的分支现象, 特别是亚洲中纬西风急流位置偏南。而在对流层中下层, 我国东北地区和华北大部以及朝鲜半岛和日本北部等地由明显的气旋式距平环流所控制, 并且源自东北及其以西地区的北风距平可一直推进至长江流域并转变为西北风距平, 并与那里的西

南风距平汇合而形成有利于该地区梅雨偏多时的环流形势。因此, 梅雨期降水量和东北冷涡存在显著的相关关系(何金海等, 2006), 东北冷涡强, 梅雨量可能偏多, 反之东北冷涡弱, 梅雨量可能偏少; 因为东北冷涡是大尺度的天气系统, 在东北冷涡强年, 冷涡能够引导北方“干冷”空气南侵, 与低层强盛西南暖湿气流在梅雨区北缘交汇, 形成“上干下湿”的不稳定层结, 在上升运动的触发下, 导致梅雨量偏多, 而东北冷涡弱年情况正相反。与梅雨情况类似, 对 1952~2002 年东北冷涡与华南前汛期降水的统计分析发现(苗春生等, 2006), 前汛期东北冷涡强度与华南降水存在显著的正相关: 前汛期东北冷涡最强的 10 年中, 华南前汛期降水全部偏多, 而东北冷涡最弱的 10 年中, 华南前汛期降水全部偏少。东北冷涡强年, 西太平洋副高位置偏南, 前期东亚冬季风偏弱, 同期东亚夏季风异常爆发提前且偏强, 东亚夏季风向北输送大量的暖湿气流, 导致华南地区环流的斜压性加大, 低层上升运动发展, 华南地区降水偏多; 东北冷涡偏弱年, 西太平洋副高位置偏北, 前期东亚冬季风偏强, 同期东亚夏季风爆发推迟且偏弱, 华南地区低层下沉运动发展, 降水偏少。所以, 频繁的东北冷涡活动具有显著的“气候效应”, 这种“气候效应”既影响东北地区对流层低层的月平均气温, 也影响东亚地区梅雨、华南的前汛期降水。

孙力等(2002)选择了 1998 年 9 例典型的松嫩流域东北冷涡暴雨过程进行诊断分析。认为东亚阻高、西太平洋副高和东北冷涡以及它们在强度和位置上的最佳配置构成了 1998 年松嫩流域持

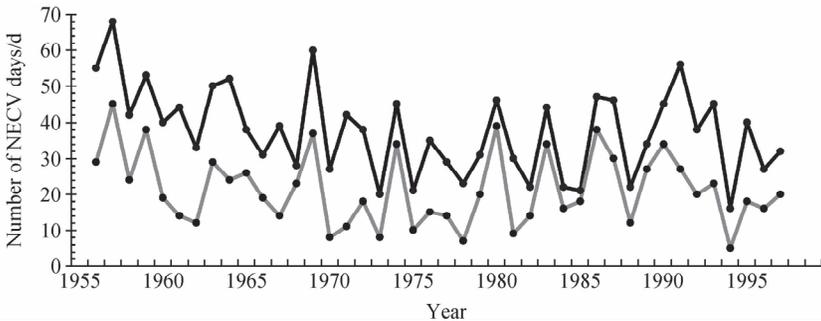


图 1 1956~1997 年 6~8 月东北冷涡出现的天数(孙力等, 2000a) (实线和灰线分别为总冷涡和中涡出现天数)

Fig. 1 Number of NECV days during Jun to Aug from 1956 to 1997 (Sun et al., 2000a) (Solid and grey line denotes total NECV and middle NECV, respectively)

续性暴雨的大尺度环流背景。亚洲季风诸系统(南亚季风, 副热带季风)的水汽输送也是大范围强降水频繁出现的主要原因, 并且是与一般冷涡降水的最根本区别。赵思雄等(1980)系统地研究了影响中国的不同低涡过程, 指出当东北冷涡与北上的热带系统(如北移台风倒槽、台风外围东风带)相结合时, 就会激发出极强的暴雨过程。它的天气特点是造成低温和不稳定性的雷阵雨天气。

东北冷涡的强度与海温变化也存在着对应关系。何金海等(2006)针对梅雨期的东北冷涡计算了冷涡强度指数与全球海温在前期6个月(从前一年12月到当年5月)和同期(当年6~7月)的相关情况, 发现东北冷涡强度指数与北太平洋的海温相关最为显著。当梅雨期东北冷涡偏强的前期或同期, 上述海区海温往往显著偏低, 因此, 前期北太平洋海温的异常可能是导致梅雨期东北冷涡异常的因素之一。同时, 统计分析表明, 东北冷涡偏强年夏季西北太平洋海温也往往偏低。在西北太平洋海温偏低的年份, 随着东亚大陆的热力性质发生由冬到夏的转变, 海陆的热力差异使得低层东亚大陆和西北太平洋之间产生东风异常, 高层西风急流增强, 这样在东亚中高纬和西北太平洋之间就形成了一个异常气流的闭合环流, 有利于东北冷涡的进一步活跃和加强。反之, 则东北冷涡偏弱。因此, 海陆热力对比在夏季对东北冷涡起着促进作用, 在冬季则对东北冷涡起着抑制作用, 因为冬季东亚大陆是冷源, 西北太平洋是热源, 因而在低层, 风由东亚大陆吹向西北太平洋, 为偏西风, 其方向与高层一致, 不利于东亚中高纬地区上升运动的发展, 这可能也是东北冷涡在夏季的发生频率远远多于其他季节的原因。

3 东北冷涡中小尺度系统研究

3.1 强对流天气特征

如引言所述, 东北冷涡最引人关注的特点是其诱发的中小尺度系统, 在东北冷涡的形成、发展、持续、甚至消退期均可伴随暴雨、冰雹、雷暴、短时大风, 甚至龙卷等强对流天气。事实上, 东北冷涡是造成局地暴雨的主要天气系统, 它在区域性大暴雨或区域暴雨中所占比例相对要小得

多(白人海等, 1993)。根据黑龙江省气象局1985~1994年出现的冰雹过程统计分析发现, 83次冰雹过程中由冷涡系统影响的占75.9%, 1972~1991年哈尔滨气象站观测到的55次飏线中与冷涡有关的有35次。从东北冷涡的中尺度天气发生的时段分析, 发现中尺度天气多发生在冷涡发展和维持阶段, 即温压结构不对称、大气斜压性强时, 而在冷涡减弱时相对较少; 从中尺度天气发生的部位分析, 中尺度天气一般发生在冷涡的南半部、冷暖空气交界处, 此处通常也是暖湿舌的后部, 从高度场看位于风切变处, 地面对应为低压或冷锋(白人海等, 1997)。具体分析, 东北冷涡出现强对流时存在以下几个条件:

(1) 假相当位温(θ_{sc})梯度大: 从冷涡内部 θ_{sc} 的空间梯度分布来看, 无中尺度天气发生的冷涡, 其内部 θ_{sc} 的变化一般为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$, 发生中尺度天气时 θ_{sc} 的梯度较大, 一般都超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$, 较强的中尺度天气(如飏线)的 θ_{sc} 梯度可以达到 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$, 最高可达 $11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。

(2) 风垂直切变强: 研究发现(游景炎, 1983), 东北冷涡是雹暴发生的主要天气形势背景, 雹暴预报不仅应注意水平温梯度的加强, 更应该注意垂直温度梯度的加强; 不仅应注意风水平切变的加强, 更应该注意风垂直切变的加强。强的风垂直切变引发的斜压不稳定和垂直运动是强对流性天气触发与维持的重要条件(陈力强等, 2006)。分析冷涡的风垂直切变, 可以得出以下统计结果(白人海等, 1997): 产生中尺度天气的相应部位的850~300 hPa风垂直切变平均为 $2.8\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 飏线为 $3.8\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 部分高达 $6.5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 局地暴雨和冰雹平均为 $1.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 无中尺度天气发生时风切变多在 $1.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 以下。雹暴具有突发性, 系统性的上升气流仅仅在雹暴发生前几小时出现。

(3) 存在明显的中尺度气压系统: 在有利的大尺度环境条件下, 中尺度系统活动在暴雨形成中起着重要作用, 中尺度切变是造成中尺度强降水的触发机制(孙力等, 2000b)。地形对中尺度切变的形成、稳定维持和对降水的增幅有相当大的作用; 中尺度切变前部的正涡度区内, 特别是正涡度区与辐合区相重合的区域内雨强最大。中

尺度滤波结果也表明：暴雨出现前，与强降水相对应的区域内，对流层低层存在着中尺度气旋式环流和中尺度辐合系统，而在高层分布着中尺度反气旋式环流和中尺度辐散系统。地面中尺度气旋和中尺度切变线的演变发展对暴雨对流系统的发生发展具有密切关系（寿亦萱等，2007a）。利用哈尔滨站 1951~1993 年的观测资料，对冷涡过程中的爬线进行环流背景、大尺度动力条件和中尺度天气系统分析（白人海等，1998）发现：地面上有明显的中尺度系统，爬线发生时天气尺度动能明显向中尺度系统转换；层结不稳定、低层水汽输送与辐合、强烈的上升运动等是必要的天气尺度条件。需要强调的另一点是，伴随着对流的出现能够产生中尺度高压（陈力强等，2005）。中尺度高压形成后，其对应的下沉气流外流与环境气流辐合，形成强的中尺度辐合区（阵风锋），它能够成为风暴形成后大气边界层主要的气流辐合源（图 2），也是风暴继续维持发展和移动的动力，其对对流系统的发展增强有重要作用。中尺度高压与强降水有很好的对应关系。

(4) 存在日变化：对东北冷涡个例研究表明，在冷涡处于发展阶段时，其降水以大范围系统性降水为主，日变化不太明显。但在成熟期等其他阶段，降水则主要由对流不稳定产生，以分散的中小尺度对流为主，有明显的日变化，强对流主

要出现在午后到傍晚，这是因为午后的低层大气加热产生的强不稳定能量在冷涡降水中有重要作用（陈力强等，2008）。从冷涡成熟期到减弱期，对流有效位能（CAPE）有明显的日变化，受太阳短波辐射影响很大，最小值出现在 2 时（北京时间，下同），最大出现在 14~20 时。这也与对流降水有较好的对应关系。应用地面加密观测资料，配合卫星云图等非常规资料，对一次东北冷涡的中尺度系统分析也表明（白人海，1997）：冷涡系统中尺度活动与其锋面系统密切相关，并与局地对流有关，存在明显的日变化，上午对流活动较弱，午后对流发展旺盛。对爬线发生的时间进行统计也能够证实冷涡强对流的日变化。根据哈尔滨站的气象资料统计，约有 64% 的爬线是由东北冷涡引起的，而 1951~1993 年期间共记录到爬线 177 次，发生在午后到夜间（12~23 时）的占 87.6%，主要集中在 15~18 时。

3.2 中尺度对流系统结构特征

陈力强等（2005）应用中尺度数值模式模拟研究东北冷涡中尺度对流系统（MCS）三维动力结构演变，针对东北冷涡诱发的一次辽宁中北部强风暴（2002 年 7 月 12 日）进行数值模拟，成功模拟出中 β 尺度系统（见图 3）。从数值模拟结果跟踪 MCS，可以看出强烈的中尺度对流活动，中尺度系统自西向东移动，依据对流系统上升运动强度可将其演变划分为 3 个阶段：14~18 时为发展阶段，19~21 时为成熟阶段，22~23 时为消亡阶段。研究表明，MCS 在发展阶段，天气尺度抬升使不稳定能量积累，低层中尺度能量锋区及中尺度气旋性环流加强使中尺度辐合加强，产生中尺度强上升气流冲破中层稳定层结，倾斜上升逐渐发展为垂直上升。MCS 强风暴成熟阶段地面气压场表现为强的雷暴高压，并有弱的前导低压和尾随低压配合。对应于雷暴高压的边界层冷丘与南部的暖湿气流形成的假相当位温不连续线加强了低层气流的辐合抬升。前导低压与 800~700 hPa 暖心低压扰动合并在一起，是由地面辐合、上升气流抽吸、潜热增温共同形成的低压扰动，对对流系统的维持和移动有重要作用。

利用常规资料和雷达卫星资料分析 2005 年 6 月沙兰镇暴雨 MCS 动力结构的演变特征（寿亦萱等，2007b），发现：中尺度对流系统处于前倾疏

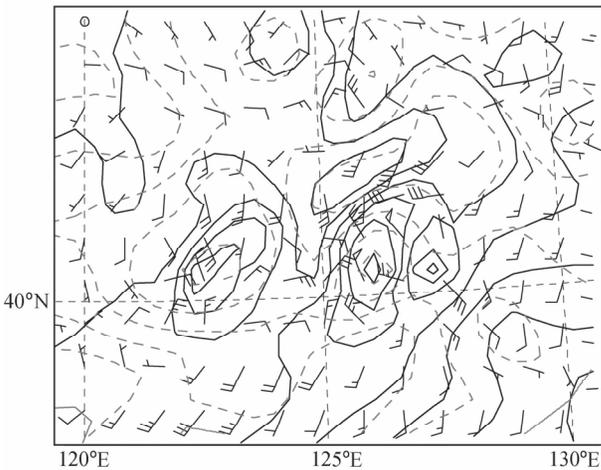


图 2 2002 年 7 月 12 日 20 时 950 hPa 中尺度系统（陈力强等，2005）（实线为位势高度，间距 10 gpm；虚线为温度，间距 2°C）
Fig. 2 950 hPa mesoscale system at 2000 LST 12 Jul 2002 (Chen et al., 2005) (solid lines denote geopotential high, interval: 10 gpm; dash lines denote temperature, interval is 2°C)

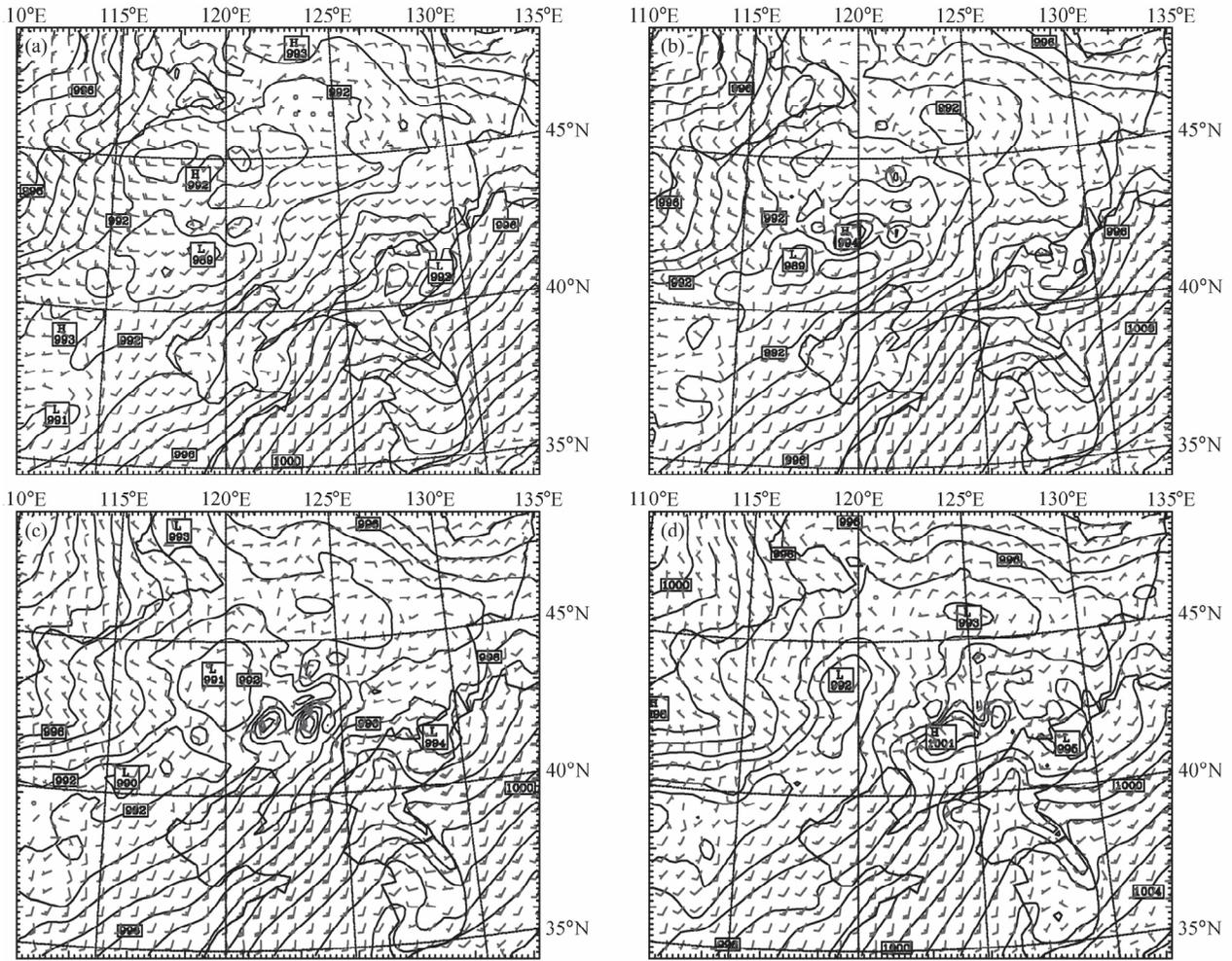


图3 2002年7月12日模拟的地面中尺度系统演变(陈力强等, 2005) (a) 15时; (b) 17时; (c) 20时; (d) 23时。实线为海平面气压场, 间隔1 hPa

Fig. 3 Evolution of simulated surface mesoscale system on 12 Jul 2002 (Chen et al., 2005) (a) 1500 LST; (b) 1700 LST; (c) 2000 LST; (d) 2300 LST. Solid lines denote sea level pressure, interval is 1 hPa

散的高空槽槽前, 高空辐散、低空辐合为 MCS 发生提供了有利的大尺度动力条件。这次强对流暴雨的中尺度对流系统是一个具有多单体风暴结构特征的孤立对流系统, 对流系统中个别对流单体的强烈发展导致了沙兰镇的雷暴等剧烈天气过程。在对流系统初生—发展—成熟 3 个阶段, 雷达反演的低空风场上显示出明显的规律性, 随着降水加大, 降水区附近的流场上反气旋性旋转疏散的特征显著增强。对整个对流系统来说, 以对流云团移向方向(东北方)为前方, 低空暖湿气流从云团左后方(西南方)入流, 而在云团的右前方(偏东方)出流, 即系统内的气流具有后方入流前方出流的特点。这与江晓燕等(2005)研究的江淮梅雨锋暴雨和孙建华等(2002)研究的华南暴

雨 MCS 中低空气流从对流云团的前方入流上升, 后方下沉, 特征相反。从对流系统的移动规律来看, 云团左侧低空入流高空出流, 右侧低空出流高空入流, 即在云层平均风方向的左侧低空辐合高空辐散, 右侧低空辐散高空辐合。这种有利于对流单体从系统的左后方新生、右前方消亡的配置, 可能是导致沙兰河上游暴雨的雷暴云具有左移风暴特点的重要动力机制。

4 东北冷涡降水机制研究

陶诗言(1980)指出东北低压或冷涡型是我国主要暴雨的大形势特点之一, 常给东北地区、华北北部造成暴雨或雷阵雨。20 世纪 40 年代末

Hsieh (1949) 已给出了与高空冷涡相联系的降水分布: 构成冷涡的云以对流云为主, 大多位于冷涡中心的东侧, 并从动力和热力角度描述了冷涡对流天气最基本的配置, 提出以下两点: 1) 冷涡东侧为正涡度平流区, 由于冷涡平流的强迫作用, 大尺度流场中为上升气流区, 这是云雨区发展的重要条件之一; 2) 在冷涡东侧的低层大气中有能量很高的气团以舌状的形式流入, 并形成一个舌状的位势不稳定区, 由此造成冷涡东侧有利于对流云发生的重要环境条件。孙力等 (2002) 的研究也表明, 东北冷涡由于东侧阻高的存在, 使上升气流能够得到充分发展, 并且该上升气流是向东倾斜的, 而系统中心附近及其西侧则由于对流层中高层大范围 and 较强的西北下沉气流的存在, 导致上升运动受到抑制。涡度、散度和螺旋度等物理量相对冷涡中心来说也呈非对称分布, 东侧低层辐合和高层辐散以及涡度远强于西侧, 再加上高能湿舌轴线和水汽通量极大值均分布于这一区域, 使得冷涡中心东侧成为强降水中心。王东海等 (2007) 指出: 大量事实表明, 当东北冷涡与其他天气系统如台风、气旋等相互作用时能够产生暴雨甚至特大暴雨, 如 2005 年东北地区受台风麦莎和冷涡系统的共同作用, 使东北地区夏季降水偏多。

事实上, 强大的冷涡由于冷性层结深厚难以诱发强的对流天气, 而其分裂的正涡度或弱的冷性低涡配合低层暖湿条件常常产生突发性强对流天气。

低空急流在冷涡降水中起着重要作用。低空急流与暴雨的出现关系密切, 绝大多数暴雨过程伴有低空急流 (陶诗言, 1980)。高空急流入口、出口区与低空急流的相对位置很大程度上决定了强天气的落区, 低空急流的出现和冷涡在对流层中的深厚程度有很大关系, 不与夏季季风系统相连, 而大多是低涡本身的产物 (杨红梅等, 1993), 低空急流在冷涡天气中起着重要作用。事实上, 有半数左右的冷涡并不产生对流天气, 习惯称干冷涡, 因此低空急流及其水汽的供应成为冷涡暴雨的重要条件。低空急流不仅是水汽的传送带, 而且能为冷涡暴雨的产生提供热力或动力不稳定条件 (张云等, 2008)。研究表明, 中尺度低空急流带来的水汽输送及水汽辐合使低层 (850

hPa 以下) 维持准饱和状态, 为强对流风暴的发生发展提供了低层湿层条件 (陈力强等, 2006)。如果没有其他天气系统配合, 不建立天气尺度的低空急流, 东北冷涡将难以产生区域性强降水天气。

冷暖平流的迭加带来层结不稳定, 易于强降水发生。高空冷涡在形成降水上有很复杂的形势, 在冷涡云系附近或后部都有可能不同程度地出现对流云的发展, 尤其是冷涡区后部的晴空区, 常有高空冷平流和低空暖平流迭加, 加上地面白天辐射增温, 形成不稳定层结, 有利于对流的发展 (斯公望, 1989)。高空急流几乎围绕着低层涡旋 (吴正华, 1993), 涡旋具有较强的斜压结构, 在 500 hPa 或 700 hPa 上冷中心落后于气压系统, 形成涡底及涡后极强的冷平流, 由于中空冷平流带来层结不稳定, 使它所产生的天气比较激烈, 带有阵性, 随低涡向东移动。事实上, 由于东北冷涡高空温度比较低, 当低层加热时, 常常发生很强的对流不稳定, 产生冰雹、雷暴等天气, 也有时产生稳定的连续性降水, 出现区域性暴雨 (郑秀雅等, 1992)。

不均匀地形有利于中尺度系统的产生和发展。对东北冷涡个例模拟研究分析发现: β 中尺度天气系统是大暴雨的主要影响系统。地形抬升、纬向次级环流和小股弱冷空气共同作用是大暴雨产生的重要因素。中尺度地形对 β 中尺度天气系统维持和发展也起作用 (张玲等, 2003), 影响暴雨落区、强度, 且有增幅作用。从地面接收到的太阳辐射能量分布情况来看, 下垫面不均匀加热引起的热力环流是一些暴雨过程中尺度对流系统发生发展的一个重要的触发机制。山区地形也有利于中尺度扰动的产生和加强。数值试验表明, 大小兴安岭和长白山等地形对嫩江、松花江流域东北冷涡的暴雨形成有重要的作用 (姜学恭等, 2000), 特别是对暴雨的落区和范围影响最大, 对强度的影响次之。

特定的环流形势和充沛水汽条件能够产生区域性暴雨。虽然冷涡暴雨更多地表现为局地强对流天气, 但是, 东北冷涡也能够引起像 1998 年夏季松花江、嫩江流域出现的连续区域性大暴雨。如果仅是由西风带上的冷涡系统造成的暴雨, 一般范围较小。但是, 西太平洋副热带高压北进后,

低纬天气系统对西风带低值系统降水产生加强作用, 同时如果有充沛的水汽输送, 则能够产生区域性大暴雨。1998 年夏季的松花江、嫩江流域大范围暴雨, 即是冷涡西侧上游的高压脊有利于北方冷空气沿脊前西北气流南下, 鄂霍次克海阻塞高压和西太平洋副热带高压引导偏南的暖湿气流北上, 两者恰好在松花江嫩江流域交汇、相互作用, 为暴雨的反复出现提供了极有利的天气尺度环流条件。分析表明, 其水汽来源主要来自西太平洋副热带高压南部低纬热带地区和孟加拉湾, 后者可追溯到印度洋赤道以南洋面。东亚大陆边缘的低空急流和西太平洋副热带高压的南北位置对急流的位置、水汽的输送影响很大(孙永罡等, 2000)。低涡暴雨的水汽初期主要来自北部, 随着低纬地区西南季风的增强, 沿副高西侧从低纬到中高纬建立起一条较强的水汽输送带, 东北地区水汽收支以南北向的辐合为主。持续的较大范围的低涡暴雨过程与亚洲中高纬的阻塞形势、低涡的维持、西太平洋副热带高压的位置及夏季风和低纬系统的水汽输送有密切的关系(乔枫雪等, 2007)。

降雹冷涡与非降雹冷涡环流形势的差别在于(徐葆真, 1983): 500 hPa 出现超前的干冷中心, 冷涡的长轴呈西北—东南向, 低能中心超前于冷涡中心, 对流层中上部干冷空气前移速度快于底层; 冷涡底部为一较强锋区, 降雹区处于极锋急流带的气旋性弯曲最大处的左侧; 850 hPa 出现次天气尺度准饱和的 Ω 形能量系统是冷涡产生冰雹的主要前兆特征; 500 hPa 最大风速轴的出现也是雹暴产生的先兆条件(李平, 1983), 风速大多在 $16 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大值为 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其为中空带来冷空气促使雹区不稳定热力层结的形成, 中空强切变环境风场为雹暴发展提供了动力条件。冷涡中心轴线随高度略向西北倾斜, 近乎垂直; 850 hPa 以下为上升气流, 以上为下沉气流, 有利于能量的积累。

应用飞机穿云观测资料, 结合雷达、卫星云图及天气图等资料, 分析冷涡个例的对流云带的宏观特征、微物理结构, 探讨降水形成机制(齐彦斌等, 2007), 发现: 东北冷涡对流云系具有明显的带状水平回波结构, 中等强度, 垂直尺度小(小于 6 km), 云过冷液态水含量丰富, 云的上部

过冷水含量也达到 $2.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对流云带的上部存在冰粒子高浓度区, 这些冰粒子在高过冷水含量区的快速增大对降水产生起到重要作用。云滴直径与云滴浓度在 0°C 层附近呈现负相关性; 上升气流的作用造成了 0°C 层以下粒子浓度的积累。在弱上升气流区, 高浓度区对应小粒子多, 低浓度区对应大粒子多。

5 存在问题与讨论

从以上综述可以看出, 在东北冷涡的形成、影响、降水机制、特别是东北冷涡的中尺度系统研究方面, 取得了许多研究成果。但受观测资料分辨率及研究工具的限制, 目前关于东北冷涡的研究大多侧重于东北冷涡的天气气候特征、天气尺度特征、天气尺度系统演变、气候统计、诊断分析、中尺度系统发生发展的天气尺度环流背景等方面。虽然开始应用卫星、多普勒雷达资料 and 通过中尺度数值模式模拟研究冷涡强对流产生、发展、消退机制及三维动力结构, 但基本上是局限于个例研究。

东北冷涡属天气尺度系统, 但东北冷涡所造成的强降水却带有明显的局地性和不对称性, 这给东北冷涡强天气预报业务带来很大困难, 难以把握东北冷涡对流性降水的强度、落区和时间。

因此, 还需要从冷涡强对流的触发机制研究着手, 依靠现代雷达、卫星等观测设备和数值模式, 开展对冷涡系统的加密观测, 着眼于研究东北冷涡的内部结构特征及其中尺度系统发生发展的物理机制、东北冷涡中尺度对流系统的结构特征, 包括对流不稳定层结、对流的爆发和维持及其与暴雨的关系, 研究东北冷涡暴雨的水汽条件及其与其他系统相互作用激发的强暴雨过程。通过研究探讨东北冷涡的暴雨机制, 解决东北冷涡强对流降水预报难的问题。特别是需要针对业务预报, 从出现东北冷涡强对流的天气条件、强对流预报要点等方面加强研究, 为预报员提供一些具体指标, 如冷涡发展阶段及应注意的预报区域位置, 对流发生时间与移动路径、对流强度, 等等。提高东北冷涡暴雨天气的预报水平, 从而提高我国东北地区暴雨过程的预报预测水平。

参考文献 (References)

- 白人海, 金瑜. 1993. 黑龙江省暴雨之研究 [M]. 北京: 气象出版社, 217. Bai Renhai, Jin Yu. 1993. The Research on Heavy Rain in Heilongjiang Province [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 217.
- 白人海. 1997. 东北冷涡加密观测事实的分析 [J]. 黑龙江气象, (04): 1-3. Bai Renhai. 1997. The intensive observational fact analysis on cold vortex over northeastern China [J]. Heilongjiang Meteorology (in Chinese), (04): 1-3.
- 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, (03): 6-12. Bai Renhai, Sun Yonggang. 1997. The background analyses on meso-scale weather in cold vortex over northeastern China [J]. Heilongjiang Meteorology (in Chinese), (03): 6-12.
- 白人海, 谢安. 1998. 东北冷涡过程中的飏线分析 [J]. 气象, 24 (4): 37-40. Bai Renhai, Xie An. 1998. Analysis of squall lines occur in cold vortexes over Northeast China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 24 (4): 37-40.
- 陈力强, 陈受钧, 周小珊, 等. 2005. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟 [J]. 气象学报, 63 (2): 173-183. Chen Liqiang, Chen Shoujun, Zhou Xiaoshan, et al. 2005. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (2): 173-183.
- 陈力强, 张立祥, 杨森. 2006. 东北冷涡诱发的一次连续强风暴环境条件分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (6): 1-5. Chen Liqiang, Zhang Lixiang, Yang Sen. 2006. Environmental conditions of continual rainstorm caused by northeast cold vortex [J]. Journal of Meteorology And Environment (in Chinese), 22 (6): 1-5.
- 陈力强, 张立祥, 周小珊. 2008. 东北冷涡不稳定能量分布特征及其与降水落区的关系 [J]. 高原气象, 27 (2): 339-348. Chen Liqiang, Zhang Lixiang, Zhou Xiaoshan. 2008. Characteristic of instable energy distribution in cold vortex over Northeastern China and its relation to precipitation area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 339-348.
- 丁士晟. 1983. 东北低温冷害的气候分析 [C] //东北夏季低温长期预报文集. 北京: 气象出版社, 9-16. Ding Shicheng. 1983. The climate analysis on microtherm and freeze injury in northeast China [C] //Long Term Forecast Corpus On Summer Microtherm In Northeast China (in Chinese). Beijing: China Meteorologica Press, 9-16.
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响 [J]. 科学通报, 51 (23): 2803-2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2006. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (23): 2803-2809.
- 黄秀娟, 朱其文, 刘实. 1997. 前夏东北冷涡活动期东亚阻塞形势的特征分析 [C] //东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 30-34. Huang Xiujuan, Zhu Qiwen, Liu Shi. 1997. The characteristic analyses on East Asia block in the activity period of cold vortex over northeastern China in early summer [C] //Corpus of Research on Cold Vortex over Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House, 30-34.
- Hsieh Yi-Ping. 1949. An investigation of a selected cold vortex over north America [J]. J. Meteor., (6): 401-410.
- 江晓燕, 倪允琪. 2005. 一次梅雨锋暴雨过程的 β 中尺度对流系统发展机理的数值研究 [J]. 气象学报, 63 (1): 77-92. Jiang Xiaoyan, Ni Yunqi. 2005. Numerical study of the evolution mechanism of meso- β scale convective system along the Meiyu front [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 77-92.
- 姜学恭, 孙永刚, 沈建国, 等. 2000. 嫩江、松花江流域暴雨过程的中尺度数值模拟 [J]. 黑龙江气象, s1: 36-43. Jiang Xuegong, Sun Yonggang, Shen Jianguo, et al. 2000. The meso-scale numerical simulation on heavy rain in nengjiang-songhua-jiang valley [J]. Heilongjiang Meteorology (in Chinese), s1: 36-43.
- 李平. 1983. 中层强风速轴对雹暴形成的作用 [C] //强对流天气文集. 北京: 气象出版社, 60-61. Li Ping. 1983. The effect of strong wind speed axis in middle layer on formation of hailstorm [C] //Corpus of Severe Storm (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 60-61.
- 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 等. 2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500 hPa 环流特征分析 [J]. 大气科学, 26 (3): 361-372. Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. 2002. Analyses of the Northern Hemisphere circulation characters during Northeast Cold Vortex persistence [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 361-372.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析 [J]. 大气科学, 30 (6): 1249-1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in south China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1249-1256.
- 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 2007. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究 [J]. 大气科学, 31 (4): 621-634. Qi Yanbin, Guo Xueliang, Jin Dezhen. 2007. An observational study of macro/microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 621-634.
- 乔枫雪, 赵思雄, 孙建华. 2007. 一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水汽收支分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 397-412. Qiao Fengxue, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chi-

- nese), 12 (3): 397-412.
- 寿亦萱, 许健民. 2007a. “05.6” 东北暴雨中尺度对流系统研究 I: 常规资料和卫星资料分析 [J]. 气象学报, 65 (2): 160-170. Shou Yixuan, Xu Jianmin. 2007a. The rainstorm and mesoscale convective systems over northeast China in June 2005. I: A synthetic analysis of MCS by conventional observations and satellite data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (2): 160-170.
- 寿亦萱, 许健民. 2007b. “05.6” 东北暴雨中尺度对流系统研究 II: MCS 动力结构特征的雷达卫星资料分析 [J]. 气象学报, 65 (2): 171-182. Shou Yixuan, Xu Jianmin. 2007b. The rainstorm and mesoscale convective systems over northeast China in June 2005. II: A synthetic analysis of MCS's dynamical structure by radar and satellite observations [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (2): 171-182.
- 斯公望. 1989. 暴雨和强对流环境系统 [M]. 北京: 气象出版社, 116. Si Gongwang. 1989. The Environment System of Heavy Rain and Severe Convection [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 116.
- 孙建华, 赵思雄. 2002. 华南“946”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I: 引发暴雨的中尺度对流系统的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 26 (4): 541-557. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of south China Part I: A numerical simulation study of meso- β convective system inducing heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 541-557.
- 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 Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 5 (3): 297-303.
- 孙力. 1997. 东北冷涡低温连阴雨的气候学特征 [C] // 东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 6-7. Sun Li. 1997. The climate characteristic of microtherm and rain days in cold vortex over northeastern China [C] // Corpus of Research on cold vortex over Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House, 6-7.
- 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2000a. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析 [J]. 气象学报, 55 (6): 704-714. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000a. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (6): 704-714.
- 孙力, 王晓明, 秦元明, 等. 2000b. 嫩江、松花江流域暴雨的中尺度系统和过程分析 [J]. 黑龙江气象, s1: 27-36. Sun Li, Wang Xiaoming, Qin Yuanming, et al. 2000b. The analysis on meso-scale system and course of heavy rain in Nenjiang-songhuajiang valley [J]. Heilongjiang Meteorology (in Chinese), s1: 27-36.
- 孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 2002. 1998 年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析 [J]. 应用气象学报, 13 (2): 156-162. Sun Li, An Gang, Gao Zongtin, et al. 2002. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the northeast cold vortex over songhuajiang-nenjiang river basin in summer of 1998 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (2): 156-162.
- 孙永罡, 白人海. 2000. 1998 年夏季松花江、嫩江流域大暴雨的水汽输送 [J]. 气象, 26 (10): 24-34. Sun Yonggang, Bai Renha. 2000. Vapor transport of heavy rain over songhuajiang and nenjiang in 1998 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (10): 24-34.
- 唐晓玲, 丁力, 廉毅. 1997. 吉林省冷涡降雹的若干统计事实 [C] // 东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 1-2. Tang Xiaoling, Ding Li, Lian Yi. 1997. Some statistic facts on hailing in cold vortex over northeastern China [C] // Corpus of Research on Cold Vortex over Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House, 1-2.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225. Tao Shiyang. 1980. Heavy Rainstorm in China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 225.
- 王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展, 22 (6): 549-560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the study of rainstorm in northeast China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (6): 549-560.
- 吴正华. 1993. 京津冀地区短历时降水和冰雹的气候研究 [C] // 中尺度气象文集. 北京: 气象出版社, 8. Wu Zhenghua. 1993. The climate research on short time rain and hail in Beijing-Tianjin region [C] // Corpus of Meso-scale Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 8.
- 徐葆真. 1983. 蒙古冷涡雹暴发生条件的合成对比分析 [C] // 强对流天气文集. 北京: 气象出版社, 87-88. Xu Baozhen. 1983. The composing and contracting analysis on occurring condition of hailstorm in cold vortex over Mongolia [C] // Corpus of Severe Storm (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 87-88.
- 杨红梅, 赵亚民. 1993. 冷涡暴雨的物理结构及概念模型 [C] // 中尺度气象文集. 北京: 气象出版社, 31. Yang Hongmei, Zhao Yamin, et al. 1993. The physics structure and concept model of heavy rain in cold vortex [C] // Corpus of Meso-scale Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 31.
- 游景炎. 1983. 华北冰雹发生条件及预报问题 [C] // 强对流天气文集. 北京: 气象出版社, 1-5. You Jingyan. 1983. Occurring condition and forecasting problem on hail in north China [C] // Corpus of Severe Storm (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1-5.
- 张玲, 李泽椿. 2003. 1998 年 8 月嫩江流域一次大暴雨的成因分析 [J]. 气象, 29 (8): 7-12. Zhang Ling, Li Zechun. 2003.

The reason of a heavy rain event in nenjiang valley in August, 1998 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (8): 7 - 12.

张云, 雷恒池, 钱贞成. 2008. 一次东北冷涡衰退阶段暴雨成因分析 [J]. 大气科学, 32 (3): 481 - 498. Zhang Yun, Lei Hengchi, Qian Zhencheng. 2008. Analyses of formation mechanisms of a rainstorm during the declining phase of a Northeast cold vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 481 - 498.

赵思雄, 刘苏红, 刘名扬. 1980. 夏季北京冷涡强对流天气的中尺度分析 [C] //中国科学院大气物理所集刊, 第 9 号. 北京: 科学出版社, 151 - 160. Zhao Sixiong, Liu Suhong, Zhou Mingyang. 1980. Mesoscale analysis of strong convective weather system caused by cold vortex over Beijing during summer [C] // Collected Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, No. 9 (in Chinese). Beijing: Science Press, 151 - 160.

郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 19 - 43. Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai Renhai. 1992. Heavy Rainfall in Northeastern China [M] (in Chinese). Beijing:

China Meteorological Press, 19 - 43.

周琳. 1991. 东北气候 [M]. 北京: 气象出版社, 122. Zhou Lin. 1991. Climate in Northeast China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 122.

朱其文, 章少卿, 周志才, 等. 1997a. 前夏东北冷涡活动及其降水分布特征的初步分析 [C] //东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 35 - 42. Zhu Qiwen, Zhang Shaoqing, Zhou Zhicai, et al. 1997a. A analysis on activity of cold vortex over northeastern China in early summer and its distributing characteristic of precipitation [C] //Corpus Of Research On Cold Vortex Over Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House, 35 - 42.

朱其文, 黄秀娟, 刘实. 1997b. 东北冷涡大型环流演变特征以及系统配置关系的研究 [C] //东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 14 - 29. Zhu Qiwen, Huang Xiujuan, Liu Shi. 1997b. The study on circulation evolvment characteristic of cold vortex over northeastern China and relation among weather systems [C] //Corpus of Research on Cold Vortex over Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House, 14 - 29.