

文章编号:1001-8166(2007)06-0549-12

东北暴雨的研究*

王东海¹, 钟水新¹, 刘英¹, 李俊², 胡开喜²,
杨帅², 张春喜³, 孙力⁴, 高枞亭⁴

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 北京大学大气科学系, 北京 100871; 4. 吉林省气象科学研究所, 吉林 长春 130062)

摘要: 系统性研究东北暴雨将提高对东北灾害性天气的认识, 有利于加深对中国暴雨的全面研究。对我国气象工作者在东北暴雨研究方面的工作进行了综述, 并回顾了影响东北暴雨的几类主要天气系统, 分别为气旋、台风、冷涡, 着重回顾了在过去几十年中东北冷涡暴雨方面研究的进展。指出目前待解决的问题是: 影响东北地区台风暴雨强度、分布及转向问题; 东北冷涡的内部结构特征及其发生发展的物理机制、东北冷涡下中尺度对流系统的结构特征与暴雨的关系; 引发东北地区强暴雨过程的水汽源地等问题。这些问题需要通过今后深入和细致的加密观测分析研究, 以及利用长时间卫星遥感观测资料和雷达资料的论证才能逐渐认识清楚。

关键词: 东北暴雨; 东北冷涡; 气旋暴雨; 台风暴雨; 冷涡暴雨

中图分类号: P458.1⁺21.2 **文献标识码:** A

1 引言

暴雨是我国东北地区的主要灾害性天气之一。20世纪90年代以来, 东北地区相继发生过若干次不同等级的大范围洪涝灾害, 如1994年东北严重洪涝、1995年东北东南部大洪水、1998年夏季嫩江流域和松花江流域特大洪水以及2005年东北大部洪涝等。除了这种大范围洪涝, 更多的是具有突发性的局地性暴雨, 如2005年黑龙江省沙兰镇的短时强降水, 给该地区人民生命财产带来了严重的损失。东北暴雨主要是西风带、副热带和热带环流系统相互作用的结果, 即所谓的“三带”环流对东北暴雨的影响, 具有突发性强、强度高、持续时间长等特点。多年来东北暴雨的预报和预警一直是我国东北地区气象工作者的重点和难点。

与南方暴雨不同, 在过去几十年中, 有关东北暴雨的研究相对较少。具体体现在研究比较分散, 不

系统; 缺乏有效的组织, 不深入; 采用新的技术、方法和理论, 用环流系统相互作用的观点所进行的研究还不多见; 国家级科研和业务机构对东北暴雨研究的关注程度不够; 与华东、华南和华中相比, 观测能力不足, 对基本事实的了解不太充分等。过去对东北暴雨理论分析研究多集中在应用常规资料的天气气候统计和诊断分析上^[1~4]。近年来也有人利用非常规资料进行研究^[5]。事实上, 东北降水较多是受西风带系统的影响及其与热带副热带环流系统相互作用的产物, 并且大多受具有局地特色的东北冷涡环流的控制。大量事实表明, 当东北冷涡与其它天气系统如台风、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, 居历史第四位(50年统计)。各地气象学者^[6~9]利用东北地区降水资料, 结合本地区情况分别统计了东北地区暴雨的强度、时空分布、大尺度环流系统等气候特

收稿日期: 2007-04-28; 修回日期: 2007-05-11.

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“我国东北强降水天气系统的动力过程和预测方法的研究”(编号: 40633016) 资助.

作者简介: 王东海(1965-), 男, 广东饶平人, 研究员, 博士, 主要从事中尺度天气动力学、数值模拟和数值预报方面的研究.

E-mail: wangdh@cams.cma.gov.cn

征,获得了大量的事实。然而由于东北暴雨系统内部观测资料的稀少和研究的匮乏,目前对东北地区暴雨洪涝灾害出现的规律、大尺度环流背景、强暴雨天气系统形成机制和发展演变的物理过程等问题还缺乏应有的认识,许多工作开展得不够深入,严重影响和制约了东北暴雨研究领域的发展。这也直接导致了我们对这种灾害性天气的监测和预测水平与实际的业务需要还有很大差距,今后需要很多专门深入的研究。近些年来,随着我国天气监测网的日益完善,所获得的常规观测资料较以前改善很多;同时高分辨率的中尺度数值预报模式也得到了快速发展。诸多方面的发展,极大地推动了对东北暴雨科研的发展和业务能力的提高。本文对近 50 年来我国东北暴雨研究领域的进展作了综述,并对现阶段问题进行讨论。

2 东北暴雨的天气特征与气候背景研究

陶诗言^[10]早在 1980 年出版的《中国之暴雨》一书中就对中国的暴雨做了一个比较详细的分析。指出西风环流、副热带环流和热带环流是影响我国暴雨的主要大气环流形势。书中阐述了我国暴雨的天气系统,特别指出东北低压或冷涡系统对东北暴雨的影响,当有冷涡系统进入东北的时候,常给东北及华北北部带来暴雨或者雷阵雨。从 1981 年起,北方天气文集编委会先后编纂出版了《北方天气文集》丛书,由北京大学出版社出版,该书汇集了各大高校、研究院(所)及其地方气象台对东北、华北和西北地区的暴雨及强对流天气进行的广泛研究^[11]。丁士晟在北方暴雨技术组 1982 年 3 月丹东会议后归纳指出,北方暴雨具有暴雨次数少、强度大、时间集中、地形影响大等气候特征。

2.1 暴雨的时空分布特征

一般而言,东北地区暴雨按照暴雨覆盖范围的大小可分为 3 类:局地暴雨、区域性暴雨和特大范围暴雨。郑秀雅等^[12]利用 1956—1987 年东北地区降水资料的统计结果,详细地对东北暴雨进行统计归类,指出暴雨主要出现在 6~9 月,尤以 7 月和 8 月最为集中,地理分布上辽宁省的中南部是暴雨的典型多发区,具有自西北向东南增多的趋势。东北地区暴雨以局地暴雨出现次数最多,其次是区域性暴雨。比较东北三省可以看出,纬度越高这种比例悬殊越大。孙力等^[13]利用东北三省及内蒙东北部均匀分布的 80 个测站 40 年(1961—2000 年)夏季(6~8 月)月降水资料以及正态化 Z 指数变换、小波分

析等方法,对东北地区夏季降水进行了旱涝等级划分,并探讨了旱涝发生的事件演变规律和空间分布特征,把东北地区夏季降水在空间上分为 7 个旱涝型(或敏感区)。并指出这些旱涝型主要是由东北不同地区的地理位置、地形地貌和下垫面分布以及主要影响天气系统的差异所决定的。孙长平等^[14]根据东北地区降水情况,从受灾面积、降雨径流与秋冬降雪、暴雨突发性出发,经统计分析把东北暴雨划分为 3 种类型:阴雨连绵,暴雨叠加型、春汛夏汛连接型、暴雨山洪型。张继权等^[3]利用东北区 1950—1990 年洪涝灾害相关资料,统计分析了建国以来东北地区洪涝灾害发生的时空特点和分布规律,指出东北地区各种等级暴雨出现的频次,总的来说是东南部略多,西北部略少。特别是特大洪灾,辽河中下游、鸭绿江下游沿海地区明显偏多。这是由于受地形影响,有利于气旋经过该地区加深加强。

东北地区各地气候差异很大,地形地貌复杂,东北地区灾害性降水的形式特点及时空分布规律也不相同,各省气象工作者对各省的暴雨作了很多统计并对气候特征及影响进行系统分析,得出东北地区各种等级暴雨出现频次黑龙江省最多,特别是严重涝灾和特大涝灾明显居多,辽宁省和吉林省居中,内蒙古东四盟(市)最少。东北地区暴雨受季风影响极大,特别是特大范围暴雨,因此它有明显的季节性。另外,东北暴雨也存在明显的长年代变化周期。郑秀雅等^[12]进一步对吉林大于等于 50 mm 和 100 mm 的天数的历年变化进行谐波和方差分析,发现均存在明显的周期性,大于等于 50 mm 的天数的年际变化有 3 年及 13 年、5 年和 2 年的周期,拟合率为 87%。大于等于 100 mm 暴雨天数的年际变化有 2.5 年及 5 年和 9 年周期,拟合率为 90%。辽宁省区域大暴雨有 11 年、10 年和 7 年周期,其拟合率为 94%。卢娟等^[7]利用辽宁 51 个台站的逐日降水资料,分别计算出 1961—2002 年 51 个台站的年降水量、年降水日数、年平均降水强度、年暴雨日数、年大暴雨日数、年最大连续降水量、年最长连续无降水日数的 8 个时间序列,用极值法对上述时间序列极端偏多和极端偏少 2 种情况的年际变化进行分析,结果表明,暴雨日数极端偏多年全省面积覆盖率表现为减少的年际变化趋势,而大暴雨日数极端偏多年全省面积覆盖率表现为增加年际变化趋势,均表现出了 10 年左右的周期性。不难看出,在全球变暖的背景下,最近几年东北地区暴雨、大暴雨等极端天气异常偏多。造成这种现象的原因是什么?东北地

区暴雨未来的长时间序列气候特征发展演变有何规律等都有待于进一步研究。

2.2 水汽输送特征

我国东北地区位于东亚季风区的最北端,属温带大陆性气候,年降水特别是夏季降水的多少,在很大程度上取决于夏季风活动的强弱。由于受到东亚季风年际变率大的影响,导致该区域夏季暴雨洪涝和持续性干旱等天气气候灾害异常活跃。关于我国中高纬度地区的旱涝和降水异常过去曾有过不少研究,20世纪70年代末和80年代初我国学者就提出过中低纬相互作用的观点^[15,16],认为该地区大范围的持续性暴雨过程与西风带、副热带和热带环流系统有密切的联系,是中低纬系统相互作用的结果,并提出了应立足于低纬洋面的长中短期相结合的预报思路^[17~20]。

近年来,孙力(2000,2002,2003)和廉毅(1997,1998)等根据最近一些年的观测资料,对我国中高纬度地区旱涝的天气气候规律、大气环流异常特征^[21,22]和热带地区海气相互作用特别是 ENSO 事件的影响^[23~26]等又作了进一步的研究,他们认为,尽管该地区夏季降水异常有其自身独特的时空分布规律和大尺度环流配置,甚至与热带地区海气相互作用也存在着明显的相关,但能否形成大范围和持续性的旱涝灾害还取决于东亚季风的影响,即亚洲季风水汽输送是一个十分关键的因素。廉毅^[27]和孙力^[28,29]等还进一步分析了东亚季风在我国中高纬地区建立的标准、日期及其主要的环流特征,并研究了东北亚地区夏季 850 hPa 南风异常与东北地区降水的密切关系,提出了东北亚地区夏季南风异常强度指标,探讨了东北亚地区夏季南风异常出现的前冬和前春海温和大气环流异常的前兆信号。

这些研究认为,东亚季风在我国中高纬度地区建立前(季风雨季开始前)该地区有一个水汽和能量的积累过程,这个积累过程不仅与低纬和热带地区水汽的向北输送有关,也与副热带地区的水汽“转运站”相联系,季风雨季的出现则是一个已积累的水汽和能量加以释放的过程,水汽与能量积累的减弱或消失,意味着季风雨季的结束。孙力^[30,31]、刘景涛^[32]和白人海等^[33]在分析 1998 年松花江和嫩江流域洪涝灾害的成因时也指出,1998 年松嫩流域大暴雨过程的出现是在东亚阻塞形势稳定和东北冷涡天气系统长期维持等特定的环流条件下形成的,甚至还与前期 El Niño 及青藏高原多雪等背景有密切关系,是多尺度环流与系统相互作用的结果。

但是,造成大暴雨的关键是由于亚洲季风水汽的输送和辐合,输送到松嫩流域的水汽甚至可以追溯到印度洋并与索马里附近的越赤道气流有关,降水的阶段性和持续性变化还受到低纬和热带地区暖湿大气低频振荡向北传播的调制。

以上研究表明,我国东北地区的暴雨过程有着复杂的气候背景和特定的大气环流异常特征,并且存在着明显的多尺度相互作用关系,所以季风水汽输送及其导致的区域水分循环异常是联系中低纬系统相互作用的主要桥梁和纽带,是实现东亚季风对我国东北地区影响的重要形式和媒介。

然而,有关我国东北地区暴雨过程的季风水汽输送和循环特征的分析工作还非常少,事实上,这样的研究对该地区来说也显得非常重要。因为东北地区暴雨发生的背景与华南、长江流域的暴雨有所不同,华南和长江流域暴雨是发生在水汽充分的西南季风气流中,水汽供应充足,不需要很强的辐合就可出现暴雨,东北地区暴雨是发生在夏季相对较干的大陆气团中,水汽供应并不是经常能够得到满足。另外东亚夏季风对我国东北地区的影响有着其自身的特点,即该地区夏季风的强弱对应着较为特殊的环流配置条件和前期海气相互作用及大尺度环流背景^[26,27],因此,可以预计,这里的季风水汽输送和收支及循环特征与我国其它地区相比也会存在着比较大的差别。

目前,至少有以下一些问题我们还不太清楚,或不完全清楚:

(1) 引发该地区强暴雨过程的水汽源地在哪里,它们是怎样远距离输送和集中的(水汽输送的源汇结构)。

(2) 季风水汽输送对该地区强降水天气系统有何影响。

(3) 水汽输送和收支的变化与东亚夏季风在该地区建立之间有何联系,包括以什么样的标准来衡量东亚夏季风对东北地区的影响、东亚季风的影响范围(夏季风可以到达的北界)、影响的时间和强度应如何界定。

(4) 典型暴雨过程及其发生前后的三维水汽收支特征以及与全球大范围水汽输送异常之间的关联。

(5) 前期东亚季风水汽输送异常及源汇变化对后期我国中高纬度地区旱涝过程的影响。

(6) 该地区水汽输送和收支的气候特征(空间分布及年际和年代际变化)及其与降水变化之间的

关系。

因此,以探讨季风水汽输送和区域水分循环特征的研究作为切入点和突破口来分析我国东北地区暴雨形成的机制,增进人们对中低纬系统相互作用过程和东亚季风对该地区的影响等科学问题的理解和认识,寻找新的预报预测着眼点,从而提高我国东北地区暴雨过程的预报预测水平有着重要的意义。

3 气旋暴雨研究

气旋是造成我国东北地区区域性暴雨的主要系统,按其源地可分为蒙古气旋、华北气旋和江淮气旋 3 类,这些都是影响我国天气的重要天气系统。前两者称为北方气旋,后者称为南方气旋。大范围特大暴雨除台风外,南来气旋影响占第二位。北方气旋一年四季均可发生,尤以春、夏季最多,在气旋发生、发展和移动过程中往往带来复杂的天气变化,产生强天气如暴雨、沙尘暴的几率较高。如果气旋和减弱台风的水汽相结合,成为半热带性质的气旋,则其能量之大、降水之强、范围之广,可称为东北地区最强的降水系统。如 1975 年 7 月 29~31 日特大范围暴雨就是华北气旋和台风水汽共同作用的结果。因此研究中高纬地区尤其是我国东北地区气旋的发生、发展和活动规律对做好它的预报预警,是一个具有重要实际意义的迫切问题。

国际上对气旋暴雨的研究相对较多。如以 Peter 等^[34]为代表的科学组,先后对美国西部沿岸的太平洋温带气旋以及东部的大西洋气旋进行了长时间的观测研究(1979—1988 年,1988—2001 年)。在对太平洋气旋的研究过程中,他们从中尺度一直深入到微观云物理展开了十分细致的研究。在中尺度方面,从动力和结构上对暖锋、暖区、宽冷锋、窄冷锋、锋前冷涌以及锋后雨带等进行详细研究,提出了这些系统之间的相互作用关系,研究了地形对这些雨带的影响。而对大西洋气旋(GALE)的研究主要是针对冬季风暴中的中尺度过程和气旋暴发型发展的物理机制展开,从而提高数值模式对东海岸气旋的预报能力。

早在 1975 年,丁士晟及其暴雨小组对气旋暴雨作了较全面深入的研究,得出气旋暴雨特别是华北气旋暴雨的模式指标及其路径和雨量预报,接着对其特大暴雨的“75.7”过程进行个例分析和动力分析,得出高、低空天气系统的演变及有关物理量对这次暴雨的贡献。郑秀雅等^[12]对东北地区气旋暴雨做了一些统计与降水特征,以及天气系统上的相对

简单分析,指出华北气旋暴雨是影响东北三省气旋暴雨中雨量最大、范围最广及次数最多的降水系统。蒙古气旋暴雨仅次于华北气旋暴雨。影响东北地区气旋及气旋暴雨多集中在 7~8 月的两个月内,且由南向北减少。蒋尚城等^[11]也指出,华北气旋暴雨中“三带”大尺度环流系统共同作用的重要性,特别是热带暖湿气流所提供的动力、热力条件。

赵瑞等^[35]对 1960—1998 年降水日和影响系统进行普查和分类统计,对蒙古气旋区域性暴雨天气进行了分析,确认有 5 次区域性暴雨是由蒙古气旋造成的,并从中找出其预报着眼点:充沛的水汽来源、中层暖平流和西南急流的配合。林明智等^[36]用 1949—1988 年的天气资料对我国北方气旋做了一个天气气候分析统计,分析了我国北方气旋的若干气候特征。姚素香等^[37]根据 1948—2000 年共 53 年的 NCEP/NCAR 逐日海平面气压再分析资料,分析了春季(3、4、5 月)东亚内陆和沿海地区气旋活动频数、气旋移动路径等气候特征及其年际、年代际变化。指出我国东北地区春季各月气旋活动频数没有明显的年代际变化,只有 80 年代以来气旋活动频数的振幅较大,我国东北到俄罗斯远东地区气旋活动路径在 80 年代略偏北。王艳玲等^[38]利用 1948—2002 年 NCEP/NCAR 再分析逐日海平面气压再分析资料以及中国 160 站的降水 and 气温资料,分析了春季北方气旋活动频数和强度的时空变化特征,以及两者与中国降水和气温的相关关系。指出春季北方气旋活动频繁,存在明显的 2 个高值中心,分别位于蒙古国中部和我国东北北部地区。春季北方气旋活动频数和强度均存在明显的年际和年代际变化,这对我国北方地区的降水和气温有一定影响。可以看出这些研究主要集中在北方气旋及其产生的暴雨天气气候学特征分析,对于进入东北的气旋,需要进一步研究其发展加强的机理、研究气旋的中尺度雨带的结构和产生强降水的物理机制。

4 台风暴雨研究

热带气旋是我国主要天气灾害系统之一,也是造成东北地区夏季暴雨的主要天气系统之一,统计表明,每年 4~12 月都有热带气旋登陆中国,年平均 9 个,而且几乎遍及沿海各省。中国每年都遭受台风带来的大风、暴雨、风暴潮等灾害,具有发生频率高、突发性强、影响范围广、成灾强度大等特点,当热带气旋北上时对我国东北地区尤其东北的东南部地区影响巨大,常引发该地区大范围洪涝灾害。虽然

北上的热带气旋为数不多,但是造成的影响和损失是相当严重的。可以说,我国东北地区盛夏季节的暴雨,特别是特大范围暴雨,大多有台风参与,如1975年04号台风、2005年9号台风麦莎。因此,减轻登陆热带气旋造成的洪涝灾害始终是我国气象科学的重要研究领域和难点课题。

20世纪80年代以来,国内对热带气旋登陆北上影响我国北方地区降水进行了一些研究。蒋尚城等^[39]分析了登陆北上减弱的7805号台风在华北所产生的暴雨过程。指出:在中低纬系统相互作用下,导致暴雨的系统具有半热带性质,强调进一步研究半热带天气系统是重要的。Foley等^[40]发现,在冷空气作用下维持的热带气旋,经常造成中高纬度的灾害性天气,大风、特大降水、洪涝等。所以说,热带气旋的变性产生的强降水是研究东北暴雨的一个重要方面。发生在东北的特大范围暴雨也是与热带天气系统和西风带的相互作用有关的。但是由于东北纬度较高,以及东北地区独有的地形等原因,动力和热力过程可能与华北地区存在差异,而对东北地区的热带气旋与西风带系统相互作用引起的强降水过程本身研究比较少。

袁子鹏等^[41]对黄渤海登陆的热带气旋活动和影响我国北方热带的若干统计特征进行了分析,揭示了在黄渤海沿岸登陆的热带气旋的年际和季节分布、强度、移向、移速、源地及变性等气候特征。胡宏达等^[42]总结了北上热带气旋的基本特征,分析了热带气旋对东北地区暴雨影响的规律,指出热带气旋北上的时间、移动路径与西太平洋副热带高压的强弱、位置有着极为密切的联系,有近97%的能产生大暴雨的热带气旋出现在7月中旬至8月下旬这段时间内。王秀萍等^[43]利用1951—2002年热带气旋年鉴资料,对52年来北上热带气旋的月际变化、年际和年代际变化、气候突变、振荡周期等若干气候特征进行了分析,揭示了近52年来北上热带气旋的气候学的一些规律。指出北上热带气旋的月际变化明显,7~9月是北上热带气旋的关键月份,尤其7、8月是高峰期;北上热带气旋的年际变化表现为略有上升的趋势,但没有明显的突变年;近52年,北上热带气旋呈现出明显的年际和年代际变化特征,存在4~6年的年际周期,同时还存在10~12年、20~22年的年代际振荡周期。另外,王达文^[44]对北上热带气旋后期异常路径进行了统计分类和天气形势分析,并进行数值模拟试验及环流形势特征研究,对北上热带气旋后期异常路径的形势特点提出了十分有

意义的观点和认识。郑秀雅等^[12]的统计结果得出造成东北有小雨以上降水台风有4大类9条路径。胡宏达等^[42]进一步指出热带气旋生成后,一般要经过7天以上的时间才有可能影响到东北,并把影响东北地区降水的热带气旋归纳为5条有代表性的路径。

对于登陆热带气旋引发的大风、暴雨、龙卷等强对流天气的预报,在很大程度上依赖于观测手段和资料的收集,由于近年来探测手段的进步和数值模式的发展,人们对强对流的发生、发展物理机制有了更为深入的了解,预报方法从以经验为主转变到强调物理过程为主,并在业务预报中引入了许多新的物理参数。80年代以来,大气探测技术的发展突飞猛进,特别是卫星探测技术的发展,如大气垂直探测AMSU资料给出了大气温、湿层结,GMS红外云图提供的云导风场,卫星微波遥感探测、热带测雨雷达,风廓线仪等稠密、非常规观测资料的获取,对于进一步提高登陆热带气旋的数值模拟研究具有重要意义。非常规观测资料在热带气旋数值模拟研究中的应用,不仅表明卫星、雷达等非常规资料的引入为细致刻画热带气旋暴雨中尺度结构和机理提供了有力依据,而且也为深入研究登陆热带气旋引发强对流的预报提供了重要手段。但是,异常台风的机理研究和预报仍是未解决的难题,热带气旋内部中小尺度结构的探测和分析还较为薄弱,对登陆热带气旋造成的大风、暴雨的有效预报也有待进一步研究、改进。

5 冷涡暴雨研究

我国东北地区处于大兴安岭东侧,高空急流的北面,独特的地形、锋区急流的动力和热力作用使得东北地区上空经常出现冷性涡旋,东北冷涡一年四季都可出现,存在明显的季节变化,集中在夏季,和东北阻塞高压的时间分布同步,常给东北地区夏季带来低温多雨的天气,甚至带来洪涝灾害,如1998年6~8月切断低压与东北低涡频繁发生引发了松花江、嫩江百年不遇的洪灾。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。

事实表明,东亚与北美、欧洲同为世界切断低压的三大频发区。切断低压(cutoff lows)是对流层中高层的闭合系统,由中高纬度基本西风气流中的深

槽向低纬完全分离而成。这些系统移动缓慢,能在局地维持数天,因而能很大程度地影响下垫面的天气状况。在等压面位势高度图上,切断低压表现为具有冷心结构的闭合等值线,它的强度在对流层自上向下逐渐减弱。切断低压下的对流层是不稳定的,在有利的下界面状况下,强对流事件时有发生,并能带来大范围的持续性降水。

东北冷涡目前用的较多的是由郑秀雅等在 1992 年编著的《东北暴雨》中给出的定义^[12]。定义东北冷涡为 500 hPa 天气图上 115 ~ 145°E, 35 ~ 60°N 范围内出现等高线的闭合圈,并有冷中心或冷槽配合,持续 3 天或 3 天以上的低压环流系统,定义出现在 50 ~ 60°N, 40 ~ 50°N, 35° ~ 40°N 的东北冷涡为北涡、中涡、南涡^[10]。然而随着对东北冷涡研究的深入,此定义尚不能满足当前和今后的研究需求,如当满足前两条件,而持续时间只有 2 天或稍短时同样造成暴雨的冷涡系统是否可归纳为东北冷涡;或满足后者条件,而在 500 hPa 没有明显的低涡,只有较强的冷槽,冷涡只在其下层表现明显时,能否划分为东北冷涡。对东北冷涡的定义需进一步量化、细化。

关于冷涡暴雨天气系统的研究,早在 20 世纪 50 年代谢义炳^[45]曾就北美高空冷涡进行过探讨,近年来一些学者对欧洲北美的切断低压从统计到个例均作了深入分析。我国对东北冷涡暴雨的研究在可查询到的文献中可追溯到 1950 年杨纫章的《东北之气候》。陶诗言^[10]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,它常给东北地区、华北北部造成暴雨或雷阵雨。赵思雄等^[46]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。朱乾根等^[47]指出东北冷涡一年四季都可能出现,而以春末、夏初活动最频繁。它的天气特点是造成低温和不稳定性的雷阵雨天气。郑秀雅等^[12]也指出,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,常产生稳定的连续性降水,出现区域性暴雨。

可以说,对东北冷涡暴雨的研究在 20 世纪 80 年代才开始真正起步。总的来说,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^[48,49],我们着重对以上研究做了综述,并适当地、重点说明现阶段研究存在的问题。

5.1 东北冷涡天气气候特征

东北冷涡是非常有地域特色的天气系统,其形成与所处的地理位置,东北地形有很大的关系,它是形成于东北地区或移入东北地区加强的高空冷性涡旋。雷雨顺等^[50]指出雷暴出现在冷涡东南部的机会比西部多,并给出了冷涡内外深厚对流区和对流活动抑制区分布概念模型。斯公望^[51]指出高空冷涡在形成降水上有很复杂的形式,在冷涡云系附近或后部都有可能不同程度的出现对流云的发展,尤其是冷涡后部的晴空区,常有高空冷平流与低空暖平流叠加,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。孙力等^[52]的统计分析表明,东北冷涡具有较强的准静止性,特别是在夏季,它的持续性活动特征非常明显,是夏季影响东北地区的一个十分重要的天气系统。李宗秀等^[53]通过对典型的 5 月和 6 ~ 8 月东亚东北冷涡活动多寡年的北半球 500 hPa 高度距平场进行合成、频次累计和相关统计,以揭示东亚东北冷涡持续性活动的月、季、年际间(半年)尺度变化的特征与北半球大气环流异常和与太平洋涛动(NPO)相互关联的前期强信号场,发现了冬季 NPO 对 6 ~ 8 月东亚东北冷涡持续性活动的隔季相关事实。研究认为东亚地区中高纬度 5 月和 6 ~ 8 月东北冷涡持续性活动是北半球大气环流异常持续性或调整的重要表现。

事实上,东北冷涡总是倾向于出现在 500 hPa 位势高度,10 ~ 20 天振荡 40 ~ 55°N 平均经度时间剖面上的低频低压区,而在低频高压区则一般没有冷涡活动,即东北冷涡在一定程度上具有准双周振荡的特征,这种振荡是使冷涡持续性活动的一个重要因素,而正是其持续性活动导致了强降水的连续发生^[12]。孙力^[52]分析了东亚大气 10 ~ 20 天低频振荡及瞬变扰动对东北冷涡的持续性活动的影响。分析指出:在时间连续的低频天气图上,东北地区有低频气旋和反气旋周期性循环出现,冷涡一半倾向于在低频气旋中心附近生成和发展,并随低频气旋移动而移动,在低频反气旋控制时,其周围一般很少有冷涡活动;说明东亚大气准双周振荡是导致东北冷涡持续活动的一个重要原因。

孙力^[54]指出:东北冷涡的空间分布及其活动路径在不同季节表现出较大的差异。指出东北冷涡出现共有 2 个密集区,初春(4 月份)的冷涡密集区主要出现在东北平原的北部,大约位于 52°N,且呈纬向分布,另一个主要的密集区位于东北平原的中部和西北日本海沿岸。冷涡的活动路径主要有 3 条,

即西北路径、偏西路径和超极地路径。郑秀雅等^[12]得到的结果和上述较一致。同时指出:冷涡的季节变化还和东亚阻塞高压的季节变化相联系。东北冷涡和东亚阻塞高压同起同落的变化是大型环流扰动的必然结果。

5.2 东亚阻塞高压对东北冷涡的影响

研究指出,东北冷涡的发生发展多数受东亚地区阻塞高压的影响。孙力^[52]统计得出:大约有77%的东北冷涡与东亚地区阻塞高压的发展变化有关,并且这一类冷涡的持续时间也比一般冷涡的生命周期平均长2.1天。同时指出,无论是春、夏还是秋季,东北冷涡的发生频数一般主要与贝加尔湖以东地区的高度场呈正相关关系。说明该地区有高压脊异常发展而形成稳定的阻塞形势时,我国东北地区容易有冷涡形成。东亚阻高对东北冷涡的影响随着季节变化表现为冷涡出现位置的不同,主要体现在对中涡的影响上。随着季节的不同,影响中涡的东亚阻高其位置存在着明显的东西向振荡。春季东亚阻高位置偏东,主要位于鄂霍茨克海附近,进入夏季逐渐西移到了雅库茨克一带,入秋后又缓慢东移。

李宗秀等^[53]通过对1956—1997年5月和6~8月东北冷涡活动天数与500 hPa高度距平场相关分析进一步得出,冷涡活动多的年份,东亚50°N以北的贝加尔湖到鄂霍茨克海为宽广的正距平区,显然有阻塞形势相对应,50°N以南的宽广地区与北太平洋区域连成近半球尺度的负距平带。冷涡少的年份,距平场分布正相反。张延治等^[55]分析10年(1980—1989年)东北冷涡暴雨500 hPa冷涡前后阻塞高压的分布特征,划分为3种类型:西阻型、东阻型及双阻型。郑秀雅^[12]将冷涡天气归纳为几点,主要表现为有利于冷涡一直维持的环流背景存在,如暖性阻高稳定在雅库茨克附近,或在印度和青藏高原及我国东南低纬有暖流源源不断向暖性阻高和东北地区东部输送,使阻高稳定,低涡维持。暴雨大多落在槽前、横切变南缘地面冷锋后部或暖锋附近,中低空急流汇合处。

5.3 东亚大槽对东北冷涡的影响

东亚大槽槽前和槽的南部不断向下游输送冷空气,并不断有低涡发展,使东北冷涡持续并得到加强。孙力等^[56]利用1951—2000年共50年的北半球500 hPa月平均高度距平场资料和奇异值分解技术,重点对东亚地区季节间大气环流异常的相互关系进行了探讨,指出:当前冬和前春北半球东亚大槽偏强时,中高纬度盛行径向环流,以及低纬和热带地

区高度正距平明显时,则对应于夏季东亚地区西太平洋副高和鄂霍茨克海阻高强度偏强,位置偏南,贝加尔湖阻高强度也偏强,位置偏西的大尺度环流形式出现,说明有与阻高伴随而生的低涡不断生成,影响我国的东北冷涡强度加强,由于副高较强,使得东北冷涡位置偏北,易形成中涡和北涡。

5.4 西太平洋副热带高压对东北冷涡的影响

孙力^[52]研究发现,西太平洋副热带高压与东北冷涡无论是何季节两者都有着十分密切的相关。副热带高压对东北冷涡的影响主要表现在副高出现的位置不同,东北冷涡出现的位置也不同。一般来说,副高偏南时,则形成中涡的可能性较大,而副高偏北时,则北涡出现的机会增多。陈力强等^[57]在对东北冷涡诱发的一次MCS结构特征进行数值模拟中指出随着副高外围低压向东北移动,副高与大陆高压脊逐渐合并加强,呈纬向带状分布,随着冷性低压带分裂冷空气的南下,斜压不稳定使西风锋区不端激发波动,提供了优越的动力和中层冷空气条件,进而产生强对流天气。

5.5 冷涡暴雨的动力条件诊断和数值模拟研究

关于位涡动力诊断分析,国内外许多学者做过较多的研究。Sanders等^[58]利用准地转Q矢量对垂直运动进行了分析,得到了通过Q矢量表示的准地转 ω 简化方程。陈受钧^[59]运用Hoskins(1978)Q矢量分析研究了夏季我国东北冷涡的中尺度对流系统,表明Q矢量即使对较弱的斜压强迫也能较好的表现出来,结合稳定性、湿度、低层风扩散区的分析,可以为区域短期预报提供较大的帮助。另外,国内许多学者做过较多类似诊断分析^[60~64],为进一步做好东北冷涡暴雨预报提供了有价值的信息。何金海等^[65]利用1951—2004年全国160测站月平均降水资料和ERA-40再分析资料,对近50多年东北地区夏季降水、东北冷涡与前期北半球环流模和海温的关系进行了统计分析,定义了一个夏季(6~8)东北冷涡强度指数(NECVI),结果表明该指数能够较好的表征东北低涡的气候效应,进而为东北地区夏季降水异常的预测提供参考依据。

一直以来,由于受探测资料分辨率及研究工具的限制,对东北冷涡的研究也大多限制在对东北冷涡的气候特征、天气尺度特征、中尺度系统发生发展的天气尺度背景及诊断分析等方面,近年来数值模式的快速发展,使通过中尺度数值模拟研究东北冷涡中尺度对流系统的结构特征、积云过程等成为可能。Sakamoto^[66]利用中尺度模式MM5和ECMWF

资料,对 1999 年 7~8 月高层冷涡(UCL)进行数值模拟,并对西北太平洋的切断低涡发展和减弱过程做了较详细研究,分析了其高层冷涡的垂直速度结构。分析指出,干绝热动力学能解释高层冷涡的垂直运动结构,在 UCL 的锋前有上升运动,对流云的潜热释放对 UCL 冷中心的减弱起了重要的作用。Qi 等^[67]利用 HIRES (High Resolution model) 对 1997 年 8 月 31 至 9 月 2 日南澳大利亚切断低涡进行了数值模拟。东北冷涡南部锋区斜压扰动及有利的潜在不稳定层结为中尺度对流系统(MCS)的产生提供了环境条件。陈受钧等^[57]应用 MM5 模式对 2002 年 7 月 12 日东北冷涡诱发的强风暴进行了数值模拟,较成功的模拟出了 MCS 强对流风暴结构。姜学恭等^[68]利用 MM5 非静力模式成功对 1998 年 8 月 8~9 日一次东北冷涡暴雨过程进行了数值模拟,揭示了此次过程的一些中尺度特征。

可以看出,过去较多的研究是用东北冷涡的时空分布特征、环流季节变化来对东北冷涡进行诊断分析,并由此去研究东北冷涡形成的基本因素,但是具备了基本条件未必就产生东北冷涡,必须还要有一些其他的充分条件才能完善东北冷涡的形成、维持机制,这就需要对东北冷涡有更加全面深入的研究,尤其对东北冷涡的发生、发展、维持机制、三维结构演变等本质问题的解决。东北冷涡与北上的热带系统相结合时可激发强暴雨过程,其诱发对流的天气是预报的重点和难点,其落区、强度很难把握。所以深入探讨东北冷涡的暴雨机制是研究我国东北地区暴雨的另一切入点 and 突破口,对东北冷涡的系统研究将有利于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。

6 讨 论

由以上的简短回顾可以看出,过去的工作大多是围绕着东北暴雨形成的大尺度、天气尺度的天气气候统计、个例分析进行的。过去的工作对造成东北暴雨的天气系统进行了归类,对于不同强度的暴雨,主要是由不同的天气系统造成的。行星尺度和天气尺度系统为暴雨发生提供了有利的环境,但它们不是直接造成暴雨的中尺度系统。受到当时观测资料和数值模式条件的限制,过去对东北暴雨过程的中尺度分析主要是限于个别天气学分析,由于当时的地面观测站相对比较稀,即便是做稍微细致的中尺度分析也是困难重重,更不用说进行中尺度系统的三维结构研究。白人海等^[69]在 1995 年 6 月 23

~ 25 日组织东北区三省一市全部地面观测站和探空站对东北冷涡进行了一次加密观测,并对其进行了中尺度分析,即便这样资料还是很有限,从而限制了进一步的分析研究。近些年虽然有了卫星、雷达等遥感资料,对东北中尺度对流系统(MCS)的研究也基本限于简单的天气分析,几乎没有涉及到其形成的热力动力过程。这同社会经济发展到今天对暴雨定时、定点、定量预报的需求相差是非常大的。

目前,至少有以下一些问题我们还不太清楚,或不完全清楚:

(1) 引发该地区强暴雨过程的水汽源地在哪里? 它们是怎样远距离输送和集中的(水汽输送的源汇结构);季风水汽输送对该地区强降水天气系统有何影响?

(2) 水汽输送和收支的变化与东亚夏季风在该地区建立(包括以什么样的标准来衡量东亚夏季风对东北地区的影响、东亚季风的影响范围(夏季风可以到达的北界)、影响的时间和强度应如何界定)之间有何联系? 典型暴雨过程及其发生前后的三维水汽收支特征以及与全球大范围水汽输送异常之间的关联?

(3) 造成暴雨洪涝的气候因子有哪些以及它们之间的相互关系? 引发强暴雨的大尺度天气系统和环流短期异常和变化规律是什么?

(4) 暴雨中尺度系统发生、发展的机理和物理过程是什么?

(5) 中高纬和中低纬系统是通过什么媒介相互作用的? 东北暴雨与我国其它地方的暴雨(如长江流域和华南)主要区别和相互联系?

(6) 影响东北地区的登陆台风发展演变有何规律? 如何提高对登陆台风转向的预报?

(7) 东北冷涡的内部结构特征及发生、发展、演变的机理等问题。

当前,对东北暴雨预报尤其是东北冷涡暴雨的预报和台风登陆后的暴雨强度及分布的预报仍很困难。这是由于东北暴雨的研究涉及到各种不同纬度、不同尺度的环流系统,以及它们之间的相互作用,这使得研究的难度很大。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,尤其目前东北地区气象综合观测系统的建立,已经形成了对东北地区三站(国家气候观象台、国家气象观测站、区域气象观测站)四网(国家气象观测网、国家天气观测网、国家专业气象观测网、区域气象观测网)的立体观测网,我们有条件有能力对东

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,这就需要一个多单位多部门分工协作具有战略意义的科学研究。因此,对东北暴雨的研究还需要进行长期的艰苦工作。

参考文献(References):

- [1] Sun Li, An Gang. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the Songhuajiang-Nenjiang river basin in the summer of 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 25(3):342-354. [孙力,安刚. 1998年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析[J]. 大气科学, 2001, 25(3):342-354.]
- [2] Huang Hong, Zhang Ming. Diagnosis and analysis on rainstorm course in northeast of China [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2004, 5(5):33-37. [黄泓,张铭. 一次东北暴雨的诊断分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2004, 5(5):33-37.]
- [3] Zhang Jiquan, Zhang Hui, Han Junshan. A study on the regularity of temporal and spatial distribution about flood/water logging disasters in northeast district from the built up of China [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 38(1):126-130. [张继权,张会,韩俊山. 东北地区建国以来洪涝灾害时空分布规律研究[J]. 东北师范大学报:自然科学版, 2006, 38(1):126-130.]
- [4] Liu Shi, Zhu Qiwen. An analysis on the influence factor on the abnormal drought and waterlogged over Jilin province in 1995 [J]. *Jilin Meteorological Quarterly*, 1996, (1):11-13. [刘实,朱其文. 1995年吉林省异常旱涝的影响因子分析[J]. 吉林气象, 1996, (1):11-13.]
- [5] Xu Xiuhong, Wang Chengwei, Shi Dingpu, et al. The features of meso-scale rain clusters over Nenjiang and Songhuajiang in 1998 [J]. *Meteorological Monthly*, 2000, 26(10):35-40. [许秀红,王承伟,石定扑,等. 1998年盛夏嫩江、松花江流域暴雨过程中尺度雨团特征[J]. 气象, 2000, 26(10):35-40.]
- [6] Ding Shicheng. The statistical analysis for heavy rain of Jilin province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1983, 7(4):432-437. [丁士晟. 吉林省大暴雨的统计分析[J]. 大气科学, 1983, 7(4):432-437.]
- [7] Lu Juan, Meng Ying, Pan Jing, et al. An Analysis on the extremity precipitation in Liaoning during the last forty-two years [J]. *Liaoning Meteorological Quarterly*, 2004, (4):8-9. [卢娟,孟莹,潘静,等. 近42年辽宁极端降水事件分析[J]. 辽宁气象, 2004, (4):8-9.]
- [8] Jing Xueyi, Fang Lijuan, Guo Jialin, et al. Characteristics and synoptics classification of rainstorm in Heilongjiang province [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(1):54-58. [景学义,方丽娟,郭家林,等. 黑龙江省暴雨的特征及天气学分类[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1):54-58.]
- [9] Liu Shi. The difference of climate change of the summer precipitation in northeast district of China [J]. *Jilin Meteorological Quarterly*, 2000, (3):12-14. [刘实. 东北地区夏季降水的气候变化区别[J]. 吉林气象, 2000, (3):12-14.]
- [10] Tao Shiyan. Chinese Rainstorm [M]. Beijing: Science Press, 1980:255. [陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社, 1980:225.]
- [11] Jiang Shangcheng. The Corpus of Weather in North of China [M]. Beijing: Peking University Press, 1983:1-10. [蒋尚城. 北方天气文集[M]. 北京:北京大学出版社, 1983:1-10.]
- [12] Zheng Xiuya, Zhang Yanzhi, Bai Renhai. Rainstorm in North-east of China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992:19-43. [郑秀雅,张延治,白人海. 东北暴雨[M]. 北京:气象出版社, 1992:19-43.]
- [13] Sun Li, An Gang, Ding Li. The characteristics of summer drought and flood in northeast area of China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3):311-317. [孙力,安刚,丁立. 中国东北地区夏季旱涝的分析研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3):311-317.]
- [14] Sun Changping, Wang Nianzhong. Precipitation disaster in north-east of China [J]. *Water Resource & Hydropower of Northeast China*, 1999, (1):28. [孙长平,王念忠. 东北地区的灾害性降水[J]. 东北水利水电, 1999, (1):28.]
- [15] Xie Yibing, Zhang Tan. The Corpus of Rainstorm [M]. Changchun: Jilin People's Press, 1980:22-44. [谢义炳,张谭. 暴雨文集[M]. 长春:吉林人民出版社, 1980:22-44.]
- [16] Xie Yibing, Zhang Tan, Jiang Shangcheng. The viewpoint and thought on the intermediate and short term forecast [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1979, 2(1):2-5. [谢义炳,张谭,蒋尚城. 暴雨中短期预报的观点和思路[J]. 气象科技, 1979, 2(1):2-5.]
- [17] Editor Group. The Rainstorm of North China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992:55-57. [《华北暴雨》编写组. 华北暴雨[M]. 北京:气象出版社, 1992:55-57.]
- [18] Sun Li, An Gang, Ding Li, et al. A climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in northeast China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(1):70-82. [孙力,安刚,丁立,等. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J]. 气象学报, 2000, 58(1):70-82.]
- [19] Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(6):704-714. [孙力,安刚,廉毅,等. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征[J]. 气象学报, 2000, 58(6):704-714.]
- [20] Lian Yi, An Gang, Wang Qi, et al. Variations of temperature and precipitation during the last forty years in Jilin province [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(2):197-203. [廉毅,安刚,王琪,等. 吉林省近40年来气温和降水的变化[J]. 应用气象学报, 1997, 8(2):197-203.]
- [21] Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. The unusual characteristics of general circulation in drought and water logging years of northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(1):102-113. [孙力,安刚,廉毅,等. 中国东北地区夏季旱涝的大气环流异常特征[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1):102-113.]

- [22] Sun Li, An Gang. A study of relationships between spring/winter and summer general circulation anomalies [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(6):650-661. [孙力, 安刚. 东亚地区春季与夏季大气环流异常之间相互关系的研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6):650-661.]
- [23] Sun Li, An Gang. The effect of north Pacific sea surface temperature anomaly on the summer precipitation in northeast China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 61(3):346-353. [孙力, 安刚. 北太平洋海温异常对中国东北地区旱涝的影响[J]. 气象学报, 2000, 61(3):346-353.]
- [24] Sun Li, An Gang, Tang Xiaoling. Characteristics of outgoing long wave radiation related to flood and drought over northeast China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11(2):228-235. [孙力, 安刚, 唐晓玲. 中国东北地区旱涝的 OLR 特征分析[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2):228-235.]
- [25] Lian Yi, An Gang. The relationship among east Asia summer monsoon El Niño and low temperature in Songliao Plains North East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 56(6):724-735. [廉毅, 安刚. 东亚季风 El Niño 与中国松辽平原夏季低温关系初探[J]. 气象学报, 2003, 56(6):724-735.]
- [26] Sun Li, Shen Baizhu, An Gang. A study on the Relationship between the summer precipitation in northeast China and the global Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) in preceding seasons [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, 9(2):325-332.
- [27] Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting, et al. The study of the onset criterion and the date of East Asian summer monsoon in northeast China and its main characteristic analysis [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(5):548-559. [廉毅, 沈柏竹, 高枳亭, 等. 东亚夏季风在中国东北地区建立的标准、日期及其主要特征[J]. 气象学报, 2003, 61(5):548-559.]
- [28] Sun Li, An Gang, Tang Xiaoling. Relationship between the northeast Asian summer south wind anomaly and the precipitation in northeast China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(3):425-434. [孙力, 安刚, 唐晓玲. 东亚地区夏季 850hPa 南风异常与东北旱涝的关系[J]. 大气科学, 2003, 27(3):425-434.]
- [29] Sun Li, An Gang. Relationship between the northeast Asian summer south wind anomaly and the precipitation in northeast China [J]. *China Journal of Atmospheric Science*, 2003, 27(2):186-196.
- [30] Sun Li, An Gang, Gao Zongting, et al. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the northeast cold vortex over Songhuajiang-Nenjiang river basin in summer of 1998 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2002, 13(2):156-162. [孙力, 安刚, 高枳亭, 等. 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, 2002, 13(2):156-162.]
- [31] Sun Li, An Gang, Sheng Baizhu. An analysis of mesoscale convective system under northeast cold vortex on Nenjiang River on 9 Aug 1998 [J]. *Rainstorm and Disaster*, 2000, (1):99-110. [孙力, 安刚, 沈柏竹. “98.8.9”嫩江流域东北冷涡暴雨过程的中尺度对流系统分析[J]. 暴雨·灾害, 2000, (1):99-110.]
- [32] Liu Jingtao, Meng Yali, Kang Ling, et al. An analysis of Macro scale circulation characteristics and synoptic scale system with the storm rainfall occurring in the Nenjiang-Songhuajiang river basin during 1998 flood period [J]. *Meteorological Monthly*, 2000, 26(2):20-24. [刘景涛, 孟亚里, 康玲, 等. 1998 年汛期嫩江松花江流域大暴雨成因分析[J]. 气象, 2000, 26(2):20-24.]
- [33] Bai Renhai, Chen Liting, Sun Yonggang. The Cause of Formation and Forecast Application Research on the Heavy Rainstorm over Songhuajiang and Nenjiang River in 1998 [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001. [白人海, 陈立亭, 孙永罡. 1998 年松花江、嫩江流域特大暴雨的成因及预报应用研究[M]. 北京:气象出版社, 2001.]
- [34] Hobbs P, Peter V, Matejka Thomas, et al. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part V: The substructure of narrow cold-frontal rain bands [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, 39(2):280-295.
- [35] Zhao Rui, Wu Xianjun. A analysis on the district rainstorm of cyclone in Mongolia [J]. *Jilin Meteorology*, 2003, (4):10-12. [赵瑞, 吴宪军. 蒙古气旋区域性暴雨分析[J]. 吉林气象, 2003, (4):10-12.]
- [36] Lin Mingzhi, Yang Keming. Climate analysis of the cyclone in North China [J]. *Meteorological Monthly*, 1992, 18(5):20-26. [林明智, 杨克明. 我国北方气旋的天气气候分析[J]. 气象, 1992, 18(5):20-26.]
- [37] Yao Suxiang, Zhang Yaocun, Zhou Tianjun. Climatic characteristics of extra tropical cyclone frequency and its variations over east Asia during recent 50 years in spring [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(3):317-323. [姚素香, 张耀存, 周天军. 近 50 年春季东亚温带气旋活动频数的气候特征及其变化[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3):317-323.]
- [38] Wang Yanling, Guo Pinwen. Climatic characteristics of northern cyclone activity in spring and their relationship to rainfall and temperature in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(3):391-397. [王艳玲, 郭品文. 春季北方气旋活动的气候特征及与气温和降水的关系[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3):391-397.]
- [39] Jiang Shangcheng, Zhang Tan, Zhou Mingsheng, et al. The hard rainstorms in north China induced by a landed northward moving and decaying Typhoon—Hard rainstorms of Semi-Tropical systems [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1981, (1):243-249. [蒋尚城, 张谭, 周鸣盛, 等. 登陆北上减弱的台风所导致的暴雨——半热带系统暴雨[J]. 气象学报, 1981, (1):243-249.]
- [40] Foley G R, Hanstrum B N. The capture of tropical cyclones by cold fronts off the west coast of Australia [J]. *Weather and Forecasting*, 1994, 9(4):577-592.
- [41] Yuan Zipeng, Zhang Lixiang. Analysis of climatic characteristics on activities of tropical cyclones landing from the yellow sea or Bohai Sea [J]. *Meteorological Monthly*, 2005, (6):39-42. [袁子鹏, 张立详. 黄渤海登陆热带气旋活动的统计分析[J]. 气象, 2005, (6):39-42.]
- [42] Hu Hongda, You Xiaomin, Chen Lifang. An analysis on north-east rainstorm caused by the north-forward tropical cyclone [J].

- Water Resource & Hydropower of Northeast China*, 1997, 14(1): 1-5. [胡宏达, 尤晓敏, 陈丽芳. 北上热带气旋对东北地区暴雨洪水的影响分析[J]. 东北水利水电, 1997, 14(1): 1-5.]
- [43] Wang Xiuping, Liang Junli. Some climatic features of tropical cyclones influencing northern China for recent 52 years[J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(10): 76-80. [王秀萍, 梁军利. 近52年北上热带气旋的若干气候特征[J]. 气象, 2006, 32(10): 76-80.]
- [44] Wang Dawen. Analysis on the abnormal route of the north-forward tropical cyclone [J]. *Liaoning Meteorological Quarterly*, 2001, (4): 1-8. [王达文. 北上热带气旋后期异常路径研究[J]. 辽宁气象, 2001, (4): 1-8.]
- [45] Hsieh Yiping. An investigation of a selected cold vortex over north America[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1949, 6: 401-410.
- [46] Zhao Sixiong, Liu Suhong, Liu Mingyang. Mesoscale analysis on the summer heavy convective weather caused by cold vortex in Beijing [C] // The Collective Journal of Chinese Academy of Sciences (No. 9). Beijing: Science Press, 1980. [赵思雄, 刘苏红, 刘名扬. 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, 1980.]
- [47] Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Principles and Methods in Synoptic Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1981: 186-187. [朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1981: 186-187.]
- [48] Jin Weifu, Liu Dunxun. Analysis on the digitized radar echoes and forecast of hail in association with cold vortex [J]. *Meteorological Monthly*, 1997, 23(11): 46-51. [金伟福, 刘敦训. 冷涡条件下雹云的雷达回波分析及冰雹预报[J]. 气象, 1997, 23(11): 46-51.]
- [49] Sun Li, Wang Qi, Tang Xiaoling. A composite diagnostic analysis of cold vortex of storm-rainfall and non-storm rainfall types [J]. *Meteorological Monthly*, 1995, 21(3): 7-10. [孙力, 王琪, 唐晓玲. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析[J]. 气象, 1995, 21(3): 7-10.]
- [50] Lei Yushun, Wu Baojun, Wu Zhenghua. Hailstone Generality [M]. Beijing: Science Press, 1978. [雷雨顺, 吴宝俊, 吴正华. 冰雹概论[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [51] Si Gongwang. Rainstorm and Heavy Convective System [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1989. [斯公望. 暴雨和强对流系统[M]. 北京: 气象出版社, 1989.]
- [52] Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi, et al. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5(3): 297-303. [孙力, 郑秀雅, 王琪, 等. 东北冷涡的时空分布特征及其东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 297-303.]
- [53] Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. Analyses of the northern Hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(3): 361-372. [刘宗秀, 廉毅, 高枏亭, 等. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500hPa 环流特征分析[J]. 大气科学, 2002, 26(3): 361-372.]
- [54] Sun Li. A study of the persistence activity of northeast cold vortex in China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, 21(3): 297-307. [孙力. 东北冷涡持续活动的分析研究[J]. 大气科学, 1997, 21(3): 297-307.]
- [55] Zhang Yanzhi, Li Shouzhi. Analysis of the cause of northeast cold vortex rainstorm [J]. *Liaoning Meteorological Quarterly*, 1996, (2): 9-11. [张延治, 李守智. 东北冷涡暴雨的成因分析[J]. 辽宁气象, 1996, (2): 9-11.]
- [56] Sun Li, An Gang. A study of relationships between spring/winter and summer general circulation anomalies [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(6): 650-661. [孙力, 安刚. 东亚地区春冬季与夏季大气环流异常相互关系的研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 650-661.]
- [57] Chen Liqiang, Chen Shoujun, Zhou Xiaoshan, et al. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(2): 173-183. [陈力强, 陈受钧, 周小珊, 等. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟[J]. 气象学报, 2005, 63(2): 173-183.]
- [58] Sanders Frederick, Hoskins Brian J. An easy method for estimation of Q-Vectors from weather maps [J]. *Weather and Forecasting*, 1989, 5: 346-353.
- [59] Chen Shoujun, Barnes Stanley L. Omega diagnosis of a cold vortex with severe convection [J]. *Weather and Forecasting*, 1988, 3: 296-303.
- [60] Sun Li, Wang Xiuqing, Wu Jilie. A diagnostic study of a MCC with severe rain over northeast China in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1992, 3(2): 157-164. [孙力, 汪秀清, 吴基烈. 东北夏季副高后部 MCC 暴雨的诊断分析[J]. 应用气象学报, 1992, 3(2): 157-164.]
- [61] Chen Yanqiu, Yu Zhihao. A dynamical diagnostic model of northeast cold vortex and its application [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2003, 23(4): 446-451. [陈艳秋, 余志豪. 东北冷涡的位涡动力诊断模型及应用[J]. 气象科学, 2003, 23(4): 446-451.]
- [62] Mao Xianmin, Qu Xiaobo. Energetics analysis of a cold vortex in northeast China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(2): 230-238. [毛贤敏, 曲晓波. 东北冷涡过程的能量学分析[J]. 气象学报, 1997, 55(2): 230-238.]
- [63] Sun Yonggang, Yu Zhendong, Wang Mingjie, et al. The Q diagnosis analysis of Northeast cold vortex [J]. *Heilongjiang Meteorology*, 1997, 3: 8-14. [孙永罡, 于振东, 王明洁, 等. 东北冷涡的 Q 矢量诊断分析[J]. 黑龙江气象, 1997, 3: 8-14.]
- [64] Wang Mingjie, Sun Yonggang, Yu Zhendong, et al. Diagnosis of the vortex income and kinetic energy during strengthen and weaken process of northeast cold vortex [J]. *Heilongjiang Meteorology*, 1998, 1: 12-16. [王明洁, 孙永罡, 于振东, 等. 东北冷涡加强减弱过程的涡度收支和动能诊断[J]. 黑龙江气象, 1998, 1: 12-16.]
- [65] He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. Relationships among the northern hemisphere annual mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(1): 1-5. [何金海, 吴志伟, 祁莉,

- 等. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析 [J]. 气象与环境学报, 2006, 22(1):1-5.]
- [66] Kei Sakamoto. Cut off and weakening processes of an upper cold low [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2005, 83: 817-834.
- [67] Qi L, Wang Y, Leslie L M. Numerical Simulation of a cut-off low over Southern Australia [J]. *Meteorological and Atmospheric Physics*, 2000, 74(1/4):103-115.
- [68] Jiang Xuegong, Sun Yonggang, Shen Jianguo. A numerical simulation and contrast test on a Northeastern vortex rainstorm [J]. *Meteorological Monthly*, 2001, 27(1):25-30. [姜学恭, 孙永刚, 沈建国. 一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验 [J]. 气象, 2001, 27(1):25-30.]
- [69] Bai Renhai. An analysis about intensive observational fact of the cold vortex over northeast China [J]. *Heilongjiang Meteorology*, 1997, 4:1-3. [白人海. 东北冷涡加密观测事实的分析 [J]. 黑龙江气象, 1997, 4:1-3.]

Advances in the Study of Rainstorm in Northeast China

WANG Dong-hai¹, ZHONG Shui-xin¹, LIU Ying¹, LI Jun²,
HU Kai-xi², YANG Shuai², ZHANG Chun-xi³, SUN Li⁴, GAO Zong-ting⁴

- (1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
3. *Department of Atmospheric Sciences, Beijing University, Beijing 100871, China;*
4. *Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China*)

Abstract: A Systemic study of the rainstorm in Northeast China will improve the understanding of severe weather in Northeast China, and will also enhance the entire research on the rainstorm in China. A summary of recent achievements of the rainstorm research is briefly depicted. A basic review of several major weather systems which cause the rainstorm in Northeast China such as cyclone, typhoon, cold vortex is made. In particular, the cold vortex and the associated rainstorm are mainly reviewed. Some problems remaining to be resolved are pointed out as follows: the intensity, distribution and movement of the typhoon which causes the rainstorm in Northeast China; the inside structure, the physical mechanisms of occurrence and development of the Northeast China cold vortex in China; and the structure features of mesoscale convective systems associated to the Northeast China cold vortex and their relationship with rainstorm and the vapor sources causing heavy rainstorm. To solve the above-mentioned problems, it is necessary to conduct more and more observational analysis and modeling studies by using long-term high-resolution observational data and long-term remote sensing data (*e. g.*, satellite and radar data) in the future.

Key words: Northeast China rainstorm; Northeast China cold vortex; Cyclone rainstorm; Typhoon rainstorm.