

孟庆涛, 孙建华, 乔枫雪. 2009. 20世纪90年代以来东北暴雨过程特征分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 596–612. Meng Qingtao, Sun Jianhua, Qiao Fengxue. 2009. Characteristics of heavy rainfall in Northeast China since the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 596–612.

20世纪90年代以来东北暴雨过程特征分析

孟庆涛^{1,2} 孙建华¹ 乔枫雪¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 使用1990~2005年全国730站日降水资料和NCEP格点分析资料对1990~2005年东北地区大暴雨过程进行了分类研究, 探讨21世纪前后夏季东北暴雨的主要特征。按照东北地区日降雨量大于50 mm的站点数不少于5个的标准, 统计出1990~2005年东北地区的69个暴雨个例(共90天)。在统计的基础上, 进一步对造成大范围暴雨过程的天气形势进行分类研究。考虑阻塞高压、热带、副热带系统和西风带之间的相互关系, 将暴雨过程的主要影响系统大致分为6类: (1) 台风与西风带系统(西风槽、东北低涡)的远距离相互作用(20个, 28.9%); (2) 登陆台风(或南来低涡)北上与西风带系统(西风槽、东北低涡)相互作用(16个, 23.2%); (3) 台风直接暴雨(1个, 1.5%); (4) 低槽冷锋暴雨(16个, 23.2%); (5) 低空切变型暴雨(2个, 2.9%); (6) 东北低涡暴雨(14个, 20.3%)。在所有个例中与台风有关的共有37个, 超过一半, 占总数53.6%。台风的远距离水汽输送或登陆台风北上与西风带系统相互作用是东北地区产生大暴雨或持续性大暴雨的重要环流条件。此外, 东北低涡和西风槽前系统造成暴雨个例也比较多, 也是东北地区大范围暴雨的重要影响系统, 低槽冷锋暴雨和东北低涡暴雨也各分为4小类。低空切变暴雨的切变线一般在低层较为明显。上述分析表明, 夏季东北地区暴雨过程种类繁多, 情况较为复杂, 且进入新世纪以来该区降雨过程较为活跃, 值得深入研究。

关键词 东北暴雨 东北低涡 台风 西风槽 低槽冷锋暴雨 切变

文章编号 1006-9585 (2009) 06-0596-17 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

Characteristics of Heavy Rainfall in Northeast China since the 1990s

MENG Qingtao^{1,2}, SUN Jianhua¹, and QIAO Fengxue¹

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract The heavy rainfall cases in Northeast China between 1990 and 2005 are classified by utilizing the daily precipitation data at 730 stations in China and NCEP grid reanalysis data from 1990 to 2005. According to the criteria that in Northeast China there are more than five stations with daily precipitation amount more than 50 mm in 24 hours, 69 heavy rainfall cases (totally 90 days) in Northeast China are selected between 1990 and 2005. Based on the statistics, the synoptic systems and large-scale circulation related with the heavy rainfall cases are studied further. Considering the interaction among blocking high, tropical and subtropical systems, and westerlies, the main impact systems for the heavy rainfall cases are approximately classified into six types: (1) The remote interaction

收稿日期 2008-11-16 收到, 2009-08-13 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程项目 KZCX2-YW-Q03-3 和公益性行业(气象)科研专项经费 GYHY200906004

作者简介 孟庆涛, 男, 1986年出生, 硕士研究生, 主要从中尺度天气分析和数值模拟研究。E-mail: skystar65@gmail.com

between typhoon and westerly systems (westerlies troughs, vortexes in Northeast China) (20 cases, 28.9%); (2) the direct interaction between the northward landing typhoons (northward propagating vortexes) and westerlies systems (westerlies troughs, vortexes in Northeast China) (16 cases, 23.2%); (3) the heavy rainfall caused directly by the typhoon (one case, 1.5%); (4) the heavy rainfall associated with low trough and cold front (16 cases, 23.2%); (5) the heavy rainfall caused by the low level shear line (two cases, 2.9%); (6) the heavy rainfall caused by vortexes in Northeast China (14 cases, 20.3%). 37 cases, more than half of the heavy rainfall cases, are associated with typhoon. The typhoon's long distance moisture transportation or the interaction between northward moving typhoons after landing and westerlies systems are still important circulation conditions for the occurrence or persistence of the heavy rainfall in Northeast China. Furthermore, there are also plenty of heavy rainfall cases caused by vortexes in Northeast China and westerlies trough, both of which could be classified into four sub-types. The shear line of the heavy rainfall with low-level warm shear line is usually obvious in the lower troposphere. The analyses above indicate that there are various kinds of heavy rainfall in Northeast China in summer and the circls are complicated. Furthermore, the rainfall in this region has been active since the new century and worthy of further research.

Key words heavy rainfall in Northeast China, vortex in Northeast China, typhoon, westerlies trough, heavy rainfall ahead of westerlies trough, shear line

1 引言

我国夏季三大雨区主要集中在东部, 即华南、江淮、华北和东北地区。20 世纪 90 年代以后, 对于华南、江淮的降雨过程已经有不少研究, 但是对于北方暴雨的研究相对较少。对华南的强降雨过程的研究主要涉及 1994、1998 和 2005 年 (孙建华等, 2000, 2002; 周秀骥, 2003; 夏茹娣, 2006; Zhao et al., 2007a), 其研究主要针对华南强暴雨发生的环境场和 β 中尺度系统。在 1991 年淮河洪涝和 1998 年长江洪涝发生后, 对江淮梅雨进行了深入研究, 已有一大批研究成果 (丁一汇, 1993; 陶诗言等, 2001; 贝耐芳等, 2002; 张庆云等, 2004; 赵思雄等, 2004), 分别针对 1991、2003 年淮河的强暴雨和 1998 年的长江流域的强对流和中尺度低涡过程。而对于北方暴雨, 20 世纪 90 年代以来, 对华北地区暴雨的研究尚有一些 (孙建华等, 2005; 梁丰等, 2006), 但是对于东北暴雨, 研究相对较少, 只是对 1998 和 2005 年的东北冷涡暴雨有一些研究 (姜学恭等, 2001; 乔枫雪等, 2007)。此外, 近年来许多学者对东北地区降水的研究, 多集中在对降水的多年气候态的分析, 发现 1990 年代处于旱涝交替出现的波动状态, 90 年代中后期有转为干旱的趋势 (贾小龙等, 2006; 孙力等, 2000)。除了对东北地区气候特征的研究外, 早期对东北暴雨过程的研究主要集中在

20 世纪 80 年代前, 相对于我国华南、江淮流域暴雨的研究而言, 新时期有关东北暴雨的研究较少, 因此本文对 1990~2005 年 16 年间东北大暴雨过程进行统计, 有助于更好的了解 90 年代以来的旱涝波动期, 以及产生大范围暴雨的天气系统的配置特征, 这对旱涝的预报有一定的参考价值。

东北地区虽属东亚季风气候区, 降水主要集中在夏季 (郑秀雅等, 1992), 但与华南前汛期降水和长江流域梅雨有很大不同, 应做专门研究。降水量季节变化曲线为单峰型, 峰值出现在 7~8 月, 峰值期与华北地区基本同步, 但落后于江南、长江中下游地区, 也不同于华南地区的双峰型分布 (第一峰在 6 月, 第二峰为 8 月)。其原因是 7 月上旬副高北跳, 高压区控制长江中下游, 江南大部和华南东部高温少雨, 而华北、东北则迎来了雨季, 体现了夏季风向北推进的过程。根据贾小龙等 (2006) 对 1951~2000 年的降雨统计, 东北地区各站夏季降水占全年降水的 56.7%~76.6%, 其中大范围暴雨或特大暴雨过程对降水的贡献很大, 而且持续性大暴雨常常造成严重的洪涝灾害, 危害人们的生命财产。

对 20 世纪 80 年代以前的东北暴雨过程有不少的统计分析和分型研究, 陶诗言 (1980) 对中国暴雨的时空分布特性进行了研究, 指出东北地区的特大暴雨分布在平原向山区过渡的大小兴安岭和长白山一带, 其中华北和东北的雨季对应于 7 月中旬副热带高压的二次北跳。郑秀雅等 (1992)

利用 1956~1989 年的资料,对东北暴雨进行了较为系统的统计分析,指出东北三省局地暴雨出现次数最多,其次为区域性暴雨,特大范围暴雨最少,强调了西风带、副热带和热带环流系统的相互作用对东北夏季大范围暴雨形成的重要作用,着重讨论了台风暴雨、气旋暴雨和冷涡暴雨这三种形式的暴雨的成因和环流特征,并对暴雨的中尺度系统进行了分析,为东北暴雨的预报提供了较全面的参考。朱乾根等(1992)总结了东北地区暴雨的环流形势特点:1) 500 hPa 上位于 110°E ~ 120°E 之间的长波槽与位于 30°N 以北的副热带高压脊相结合,且中低层存在西南风急流,在急流北端产生暖锋式切变。在这种形势下,地面气旋(或黄河气旋或江淮气旋)活动频繁,当它移入东北时,常产生暴雨。这类暴雨占总数的 76%。2) 当有台风北上进入长波槽前时,常产生特大暴雨。3) 高空冷涡也是华北和东北地区夏季降水和暴雨的重要环流形势。

然而,东北地区作为我国东部夏季三大雨区之一,暴雨的发生发展带有很大的突发性和局地性,尤其是 20 世纪 90 年代以来东北地区处于气候态的波动期(贾小龙等,2006;孙力等,2000),1991 年的松花江流域暴雨、1998 年的松嫩洪水和 2005 年的辽河洪水等,使得我们需要对 20 世纪 90 年代以来在东北发生的一些大暴雨过程进行探讨,以弄清其降水和暴雨过程的特征。

2 资料和个例的选择

本文采用 1990~2004 年全国 730 站的日降水资料[日降雨量是指前一天 20 时至当日 20 时(本文中时间除特殊说明外都为北京时间)]和 2005 年的日降水资料(日降雨量是指前一天 08 时至当日 08 时),这样做严格讲有一些差异,但是对探讨暴雨过程来说,仍有一定的参考价值。结合 NCEP 每天 4 个时次的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点资料,对 1990~2005 年东北地区暴雨个例进行了选择。本文中东北地区的范围指定为 38°N ~ 54°N , 119°E ~ 135°E ,这一地区大约有 103 个站点(图 1)。当该区域中日降雨量大于或等于 50 mm 的站点数至少为 5 个时,定义为一次暴雨日,在以上基础上,最少有一个站点降雨量大于或者等于 100 mm 时,

定义为一次大暴雨日。

统计得到 1990~2005 年 6~8 月出现暴雨日共 90 天(表 1),平均每年 5 天以上。发生次数最多的是 1994 年,为 11 天,其次是 1998 年,为 10 天,1996 年为 9 天,1995 年为 8 天,1997、2001 和 2004 年均均为 6 天,1990、1991、2002、2003 和 2005 年均均为 5 天,1992、2000 年均均为 3 天,1999 年为 2 天,1993 年最少,仅为 1 天。

统计得到 1990~2005 年 6~8 月出现大暴雨日 60 天(表 1),平均每年 4 天。发生次数最多的是 1994、1995 和 1998 年,均为 7 天。其次是 2001 和 2005 年,均为 5 天。然后是 1991、1996、1997、2003 和 2004 年,为 4 天。1992、1999、2000 和 2002 年每年为 2 天,1990 年为 1 天,1993 年没有发生大暴雨。

表 1 1990~2005 年东北地区年暴雨、大暴雨发生日数
Table 1 Annual days of heavy rainfall and severe heavy rainfall in Northeast China during 1990 - 2005

年份	暴雨日数	大暴雨日数	年份	暴雨日数	大暴雨日数
1990	5	1	1998	10	7
1991	5	4	1999	2	2
1992	5	4	2000	3	2
1993	1	0	2001	6	5
1994	11	7	2002	5	2
1995	6	7	2003	5	4
1996	9	4	2004	6	4
1997	6	4	2005	5	5

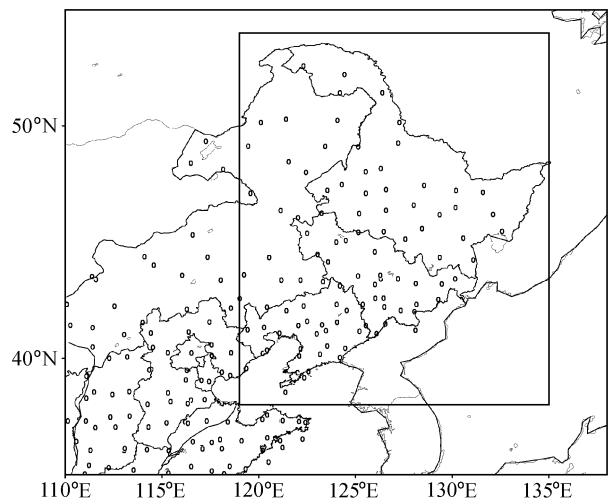


图 1 东北地区站点分布图。矩形框表示东北地区的范围

Fig.1 Station distribution in Northeast China. The rectangle denotes the area of Northeast China

3 东北大暴雨个例的分类

对于暴雨的分类有很多方式,一般以大尺度环流形势特征或以影响系统来分型。陶诗言(1980)将我国暴雨的环流形势分为稳定的经向型、稳定的纬向型以及过渡型。因为产生东北暴雨的长波槽与产生华北暴雨的长波槽一般是相同的低槽,因此习惯上将华北和东北划为一个雨带。郑秀雅等(1992)对东北暴雨的研究则主要着眼于台风、气旋和冷涡三种主要影响系统。

1990~2005 年 16 年间的暴雨日(东北地区日降雨量大于或等于 50 mm 的站点数至少为 5 个)总共有 90 天,其中包括 18 个连续个例,实际上独立的个例为 69 个(持续一天个例 51 个,持续 2 天个例 15 个,持续 3 天个例 3 个)。本文对东北大范围暴雨过程的讨论,更多地考虑了阻塞高压、热带与副热带系统和西风带之间的相互作用,在统计的基础上,将上述 69 个暴雨过程的主要影响系统大致分为 6 类:(1)台风与西风带系统(西风槽、东北低涡)的远距离相互作用(20 个,28.9%);(2)登陆台风(或南来低涡)北上与西风带系统(西风槽、东北低涡)相互作用(16 个,23.2%);(3)台风直接暴雨(1 个,1.5%);(4)低槽冷锋暴雨(16 个,23.2%);(5)低空切变型暴雨(2 个,2.9%);(6)东北低涡暴雨(14 个,20.3%)。其中,与台风有关的共有 37 个,超过一半,占总数 53.6%。台风的远距离水汽输送或是登陆台风北上与西风带系统相互作用是东北地区产生大暴雨或持续性大暴雨的重要环流条件之一,这与孙建华等(2005)分析的华北地区产生大暴雨的环流特征相似。此外,东北低涡和西风槽前系统造成暴雨个例也比较多,因此,东北低涡和西风带槽前系统也是大范围暴雨的重要影响系统。

1990~2005 年 16 年间的 90 个暴雨日中有 39 天属于连续性的暴雨日。其中,持续 2 天的个例有 15 次,持续 3 天的个例 3 次(表 2~6)。这 18 次持续性大暴雨中,有 11 次与台风有关,所占的总比例达到 61.1%。东北低涡造成的暴雨有 3 次,占 16.7%,低空切变型暴雨 2 次,占 11.1%。台

风对整个天气形势场的影响以及台风的水汽输送作用是导致东北持续性大暴雨的主要条件,东北低涡暴雨也不容忽视,在持续性暴雨日中所占比例接近四分之一。此外值得注意的是,低空切变型暴雨日虽然总天数只有 4 天,但是其所造成的暴雨全部是连续性个例,总共为 2 次持续两天的连续暴雨。这说明低空切变型暴雨为数虽然较少,但是一旦形成,其影响不可忽视,容易引发东北地区大范围持续性暴雨。

4 6 类大暴雨过程的特征

东北暴雨多发生在 7~8 月,中纬度以经向环流为主,且有低槽或低涡位于东北地区上空;低纬则常有台风在我国登陆或沿海活动。在有利条件下,中低纬系统相互作用常常引发东北大范围的暴雨。以下要讨论的前三类就是与台风活动有关的大暴雨过程。后三类则是无台风影响的冷锋低槽、切变和低涡类大暴雨过程。

4.1 台风与西风带系统的远距离相互作用

此类个例中台风一般在南海或西太平洋台湾附近,或是在我国南部沿海登陆,西风带为低槽,一般位于 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$,有时低槽内有闭合中心出现,即出现切断低压(Zhao et al., 2007b),在东北地区上空维持,形成东北低涡(一般指深厚的维持在东北地区上空的涡旋,500 hPa 可见闭合中心)。台风与西风带系统之间的距离较远,它们各自的暴雨区位于中、低纬度不同的区域。在这类暴雨中,高空 200 hPa 东北地区一般处于西风槽前,槽发展不深,高空急流轴跟高空槽相距不远,甚至重合,东北地区处于较强的高空急流区右侧的辐散区。中层 500 hPa 上东北地区处于西风槽前,有时候槽内会有切断低压出现,槽前的正涡度区有利于上升运动的形成。台风沿副热带高压西南侧的东南引导气流北上,会使得副高北抬。低层 850 hPa 上副高西侧北侧存在强烈的偏南低空急流,急流从台风影响区一路北上向西风带输送暖湿气流,台风虽然距离暴雨区比较远,但是起着输送水汽的作用,这就是所谓的台风间接暴雨。属于此类的个例有 20 个(见表 2),其中有 6 个是持续 2 天以上的个例。

表 2 20 个台风与西风带系统的远距离相互作用个例
Table 2 20 cases of the long distance interaction between typhoon and westerlies zone systems

个例	时间	暴雨站点数 (≥50 mm)	暴雨站点数 (≥100 mm)	最大雨量 /mm	影响系统
1	1990-08-29	7	0	85.4	台风与东北低涡远距离相互作用
2	1991-07-22	22	4	132.3	台风与东北低涡远距离相互作用
3	1994-08-06	14	6	188.7	台风与西风槽远距离相互作用
	1994-08-07	10	2	152.0	
4	1995-07-25	11	3	144.9	台风与西风槽远距离相互作用
	1995-07-26	19	2	119.4	
5	1996-07-23	5	1	123.9	台风与东北低涡远距离相互作用
	1996-07-24	11	1	118.8	
6	1996-07-29	11	2	136.8	台风与东北低涡远距离相互作用（涡旋仅在低层出现闭合中心）
7	1996-08-10	7	0	71.8	台风与东北低涡远距离相互作用
	1996-08-11	12	3	271.7	
	1996-08-12	6	0	68.4	
8	1997-08-02	7	1	103.7	台风与西风槽远距离相互作用
9	1998-08-05	22	2	118.5	台风与东北低涡远距离相互作用
10	1999-07-31	5	1	162.5	台风与西风槽远距离相互作用
11	1999-08-10	14	3	134.2	台风减弱后形成的江淮气旋北上西风槽远距离相互作用
12	2000-08-09	5	3	188.7	台风与西风槽远距离相互作用
	2000-08-10	9	0	99.7	
13	2001-07-04	13	2	100.1	台风与西风槽远距离相互作用
14	2001-07-26	6	1	101.4	台风与东北低涡远距离相互作用
	2001-07-28	14	5	244.4	
15	2001-08-17	5	1	109.0	台风与东北低涡远距离相互作用
16	2002-07-23	7	1	102.0	台风与东北低涡远距离相互作用
17	2003-08-06	20	3	165.8	台风与东北低涡远距离相互作用
18	2003-08-22	13	2	110.7	台风与西风槽远距离相互作用
19	2004-07-30	7	0	74.0	台风与西风槽远距离相互作用
20	2004-08-28	13	2	140.9	台风与东北低涡远距离相互作用

在这类暴雨过程中,1994 年 8 月 5 日 20 时~7 日 20 时的暴雨过程为持续性大暴雨个例。下面以 1994 年 8 月 6 日为例分析此类暴雨过程的特点。图 2 是 1994 年 8 月 6 日的天气形势图和降雨量分布图。台风于 8 月 4 日在福建沿海登陆,然后向西北方向移动,8 月 6 日移至 30°N 附近,图中副高西侧的正涡度中心是登陆台风减弱后的低压。西风槽位于贝加尔湖以东,110°E~120°E 之间。随着台风的北上,副高东退北抬,130°E 处副高 5880 gpm 线抬至 40°N 以北。副高与其西侧登陆台风之间形成一条强的偏南风低空急流,将水汽大量的输送到华北、东北地区。在副高北面、

西风带南缘之间,低空急流与高空急流几近平行,暴雨区位于高空槽前,高、低空急流之间。

从降雨量图(图 2b)可以看到,由于西风槽和登陆台风低压之间的远距离相互作用,形成了华南到华北、东北的一条大范围雨带,且从华北北部到东北地区有四个强的大暴雨中心。其中华南地区的暴雨由台风本身引起,而东北的暴雨则是由于登陆台风低压与副高之间的偏南急流将水汽向北输送引起,且低空急流输送区内空气潮湿不稳定,加上西风槽前上升运动的触发,这些条件有利于中尺度对流的发生发展,从而形成强的暴雨中心。

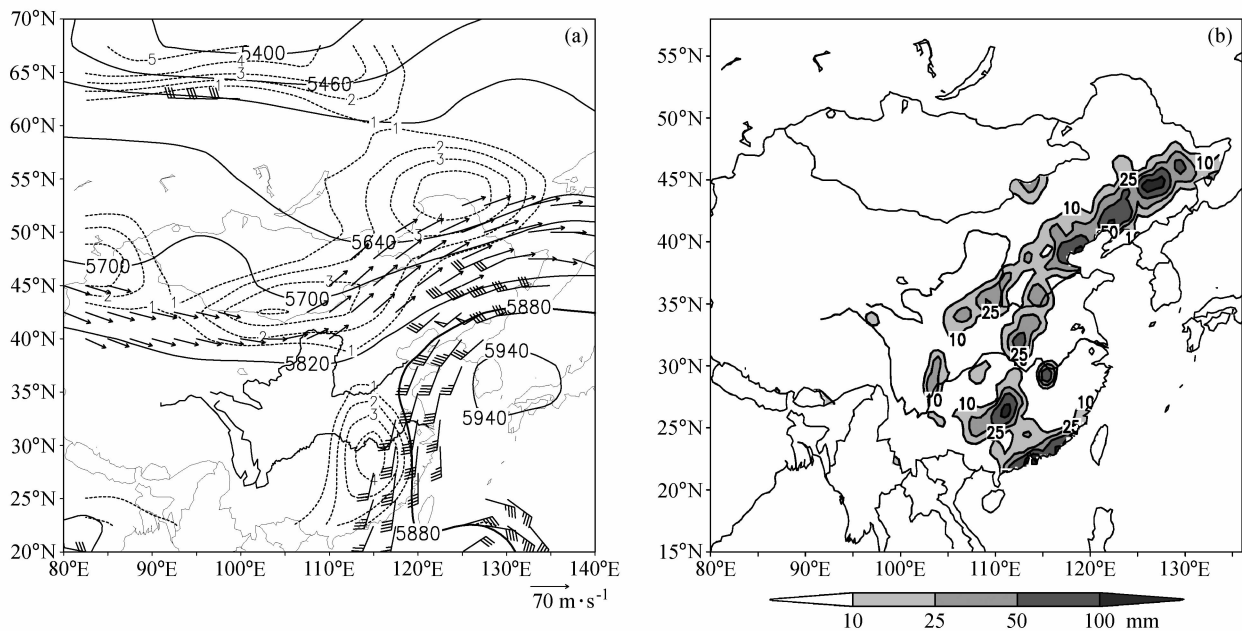


图2 (a) 台风与西风槽远距离相互作用天气形势的分布 (个例 1994 年 8 月 6 日)。箭矢线表示 200 hPa 上风速 $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流；风标表示 850 hPa 上的风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流；实线为 500 hPa 等高线 (单位: gpm)；虚线表示 500 hPa 上的等涡度线 (单位: 10^{-5} s^{-1})。 (b) 1994 年 8 月 5 日 20 时~6 日 20 时 24 h 降雨量

Fig. 2 (a) The composite synoptic pattern of the long distance interaction between typhoon and westerlies trough (the case on 6 Aug 1994). The vector is the jet at 200 hPa with speed $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the barb is the jet at 850 hPa with speed $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; the solid line is the geopotential height contour at 500 hPa (units: gpm); the broken line is the vorticity contour at 500 hPa (units: 10^{-5} s^{-1}). (b) The 24-hour precipitation between 2000 LST 5 Aug and 2000 LST 6 Aug 1994

4.2 台风 (或低涡) 北上与西风带系统相互作用

此类个例中台风一般在东南沿海登陆, 沿着副高西侧的偏南气流向北方推进, 与西风带系统相遇, 即被西风槽捕获或是与东北低涡合并产生暴雨。也有些个例没有台风北上, 而是有西南涡或西北涡等中低层低涡向北移入东北地区, 或是江淮气旋与西风带系统相互作用。如 1990 年 7 月 6 日 20 时~7 日 20 时是西北涡北上并入东蒙冷涡, 1996 年 6 月 29 日 20 时~30 日 20 时是江淮气旋北上与东北冷涡相互作用。

与第一类不同的是, 此类中的登陆台风 (或低涡) 的作用不仅仅是水汽输送, 而是和西风带系统共同作用, 对东北地区暴雨的产生和增强起着直接的作用。郑秀雅等 (1992) 指出台风环流直接与西风槽结合, 仅有较弱的冷空气侵入台风环流, 台风变为“半热带”气旋, 此时是暴雨发展最强的时期, 随着台风环流与西风槽相结合, 有较强的冷空气侵入台风环流, 台风变为温带气旋, 暴雨即开始减弱。此类暴雨中, 高层 200 hPa

上东北地区处于西风大槽前, 我国东部沿海到朝鲜半岛, 日本海区域为大范围的高压控制, 西风槽前的高空急流右侧为辐散区域。中层 500 hPa 上西风槽发展强烈, 较容易出现切断中心, 由于台风的北上, 副高位置偏东偏南, 台风一般到 30°N 以北即开始被西风槽捕获, 此后, 由于冷空气的侵入, 台风慢慢转变为半热带性质的气旋, 在西风槽前的正涡度有利环境中触发暴雨。低层 850 hPa 上台风本身就是最大的水汽源地, 暴雨区主要在台风区域, 随台风的移动而移动。这类暴雨中台风除了提供暴雨所需的水汽外, 自身与西风槽 (涡旋) 系统的相互作用也是维持暴雨所需的动力、热力机制的重要条件, 与上一类不同的是, 台风常常直接提供暴雨所需水汽, 也直接参与中低纬系统的相互作用 (上一类中台风与中纬度系统不直接作用, 台风只是水汽的源地之一)。这类共有 16 个个例 (见表 3), 下文选取 1997 年 8 月 19 日 20 时~21 日 20 时登陆台风“9711 号”北上与西风槽相互作用的个例过程进行分析。

表 3 16 个台风(或低涡)北上与西风带系统相互作用个例

Table 3 16 cases of the direct interaction between northward typhoon (or vortex) and westerlies zone system

个例	时间	暴雨站点数 (>50 mm)	暴雨站点数 (>100 mm)	最大雨量 (mm)	影响系统
1	1990-07-07	14	2	108.1	西北涡北上与东北冷涡相互作用
2	1990-08-22	6	0	94.8	台风北上与西风带相互作用
	1990-08-23	6	0	77.0	
3	1991-07-29	20	5	165.5	台风北上与东北低涡相互作用
	1991-07-30	12	1	100.9	
4	1994-07-13	17	10	225.1	台风北上与西风带相互作用
	1994-07-14	6	0	85.6	
5	1994-08-08	8	2	170.9	台风北上与西风带相互作用
6	1994-08-15	6	0	81.1	台风北上与西风槽相互作用
	1994-08-16	23	10	188.9	
7	1996-06-30	5	0	69.7	江淮气旋北上与东北冷涡相互作用
8	1996-08-03	6	0	90.9	台风北上与西风带相互作用
9	1997-08-20	14	7	172.8	台风北上与西风带相互作用
	1997-08-21	25	10	157.1	
10	1997-08-31	7	0	82.0	台风北上与西风带相互作用
11	2001-08-02	9	2	119.5	江淮气旋北上与西风槽相互作用
12	2002-07-13	5	0	66.8	台风北上与东北低涡相互作用
13	2002-08-04	5	3	212.9	台风北上与东北低涡相互作用
14	2004-07-01	6	2	134.2	台风北上与东北低涡相互作用
15	2004-07-18	7	0	83.6	西北涡北上与西风槽相互作用
	2004-07-19	7	1	140.2	
16	2004-08-03	7	1	121.8	台风北上与西风槽相互作用

“9711 号”台风于 1997 年 8 月 10 日在 (15.4°N , 153.85°E) 的西北太平洋洋面生成, 然后向西北方向移动并逐渐加强成为强台风, 8 月 18 日 (图 3a) 在浙江省登陆, 后继续北上。西太平洋副高位置偏东偏北, 5880 gpm 线北抬至日本海到朝鲜半岛一带, 副高脊线位于 35°N , 其西侧的偏南风有利于引导台风的北上。500 hPa 等压面上原位于 120°E 海拉尔—北京—太原一线的华北低槽, 受到位于日本的副热带高压主体的阻挡, 原地少动加深, 槽底南伸至 30°N 附近, 此时未出现大范围的暴雨 (图 3b)。

受台风西侧长波槽的影响, 台风由向西北路径转为北向路径, 经安徽、苏北, 于 8 月 20 日 00 时 (协调世界时) 到达鲁中。图 4a 的天气形势配置显示, 登陆台风低压与西风槽已经合并, 槽后冷空气进入台风低压环流, 使其减弱为一个南北向的台风倒槽。倒槽与副高之间的东南风低

空急流以及来自南海的偏南急流将大量的暖湿空气向倒槽东侧输送。高空急流入口区右侧的强辐散又造成倒槽东侧强烈的上升运动。冷暖空气的交汇、低空急流的水汽输送以及垂直上升运动的叠加, 在环渤海湾形成一条暴雨雨带 (图 4b), 其中山东省和辽宁省南部出现了大于 100 mm 的大暴雨区。

由于低空急流左侧强的气旋性切变辐合, 以及水汽和能量的输送, 使得台风倒槽内低压又有所加强并向东移。8 月 21 日 00 时 (协调世界时) 台风低压移入东北地区, 原来位于日本岛的副高南移西伸, 来自南海的偏南低空急流被切断, 水汽主要来自台风低压与副高之间的西南低空急流输送 (图 5a)。由于登陆台风低压东侧仍有高空急流强辐散区的叠加, 雨带移至辽宁和吉林省 (图 5b), 并出现大范围的暴雨, 局部地区出现 100 mm 以上的大暴雨。

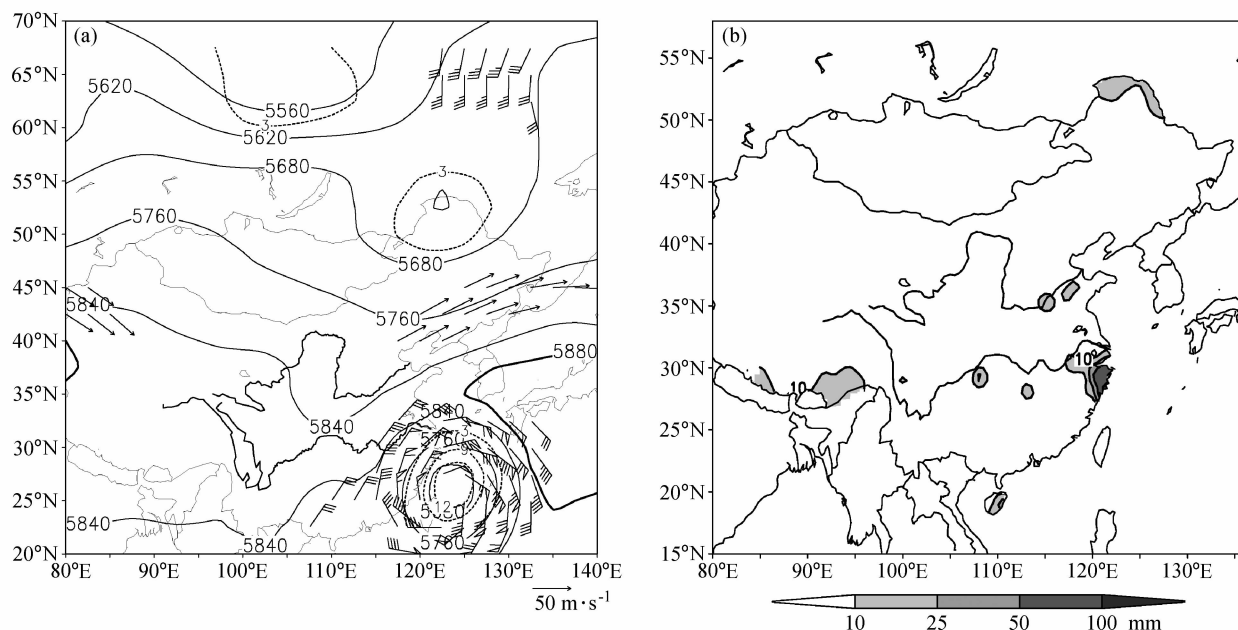


图 3 (a) 台风与西风槽相互作用的天气形势的分布 (个例 1997 年 8 月 18 日), 其他同图 2a; (b) 1997 年 8 月 17 日 20 时~18 日 20 时 24 h 降雨量

Fig. 3 (a) The same as Fig. 2a, but for the direct interaction between typhoon and westerlies trough (the case on 18 Aug 1997); (b) the 24-hour precipitation amount between 2000 LST 17 Aug and 2000 LST 18 Aug 1997

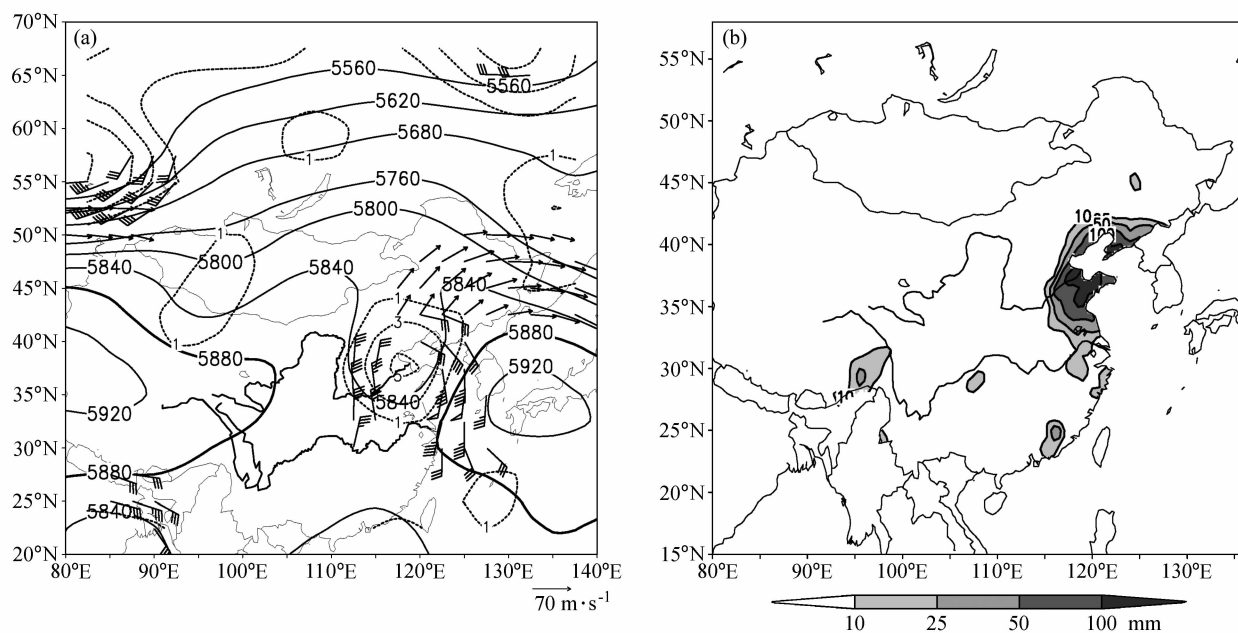


图 4 (a) 台风与西风槽相互作用的天气形势的分布 (个例 1997 年 8 月 20 日), 其他同图 2a; (b) 1997 年 8 月 19 日 20 时~20 日 20 时 24 h 降雨量

Fig. 4 (a) The same as Fig. 2a, but for the direct interaction between typhoon and westerlies trough (the case on 20 Aug 1997); (b) the 24-hour precipitation amount between 2000 LST 19 Aug and 2000 LST 20 Aug 1997

该次持续性大暴雨过程中, 台风登陆先是受到西风槽前西南气流的引导转为北上, 与低槽合

并。槽后冷空气的侵入, 使得台风低压减弱为倒槽, 大暴雨发生在倒槽东部地区。水汽输送主要

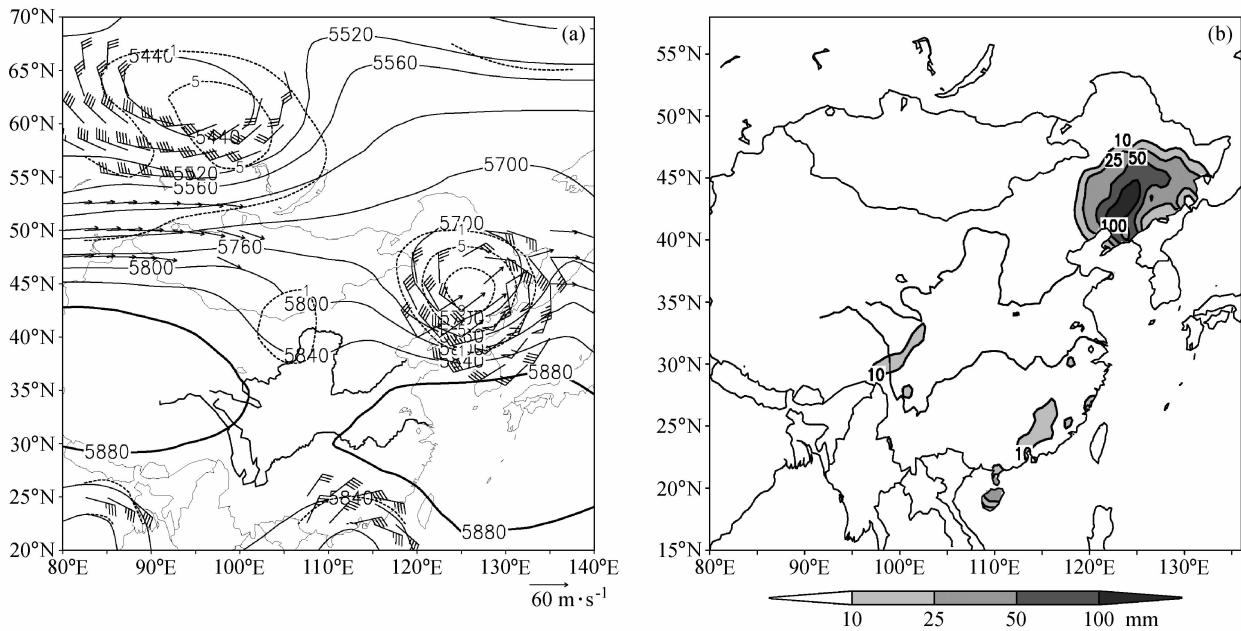


图5 (a) 台风与西风槽相互作用的天气形势的分布 (个例 1997 年 8 月 21 日), 其他同图 2a; (b) 1997 年 8 月 20 日 20 时~21 日 20 时的 24 h 降雨量

Fig. 5 (a) The same as Fig. 2a, but for the direct interaction between typhoon and westerlies trough (the case on 21 Aug 1997); (b) the 24-hour precipitation amount between 2000 LST 20 Aug and 2000 LST 21 Aug 1997

来自于倒槽与副高之间的东南风低空急流。随着低空急流携带能量流入, 台风倒槽内又产生新的中心, 出现台风的“跳跃”现象, 继而移入东北, 引发辽宁和吉林的大范围暴雨, 水汽的输送则变为来自副高西北的西南急流。

4.3 台风直接暴雨

不同于第一类和第二类的台风与西风带系统有直接或间接的相互作用, 此类暴雨过程没有西风槽配合, 而是台风绕过副高, 进入东北地区引发暴雨, 一般没有冷空气侵入。暴雨过程中, 台风顺着副高西侧的引导气流北上, 独自侵入东北地区, 暴雨发生所需的水汽, 不稳定能量等动力热力机制都来自台风, 从机理上来说本质上与台风在热带产生的降水差别不大, 只是在中高纬地区水汽条件相对薄弱, 需要低空的水汽输送或者是台风所处中高纬海面的水汽补充。此类个例较少发生, 1990~2005 年间仅有一例, 即 2005 年 8 月 8 日 08 时~9 日 08 时, “麦莎”台风移入东北引发大范围的暴雨。下面具体分析该例此类暴雨过程的天气形势特征。

2005 年 9 号“麦莎”台风于 2005 年 7 月 31 日在西太平洋上生成。8 月 6 日晨“麦莎”台风在

浙江玉环县登陆后减弱为热带风暴, 8 月 7 日 12 时 (协调世界时) (图略), 500 hPa 上“麦莎”移至山东半岛南部, 此时西太平洋副热带高压明显西伸, 副高脊与西风带上的蒙古—我国东北地区的高压脊相叠加。“麦莎”在副高西侧的西南气流引导下北上, 8 月 8 日 00 时 (协调世界时) (图略), 北部的高压脊断裂, 蒙古东部分裂出一个大陆小高压, 在该高压的影响下, “麦莎”向偏东北方向移动。8 月 8 日 12 时 (协调世界时) (图 6a), “麦莎”减弱后的低压系统移至渤海湾地区, 位于蒙古的大陆小高压与海上的副热带高压脊再次叠加, 形成了一个“高压坝”, 使得“麦莎”移速减慢。副高 5880 gpm 线北端到达 40°N, 位于其西北侧的西南低空急流为“麦莎”降水提供了大量的水汽, 而且渤海海面的增湿作用, 对“麦莎”的维持和降雨也提供了动力和水汽条件。东北地区降雨主要集中在辽宁省中部以及南部 (图 6b), 强降水位于辽宁南部, 即“麦莎”热带低压的北部, 对此个例龚晓雪等 (2007) 有详细的分析。此例与前两类暴雨不同的是, 高空急流的作用不显著; 主要是台风低压直接造成的降水, 其中北部的高压坝, 一定程度上阻挡了台风低压的

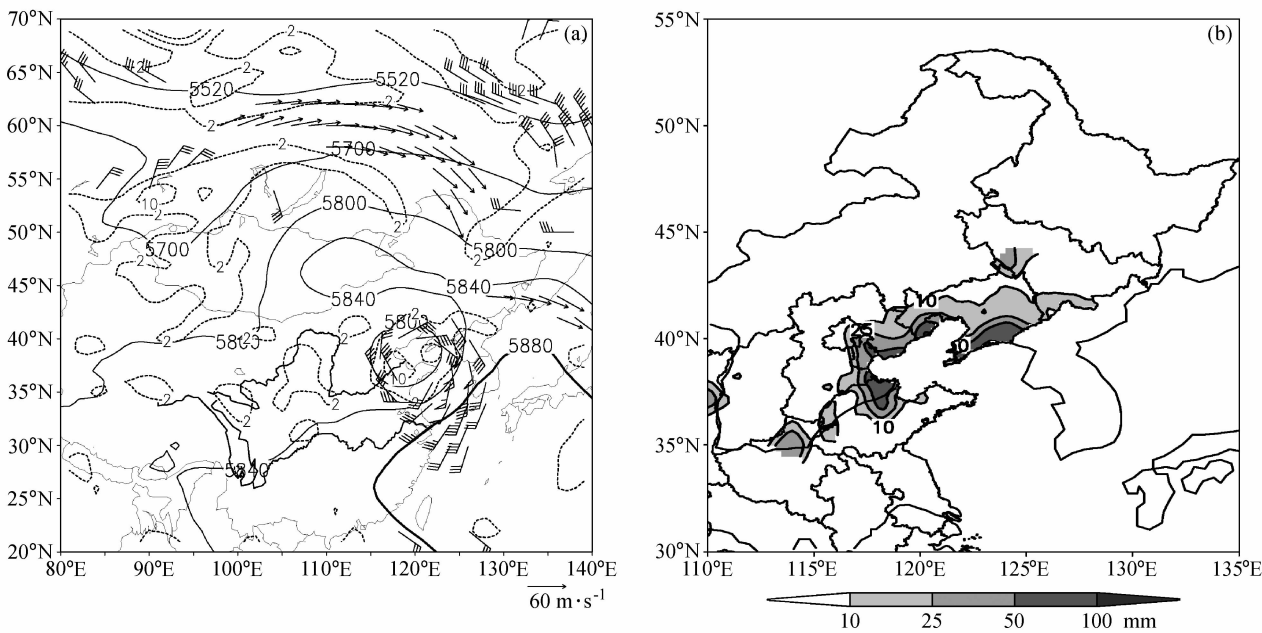


图6 (a) 台风直接暴雨天气形势的分布 (个例 2005 年 8 月 8 日), 其他同图 2a; (b) 2005 年 8 月 8 日 08 时~9 日 08 时的 24 h 降雨量
Fig. 6 (a) The same as Fig. 2a, but for the heavy rainfall directly caused by typhoon (the case on 8 Aug 2005); (b) the 24-hour precipitation amount between 0800 LST 8 Aug and 0800 LST 9 Aug 2005

移动, 使得台风移动缓慢, 有利于大范围降雨的维持。水汽输送主要来自副高西北侧的西南低空急流和渤海的暖湿水汽。

4.4 低槽冷锋暴雨

此类暴雨主要发生在西风槽前, 受低槽冷锋影响或是槽前气旋移入东北引发大范围的暴雨。一般无低纬台风的远距离水汽输送或是台风北上的影响, 即使有的个例在副高南侧有台风出现, 水汽的远距离输送作用也比较弱。这类暴雨中, 高空 200 hPa 处, 东北地区一般处于西风槽前, 急流右侧存在高空辐散。500 hPa 上西风槽的位置不固定, 从贝加尔湖到蒙古东部、华北、河套地区都有可能存在西风槽的加深, 有时候会出现南北短波槽相互叠加的情况, 西风槽后常常有冷平流, 副高的位置一般偏北, 北部脊线常常到达 40°N 地区, 西风槽与副高之间形成锋区, 冷锋随着低槽的东移侵入东北, 产生暴雨。低层在副高西侧一般存在低空西南急流, 水汽从南海输送过来, 有的个例在西风槽前有低涡配合, 并移入东北, 与冷锋相互作用而发展, 增强暴雨的强度和范围。此类暴雨成因条件要求并不算高, 500 hPa 上西风槽有时候并不是很强, 低空的水汽输送条件对暴雨产生的起重要作用。1990~2005 年, 低槽冷锋

共有 16 例 (见表 4)。

表 4 16 个低槽冷锋个例
Table 4 16 cases of the heavy rainfalls associated with low trough and cold front

个例	时间	暴雨站点数 (>50 mm)	暴雨站点数 (>100 mm)	最大雨量 /mm	分类
1	1990-07-31	5	0	93.3	4 类
2	1991-06-28	7	0	98.4	1 类
3	1992-07-21	11	1	154.5	1 类
4	1992-07-26	7	1	132.9	3 类
5	1992-07-29	9	0	95.4	3 类
6	1994-07-04	6	0	89.2	2 类
7	1994-07-08	7	0	79.0	2 类
	1994-07-09	13	2	112.4	
8	1994-07-28	6	1	108.1	4 类
9	1995-07-12	8	0	71.6	3 类
10	1995-07-15	16	1	108.5	1 类
11	1995-08-04	7	2	104.8	2 类
12	1995-08-07	13	2	170.0	4 类
13	1998-07-24	5	2	177.7	1 类
14	1998-08-23	6	2	125.9	2 类
15	2002-07-31	6	0	74.9	2 类
16	2005-08-17	14	0	74.5	3 类

按照低槽的位置以及高低空环流形势场配置, 此类暴雨主要分为 4 种分类型: 1) 贝加尔湖地区为一大范围低涡区, 涡底槽区伸至华北地区, 槽前有气旋或低压向东北地区移动。1992 年 7 月 20 日 20 时~7 月 21 日 20 时的降雨就属于该类型, 此分类型总共 4 个个例。2) 贝加尔湖地区或以北为一高压中心, 其上游切断出一横槽向东移, 与位于河套的低槽南北向叠加, 副高的北侧往往是近于东西向的强锋区, 低槽前有低涡东移, 在强锋区上获得发展, 侵入东北形成暴雨, 如 1994 年 7 月 8 日 20 时~10 日 20 时就属于此种类型, 或是贝湖高压的下游切断出低压槽, 与河套移来的低槽在东北地区南北向叠加, 形成槽前暴雨。此分类型总共 5 个个例。3) 东亚高纬度地区为宽广的低压区, 中纬度地区环流较平直, 其上多短波槽活动, 在蒙古以东或华北地区有低槽加深, 槽后常常有明显的冷平流, 低槽冷锋产生暴雨, 如 1995 年 7 月 11 日 20 时~12 日 20 时的暴雨过程, 此分类型总共 4 个个例。4) 贝加尔湖及其以西地区为高压控制, 东亚高纬大槽南伸到东北地区, 暴雨区域位于 500 hPa 西风槽前, 此类型主要区别在于低空存在涡旋。涡旋或形成于东北地区上空低空, 或者是从贝加尔湖到内蒙古一带移来,

低空涡旋在西风槽前获得发展, 从而形成暴雨, 如 1994 年 7 月 27 日 20 时~28 日 20 时的暴雨过程, 此分类型总共 3 个个例。4 种类型的低槽冷锋暴雨发生概率没有大的差别, 都应受到重视。

由于篇幅所限, 在低槽冷锋暴雨的 4 个分类型中, 选取第四分类型中的一个典型个例 (1995 年 8 月 6 日 20 时~7 日 20 时) 进行分析, 此次暴雨过程中最大降雨量为 170 mm。1995 年 8 月 6 日低槽位于蒙古东部到河套北部地区 (图 7), 槽后有明显的冷平流。副高呈纬向分布, 5880 gpm 线北端位于 40°N 以南, 西段达到 120°E 附近; 副高西侧有明显的偏南风急流, 将低纬南海的水汽输送到槽前; 高空急流入口区右侧的高空辐散, 在低槽前产生强的垂直上升运动, 对应槽前冷锋, 在华北地区产生了一条倾斜的带状雨带 (图 7)。8 月 7 日低槽东移至 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之间, 副高东退, 其西北侧有强的西南低空急流伸向东北地区; 槽前对应高空急流入口区右侧的强辐散区, 对应的冷锋降雨移至山东到辽宁一带 (图 8)。

4.5 低空切变型暴雨

低空切变型暴雨中, 切变线一般在 700 或 850 hPa 层上较为明显。高空 200 hPa 处暴雨区域一般位于西风纬向平直气流南面的高压区, 东北地区

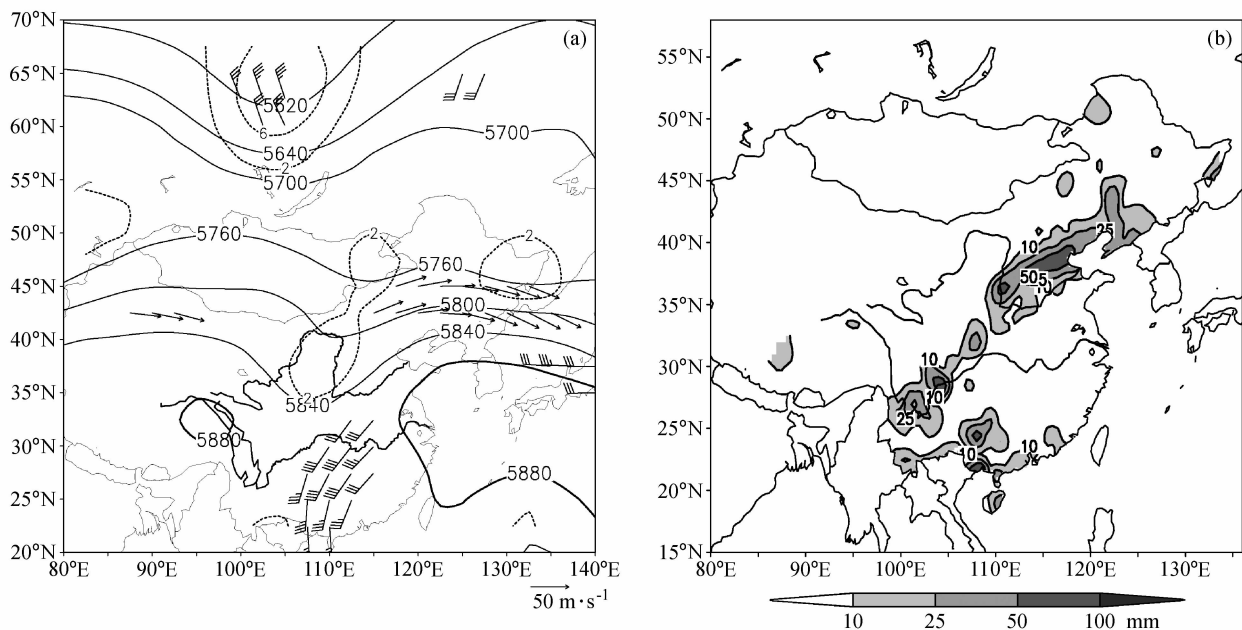


图 7 (a) 低槽冷锋暴雨天气形势的分布 (个例 1995 年 8 月 6 日), 其他同图 2a; (b) 1995 年 8 月 5 日 20 时~6 日 20 时的 24 h 降雨量
Fig. 7 (a) The same as Fig. 2a, but for the heavy rainfall associated with low trough and cold front (the case on 6 Aug 1995); (b) the 24-hour precipitation amount between 2000 LST 5 Aug and 2000 LST 6 Aug 1995

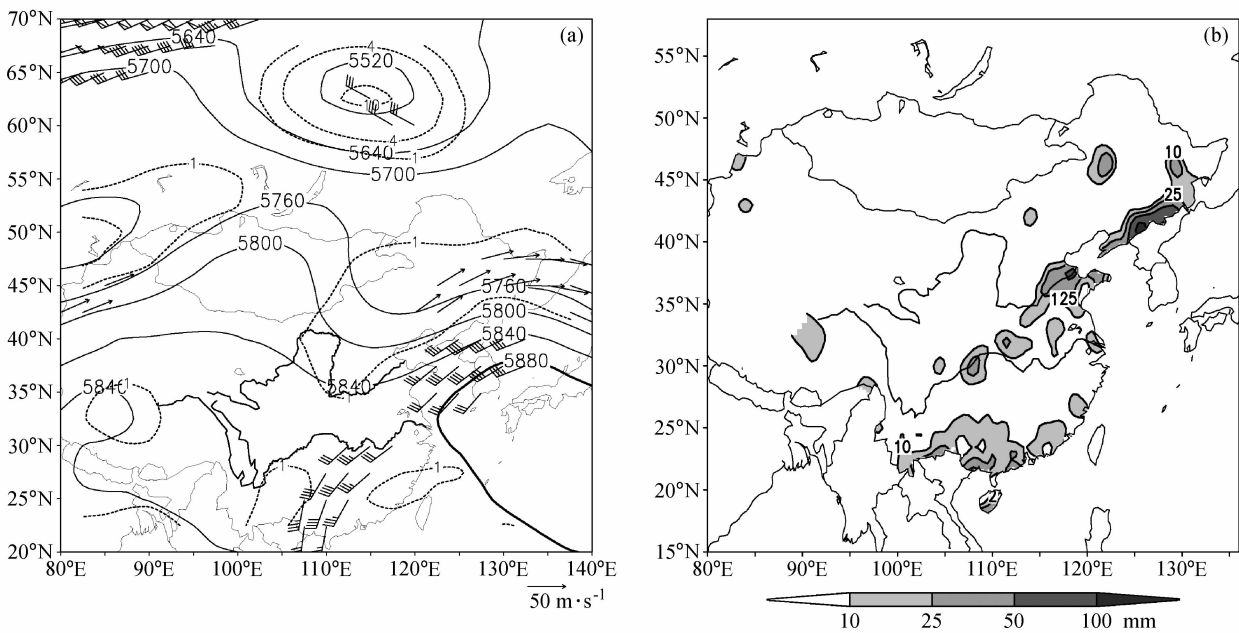


图 8 (a) 低槽冷锋暴雨天气形势的分布 (个例 1995 年 8 月 7 日), 其他同图 2a; (b) 1995 年 8 月 6 日 20 时~7 日 20 时的 24 h 降雨量
Fig. 8 (a) The same as Fig. 2a, but for the heavy rainfall associated with low trough and cold front (the case on 7 Aug 1995); (b) the 24-hour precipitation amount between 2000 LST 6 Aug and 2000 LST 7 Aug 1995

受西风脊控制, 高空急流不明显; 500 hPa 中层环流一般较为平直, 以纬向型为主, 有短波槽快速东移, 副高偏北, 脊线常伸到东北; 低空在内蒙古至东北西部一带有大陆小高压, 其风场环流与副高西侧风场环流之间形成西北风和西南风的切变, 此类暴雨过程中, 副高后部常伴随着西南风低空急流, 将低纬暖湿空气输送到切变线辐合带, 为大范围的暴雨提供水汽和能量。此类暴雨共有 2 个个例 (共 4 天, 见表 5)。其中 2005 年 8 月 12 日东北地区暴雨站点数达到 28 个, 最大降雨量 174.2 mm, 造成了辽河流域大范围的洪水灾害, 下面以此为例具体分析。

暴雨发生前期, 500 hPa 上乌拉尔山附近有阻塞高压形成, 其东侧西伯利亚上空一直维持一个

大范围的冷涡, 冷涡中不断分裂出短波槽东移。8 月 12 日 12 时 (协调世界时) 时刻 500 hPa 上 (图 9a) 受南海西北部台风的影响, 副热带高压异常偏北偏西, 5880 gpm 线北伸至朝鲜半岛中部, 并西伸至大陆内部; 东北地区北部有小槽, 槽后为弱脊, 其对应的低层 700 hPa (图 9b) 上的蒙古高压与副高之间形成 (西) 北风和西南风的切变。副高后部的低空急流从渤海向东北地区输送水汽, 暴雨区有三个极值中心 (图 9c), 均位于 850 hPa 副高后部西南低空急流和 700 hPa 切变线之间。

4.6 东北低涡暴雨

通过对 1990~2005 年大暴雨过程的统计分析, 发现尽管不少东北低涡引发大范围暴雨的过程都是在低纬台风或是南来低涡的影响下共同产生的, 但是无低纬台风或南来低涡影响的东北低涡暴雨过程也不少, 共有 14 例 (表 6)。这里讨论的低涡暴雨是指这类不受低纬台风或南来低涡影响的西风带系统引发的暴雨。

本文研究的东北低涡是指在东北地区上空维持的比較深厚的东北低压或冷涡, 500 hPa 上有闭合中心出现。陶诗言 (1980) 对低涡暴雨的研究中, 指出东北冷涡一般在贝加尔湖附近形成, 经过我国东北向堪察加半岛方向移去。一般可以维

表 5 2 个低空切变型暴雨个例
Table 5 Two cases of the heavy rainfalls caused by low level shear line

个例	时间	暴雨站点数 (>50 mm)	暴雨站点数 (>100 mm)	最大雨量 /mm
1	1995-07-29	16	4	147.5
	1995-07-30	12	5	138.4
2	2005-08-12	28	4	174.2
	2005-08-13	9	3	140.6

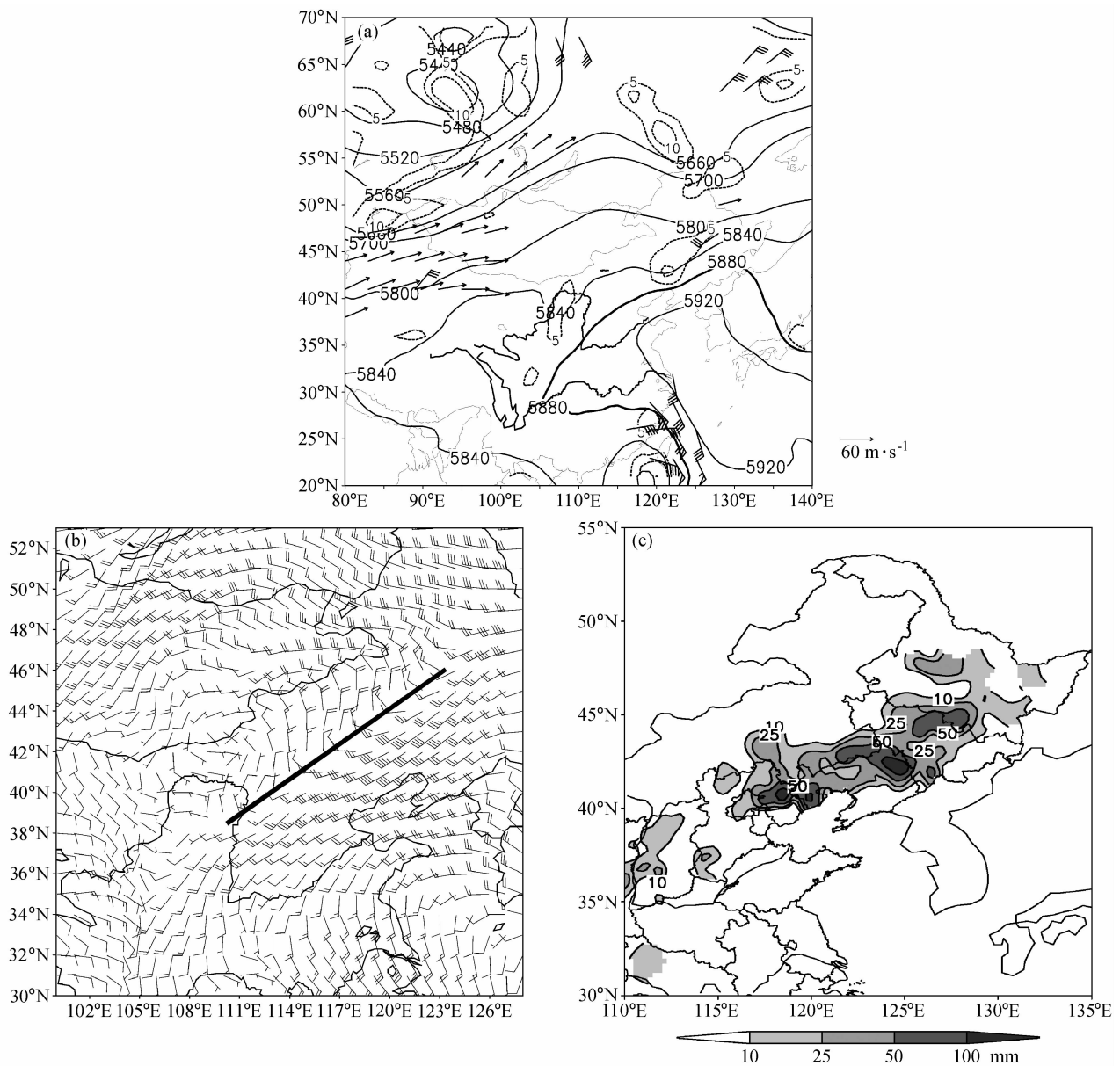


图9 (a) 低空切变型暴雨天气形势的分布 (个例 2005 年 8 月 12 日), 其他同图 2a; (b) 2005 年 8 月 12 日 1200 (协调世界时) 的 700 hPa 风场 (黑线为切变线所在位置); (c) 2005 年 8 月 12 日 08 时到 13 日 08 时雨量分布

Fig. 9 (a) The same as Fig. 2a, but for the heavy rainfall caused by low level shear line (the case on 12 Aug 2005); (b) the wind field at 700 hPa at 1200 UTC 12 Aug 2005 (the bold solid line is the shear line); (c) the 24-hour precipitation amount between 0800 LST 12 Aug and 0800 LST 13 Aug 2005

持 3 天以上, 与西北涡和西南涡相比, 东北冷涡的尺度较大, 而且是深厚的冷性系统。在这类东北低涡暴雨中, 高空 200 hPa 处东北地区一般受西风脊控制, 高空急流初期不明显, 在东北低涡发展加强后出现在西风槽与副高之间; 中层 500 hPa 上暴雨区位于西风槽 (前) 系统控制下, 槽中有低压闭合中心, 这类西风槽涡旋比较深厚,

涡旋后部常出现冷平流, 常与副高西侧来自低纬的暖湿气流相交汇, 从而加强上升运动, 并产生暴雨; 低层上副高西侧的偏南气流将水汽从南海输送到东北, 低纬暖湿气流对暴雨的发生和维持提供了重要条件。相对来说, 东北低涡暴雨过程中大气中低层环流形势比较一致, 东北低涡从中层一直延伸到低层。

表 6 14 个东北低涡暴雨个例
Table 6 14 cases of Northeast China vortex heavy rainfall

个例	时间	暴雨站点数 (≥50 mm)	暴雨站点数 (≥100 mm)	最大雨量 /mm	分类
1	1991-06-11	10	1	143.2	3 类 西风槽切断低压从华北移入东北
2	1993-07-28	5	0	81.5	3 类 西风槽切断低涡从江淮移入东北
3	1996-08-07	5	0	79.0	1 类 贝湖移来的低涡进入东北引发暴雨
4	1997-07-03	6	0	85.7	4 类 低涡主要来源于东亚高纬大槽南伸切断，低层存在贝湖
	1997-07-04	5	1	110.6	移来的弱低压，二者共同作用产生暴雨
5	1998-07-07	11	2	136.5	2 类 蒙古低压东移受贝湖低压增援加强
6	1998-07-13	7	1	138.9	3 类 连续个例。低涡从河套移来进入东北，低层有西南气流
	1998-07-14	14	1	145.7	输送水汽，造成大范围暴雨。
	1998-07-15	14	0	98.2	
7	1998-08-08	5	0	73.9	3 类 四天中间隔一天的连续个例。从河套移来的东北低涡维
	1998-08-10	7	2	176.1	持在东北地区上空造成暴雨，低空存在西南涡向东北方
	1998-08-11	5	0	71.9	向移动。
8	2000-07-11	9	1	148.4	3 类 低涡从江淮移入东北造成暴雨
9	2001-06-17	5	0	66.7	2 类 内蒙古移来的低涡进入东北引发暴雨
10	2002-06-19	6	0	69.6	4 类 东北低涡来源中东亚大槽切断低压
11	2003-06-23	6	1	103.0	3 类 低涡从江淮移入东北造成暴雨
12	2003-07-08	6	0	96.0	2 类 内蒙古移来的气旋侵入东北引发暴雨
13	2003-07-27	8	3	111.8	1 类 贝湖移来的气旋侵入东北引发暴雨
14	2005-07-28	10	0	91.1	4 类 低涡来源于东亚高纬大槽南伸切断

Zhao et al. (2007b) 将东北低涡按照其移动路径分为 3 类：（1）从贝加尔湖向东南方向移入东北；（2）从蒙古或内蒙古自治区向东移入东北；（3）从河套或江淮流域向东北方向移入东北。此次统计研究发现东北低涡还存在第 4 种移动路径：即从东亚中高纬大槽南伸切断出的低涡向西南方向移入东北。本文对于东北低涡暴雨采取以上 4 类标准进行分类。

其中，1998 年 8 月 8 日~11 日 4 天连续降雨过程中有 3 天达到筛选标准，分别为 8、10、11 日，形成连续暴雨个例。暴雨面积并不是特别大，三天达到标准站点数分别为 5、7、5。10 日暴雨降雨面积最大，而且降水最强，其最大雨量达到 176.1 mm。下面依此例为例具体分析。

7 日 18 时，500 hPa 上西风槽从贝加尔湖南伸到河套到华北一带，内蒙古中部地区存在低压闭合中心，涡度闭合中心基本与低压中心重合。贝加尔湖以西地区存在着阻塞高压。副高十分强大，5880 线西伸控制我国南方地区，从贝加尔湖东侧到我国黑龙江地区也在西风带高压脊的控制下，西风高压

脊与南面副热带高压打通。低空维持西南风急流，水汽从南海海面一直输送至华北地区。8 日 18 时，500 hPa 上贝加尔湖以西的阻高继续维持并东进，使得贝加尔湖到内蒙一带的低涡东移进入东北地区，降雨区域落于东北地区西部，最大降雨中心位于黑龙江西部。10 日 08 时西风槽加深，低涡中心继续东移，该日东北大部分地区出现强降水（图 10）。11 日，西风槽开始逐渐北退，500 hPa 上低涡中心和涡度中心加快东移，并略微北抬。此外，副高逐渐南退，使得低涡东部的高压脊减弱并逐渐消失，这也加速了低涡的东移，从而使得强降雨快速移出东北地区。此次降雨过程中，贝加尔湖以西阻塞高压的稳定对低涡的维持和形成有着重要作用。此外，副高的北抬使副高西侧的低空西南风急流的水汽输送正好到达东北地区。

5 小结

本文对 1990~2005 年夏季 6~8 月的东北暴雨过程进行了统计研究，发现它有很多不同于南

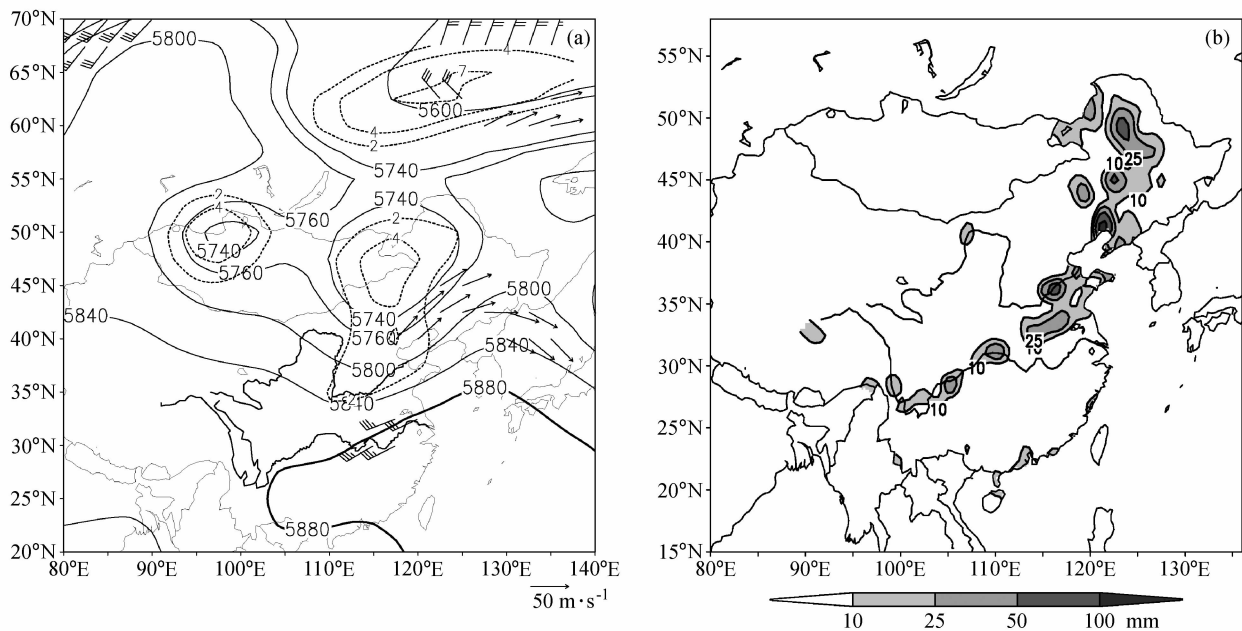


图 10 (a) 1998 年 8 月 10 日东北低涡暴雨天气形势分布图, 其他同图 2a; (b) 1998 年 8 月 9 日 20 时到 10 日 20 时全国雨量分布
Fig. 10 (a) The same as Fig. 2a, but for the heavy rainfall caused by Northeast China vortex (the case on 10 Aug 1998); (b) the 24-hour precipitation amount between 2000 LST 9 Aug and 2000 LST 10 Aug 1998

方暴雨的特点。1990~2005 年 16 年间的暴雨日 (东北地区日降雨量大于或等于 50 mm 的站点数至少为 5 个) 总共有 90 天, 实际上独立的过程个例为 69 个 (持续一天个例 51 个, 持续 2 天个例 15 个, 持续 3 天个例 3 个)。1990~2005 年共发生大暴雨日 60 天, 平均每年 4 天。东北作为既受季风影响又受西风带系统影响的地区, 其特征十分明显。对这些个例的分类研究结果如下:

(1) 考虑阻塞高压、热带及副热带系统和西风带系统之间的相互作用, 东北暴雨过程的主要影响系统大致可分为 6 类: 1) 台风与西风带系统 (西风槽、东北低涡) 的远距离相互作用 (20 个, 28.9%); 2) 登陆台风 (或南来低涡) 北上与西风带系统 (西风槽、东北低涡) 相互作用 (16 个, 23.2%); 3) 台风直接暴雨 (1 个, 1.5%); 4) 低槽冷锋暴雨 (16 个, 23.2%); 5) 低空切变型暴雨 (2 个, 2.9%); 6) 东北低涡暴雨 (14 个, 20.3%)。

(2) 台风的远距离水汽输送或是登陆台风北上与西风带系统相互作用是东北地区产生大暴雨或持续性大暴雨的重要环流条件之一, 在所有个例中与台风有关的共有 37 个, 占总数 53.6%。6 类东北暴雨中前三类都是与台风活动有关的大暴

雨过程: 第一类中台风与西风带系统之间的距离较远, 它们各自的暴雨区位于中、低纬度不同的区域; 第二类中台风一般在东南沿海登陆, 沿着副高西侧的偏南气流北上, 被西风槽捕获或是与东北低涡合并产生暴雨; 第三类与前两类暴雨不同, 主要是台风低压直接造成的降水, 其中北部的高压坝, 一定程度上阻挡了台风低压的东移, 使得台风移动缓慢, 有利于大范围降雨的维持。本研究再次表明, 尽管东北地区纬度偏高, 但热带系统 (含台风) 的间接和直接影响是不可忽视的。特别是在环流形式呈东高西低, 高空西风带经向发展较盛时更加值得注意。

(3) 单独由东北低涡和西风槽前系统造成暴雨个例也比较多 (分别为 14 个, 20.3% 和 16 个, 23.2%), 东北低涡和西风带槽前系统也是大范围暴雨的重要影响系统。低槽冷锋暴雨主要发生在西风槽前, 受低槽冷锋影响或是槽前气旋移入东北引发大范围的暴雨, 其又可细分为 4 个小类。东北低涡暴雨按低涡移动路径也可分为 4 个小类: 从贝加尔湖向东南方向移入东北; 从蒙古或内蒙古自治区向东移入东北; 从河套或江淮流域向东北方向移入东北; 从东亚中高纬大槽南伸切断出的低涡向西南方向移入东北。本研究进一步揭示,

由于东北地区纬度偏高, 比起南方暴雨, 尤其是华南前汛期暴雨来, 西风带系统的影响, 特别是涡旋(扰动)的影响更加明显。因此, 对东北暴雨的预报, 应更加重视中纬度系统所产生的作用。

(4) 作为另一种重要的影响系统, 低空切变型的切变线一般在 700 hPa 或 850 hPa 层上较为明显, 高空环流一般较为平直, 以纬向型为主, 槽后弱脊对应低层大陆小高压, 它与副高之间形成(西)北风和西南风的切变, 从而引发暴雨, 由于其所在层次偏低, 生命史较短, 给预报增加了难度。这类切变线(尤其是暖切变)是我国北方所特有的暴雨影响系统, 应密切关注。

(5) 由台风引起及与台风相关的暴雨占暴雨总次数的 53.6%, 从地域上讲似乎比华北的台风相关暴雨要多(孙建华等, 2005; 丁一汇等, 1980), 他们的 33 个例子中, 低涡, 暖切变和低槽冷锋占 23 次(70%), 也似乎比过去研究结果中的东北同类暴雨要多, 自 1954~1990 年由台风影响的暴雨(在吉林)共 24 次, 平均每年不到一次, 而 1990~2005 年 16 年中, 有 37 次影响东北地区, 统计地区大小虽不一样, 难以严格对比, 但数量变化仍是非常明显, 或许比 20 世纪 80 年代前有所增加, 其原因有待进一步分析。这是否表明, 在 21 世纪前后, 低纬系统更加活跃, 而这需要更长的时期和更多的个例来探讨, 因而, 应该继续加以关注。

(6) 6 类暴雨类型对应于不同的暴雨产生环流形势, 前三类主要跟台风有关, 受台风影响, 暴雨强度和范围都较大。后三类则是无台风影响暴雨, 其中低槽冷锋暴雨和东北低涡暴雨最为常见, 两者都是在西风槽(前)系统的作用下产生暴雨, 东北低涡中又主要是低纬暖湿气流输送到涡旋中上升产生暴雨。低空切变暴雨较为少见, 其主要产生机制位于低层。综上所述, 在台风环境中东北暴雨的预报应着眼于前三类暴雨类型, 无台风影响若存在西风槽, 预报应着眼于低槽冷锋暴雨和东北低涡暴雨, 而在无台风无明显西风槽环境中也不应忽视低层的暖切变暴雨。

本文只是利用了 1990~2005 年夏季 6~8 月的资料对东北暴雨过程的主要特征做了分析, 应当说还是很初步的, 其结果有待今后更多的资料分析来完善和补充。

参考文献 (References)

- 贝耐芳, 赵思雄. 2002. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统及其环境场研究 [J]. 大气科学, 26 (4): 526 - 540. Bei Naifang, Zhao Sixiong. 2002. Mesoscale analysis of severe local heavy rainfall during the second stage of the 1998 Meiyu season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 526 - 540.
- 丁一汇, 李吉顺, 孙淑清, 等. 1980. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析 [J]. 中国科学院大气物理研究所集刊 (第 9 号), 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社, 1 - 13. Ding Yihui, Li Jishun, Sun Shuqing, et al. 1980. The analysis on mesoscale systems producing heavy rainfall in North China [J]. Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (No. 9) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1 - 13.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 255pp. Ding Yihui. 1993. Study on the Lasting Heavy Rainfalls over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 255pp.
- 姜学恭, 孙永刚, 沈建国. 2001. 一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟研究 [J]. 气象, 27 (1): 25 - 30. Jiang Xuegong, Sun Yonggang, Shen Jianguo. 2001. A numerical simulation and contrast test on a northeastern vortex rainstorm [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (1): 25 - 30.
- 贾小龙, 王谦谦. 2006. 东北地区汛期降水异常的大气环流特征分析 [J]. 高原气象, 25 (2): 309 - 318. Jia Xiaolong, Wang Qianqian. 2006. Analyses on general circulation character of precipitation anomaly in Northeast China flood season [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (2): 309 - 318.
- 龚晓雪, 赵思雄. 2007. 麦莎台风登陆后能量过程与水汽供应的诊断研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 437 - 452. Kung Hiu-suet, Zhao Sixiong. 2007. Diagnosis on energy budget and moisture supply of Matsa after landfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 437 - 452.
- 梁丰, 陶诗言, 张小玲. 2006. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析 [J]. 应用气象学报, 17 (3): 257 - 265. Liang Feng, Tao Shiyang, Zhang Xiaoling. 2006. Diagnostic analysis of a heavy rain event in North China caused by the development of yellow river cyclone [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (3): 257 - 265.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 309 - 319. Qiao Fengxue, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of northeast vortex producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 309 - 319.
- 孙建华, 赵思雄. 2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值

- 模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (3): 381-392. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (3): 381-392.
- 孙建华, 赵思雄. 2002. 华南“94.6”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 β 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.
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20 世纪 90 年代华北大雨过程特征的分析研究 [J]. 气候环境与研究, 10 (3): 492-505. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 492-505.
- 孙力, 安刚, 丁立, 等. 2000. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析 [J]. 气象学报, 58 (1): 70-81. Sun Li, An Gang, Ding Li, et al. 2000. A climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (1): 70-81.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainfall in China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 225pp.
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 184pp. Tao Shiyan, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. 2001. The Study on Formation Mechanism and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 184pp.
- 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一次华南锋前暖区暴雨 (中尺度系统环境特征的分析研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 988-1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of Meso- β -Scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 988-1008.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003 年 [M]. 北京: 气象出版社, 170pp. Zhang Qiyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2004. The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China—2003 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 170pp.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 282pp. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 282pp.
- Zhao Sixiong, Bei Naifang, Sun Jianhua. 2007a. Mesoscale analysis of severe heavy rainfall in Hong Kong during pre-rainy season in South China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (4): 555-572.
- Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007b. Study on cut-off low pressure systems causing flood in northeast Asia [J]. Meteor. Atmos. Phys., 96: 159-180.
- 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 299pp. Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai Renhai. 1992. Heavy Rainfall in Northeast China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 229pp.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. '98 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 220pp. Zhou Xiuji, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. 2003 Scientific Test Research on Heavy Rainfall in South China in 1998 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 220pp.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 1992. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 1992. Principium and Method in Synoptic Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 649pp.