

20世纪90年代华北大暴雨过程特征的分析研究

孙建华 张小玲* 卫捷 赵思雄

中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

摘要 首先对1960~1999年的华北夏季暴雨过程进行了统计分析,之后,又进一步对1990~1999年造成夏季特大暴雨过程的天气形势进行了分型研究。结果表明,从20世纪60年代到90年代夏季每10年发生的暴雨和大暴雨次数基本相当,40年中山西和河北的北部暴雨发生次数在20次以上,沿海地区暴雨发生次数为60~100次。1990~1999年的6~8月华北地区发生大暴雨共39天,大体可分为5型:1型为台风与低槽(低涡)远距离相互作用;2型为低涡(登陆台风)与西风槽相互作用;3型为登陆台风北上受高压阻挡停滞;4型为低涡暴雨;5型为暖切变暴雨。其中,台风和低涡是主要影响系统。最后,对北京夏季的暴雨过程也进行了统计和分型研究。40年中有7年未发生暴雨,而最多的年份发生了5次,存在很明显的年变化。研究表明,尽管北京暴雨具有华北暴雨的共同特征,但也有北京地区的特点,如以暴雨频次而言,最多的是低涡暴雨,其次是台风与低槽(低涡)相互作用型。另外,低槽冷锋暴雨也是一类值得关注的系统。

关键词 华北大暴雨 台风 低涡暴雨 暖切变暴雨

文章编号 1006-9585 (2005) 03-0492-15 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

A Study on Severe Heavy Rainfall in North China during the 1990s

SUN Jian-Hua, ZHANG Xiao-Ling, WEI Jie, and ZHAO Si-Xiong

*Laboratory of Cloud Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The general statistical characteristics of heavy rainfall processes occurring in North China during 1960—1999 are analyzed firstly, afterwards, the severe heavy rainfall processes of 1990—1999 are classified into five types and their features of weather pattern are studied further. The statistical studies show that the occurrence frequency of heavy rainfall in the summer of each decade from 1960 to 1999 is very similar. 20 heavy rainfall cases occurred in northern Shanxi and northern Hebei provinces in the summer during 40 years, at the same time, 60—100 cases in coastal area. There were 39 days of severe heavy rainfall in the summer of 1990—1999. And the mentioned-above cases are classified into five types: 1) the remote interaction between typhoon and westerly trough (or vortex), 2) the direct interaction between vortex (or landing typhoon) and westerly trough, 3) the standstill or slow-moving of landing typhoon stopped by high pressure in the continent, 4) vortices in the lower-middle troposphere and 5) shear line pushed by warm air. Generally speaking, among them, the typhoon and vortices are the most important heavy-rainfall-producing systems in North China. Finally, the heavy rainfall occurred in Beijing from 1960 to 1999 are investigated. During 40 years, no heavy rainfall for 7 years and the maximum of 5 cases in one summer. It is revealed that the annual variation of heavy rainfall frequency in Beijing is remarkable. Therefore, the further study on heavy rainfall in Beijing should still be paid more attention. The certain characteristics of heavy rainfall in

收稿日期 2004-10-13 收到, 2005-07-22 收到修定稿

资助项目 中国科学院奥运科技项目 KACX1-02 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213

作者简介 孙建华, 女, 1972年出生, 博士, 主要从事中尺度天气分析和数值模拟以及沙尘天气的研究, E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn
*现在工作单位: 中国气象局国家气象中心

Beijing are, in some ways, similar to those of heavy rainfall in North China, but there still exist some differences between them, for instance, type 4 and type 2 are the most important weather pattern producing heavy rainfall in Beijing and North China, respectively. In addition, the cold front with trough is also important for the heavy rainfall occurrence in Beijing.

Key words heavy rainfall in North China, Typhoon, vortex, shear line

1 引言

华北是我国东部夏季三大降雨区之一, 20 世纪 90 年代以来处在相对的干旱期, 因而, 近年来对华北暴雨的研究相对较少。华北暴雨的次数虽少, 但降水强度却较强。据统计, 华北地区 6~8 月的降雨量占年降雨量的 50% 以上, 且主要由几场暴雨造成, 一次暴雨的日降水量有时可达月降水量的 50% 以上。华北地区 80%~90% 的暴雨出现在 6~8 月, 并且主要集中在 7 月下旬至 8 月上旬, 即所谓的“七下八上”^[1,2]。建国以来, 华北地区主要的暴雨洪涝灾害有: “58·7” 黄河中游的特大暴雨和洪水; “63·8” 海河流域的特大暴雨和洪水; “75·8” 河南的特大暴雨和洪水; “96·8” 河北的特大暴雨和洪水。

对 20 世纪 80 年代以前的华北暴雨过程有过统计分析和分型研究^[1~3], 根据对 1958~1976 年华北地区的 33 次暴雨过程的分析, 丁一汇等^[3]归纳出造成华北暴雨的天气形势特点: 1) 华北暴雨主要发生在东高西低或两高压对峙的环流形势下, 当长波槽位于 100~110°E 之间时, 对华北暴雨最有利。另外, 当北面形成高压坝时, 北上台风深入内陆受阻或切断低涡稳定少动也会造成暴雨。2) 低涡、暖切变线和低槽冷锋是造成华北暴雨的主要天气尺度系统。3) 华北强烈的暴雨大部分出现在两个或两个以上天气系统的相互作用或相互叠加的情况下, 暖切变线与低涡相叠加; 低槽冷锋与低涡叠加; (南北或东西方向) 低槽的合并和加强; 高空冷涡与台风或西南涡结合。4) 大部分暴雨发生时, 有低空急流的出现。5) 华北地形对暴雨的出现有一定的作用。还应当强调, 除对流天气型外, 在 80 年代对有重大影响的河南“75·8” 特大暴雨也作了较深入的探讨^[4~6]。

应当指出, 对 20 世纪 50~70 年代华北地

区的暴雨过程已经进行了大量的研究, 已有的研究成果表明, 华北暴雨具有一些与华南和江淮梅雨锋暴雨不同的特点^[7,8], 其发生发展带有很大的突发性和局地性, 因此, 值得深入开展专门的研究。

80 年代以后, 对华北暴雨仍有少量研究, 如孙建华等^[9]对 9406 号台风登陆北上与西风槽相互作用引发的华北大暴雨进行了诊断分析; 程麟生等^[10]对 1996 年 8 月 3~5 日 (“96·8”) 河南、山西、河北等省发生的特大暴雨洪涝过程进行了研究。这些研究相对我国华南和长江流域暴雨, 无论是深度和广度都是很不够的, 特别是 90 年代华北 (含北京) 处于相对的干旱期, 弄清其降水和暴雨的特征是很有必要的, 因此, 本文首先对 1960~1999 年 40 年的华北夏季暴雨、大暴雨过程进行了统计分析, 然后对 90 年代发生在华北的一些大暴雨过程进行分类研究, 最后, 对 90 年代北京夏季的暴雨过程进行了分析。对某些个例的深入分析将另文研究。

2 资料和个例的选择

采用全国 730 个地面站的日降水资料 (这里日降雨量是指前一天北京时 20 时至当日 20 时) 对 1960~1999 年华北地区暴雨个例作了选择, 华北地区本文指定为 (35~45°N, 110~124°E), 这一地区大约有 124 个站点 (见图 1)。对每 10 年每个站点发生的暴雨、大暴雨次数的统计结果表明, 从 20 世纪 60 年代到 90 年代夏季每 10 年发生的暴雨和大暴雨次数基本相当 (图略)。图 2 给出了 1960~1999 年和 1990~1999 年 6~8 月的暴雨和大暴雨频次。在干旱的内蒙古地区暴雨也不少发生, 40 年中大部分地区都有 5 次以上; 山西和河北的北部可多达 20 次以上, 也就是说约 2 年有 1 次暴雨发生; 沿海地区暴雨发生次数在 60~100 次, 即每年有 1~3 次暴雨发生, 频率还是相当高

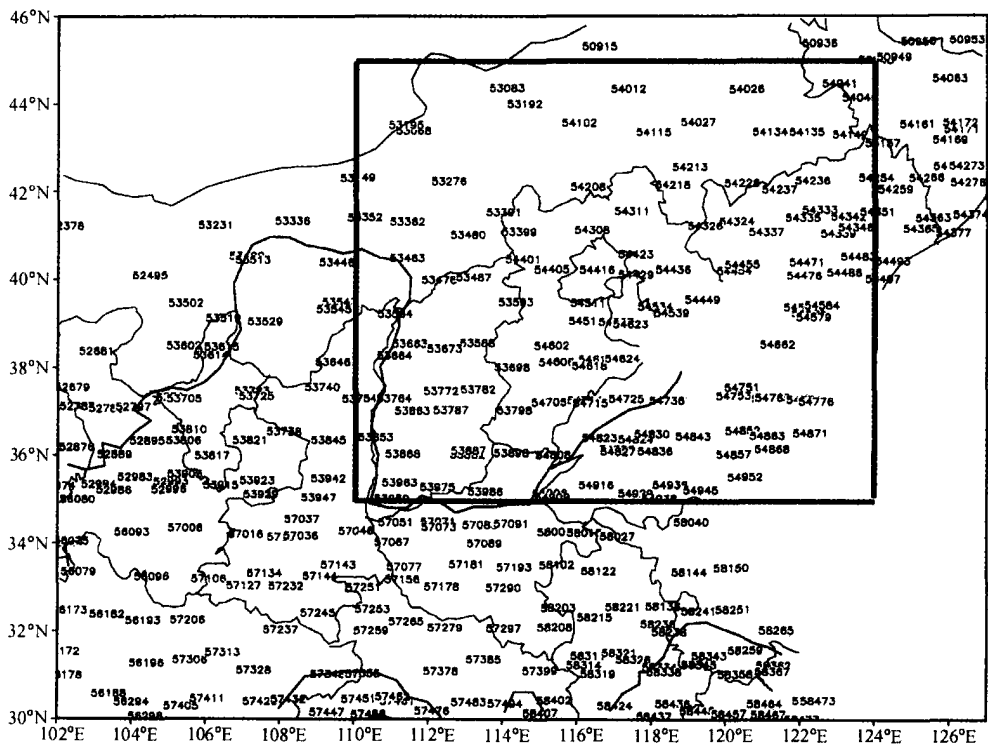


图1 地面站点分布。图上数字为站号，框内表示华北地区

Fig. 1 The distribution of surface stations. The digital is station number and inside of the rectangle is North China

的(图2a)。大暴雨的发生次数从内蒙古、山西、河北北部的1次到沿海地区的20次左右,即华北大部分地区,一般情况下2~5年发生一次大暴雨(图2c)。

对1990~1999年6~8月每个站点发生的暴雨、大暴雨次数进行统计的结果表明(图2b、d),除了内蒙古的一些地区,华北的大部分地区都有暴雨发生,在太行山东麓及其以东地区,10年的暴雨频次在10次以上,即大部分站点每年夏季都有1~2次暴雨发生,暴雨发生频次最高的地区集中在山东半岛、渤海湾以及辽宁和吉林东部的山区(图2b)。而对于大暴雨,10年中一般发生1~5次,两年能发生1次大暴雨的站都不是很多(图2d)。从以上分析看,90年代发生的暴雨和大暴雨频次与1960~1999年的频次相当。

图3给出了1960~1999年华北地区98个站发生暴雨、大暴雨和特大暴雨的频次,选取的98个站的40年资料都是完整的,而建站晚于1960年和地址有变更的站点没有采用。统计结果表明每年暴雨次数在100次左右,即平均每年每个站发生一次暴雨,最大值出现在1963年,最小值出

现在1968年,1999年比1968年还稍多(图3a)。大暴雨次数以1963、1994年最多,大约38次(图3b)。特大暴雨出现频次以1963和1975年最多,为6次(图3c)。暴雨发生频次高的年份都有持续性大范围暴雨发生,如“63·8”海河流域的特大暴雨;“75·8”河南的特大暴雨;1994年7月华北和东北南部的特大暴雨。从这个统计结果可知,虽然近年来华北地区处于相对的干旱期^[11、12],但暴雨、大暴雨还是有可能发生,而且有的还会造成严重的洪涝灾害。

这里我们定义:在华北地区,当日降雨量大于或等于50mm的站点数至少为9个,且其中至少有一站最大降雨量达到或大于100mm时,就定为一次大暴雨日。对90年代的统计可用的站数要多一些,为115个站。1990~1999年的6~8月发生大暴雨共39天(见表1),平均每年3.9次。发生次数最多的是1994、1996、1998年都为7天,其次是1991年有5天,1997年有4天,1990、1995年为3天,而1992、1993、1999年都只有1天。6~8月中6月只发生了4天,而7、8月分别为18、17天,华北地区的大暴雨主要发生

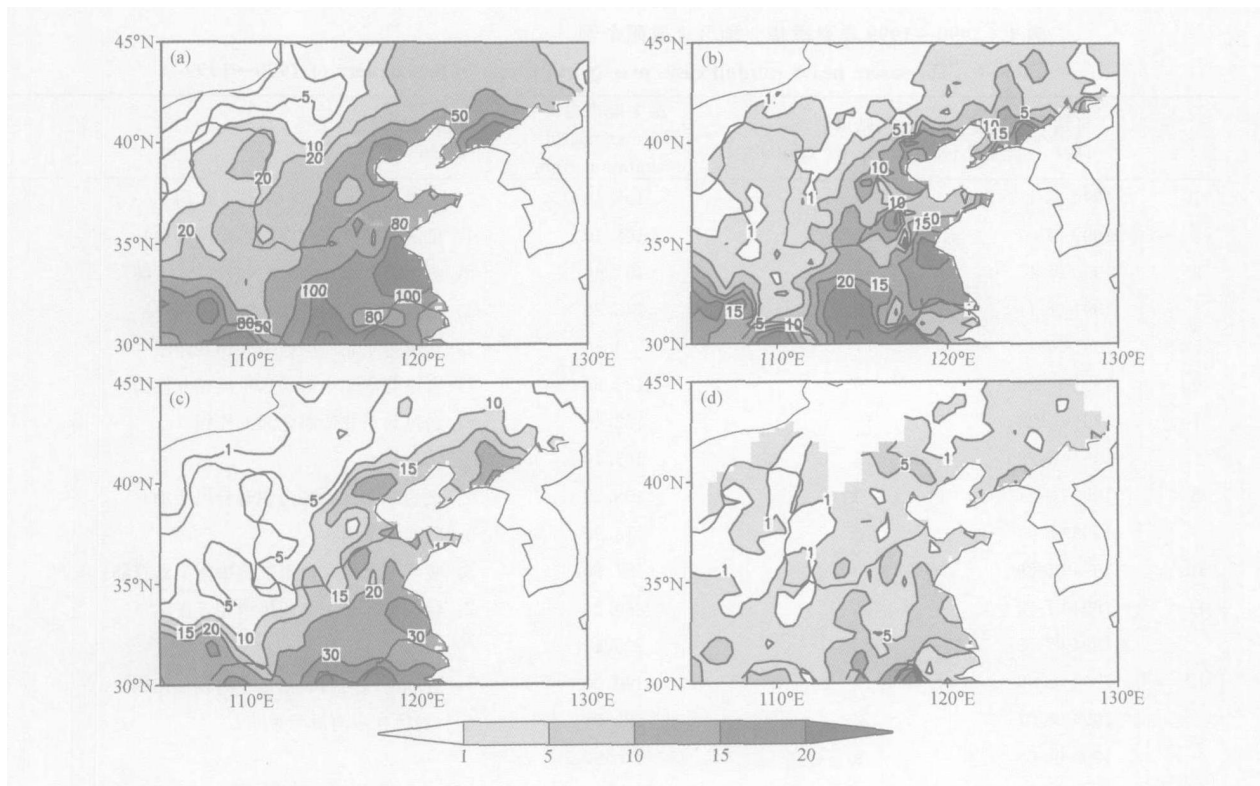


图2 暴雨 (a、b) 和大暴雨 (c、d) 发生频次 (单位: 次)。左侧是 1960~1999 年 6~8 月, 右侧是 1990~1999 年 6~8 月

Fig. 2 The frequency of heavy rainfall (a, b) and severe heavy rainfall (c, d). Left panel is for the summer of 1960—1999, right panel is for the summer of 1990—1999

在 7~8 月。下面再分析一下特大暴雨个例, 特大暴雨个例定义为暴雨站数到达或超过有 9 个, 至少有一个站的降雨量到达或超过 200 mm。90 年代总共只有 5 天为特大暴雨个例 (表 1 中带 * 号的个例), 其中, 4 天与登陆台风有关, 1 天与低涡暴雨有关。最大的降雨为 1996 年 8 月 4 日河北石家庄的 359.3 mm, 这次过程是台风登陆北上后, 受东侧高压阻挡停滞造成。

3 大暴雨个例的分类

对暴雨的分类有多种方式, 一般以大尺度环流形势特征或以影响系统来分型。陶诗言^[1]将我国大暴雨的环流形势分为 3 类: 稳定的经向型、稳定的纬向型和过渡型。第 1 类: 西风带以经向环流为主, 长波系统移动缓慢或停滞少动, 副热带高压稳定偏北, 中低纬系统容易发生相互作用; 第 2 类: 西风带 (35~55°N) 盛行纬向环流, 多短波槽活动, 副高也比较稳定, 呈带状; 第 3 类的主要特征是副热带高压位置不稳定。在这 3 类

形势中, 以第 1 类的暴雨强度最大, 第 3 类最弱。当然, 也有根据具体的影响天气系统进行分类的。本文主要研究华北地区的大范围暴雨过程, 这些暴雨过程的天气形势大多为稳定的经向型或纬向型, 因此, 为讨论问题的方便, 主要根据每次暴雨过程的影响天气系统来分类进行讨论。

表 1 中列出的 20 世纪 90 年代的 39 天大暴雨中有几次是持续大暴雨, 属同一过程, 因此只有 31 个个例, 根据影响天气系统对 31 个暴雨个例的分类如下: (1) 台风与低槽 (低涡) 远距离相互作用 (10 个); (2) 低涡 (登陆台风) 与西风槽相互作用 (6 个); (3) 登陆台风北上受高压阻挡停滞 (1 个); (4) 低涡暴雨 (8 个); (5) 暖切变暴雨 (6 个)。它们分别占 32.2%、19.4%、3%、26% 和 19.4%。其中, 持续两天以上的个例有: 1991 年 7 月 28~29 日 (台风与东北低涡相互作用), 1994 年 7 月 12~13 日 (登陆台风北上与西风槽相互作用), 1994 年 8 月 6~8 日 (登陆台风与西风槽远距离相互作用), 1996 年 7 月 24~25 日 (台风与东北低涡远距离相互作用), 1996 年 8

表 1 1990~1999 年夏季华北地区大暴雨个例

Table 1 The severe heavy rainfall cases over North China in the summer of 1990—1999

日期 Date	暴雨站点数 Number of heavy rainfall	最大降雨量 The maximal of precipitation / mm	分型 Classification	
1	1990-06-18	10	105. 10	1: 台风与西风槽远距离相互作用
2	1990-07-07	22	108. 10	4: 低涡暴雨 (副高南侧有台风活动)
3	1990-08-16	10	151. 40	5: 暖切变暴雨 (副高南侧有台风活动)
4	1991-06-11	13	143. 20	4: 低涡暴雨
5	1991-07-22	11	109. 50	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
6	1991-07-25	9	136. 60	1: 台风与华北小低涡远距离相互作用
7	1991-07-28	15	152. 40	2: 台风与东北低涡之间的作用
	1991-07-29	12	165. 50	
8	1992-07-21	9	108. 60	4: 低涡暴雨 (副高南侧有台风活动)
9	1993-08-04	10	113. 90	5: 暖切变暴雨
10	1994-06-29	16	187. 80	5: 暖切变暴雨 (热带气旋中南半岛登陆)
11	* 1994-07-12	11	260. 20	2: 台风登陆北上与西风槽相互作用
	* 1994-07-13	25	225. 10	
12	1994-08-06	16	160. 00	1: 登陆台风与西风槽远距离相互作用
	1994-08-07	12	188. 00	(台风在东南沿海登陆)
	1994-08-08	9	170. 90	
13	1994-08-16	16	188. 90	2: 登陆台风与西风槽相互作用
14	1995-07-25	21	144. 90	5: 暖切变暴雨
15	1995-07-29	15	125. 60	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
16	1995-08-16	10	115. 70	5: 暖切变暴雨
17	1996-06-29	9	125. 90	2: 江淮气旋与西风槽相互作用
18	1996-07-24	13	130. 80	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
	1996-07-25	9	143. 20	(副高南侧有台风)
19	1996-07-30	11	156. 20	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
20	* 1996-08-04	9	359. 30	3: 登陆台风北上受阻引发暴雨
	1996-08-05	9	141. 80	(副高南侧有台风)
21	1996-08-11	9	160. 40	4: 低涡暴雨 (台湾以东有台风)
22	1997-08-01	9	116. 60	1: 登陆台风与西风槽远距离相互作用
23	* 1997-08-19	10	250. 20	2: 登陆台风北上与西风槽相互作用
	1997-08-20	30	172. 80	
	1997-08-21	11	154. 40	
24	1998-07-06	10	110. 90	4: 低涡暴雨
25	1998-07-08	9	158. 40	4: 低涡暴雨
26	1998-07-13	17	175. 90	5: 暖切变暴雨
27	* 1998-07-14	11	317. 70	4: 低涡暴雨
28	1998-07-24	16	177. 70	4: 低涡暴雨
29	1998-08-04	16	191. 30	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
30	1998-08-22	11	145. 70	1: 登陆台风与西风槽 (低涡) 远距离相互作用
31	1999-08-10	9	134. 20	2: 江淮气旋与西风槽相互作用 (副高南侧有气旋)

“ * ” 为特大暴雨个例

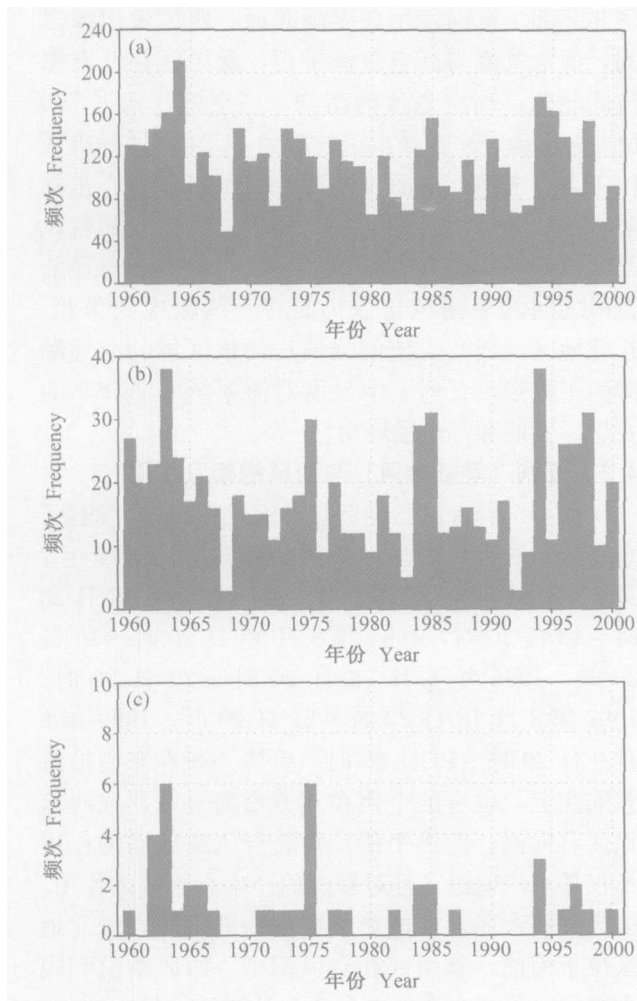


图3 1960~1999年6~8月华北地区发生暴雨(a)、大暴雨(b)和特大暴雨(c)的总频次

Fig. 3 The total frequency of heavy rainfall (a), severe heavy rainfall (b) and extreme severe heavy rainfall (c) for the summer of 1960-1999

月4~5日(登陆台风北上受高压阻挡), 1997年8月19~21日(登陆台风北上与西风槽相互作用)等6次。这6次持续性大暴雨的发生都与登陆台风北上有关, 可见, 登陆台风北上与西风带系统相互作用是华北地区产生持续性暴雨的重要环流条件之一。

统计结果31个个例中有23个个例与登陆台风或副高南侧未登陆台风有关, 约占74%。登陆后的台风有两个作用: 直接与中纬度系统作用引发强暴雨, 台风东侧东南急流的水汽输送对暴雨有增强作用。伴随洋面上未登陆台风的北上, 副高常北抬, 而副高北抬是华北暴雨产生的重要环流条件。

4 各类暴雨的影响天气系统的特点

在研究中, 人们很早就已经注意到夏季发生在中纬度的大暴雨一般都有来自热带的天气系统的影响。而西太平洋是世界上台风发生最频繁的地区, 常有台风在我国登陆或在沿海活动, 当条件有利时, 就可与中纬度系统发生相互作用。一般来说, 中低纬度系统相互作用的个例降雨区域广、时间较长、强度也较大, 甚至引发北方的特大暴雨。关于中低纬系统相互作用的重要性, 国内外学者对此已有很多研究, 台风与中纬度系统的相互作用主要表现为3种形势: 第1种是相互作用后使台风变性, 转变为典型的温带气旋, 这种情况多发生在北美, Palmó^[13]、DiMego等^[14, 15]分别对深入北美的Hazel和Agnes飓风及其与中纬度系统的相互作用进行了研究。第2种是登陆台风北上与西风槽结合, 但不转变为温带气旋, 这种情况在东亚比较常见。第3种是与西风带系统发生远距离相互作用, 输送水汽到北方。

在下面将要讨论的大暴雨类型和个例大部分与台风的活动有关, 其与中纬度系统相互作用的类型一般属于上面提到的后2类。

4.1 台风与低槽(低涡)远距离相互作用

此类个例台风与低槽(低涡)的距离在几百公里以上, 台风没有登陆或刚在两广沿海登陆, 台风的暴雨区与低槽暴雨区位于不同的区域。个例有10个, 占的比例最高: 1990年6月17日20时~18日20时, 1991年7月21日20时~22日20时, 1991年7月24日20时~25日20时, 1994年8月5日20时~8日20时, 1995年7月28日20时~29日20时, 1996年7月23日20时~25日20时, 1996年7月29日20时~30日20时, 1997年7月31日20时~8月1日20时, 1998年8月3日20时~4日20时, 1998年8月21日20时~22日20时。此类个例台风一般在南海或西太平洋台湾附近地区, 也有在两广登陆后西行的, 台风的作用主要为台风东侧东南低空急流的水汽输送。低槽是指西风槽, 低涡一般是东北低涡, 存在于对流层中低层, 低槽(低涡)位于华北或东北地区, 槽线一般在110~120°E, 但也有东北-西南向低槽位于日本, 东北风入侵华

北的情况。副高一般西伸偏北，南侧热带气旋的活动也有利于副高北抬。暴雨区位于低槽（低涡）与副高之间。

这 10 个个例中有 2 次持续大暴雨个例：1994 年 8 月 5 日 20 时~8 日 20 时和 1996 年 7 月 23 日 20 时~25 日 20 时。下面以 1994 年 8 月 6 日为例分析这类个例的特点。台风于 8 月 4 日在福建沿海登陆，之后，向西北方向移动，此时，西风槽位于贝加尔湖以西，槽线在 95°E，而副高在登陆台风的影响下开始东退北抬。8 月 5~6 日随着西风槽的东移和登陆台风低压的北上，中低纬系统处于有利于相互作用的配置。1994 年 8 月 6 日的降雨量（图 4）显示：由于西风槽和登陆台风低压的影响，形成了从华南到东北北部的一条长约 3 000~4 000 km 的雨带，除了与登陆台风本身有关的华南地区的暴雨区外，主要的暴雨区在华北和东北地区，从华北北部到东北，有 4 个大暴雨中心。

图 5 是 1994 年 8 月 6 日的天气形势分布，此图中的高度和环流采用了 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 2.5°×2.5 再分析资料， ω 和涡度也是采用 NCEP 2.5°×2.5 再分析资料计算的，雨量资料是前面提到的站点资料，图 7、9、11 也是采用同样的资料。 ω 线没有出现江淮梅雨的密集分布，但 342 K 等 ω 线已经伸到

华北北部，暴雨发生在副高北面、西风带南缘之间，低空急流与高空急流平行，暴雨区在低空急流的北侧、高空急流的南侧。高空槽（根据 500 hPa 涡度确定）在暴雨区的西侧 110°E，即暴雨区位于高空槽前，南面副高西侧的正涡度中心是登陆台风减弱后的低压。此个例中，虽然登陆台风与西风带系统有几百公里的距离，但副高与登陆台风之间的东南风急流仍能将水汽输送到华北、东北地区，低空急流的强输送使该区域的空气潮湿而不稳定，有利于中尺度对流系统（MCS）的发生、发展和产生强降雨。

4.2 低涡（登陆台风）与西风槽相互作用

此类个例台风已经登陆北上，西风槽“捕获”登陆减弱的台风低压。个例共有 6 个：1991 年 7 月 27 日 20 时~29 日 20 时，1994 年 7 月 11 日 20 时~13 日 20 时，1994 年 8 月 15 日 20 时~16 日 20 时，1996 年 6 月 28 日 20 时~29 日 20 时，1997 年 8 月 18 日 20 时~21 日 20 时，1999 年 8 月 9 日 20 时~10 日 20 时。台风一般在东南沿海登陆北上，也有的个例在北方沿海登陆，或西南地区有低涡。此类个例，登陆台风或低涡的作用不仅是水汽输送，且对暴雨的产生有直接的作用。因为登陆台风北上的影响副高一般偏东，华北地区位于槽前，暴雨区在台风倒槽、西风槽前和副高之间。这 6 个个例中有 3 个是持续大暴雨个例，其中 1997 年 8 月 18 日 20 时~21 日 20 时大暴雨持续 3 天，有两个台风先后登陆，在这种形势下，非常有利于出现持续大暴雨。

这里以 1994 年 7 月 12 日为例分析此类个例的特点，在 7 月 10 日的前后几天中，中层（500 hPa）上中高纬度地区形势稳定，贝加尔湖以西有一阻塞高压，脊前的低槽位于河套地区，台风 11 日在福建登陆后，副高北抬，副高西侧的偏南气流、西风槽前的西南气流引导台风低压北上，12 日 08 时，登陆台风低压与西风槽合并，形成一个南北向的低槽，向南伸到 25°N（图略）。在此过程中，虽然有冷空气进入登陆的台风低压系统，但冷空气不强，低压并没有迅速发展成为温带气旋。12 日形成了从华南到华北北部的大约 2 000 km 长的南北向雨带（图 6），暴雨出现在低压的东侧和台风倒槽与西风槽结合的地方。

图 7 是 1994 年 7 月 12 日的天气形势分布，

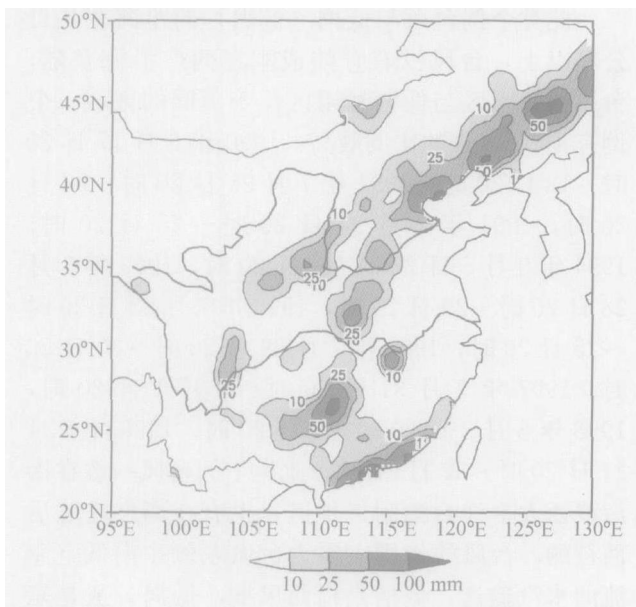


图 4 1994 年 8 月 5 日 20 时~6 日 20 时的 24 h 降雨量

Fig. 4 The 24 h precipitation of 2000 LST 5—2000 LST 6 August 1994

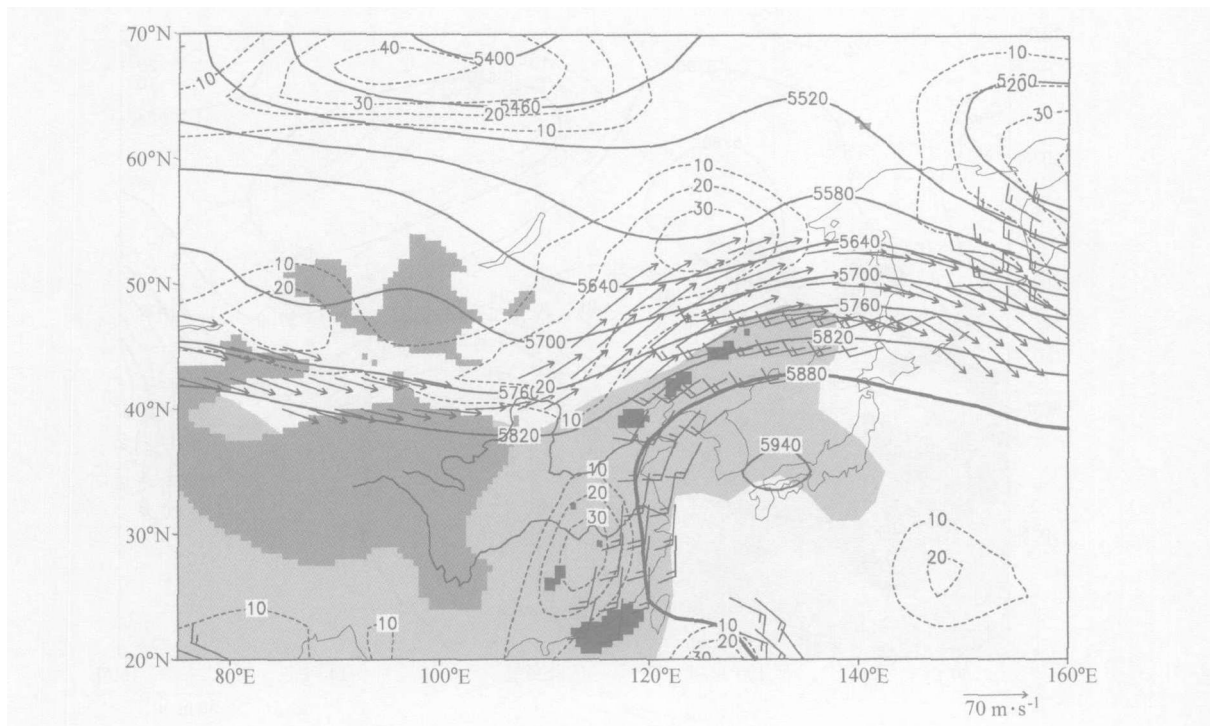


图 5 台风与低槽（低涡）远距离相互作用天气形势分布（个例 1994 年 8 月 6 日）。浅色阴影区为 850 hPa 等 338 K；稍深的阴影区为地形大于 1 500 m；深色阴影区表示 24 h 降雨量 50 mm 的暴雨中心；风速 40 m · s⁻¹ 表示 200 hPa 上的高空急流（箭矢线），风速 12 m · s⁻¹ 表示 850 hPa 上的低空急流（风标）；粗实线为 500 hPa 等高线（单位：gpm）；短虚线为 500 hPa 上的等涡度线（单位：10⁻⁵ s⁻¹）

Fig. 5 The composite synoptic weather pattern for the remote interaction between typhoon and westerly trough (or vortex), the case of 6 August 1994. Shallow shaded is 338 K on 850 hPa, middle shaded is topography greater than 1 500 m and deep shaded is 24 h precipitation 50 mm. The arrows are wind speed 40 m · s⁻¹ on 200 hPa and barbs represents wind speed exceeding 14 m · s⁻¹ on 900 hPa. The thick solid lines are geopotential height in gpm on 500 hPa. The short dashed lines are vorticity (units: 10⁻⁵ s⁻¹) on 500 hPa

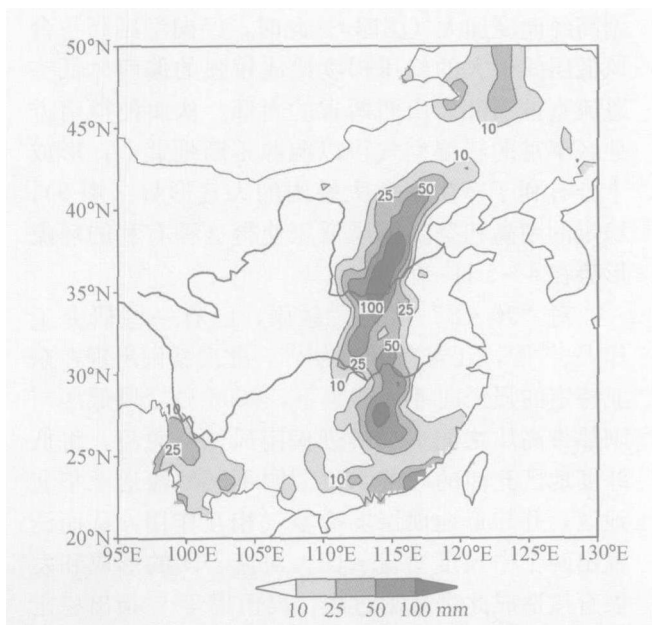


图 6 1994 年 7 月 11 日 20 时 ~ 12 日 20 时的 24 h 降雨量

Fig. 6 The 24 h precipitation of 2000 LST 11—2000 LST 12 July 1994

342 K 等温线已经伸到华北北部，该地区已经非常潮湿，暴雨发生在副高西北面、西风带南缘之间，低空急流与高空急流相交于华北地区，高空槽（根据 500 hPa 涡度确定）在暴雨区的西侧 115°E，南面副高西侧的正涡度中心是登陆台风减弱后的低压，暴雨主要发生在台风倒槽与西风槽的结合部，此个例中，登陆台风倒槽与西风槽相遇，副高与登陆台风之间的东南风急流将水汽输送到华北地区。与上一个个例相比，低空急流水汽输送的距离要短一些，但没有到达东北，主要的原因是副高位置偏南。

4.3 登陆台风北上受高压阻挡停滞

由于 1996 年 8 月 3 日 20 时 ~ 5 日 20 时的登陆台风北上造成的暴雨与第 2 类暴雨有明显不同，副高与华北的高压脊打通，形成高压坝，使登陆台风北上受阻，这次过程的暴雨主要是登陆台风本身减弱后的低压造成的。图 8 是此次过程造成

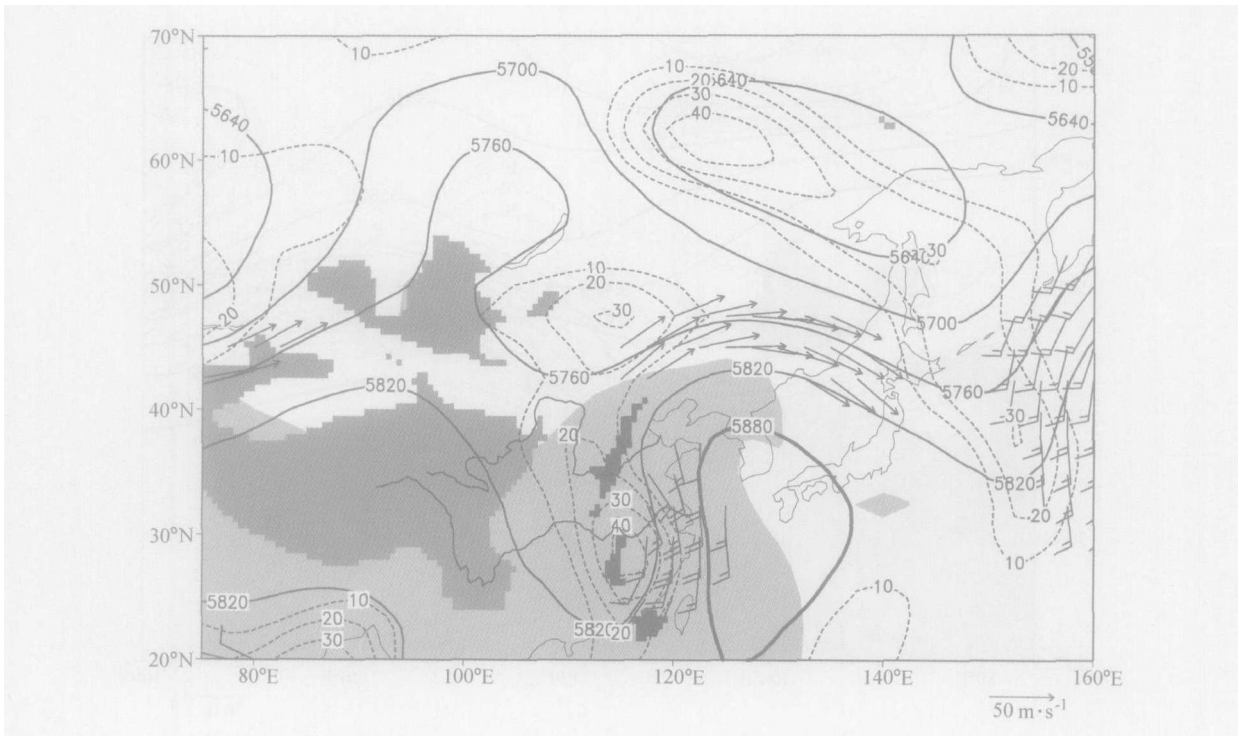


图7 同图5, 但为低涡(登陆台风)与西风槽相互作用天气形势分布(个例1994年7月12日)

Fig. 7 The same as Fig. 5, but for the direct interaction between vortex or landing typhoon and westerly trough, the case of 12 July 1994

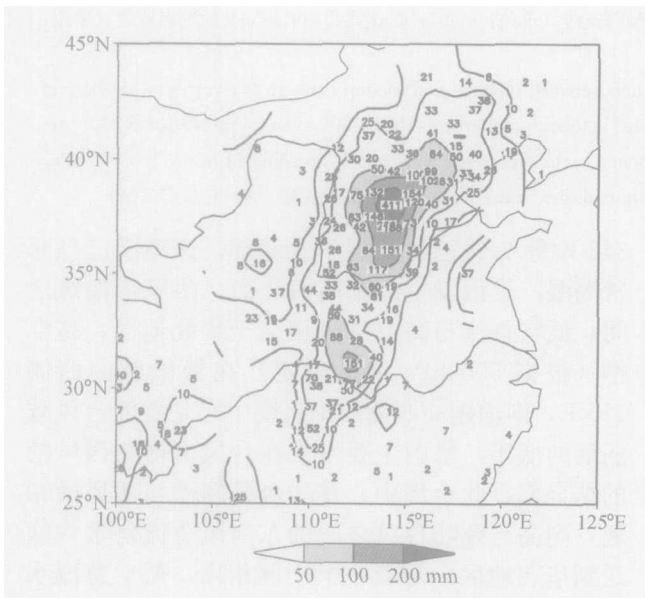


图8 1996年8月3日20时~5日20时的降雨量。等值线间隔为: 10、25、50、100、200 mm, 图中的数字是降雨量

Fig. 8 The 48 h precipitation of 2000 LST 3—2000 LST 5 August 1996. The interval of isolines are 10, 25, 50, 100, 200 mm. The digital is amount of precipitation on the site

的降雨, 这次过程使得湖北、河南、山西和河北均出现暴雨, 最大的暴雨中心在河北、山西交界处, 雨量达 100 mm 以上, 其中最大降雨量为石

家庄的 411 mm (图 8); 而石家庄以西的一些地面站观测到了更强的降雨, 例如井陘县达 513 mm, 该县的胡家滩、吴家窑更是分别达到了 525 mm 和 670 mm。图 9 是此次过程的形势场分布, 1996 年 8 月 3 日 20 时槽后小高压并入副高北部, 副高经向度加大 (图略)。此时, 经向型副高与台风低压间很大的气压梯度造成较强的偏南风低空急流直抵河北、山西两省的南部, 从而使得南方地区丰富的暖湿空气得以源源不断地北上, 形成十分有利于产生华北大暴雨的天气形势 (图 9)。稳定的副高和登陆台风低压使得这种有利的环流形势在 4~5 日一直维持。

对“96·8”河北大暴雨, 已有一些研究工作^[10, 16~18], 江吉喜等认为^[17], 此次暴雨出现在东亚特定的强经向环流形势下, 9608 号台风低压与副热带高压之间形成的强偏南风低空急流, 将低纬度地区充沛的暖湿水汽源源不断地输送至华北地区, 并与近地面层弱冷空气相互作用, 从而诱发出两个中尺度对流云团。对流云团的形成和发展直接造成此次暴雨过程。冯伍虎等^[10]指出稳定的大型鞍形场和北移的台风低压与其东侧西太平洋副热带高压间的相互作用为“96·8”特大暴雨

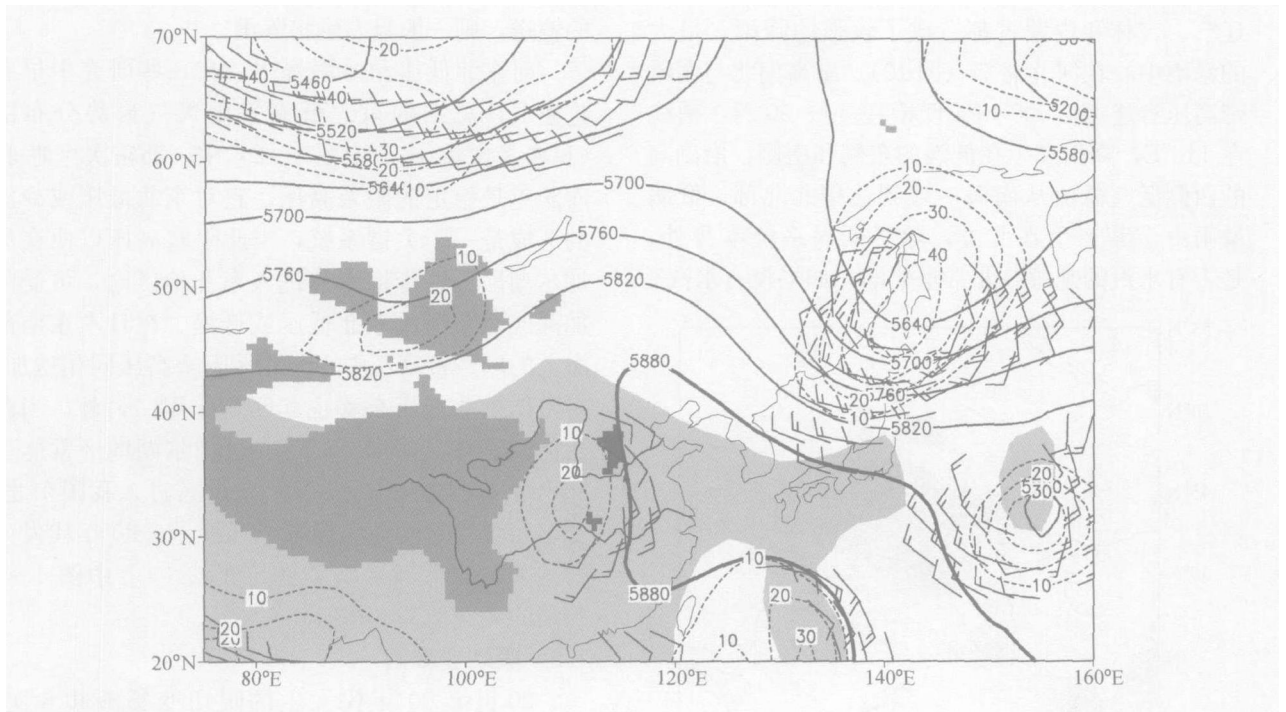


图 9 同图 5，但为登陆台风北上受高压阻挡停滞天气形势分布（个例 1996 年 8 月 4 日）

Fig 9 The same as Fig. 5, but for the standstill or slow-moving of landing typhoon by high pressure in the continent, the case of 4 August 1996

的发生提供了有利的大、中尺度环流背景。孙建华等认为台风低压云系外围发展起来的 2 个强对流云团是造成此次特大暴雨的直接影响系统。偏南低空急流中心一直伸展到对流层中层，比一般梅雨锋暴雨的低空急流伸展高，使充沛的水汽源源不断地输送到暴雨区。此外，来自华北小高压东侧海上的干冷空气和太行山对对流系统北移的阻挡作用，是导致强降雨出现并长时间维持在石家庄附近的可能原因。由于已经有较详细的研究，本文就不再赘述。

4.4 低涡暴雨

低涡暴雨一般指东蒙低涡，是比较深厚的高空冷性系统，有 8 个个例，在华北暴雨个例中排第 2 位，它们是：1990 年 7 月 6 日 20 时~7 日 20 时，1991 年 6 月 10 日 20 时~11 日 20 时，1992 年 7 月 20 日 20 时~21 日 20 时，1996 年 8 月 10 日 20 时~11 日 20 时，1998 年 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时，1998 年 7 月 7 日 20 时~8 日 20 时，1998 年 7 月 13 日 20 时~14 日 20 时，1998 年 7 月 23 日 20 时~24 日 20 时。此类暴雨在 500 hPa 上华北地区位于槽前，有时低槽中有切断低压出现，低涡位于华北北部或东北南部，有时低

层涡旋并不明显，而仅有对流层中层的涡旋系统，副高一般偏西偏北，西南风的水汽输送是主要的水汽来源。有些个例中，也有台风在南海或台湾附近活动，但总体来说，与暴雨的关系不如第 1 类明显。夏季当冷涡维持，水汽供应不太丰富时，一般不会出现暴雨，而是仅引发强烈对流天气，如飑线和强风暴等^[19]。在 8 个个例中 1998 年有 4 个，且 1998 年东北地区多低涡活动，造成了松花江流域的严重洪涝^[20]，并引发了韩国的暴雨和洪涝^[21]。华北和东北低涡在有利的形势下一般可维持数日，但 20 世纪 90 年代以来，这样的情况较少发生，这可以认为是中纬度冷空气活动减弱所致，而 1998 年是低涡与冷空气活动较多的年份。

对这 8 个个例的天气环流形势的分析发现，除了 1998 年 7 月 24 日是东海的东南气流输送水汽外，其他个例都是副高西侧的西南气流输送水汽。下面以 1998 年 7 月 6 日为例来分析此个例的特点，降雨量和形势分布分别见图 10 和图 11，此次低涡造成的降雨范围还是比较大的，在河北、

孙建华，齐琳琳，赵思雄. 引发“96·8”北方特大暴雨的中尺度对流系统研究. 气象学报，待发表

辽宁、吉林和内蒙古都造成了较强的降雨，最大的暴雨中心在河北北部（图 10）。副高偏北与西风带高压脊连通，500 hPa 低槽在 40~50°N，槽线在 110°E，降雨产生在低槽的东侧和南侧，沿副高的西侧低空急流从南海一直到达华北北部。低涡暴雨由于其产生在北方，除了低涡系统本身外，是否有水汽的来源是非常重要的，如果没有水汽

的输送，则一般只发生雷阵雨。

对东北低压和冷涡暴雨，在一些研究中早有论述^[1]，总结的东北低涡暴雨天气形势分布图（见参考文献 [1] 中图 4~2）中，鄂霍次克海-雅库茨克是稳定的阻塞高压，它对东北低压或冷涡的形成是一个关键系统，当此阻塞高压以西在贝加尔湖地区有冷槽东移进入东北地区时，可受阻加深或切断形成东北低压或低涡。在日本东南部海上的副热带高压中心与北面阻塞高压同相迭加，对阻挡东北低压东移也起明显作用。另外，当西西伯利亚有阻塞形势时，在贝加尔湖地区常能切断出冷涡，这种冷涡东移后经蒙古进入我国东北，受东面暖脊阻挡也能形成东北冷涡。90 年代发生的这些东北低涡暴雨类型与文献 [1] 中图 4~2 归纳的天气型基本相似。

4.5 暖切变暴雨

20 世纪 90 年代发生的暖切变暴雨共 6 次：1990 年 8 月 15 日 20 时~16 日 20 时，1993 年 8 月 3 日 20 时~4 日 20 时，1994 年 6 月 28 日 20 时~29 日 20 时，1995 年 7 月 24 日 20 时~25 日 20 时，1995 年 8 月 15 日 20 时~16 日 20 时，1998 年 7 月 12 日 20 时~13 日 20 时。暖切变暴雨的共

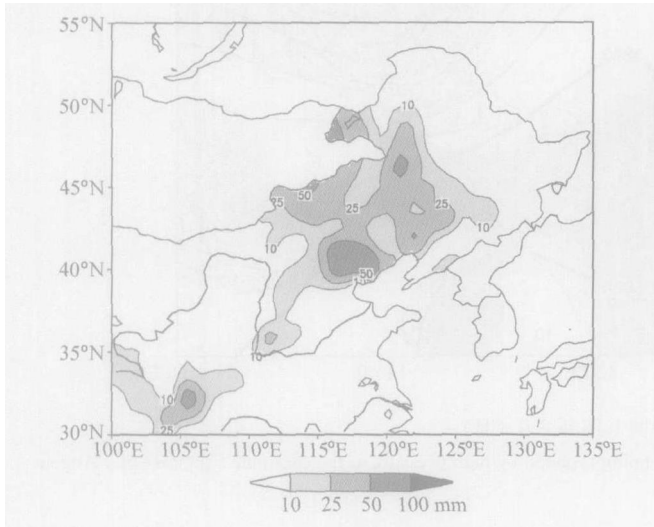


图 10 1998 年 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时的 24 h 降雨量
Fig 10 The 24 h precipitation of 2000 LST 5—2000 LST 6 July 1998

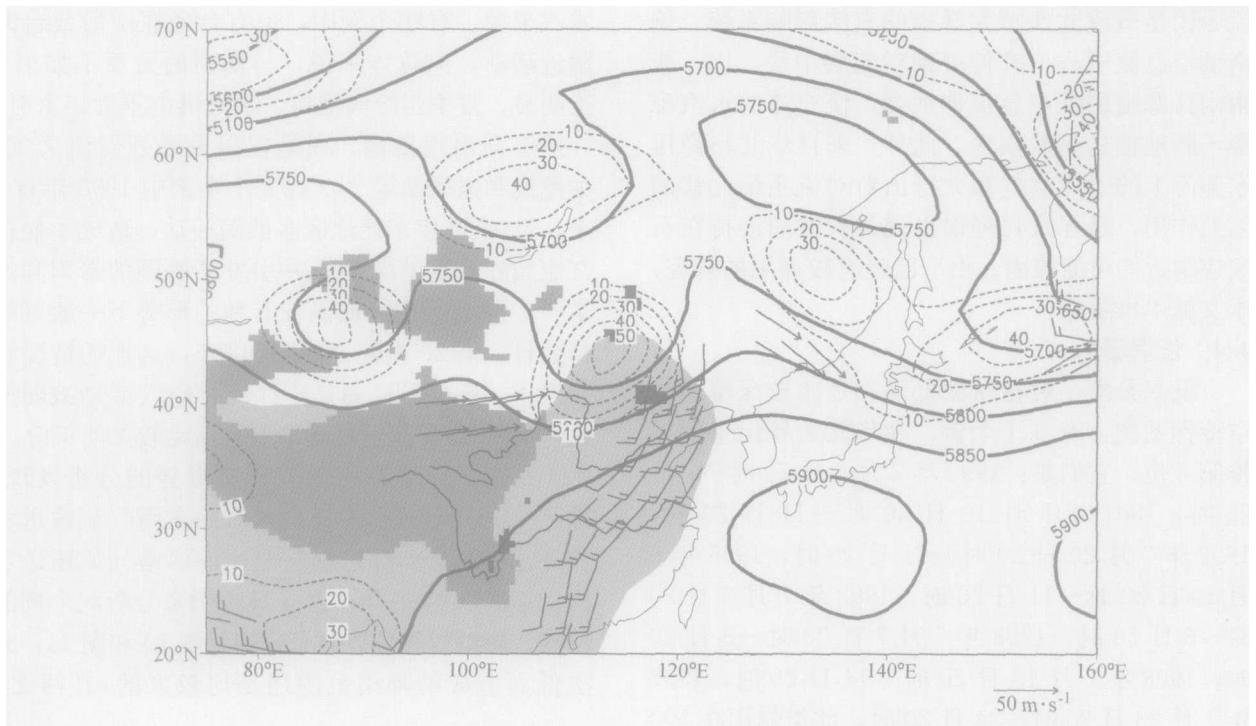


图 11 同图 5，但为低涡暴雨天气形势分布（个例 1998 年 7 月 6 日）
Fig. 11 The same as Fig. 5, but for the vortices in the lower-middle troposphere, the case of 6 July 1998

同点是暴雨区位于 500 hPa 的槽后脊前或高压脊中，此时一般是副高与华北高压脊打通，中纬度的冷槽活动较弱。低层 850 hPa 上华北小高压和西南气流之间存在西南风与东风之间的暖切变，也有江淮切变线北抬到华北形成的暖切变，切变线的西段有时有低涡活动。暴雨一般出现在暖切变线的东段，这种形势下一般不会出现持续大暴雨，而且暴雨的位置偏南，大多位于华北南部，但日降雨量有时却较大，例如 1998 年 7 月 13 日的个例有 17 个站达到了暴雨强度，最大降雨量为 175.9 mm。

从上面的 6 个暖切变暴雨个例看，高纬度的环流形势是多种多样的，但中纬度华北地区是一个弱的高压脊，其上游河套及以西为弱槽。由于很难用一个个例说明此类个例的环流特点，这里借用文献 1 中图 4-6 给出的概念模型来说明这类暴雨的特征：高纬度地区为两脊一槽型，中纬度冷槽活动弱，在华北和东北地区有槽后小高压，副高脊线稳定在 25°N 附近，其最关键之点为，华北高压与副热带高压之间形成横切变线。

5 北京的暴雨个例

以上对 20 世纪 90 年代发生在华北地区的暴雨个例进行了统计分析。北京的暴雨具有华北暴雨的共性，但也有自身的特点。这里我们采用的是北京南郊观象台的降雨量，虽然不能完全反映整个北京地区的降雨情况，但仍具有一定的代表性。

图 12 给出了 1960~1999 年北京 6~8 月的降雨量和暴雨、大暴雨的日数。北京的夏季降雨量(6~8 月)一般在 400~700 mm 之间，大体反映华北地区偏北部分的情况。超过 600 mm 的有 1963、1969、1985、1994、1996 年，少的年份不足 200 mm，最少的 1999 年不到 100 mm (图 12a)。对于暴雨、大暴雨发生的日数，在 1960~2000 年的 41 年中有 7 年没有发生暴雨，最多的年份是 1991、1994 年的 5 次。发生大暴雨最多的是 1963、1985 年的 2 次，大部分年份未出现大暴雨 (图 12b)。

表 2 列出了 1990~1999 年北京发生的暴雨，10 年夏季共有 26 天出现了暴雨，其中有 2 次连

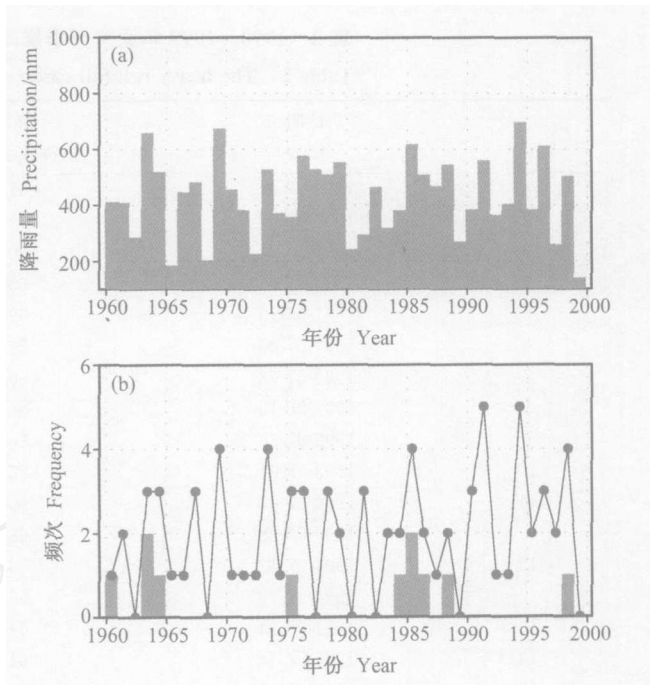


图 12 1960~2000 年北京 6~8 月 (a) 降雨量、(b) 暴雨日数 (曲线) 和大暴雨日数 (直方, 单位: 次)

Fig 12 The total precipitation (a), heavy rainfall days (line) and severe heavy rainfall days (bar, units: times) (b) at Beijing for the summer from 1960 to 2000

续暴雨，都发生在 1994 年，因此，个例为 24 个。而大暴雨只有 1998 年出现了 1 次。根据前面对华北暴雨的分型，这里对北京暴雨也进行了分类，24 个个例中属于前面定义的 5 类有 21 个：第 1 类 5 个，第 2 类 2 个，第 3 类 1 个，第 4 类 9 个，第 5 类 4 个。以第 4 类低涡暴雨最多，其次是台风与低槽（低涡）相互作用的类型。在表 2 列出的暴雨过程中还有 3 个个例不属于上述 5 类，即发生于槽前的冷锋暴雨，此类个例降雨范围较大，但达到暴雨强度的测站数目却不多。这类暴雨发生时没有中低纬系统的相互作用，也没有低涡和暖切变出现。因此，对北京暴雨除上述 5 类，似乎还应多注意低槽冷锋暴雨一类（列为第 6 类），各类出现的比例分别为 21%、8%、4%、38%、17%、13%，仍以第 1 类和第 4 类发生频率最高，即以两类涡旋（热带气旋和高空低涡）的影响为主，这是与华北大暴雨的共同之处，但北京暴雨以第 4 类发生频率更高一些，此外，低槽冷锋类暴雨也占一定比例，与华北大暴雨有些差异。

表 2 1990~1999 年北京夏季暴雨个例

Table 2 The heavy rainfall cases at Beijing for the summer of 1990—1999

	日期 Date	降雨量 Precipitation/mm	暴雨类型 Classification
1	1990-07-04	61.00	5: 暖切变暴雨
2	1990-07-07	51.10	4: 低涡暴雨
3	1990-08-01	50.10	6: 槽前暴雨
4	1991-06-08	63.10	4: 低涡暴雨
5	1991-06-10	69.50	5: 暖切变暴雨
6	1991-07-08	59.00	4: 低涡暴雨
7	1991-07-28	66.30	2: 台风与东北低涡之间相互作用
8	1991-08-15	66.80	4: 低涡暴雨
9	1992-07-26	56.80	4: 低涡暴雨
10	1993-08-01	75.30	1: 登陆台风与西风槽远距离相互作用
11	1994-07-07	90.60	5: 暖切变暴雨
	1994-07-08	68.30	
12	1994-07-12	58.60	2: 台风登陆北上与西风槽相互作用
	1994-07-13	96.00	
13	1994-08-13	61.60	1: 台风与西风槽远距离相互作用
14	1995-07-14	61.80	5: 暖切变暴雨
15	1995-07-29	50.90	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
16	1996-07-20	67.30	4: 低涡暴雨
17	1996-07-31	63.80	1: 台风与东北低涡远距离相互作用
18	1996-08-05	91.40	3: 登陆台风北上受阻引发暴雨
19	1997-07-19	64.40	6: 槽前暴雨
20	1997-08-01	51.20	1: 登陆台风与西风槽远距离相互作用
21	1998-06-30	103.00	6: 槽前暴雨
22	1998-07-06	65.90	4: 低涡暴雨
23	1998-07-18	54.90	4: 低涡暴雨
24	1998-07-24	53.80	4: 低涡暴雨

6 结论与讨论

本文首先对 1960~1999 年的华北暴雨过程进行了统计分析,之后,对 1990~1999 年造成特大暴雨过程的天气形势进行了分型讨论,并对每种类型暴雨的天气形势特点进行了具体分析,最后,对北京的暴雨过程进行了统计和分型研究。主要结论如下:

(1) 40 年间华北暴雨统计结果表明,从 20 世纪 60 年代到 90 年代夏季每 10 年发生的暴雨和大暴雨次数基本相当。在干旱的内蒙古地区暴雨也不少见,40 年中山西和河北的北部暴雨发生次数在 20 次以上,沿海地区暴雨发生次数为 60~100 次,暴雨的发生频率还是比较高的。虽然近年来华北地区处于相对的干旱期,但暴雨、大暴雨也时有发生,只是降雨量相对偏少一些,因而,继

续深入开展对华北暴雨的研究很有必要,对此不能掉以轻心。

(2) 20 世纪 90 年代(1990~1999)的 6~8 月华北地区共发生大暴雨 39 天,其中 6 月只发生了 4 天,大暴雨主要集中在 7、8 月,分别为 18、17 天。上述 31 个大暴雨个例可分为 5 类:台风与低槽(低涡)远距离相互作用(10 个),低涡(登陆台风)与西风槽相互作用(6 个),登陆台风北上受高压阻挡停滞(1 个),低涡暴雨(8 个),暖切变暴雨(6 个)。并分别对这 5 类大暴雨发生的天气形势特点进行了分析。其中与涡旋有关的暴雨,即与热带气旋和温带低涡有关的暴雨非常重要。

(3) 对 1960~1999 年 40 年间北京夏季降雨量的统计表明,降雨量一般在 400~700 mm 之间,超过 600 mm 的有 5 年,最少的 1999 年不到 100 mm。40 年中有 7 年未发生暴雨,最多的年份

是 5 次, 但大部分年份没有大暴雨发生。北京降雨存在年代际变化, 而年际变化尤其明显, 加之夏季降雨一般集中于 2~3 次过程, 预报难度较大, 应进一步加强研究。

(4) 20 世纪 90 年代 (1990~1999 年) 北京有 24 个暴雨个例, 平均每年 2.4 个暴雨日, 其中有 21 个属于华北大暴雨定义的类型。也是热带涡旋和温带低涡类为主, 但与华北地区情况有所不同, 北京以低涡暴雨最多, 其次才是台风与低槽 (低涡) 相互作用的类型。另外, 还要强调低槽冷锋也是北京地区值得注意的暴雨影响系统之一, 但这类暴雨发生时无明显的中低纬系统的相互作用, 也没有低涡和暖切变出现, 一般不至于引发大暴雨。

华北暴雨涉及不同纬度系统以及它们的相互作用, 还涉及华北特有的云和降水物理过程以及特殊的地形, 因此要提高华北的暴雨预报水平还应对这些问题开展针对性研究。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyang. *Heavy rainfalls in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [2] “华北暴雨”编写组. 华北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 182pp
Compilers of “Heavy rainfall in North China”. *Heavy rainfall in North China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992. 182pp
- [3] 丁一汇, 李吉顺, 孙淑清, 蔡则怡, 赵思雄, 陶诗言. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析. 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, 1980. 1~13
Ding Yihui, Li Jishun, Sun Shuqing, et al. The analysis on mesoscale systems producing heavy rainfall in North China. *Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences* (No. 9) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 1~13
- [4] “75·8”暴雨会战北京组. “75·8”河南特大暴雨的动力学分析. 气象学报, 1979, 37 (4): 45~55
Beijing Group, “75·8” Heavy Rain Cooperative Research. A diagnostic analysis about the “75·8” heavy rain in Henan. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1979, 37 (4): 45~55
- [5] 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺. 1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学, 1978, 2 (4): 276~289
Ding Yihui, Cai zeyi, Li Jishun. A study on the severe heavy rainfall in Henan on August 1975. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1978, 2 (4): 276~289
- [6] 赵思雄, 周晓平. 风场在暴雨发生中的作用——1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的数值实验. 大气科学, 1984, 8 (1): 1~6
Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping. The effect of wind field disturbances on the forecast of rainstorm formation. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1984, 8 (1): 1~6
- [7] 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究. 大气科学, 2000, 24 (3): 381~392
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A diagnosis and simulation study on a strong heavy rainfall in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, 24 (3): 381~392
- [8] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 贝耐芳. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 北京: 气象出版社, 2004. 281pp
Zhao Sixiong, Tao zuyu, Sun Jianhua, Bei Naifang. *Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 281pp
- [9] 孙建华, 赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究. 大气科学, 2000, 24 (2): 223~237
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Diagnoses and simulations of Typhoon (Tim) landing and producing heavy rainfall in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, 24 (2): 223~237
- [10] 冯伍虎, 程麟生, 程明虎. “96·8”特大暴雨和中尺度系统发展结构的非静力数值模拟. 气象学报, 2001, 59 (3): 294~307
Feng Wuhu, Cheng Linsheng, Cheng Minghu. Nonhydrostatic numerical simulation for the “96·8” extraordinary heavy rainfall and the developing structure of mesoscale system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, 59 (3): 294~307
- [11] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征. 气候与环境研究, 2003, 8 (3): 307~318
Zhang Qingyun, Wei jie, Tao Shiyang. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations, *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (3): 307~318
- [12] 谢庄, 崔继良, 刘海涛, 等. 华北和北京的酷暑天气 I 历史概况及个案分析. 气候与环境研究, 1999, 4 (4): 323~333
Xie Zhuang, Cui Jiliang, Liu Haitao, et al. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part I statistics and synoptic case study. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4 (4): 323~333
- [13] Palm E. Vertical circulation and release of kinetic energy

- during the development of hurricane hazel into an extratropical storm. *Tellus*, 1958, **10**: 1~23
- [14] DiMego G J, Bosart L F. The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part I: the observed fields and vertical motion computations. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110** (5): 385~411
- [15] DiMego G J, Bosart L F. The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part II: moisture, vorticity and kinetic energy budgets. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110** (5): 412~433
- [16] 杜青文, 张迎新. “96·8”特大暴雨的中尺度对流云团特征. *气象*, 1997, **23** (10): 39~43
Du Qingwen, Zhang Yingxin. Mesoscale convective cloud cluster analysis of the torrential rain in August 1996. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1997, **23** (10): 39~43
- [17] 江吉喜, 项续康. “96·8”河北特大暴雨成因初探. *气象*, 1997, **23** (7): 19~23
Jiang Jixi, Xiang Xukang. A primary study of the extreme rainfall event in early August 1996 over Hebei province. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1997, **23** (7): 19~23
- [18] 杜青文, 任荣彩, 康锡言. “96·8”河北特大暴雨地面中尺度系统分析. *气象*, 1999, **25** (7): 25~29
Du Qingwen, Ren Rongcai, Kang Xiyan. Analysis on mesoscale systems of the torrential rain in August 1996. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1999, **25** (7): 25~29
- [19] 赵思雄, 刘苏红, 周名扬. 北京夏季低涡强对流天气的中尺度分析. 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, 1980, 151~160
Zhao Sixiong, Liu Shuhong, Zhou Mingyang. Mesoscale analysis of strong convective weather associated with upper level cold vortex in Beijing in Summer. *Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences* (No. 9) (in Chinese), Beijing: Science Press, 1980. 151~160
- [20] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 陈受钧, 王建捷, 等. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 1~184
Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, Chen Shoujun, Wang Jianjie, et al. *The Study on Formation Mechanisms and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 1~184
- [21] Sun Jianhua, Lee T Y. A numerical study of an intense quasi-stationary convection band over the Middle of Korean Peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan* 2002, **80** (5): 1221~1245