

2005年夏季的主要天气及其环流分析

孙建华 卫捷 赵思雄 陶诗言

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 简要讨论了2005年夏季的主要天气过程和形势。2005年夏季全国大部分地区降雨量接近常年同期或偏多,特别是新疆地区降雨异常偏多,华南地区出现严重洪涝,而长江流域出现了空梅。造成6月华南地区强降雨的影响天气系统为切变线和地面静止锋,主要为从东北和西北来的冷空气与暖湿气流交汇于华南地区而形成。2005年与1994、1998年环流的对比表明,1998年西南季风强度比1994、2005年都要弱,但2005年梅雨期东阻位置在贝加尔湖东侧,比1998年的鄂霍次克阻高偏西,中纬度地区多小槽活动,贝加尔湖地区没有长波槽建立,中高层西风急流带偏北大约10个纬度,低层西南风急流也偏北,有利于北方降水的发生。2005年夏季登陆我国的台风偏多,强度较强,这是又一特点。华北地区的暴雨过程多与登陆或西太平洋上活动的台风有关;东北地区多低涡活动。与2004年对比,2005年华北地区的高温日数偏多,而且出现持续闷热天气,江南部分地区的高温天数也偏多。

关键词 前汛期 梅雨 台风 东北低涡 高温酷暑

文章编号 1006-9585 (2006) 02-0138-17 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

The Weather and Its Circulation in Summer of 2005

SUN Jian-Hua, WEI Jie, ZHAO Si-Xiong, and TAO Shi-Yan

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

Abstract The main weather processes and the related circulations are discussed. The total precipitation amount over most of China is almost equal to or more than climatologic one. The flooding occurred over Xinjiang Autonomous region and South China, but typical Meiyu over the Yangtze River valley did not occurred. The severe heavy rainfall over South China was caused by the shear line at lower troposphere and stationary front at surface, which was associated with the convergence of cold air from northwestern and northeastern China and warm-wet air from South China Sea. The comparison of summer monsoon circulation between 2005, 1994 and 1998 shows that the summer monsoon in 1994 and 2005 was stronger than that in 1998. In the Meiyu season of 2005, the blocking high located to the east of Lake Baikal, small trough in westerlies was relatively active in middle latitude area. Comparing with the circulation in 1998, the westerly jet at upper troposphere and southwesterly jet at lower troposphere moved north farther about 10 latitudes. The landing tropical cyclones with high intensity were more than the normal and resulted in serious disasters. The heavy rainfall in North China was related to the activities of tropical cyclones over mainland or western Pacific Ocean. The vortices were very active over northeast China in the summer of 2005. The hot weather days over southern China and North China in the summer of 2005 are relatively more than that in the summer of 2004, and swelter weather also occurred over North China. In addition, hot weather days did not happen over northeast China. The hot wave occurred in southern and North China, which was associated with subtropical

收稿日期 2006-02-01 收到, 2006-03-01 收到修定稿

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

作者简介 孙建华, 女, 1972年1月出生, 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

high of West Pacific and continental high, respectively.

Key words pre-rainy season, Meiyu, typhoon, vortex in northeast China, hot waves

1 引言

中国科学院大气物理研究所每年汛期(6~8月)都开展我国灾害天气机理分析及预测试验。采用有限区域数值天气预报模式对逐日雨区和天气形势进行实时预测,并定期举行天气会商,分析研究夏季的异常环流,重要灾害性天气的系统结构、演变特征,以及检验数值模式的预报能力提出改进方案,并且在汛期后给出总结^[1~3]。本文主要介绍 2005 年汛期(6~8月)中国主要的灾害性天气系统和环流特征。

2005 年夏季全国大部分地区降雨量接近常年同期或偏多,为 1999 年以来同期降水最多的一年。降雨偏多地区为:湖北北部至淮河流域、新疆大部、吉林和广东部分地区降水偏多 3~5 成,其中新疆东南部偏多 2 倍以上(图 1a)。珠江、湖北、湖南、淮河流域及辽宁、新疆等地发生了严重的洪涝灾害。从气温距平看,全国温度普遍比常年同期偏高,偏高 1℃ 以上的区域主要出现在华北和西北;此外,江苏、浙江和安徽南部也偏高 1℃ 以上(图 1b)。

本文将分别讨论华南前汛期、江淮梅雨和北方降雨的特点、台风活动情况以及高温酷暑的环流形势等。

2 夏季的环流演变和雨带分布

在分析 2005 年夏季华南前汛期和江淮梅雨之前,我们首先对 5~8 月的逐月降雨和环流形势作一简单介绍。5 月雨带位于江南和华南地区(图 2a),福建、江西、湖北、广东和广西的大部分地区降雨量都在 400 mm 以上,其中在福建、江西中部和广东北部出现 600 mm 以上的强降雨中心。6 月主雨带仍然位于华南和江南(图 2b),此外在黄淮流域也出现了一条雨带,月降雨量在 400~1000 mm 之间,最大的中心出现广东东部;与气候平均比较,6 月华南大部、黄淮北部、华北东部至东北中部以及新疆北部等地降水偏多 3 成~1

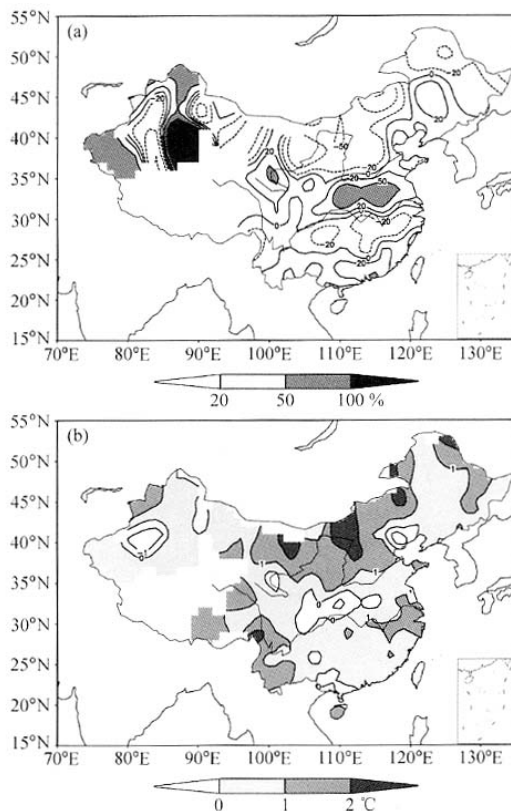


图 1 2005 年 6~8 月中国降水距平百分率 (a) 与气温距平 (b)

Fig. 1 The percentage anomaly of precipitation amount (a) and temperature anomaly (b) from the average from June to August 2005

倍,其余大部地区接近常年同期或偏少,其中长江中下游地区、西北大部以及内蒙古中西部、西藏大部、黑龙江东部等地偏少 3~8 成(图略)。7 月主雨带位于长江和黄淮之间,最强的降雨发生在湖北和安徽(图 2c);7 月另一个降雨中心位于浙江和福建沿海地区,这是由于 5 号台风海棠(HAITANG)登陆造成的。7 月淮河流域和汉水流域、浙江和福建沿海、黑龙江西南部、新疆东南部和西部以及青藏高原北部等地较常年同期偏多 3 成~1 倍,部分地区偏多 1~2 倍。8 月主雨带稍向北移,位于黄淮和渤海湾,强中心的降雨

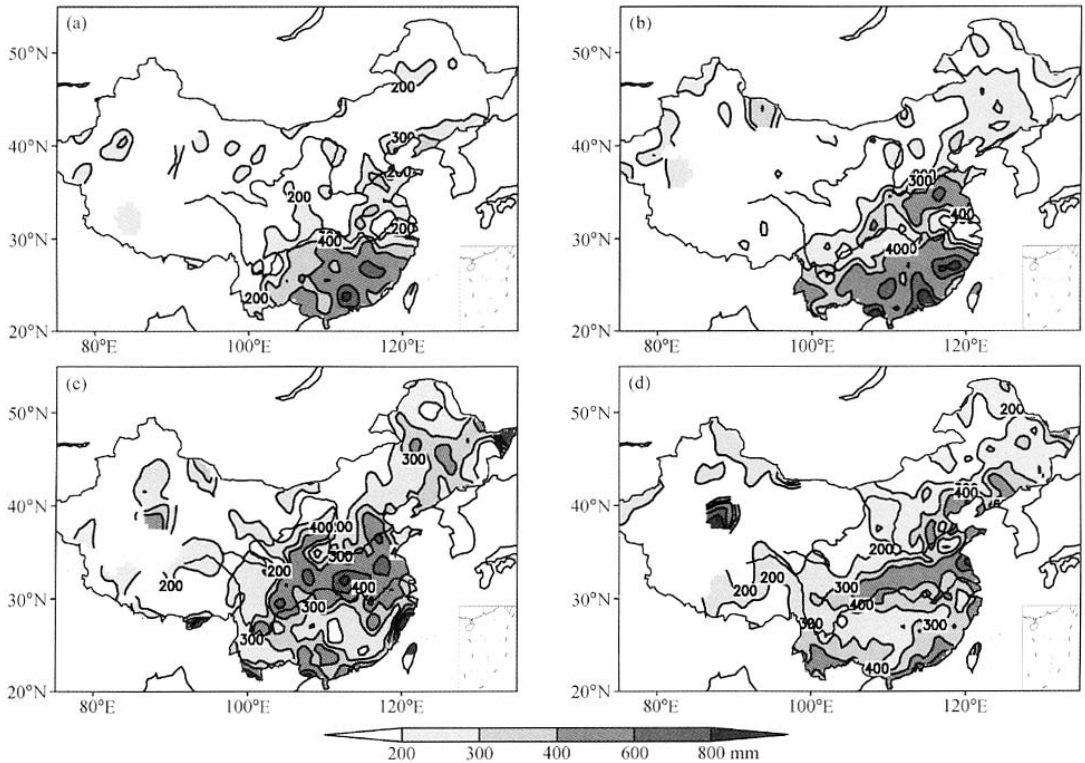


图2 2005年5~8月的月降水量: (a) 5月; (b) 6月; (c) 7月和 (d) 8月

Fig. 2 The precipitation amount from May to August 2005: (a) May; (b) June; (c) July; (d) August

量在 400 mm 左右 (图 2d), 黄淮大部、江淮部分地区降水偏多 3 成以上。从以上分析表明, 2005 年夏季我国东部的雨带主要在华南和黄淮地区, 长江流域出现了空梅。

夏季东部地区雨带的推进与东亚夏季风的推进有密切的关系, 图 3 是 2005 年 5~8 月 110~120°E 的平均风速。从风速的演变看, 5 月 20~30°N 之间有较强的西北风, 表明 5 月冷空气的影响对华南降雨起了非常重要的作用, 这是由于 5 月西风带系统偏南, 南支急流偏南造成。南海夏季风于 5 月 28 日初次爆发, 比常年 5 月 15 日前后的爆发日期晚了 10 多天。6 月 1~25 日西南季风稳定在华南地区, 25 日以后, 季风北跳到 35°N, 主雨带也北移到黄淮地区, 一直到 7 月中旬, 大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流中心都稳定在黄淮地区, 7 月下旬到 8 月, 急流中心有中断, 但雨带大部分时间仍维持在黄淮。与此同时, 西太平洋和南海

的台风开始活跃, 在华南地区形成一个强东南风急流, 南方出现了强烈的台风降雨。

3 华南前汛期和江淮梅雨的特点

3.1 华南前汛期—桂、粤、闽发生严重洪涝

前面已经提到, 2005 年 5 月华南和江南地区的降雨较多, 使该地区土壤含水量的和江河来水充足, 在此基础上, 6 月的几场强降雨就使福建、广东、广西的闽江、东江和西江流域发生了严重的洪涝灾害。6 月华南地区发生的主要降雨过程有 1~5 日、17~23 日、26~28 日 (图 4), 其中广东河源 6 月有 7 天发生了暴雨, 而 6 月 19~21 日连续 3 天的降雨量都超过 100 mm, 16~23 日的过程雨量在 700 mm 左右 (图 4a)。广西的降雨虽然较广东弱一些, 但在这几次过程中也出现了持续性强降雨 (图 4b)。华南地区 15 站 (厦门、

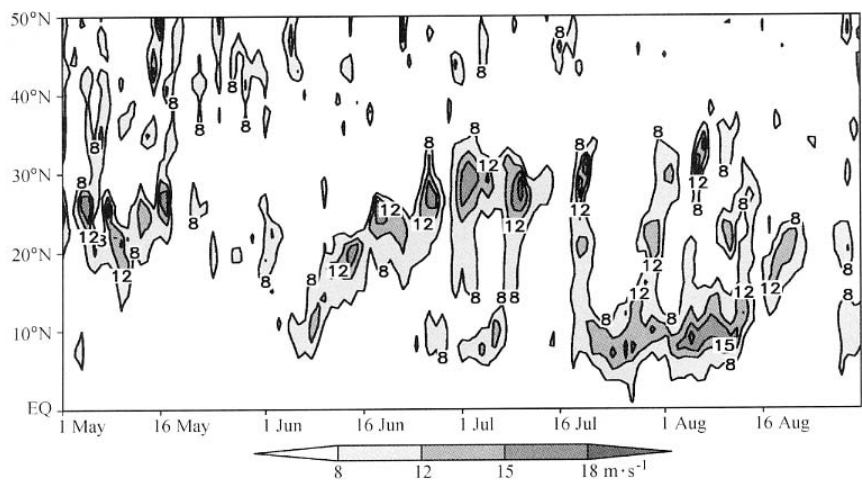


图3 2005 年 5 月 1 日~8 月 31 日 110~120°E 的平均风速
Fig. 3 The mean wind speed of 110—120°E from May to August 2005

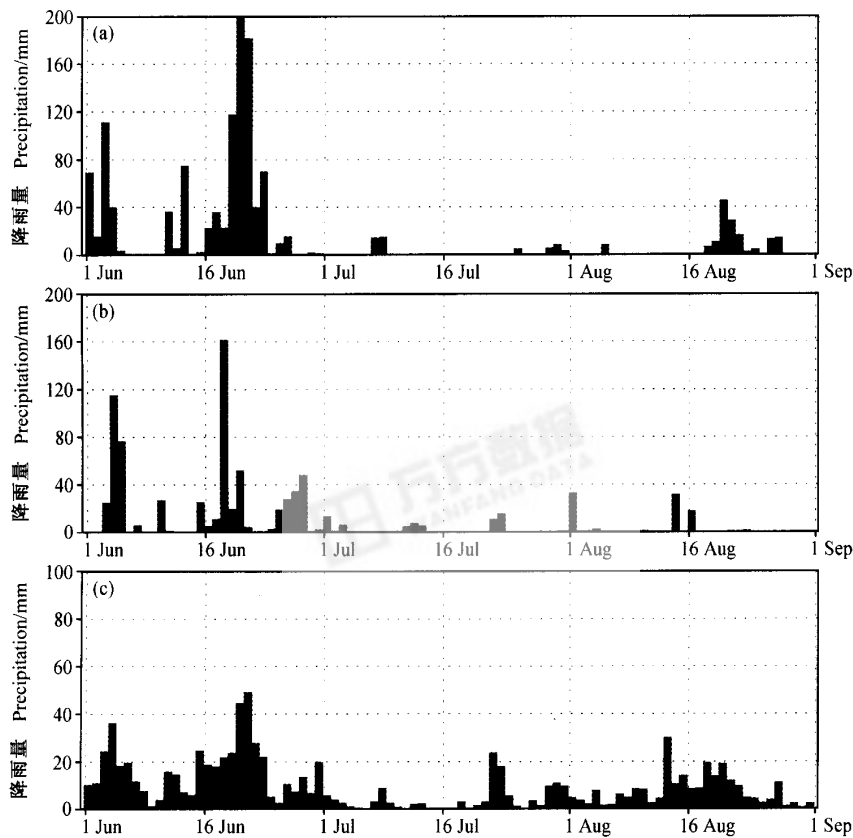


图4 2005 年 6 月 1 日~8 月 31 日华南日降雨量：(a) 广东河源；(b) 广西桂林；(c) 华南 15 站的平均（厦门、梅县、汕头、韶关、河源、广州、阳江、湛江、海口、桂林、柳州、梧州、南宁、北海和百色）
Fig. 4 The daily precipitation amount in South China form June to August 2005: (a) Heyuan in Guangdong; (b) Guilin in Guangxi; (c) the daily mean precipitation amount of fifteen stations in South China (Xiamen, Meixian, Shantou, Shaoguan, Heyuan, Guangzhou, Yangjiang, Zhanjiang, Haikou, Guilin, Liuzhou, Wuzhou, Nanning, Beihai and Baise)

梅县、汕头、韶关、河源、广州、阳江、湛江、海口、桂林、柳州、梧州、南宁、北海和百色)的日平均降雨量(图 4c)显示,整个夏季只有 7 月上中旬降雨较弱,后期由于登陆台风较多,也造成了大范围的强降雨。

2005 年 6 月华南的 3 次持续性降雨过程的影响天气系统主要是低层的切变线和地面准静止锋,在有利的天气形势的影响下,局地的强对流活跃。图 5 是 6 月 17~23 日的平均环流,对流层高层西风带急流中心在 30°N ,急流带位置偏南。东亚沿海地区处于对流层中层槽后,冷空气沿槽后南下。低层低空急流在华南沿海加强,而冷空气从西北和东北两个方向到达华南,冷暖空气在华南形成了稳定的切变线,在切变线附近及其南侧,对流云团活跃,形成了持续的强降雨。

3.2 江淮梅雨—长江流域“空梅”

2005 年 5 月 28 日南海夏季风初次爆发,比常年平均晚了 10 多天。而南亚夏季风于 6 月 8 日爆发。这两地的夏季风相继爆发,表征着东亚大气环流已完全转入夏季形势,华南、西南地区东南部的强降雨区将逐渐向北扩展至长江流域广大地区,但是华南雨带并没有北跳到长江流域,而是直接北跳到长江以北的黄淮地区,长江流域

出现了空梅。虽然出现了空梅,但长江流域受西风槽和登陆台风的影响,也出现了一些降雨过程。

2003~2005 年江淮梅雨似乎都出现了异常现象,2003 年梅雨期,淮河流域强降雨集中在 2 个星期内,引发了淮河流域的大洪水^[4]。2004 年夏季江淮流域梅雨期偏短(6 月 14~27 日),最强的雨带位于长江中下游地区,雨量在 200 mm 以上,其中长江口的雨量在 300 mm 以上^[3]。2004 年江淮流域降雨的主要特点是典型梅雨环流形势没有建立,中纬度地区西风带槽活动频繁,多过程性降雨。2005 年在气候平均的梅雨期,典型环流形势也没有建立,雨带在江南和黄淮,长江流域的降雨都在 400 mm 以下,长江口和湖南的北部地区在 200 mm 以下(图 6a),长江流域降雨明显偏少。2005 年夏季,在典型梅雨常见的高纬度乌拉尔和鄂霍次克阻塞高压都没有建立,中高纬度高压位于贝加尔湖以东,而不是在鄂霍次克海,低纬度副高位置比气候平均稍偏北。前面已经提到,西南季风前沿在 6 月 25 日以后即从华南北跳到长江以北,高低空急流也在黄淮流域上空相交(图 6b),以上的环流异常导致 2005 年夏季梅雨期冷暖空气未能在长江流域交汇,造成降雨偏少。

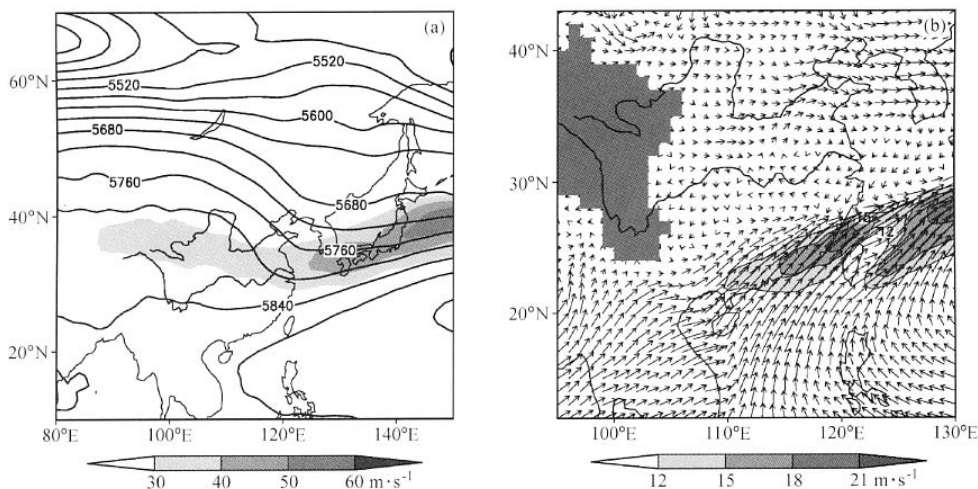


图 5 2005 年 6 月 17~23 日的平均环流: (a) 500 hPa 位势高度(等值线, 单位: gpm)和 200 hPa 的风速(阴影为风速 $>30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 850 hPa 风场(浅色阴影为风速 $>12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 左侧深色阴影为地形高于 1500 m)

Fig. 5 The mean circulation of 17-23 June 2005: (a) The geopotential height on 500 hPa (solid line, gpm) and wind speed on 200 hPa (shaded is wind speed greater than $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) wind on 850 hPa (shallow shaded is wind speed greater than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dark shaded in left part represents topography higher than 1500 m)

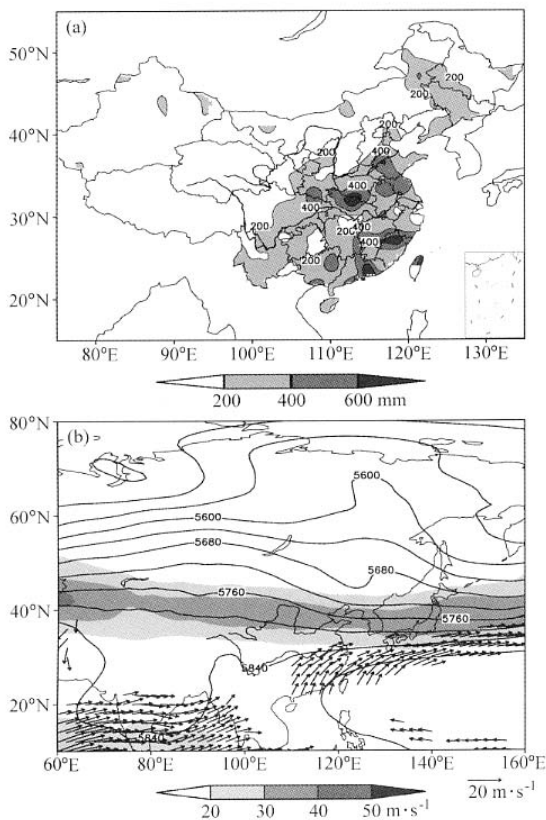


图 6 2005 年梅雨期 (6 月 18 日~7 月 10 日) 的降雨量 (a) 和环流 (b)。(b) 中: 阴影为 200 hPa 风速 $> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风矢量为 850 hPa 上风速 $> 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线为 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)

Fig. 6 The precipitation amount (a) and circulation (b) of 18 June—10 July, 2005. In (b): the shaded is the wind speed more than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 200 hPa, vector shows wind speed more than $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ on 850 hPa, solid line is geopotential height in gpm on 500 hPa

3.3 与 1994 年和 1998 年环流形势的对比

1994 年华南为多雨年和 1998 年江淮为多雨年。1994 年 6 月中旬两广出现了 1915 年以来少见的洪涝灾害, 发生了 20 世纪最大的洪水。1994 年 6 月, 我国的主要雨带位于江南到华南一带, 降水中心在广东、广西以及江西的部分地区。7 月中旬以后, 伴随西太平洋副高的第 2 次北跳, 主要雨带北移到华北、东北平原一带, 但 1994 年华南地区受副高南侧东风带里的热带环流系统的影响, 华南又出现了持续的暴雨过

程^[5,6]。1998 年 6~8 月珠江、闽江、长江以及嫩江、松花江同时出现了严重的洪涝灾害。6 月中下旬华南普降持续性暴雨, 西江和闽江出现了百年一遇的洪水。6 月中旬长江流域梅雨开始, 梅雨出现在 6 月 12~28 日, 7 月 21~31 日两段时间, 梅雨期暴雨频繁, 特别是第 2 阶段梅雨与长江上游多雨时段重合, 形成了 20 世纪自 1954 年以来的一次全流域洪涝。有关 1998 年长江流域暴雨过程已经有大量研究^[7,8]。由于对 1994、1998 年造成洪涝的具体天气过程已有大量研究, 本文只对 1994、1998 年的季风活动和环流特征与 2005 年进行对比。

1994 年是季风活动异常的年份, 南海夏季风于 5 月第 1 候建立, 爆发偏早, 是强夏季风年, 1998 年是弱夏季风年, 建立时间是 5 月第 5 候, 长江流域发生了严重洪涝灾害。研究表明南海夏季风强度指数与夏季长江中下游地区降水和淮河流域降水有显著的反相关, 与江南地区降水和华南后汛期降水有显著的正相关。我国出现的 1998 年夏季长江流域特大洪涝和 1994 年华南夏季严重洪涝与南海夏季风的强度异常有关^[5]。

对比 2005 年、1994 年和 1998 年夏季的风速变化 (图 3 和图 7)。1994 年 6 月的演变与 2005 年相似, 6 月强西南风都稳定在 25°N 以南。1994 年 6 月 15 日前风速 $> 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的是南下的北风 (图 7a), 2005 年北风的强度比 1994 年弱。6 月下旬西南风北界到达 30°N , 与副热带高压的北跳对应。此外, 1994 与 2005 年都存在两条强风速带, 分别位于副热带高压的南北两侧, 不同的是 1994 年南侧的强风带强, 而 2005 年北侧的强风速带强, 副热带高压南侧的强风速带与台风的活动有关, 1994、2005 年 7、8 月登陆我国的台风比 1998 年多。2005 年北侧的强风速带在黄淮流域有一个稳定时期, 而 1994 年雨带直接从华南北跳到华北地区。1998 年风速强度比 1994、2005 年都弱的多, 强度几乎没有到达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且强风速带的北界一直稳定在 30°N (图 7b), 这与弱季风年对应长江流域多雨年一致。

1994 年梅雨期 (6 月 18 日~7 月 10 日) 长江中下游地区的降雨量大部分在 100 mm 以下 (图 8a), 是一个典型的空梅年, 在气候平均的梅雨时

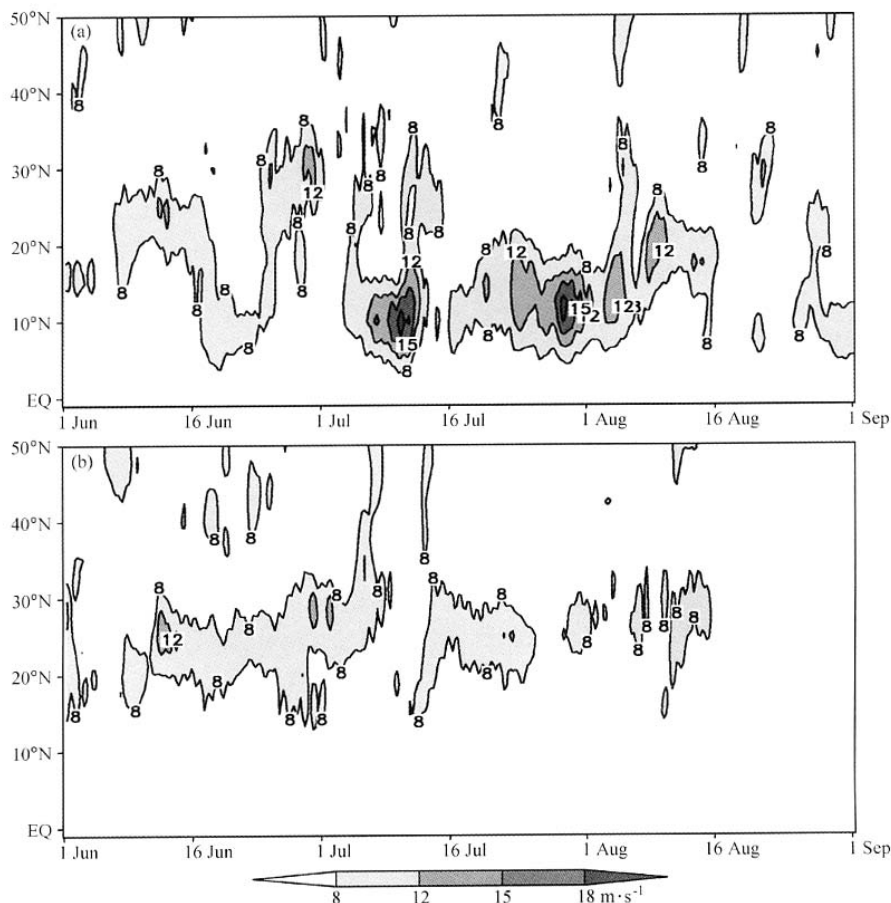


图7 1994 (a) 和 1998 (b) 6~8月 110~120°E 平均风速

Fig. 7 The mean wind speed of 110~120°E from June to August (a) 1994 and (b) 1998

段降雨产生在除长江中下游地区的大部分中国东部。梅雨期的环流特征(图 8b)显示,中纬度对流层中层平均槽线位于河套西侧,长江中下游地区受弱高压脊控制,高纬度的阻塞高压位于贝加尔湖及其以西,位于典型梅雨期的鄂霍次克海、乌拉尔阻塞高压之间,西风急流带位于 40~50°N,在我国东部上空的西风急流比 1998 年(图 9b)和 2005 年(图 6b)弱,以上中高纬度环流形势都不利于冷空气侵入长江中下游流域。1994 年虽然是强季风年,但梅雨期平均西南风的强度较弱,从 6~8 月 110~120°E 平均风速演变(图 7a)分析,虽然逐日演变在 6 月下旬到 7 月上旬曾经出现风速 $>8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强西南风,但强度不稳定,因而,

梅雨期平均值较小。与 1994 年相反,1998 年 6 月 12~28 日出现了第 1 段典型梅雨,降雨主要位于长江及其以南地区,中心在江苏和浙江北部,达到 600 mm 以上(图 9a)。1998 年梅雨期中高纬度出现典型的“双阻”,即乌拉尔、鄂霍次克阻塞高压,贝加尔湖为低槽,中高层的西风急流带位于 30~40°N,而副热带高压西北侧的西南风急流带也正好到达长江中下游地区。从中高纬度的形势看,2005 年的梅雨期与 1998 年的主要差别有以下几点:东阻的位置偏西,位于贝加尔湖以东,而在鄂霍次克海;中纬度地区多小槽活动,贝加尔湖地区没有长波槽建立;中高层西风带急流偏北大约 10 个纬度,低层西南风急流偏北。

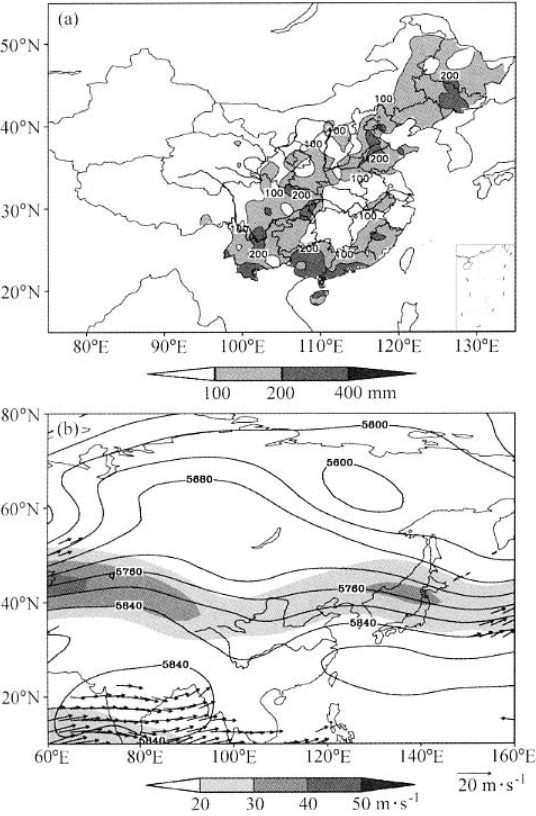


图 8 1994 年梅雨期 (6 月 18 日~7 月 10 日) 的降雨量 (a) 和环流 (b)。(b) 中：阴影为 200 hPa 风速 $>20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，风矢量为 850 hPa 上风速 $>8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，等值线为 500 hPa 位势高度场 (单位：gpm)

Fig. 8 The precipitation amount in mm (a) and circulation (b) of 18 June — 10 July, 1994. In (b): the shaded is the wind speed more than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 200 hPa, vector shows wind speed more than $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 850 hPa, solid line is geopotential height at 500 hPa

4 北方地区的降雨特点

4.1 华北的降雨过程—热带系统和西风带系统各有特点

2005 年夏季华北地区环渤海湾地区，包括山东、河北东部降雨偏多，降雨量在 800 mm 以上，其他地区降雨偏少，降雨量在 400~800 mm。图 10 给出了几个站点 6 月 1 日~8 月 31 日的日雨量分布，北京 (54511)、天津 (54527)、石家庄

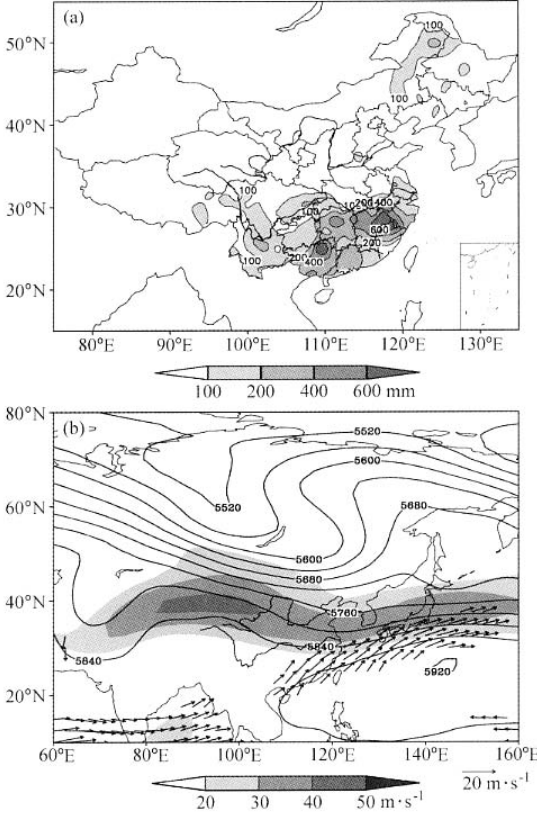


图 9 1998 年第 1 阶段梅雨期 (6 月 12~28 日) 的降雨量 (a) 和环流 (b)。(b) 中：阴影为 200 hPa 风速 $>20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，风矢量为 850 hPa 上风速 $>8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，等值线为 500 hPa 位势高度场 (单位：gpm)

Fig. 9 The precipitation amount in mm (a) and circulation (b) of 12 June—28 June, 1998. In (b): the shaded is the wind speed more than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 200 hPa, vector shows wind speed more than $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 850 hPa, solid line is geopotential height at 500 hPa

(53698)、济南 (54823) 的总雨量分别为 288、528、237、546 mm。从逐日雨量分布看，济南发生了 5 次暴雨过程，天津也有 3 次大到暴雨过程，石家庄发生了 1 次暴雨过程，北京只有 8 月 16 日的降雨为 40 mm，而同一次过程天津的降雨量达到 161 mm。2005 年夏季北京、石家庄没有到达气候平均值，天津、济南超过了气候平均值。

平均而言，华北地区降雨过程应集中在 7 月下旬至 8 月上旬，即“七下八上”。2005 年夏季华北的主要降雨时段有：6 月 25~26 日，6 月 28~

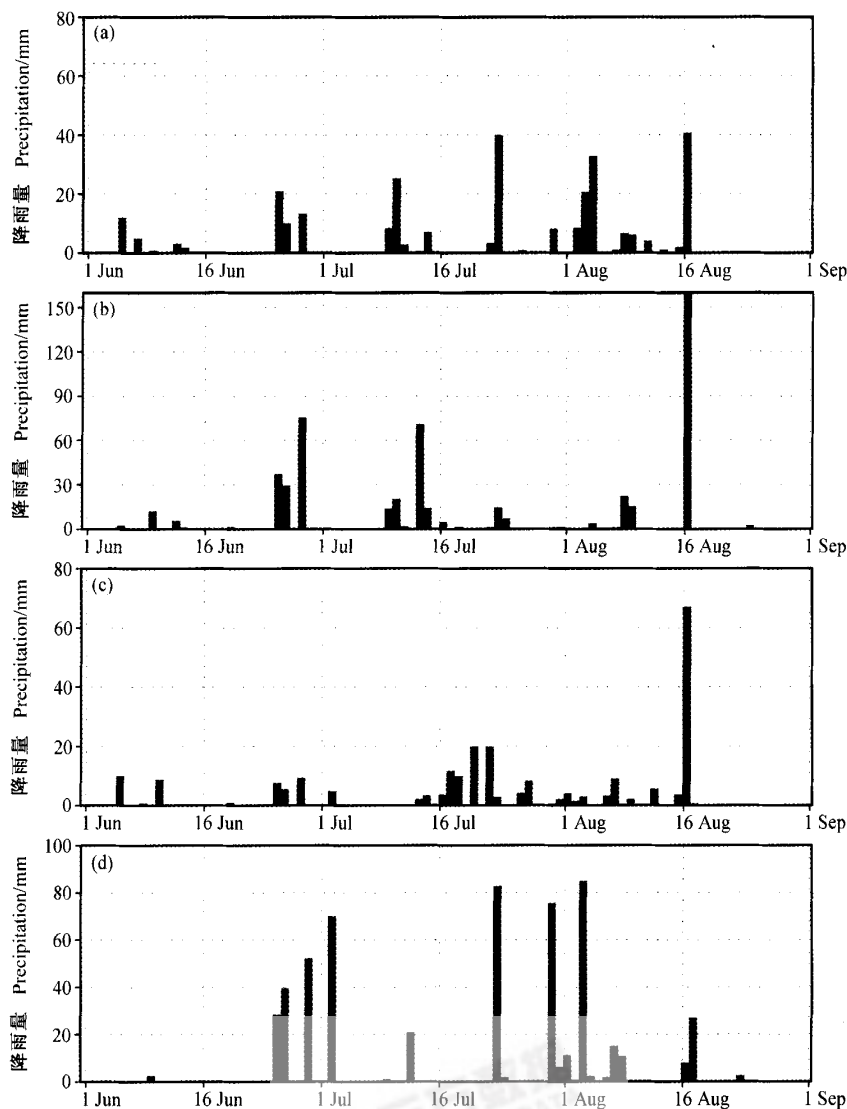


图 10 2005 年 6~8 月逐日降雨量: (a) 北京; (b) 天津; (c) 石家庄; (d) 济南

Fig. 10 The daily precipitation from June to August 2005; (a) Beijing; (b) Tianjing; (c) Shijiazhuang; (d) Jinan

30 日, 7 月 1~2 日, 7 月 22~23 日, 7 月 30 日~8 月 1 日, 8 月 7~9 日, 8 月 11~13 日, 8 月 15~17 日等, 降雨过程并不都集中在“七下八上”。从 2005 年 6、7、8 月的月降雨量分布看(图 2), 3 个月华北地区的降雨量大致相同, 其中 8 月稍多, 主要是由于台风“麦莎”的登陆北上和 8 月 15~17 日发生一次强降雨过程。以上列出的几次暴雨过程都不是局地的强降雨, 降雨范围均较大, 在 8 次过程中有 5 次与台风有关(包括直接影响和远距离相互作用): 7 月 22~23 日, 7 月 30 日~8 月 1 日, 8 月 7~9 日, 8 月 11~13

日, 8 月 15~17 日。虽然台风是造成华北暴雨的一个重要天气系统, 但台风的影响次数有限。华北暴雨对流层中层的影响系统一般为低槽, 低层的影响系统为低涡和暖切变, 这种切变线一般为江淮切变线北抬, 切变线北侧一般为东北低涡南侧的西北气流。也有对流层中层在高压控制下, 对流层低层副高与华北大陆高压之间形成的暖切变^[3]。这里我们重点讨论与台风有关的暴雨。

在 5 次过程中, 8 月 7~9 日是“麦莎”台风北上引起, 由台风系统本身产生的暴雨, 但这次过程由于没有中纬度西风槽配合, 并未在华北地

区引发大范围持续性暴雨; 7 月 22~23 日也是登陆台风减弱后的气旋直接造成。另外 3 次(7 月 30 日~8 月 1 日、8 月 11~13 日和 8 月 15~17 日)均属于台风与西风带系统远距离相互作用。有关华北暴雨的天气型, 孙建华等^[9]归纳为 5 类, 其中台风(低涡)与西风带系统远距离相互作用是最常出现的一类持续性大暴雨天气。研究结果显示, 20 世纪 90 年代 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^[9]。

图 11 是 7 月 31 日和 8 月 16 日的天气形势合成。7 月 31 日热带风暴“天鹰”位于北部湾, 低

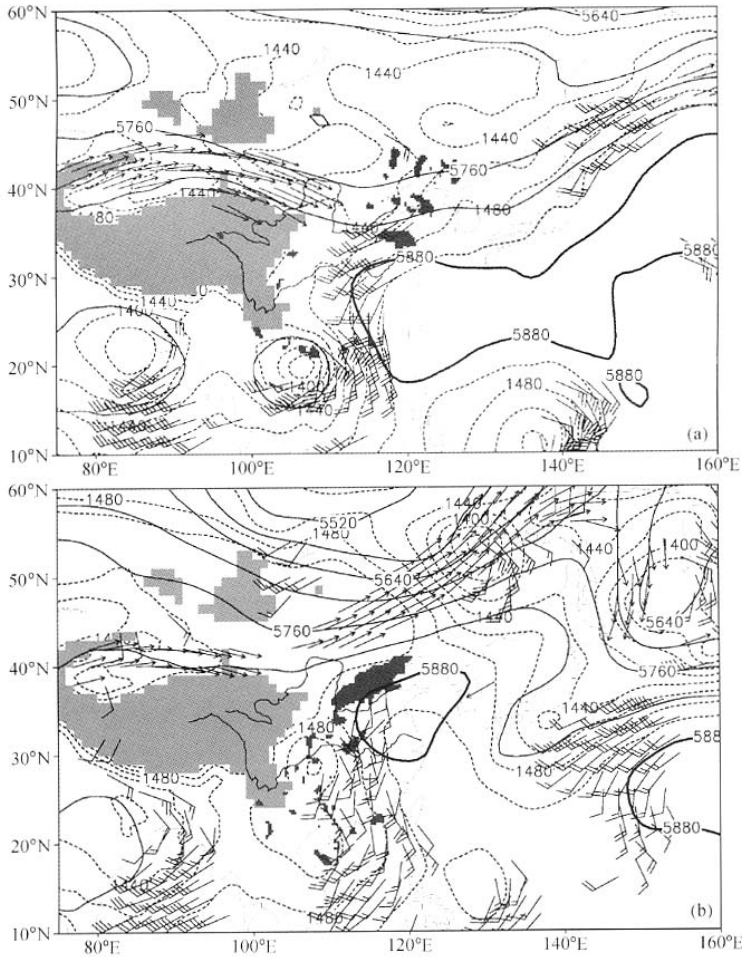


图 11 2005 年 7 月 31 日 (a) 和 8 月 16 日 (b) 天气形势合成。浅色阴影区为地形 $>1\,500\text{ m}$; 深色阴影区表示 24 h 降雨量 $>25\text{ mm}$ 的强降雨中心; 箭头线为 200 hPa 上风速 $>40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高空急流, 风标为 850 hPa 上风速 $>8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低空急流; 粗实线和虚线分别为 500 hPa 和 850 hPa 等高线 (单位: gpm)

Fig. 11 The composite weather pattern for 31 July (a) and 16 August (b) 2005. Light shaded is topography greater than $1\,500\text{ m}$ and dark shaded is 24 h precipitation amount more than 25 mm . The arrows are wind speed greater than $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at 200 hPa and barbs represents wind speed exceeding $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at 850 hPa. The thick solid and dashed lines are geopotential height in gpm at 500 hPa and 850 hPa, respectively

层在“天鹰”和副热带高压之间形成了一条 2 000 km 的偏南风水汽输送带,水汽输送带将水汽输送到华北南部,中纬度地区,华北正好处于浅槽的槽前,高层华北南部处于高空急流出口区的右侧。8 月 15~16 日,登陆强热带风暴“珊瑚”减弱的气旋影响长江中上游地区,该气旋东侧的偏南风与从南海来的西南风共同输送水汽到华北北部。与 7 月 31 日个例对比,此个例中纬度是经向环流,登陆强热带风暴与西风槽的位置更近,因此,造成的强降雨范围更大更强。

4.2 东北低涡的活动频繁

2005 年东北低涡活动频繁,6~8 月均出现了较强的降雨(图 2),辽宁、吉林、黑龙江南部、内蒙古东部的部分地区降雨偏多,温度则出现了负距平(图 1)。2005 年夏季东部低涡的活动情况见表 1,共有 9 个过程,东北低涡虽然能产生降雨,如无低纬度系统的配合,一般为中到大雨,暴雨只出现在局地。从表 1 的统计结果看,低涡的活动集中在 6~7 月,8 月只有 1 次,低涡的源地有 3 个:贝加尔湖以东、蒙古国和东北原地。研究结果表明,东北低涡的活动是夏季东北地区的主要降雨系统,1998 年松花江和嫩江流域的特

大洪涝就是东北低涡的频繁活动造成^[7]。虽然对东北低涡的发生发展研究不多,但本文由于篇幅所限,暂不深入讨论,今后将在另外的论文中分析,这里只简单讨论 6 月 29 日~7 月 1 日个例。

6 月 29 日~7 月 1 日个例 3 天都出现了暴雨,暴雨一般出现在低涡的东部,6 月 29 日、30 日的天气形势合成图(图 12)表明,与前面提到的华北暴雨个例不同,此个例无中低纬系统的相互作用,也没有高低空急流的配合,水汽主要来源于渤海和东海,在低涡的东部存在西南风与东南风的暖切变,主要的雨区位于暖切变的附近。

4.3 西北地区降雨的特点—中亚低槽活跃

2005 年夏季新疆的大部分地区降雨偏多,不但北疆偏多,南疆的大部分地区也偏多(图 1a)。夏季气候平均降雨量,北疆一般在 30~50 mm,南疆在 10 mm 以下。由于南疆气候平均降雨量小,所以距平较大。

新疆地区 6~8 月主要的降雨过程有:6 月 20~29 日连续的降雨过程,降雨集中在北疆,但强度不强;7 月 8~9 日,降雨在北疆,范围小,最大降雨量为 21 mm;7 月 14~18 日降雨主要发生在新疆的中西部,有不少站点出现中到大雨;7 月

表 1 2005 年夏季东北低涡活动情况
Table 1 The activities of vortices over Northeastern China in the summer 2005

序号 Number	低涡影响东北日期 Date	低涡源地 Sources	850 hPa 强度 Intensity on 850 hPa /gpm	降雨强度 Intensity of precipitation
1	6 月 1~2 日 1-2 June	蒙古国 Mongolia	1340	6 月 1 日中到大雨 Middle and large rainfall occurred at 1 June
2	6 月 10~11 日 10-11 June	原地生成 Northeast China	1360	6 月 10 日中到大雨 Middle and large rainfall occurred at 10 June
3	6 月 13~15 日 13-15 June	蒙古国 Mongolia	1340	每天都有中到大雨 Middle and large rainfall occurred at 13-15 June
4	6 月 20~21 日 20-21 June	原地生成 Northeast China	1360	只有吉林降雨稍强 Relatively strong rainfall occurred over Jinin province
5	6 月 29 日~7 月 1 日 29 June-1 July	蒙古国 Mongolia	1340	3 天均出现暴雨 Heavy rainfall occurred at three days
6	7 月 4~5 日 4-5 July	贝加尔湖以东 East to the Lake Baikal	1340	2 天均出现中到大雨 Middle and large rainfall occurred at two days
7	7 月 8~10 日 8-10 July	贝加尔湖以东 East to the Lake Baikal	1400	7 月 9 日出现暴雨 Heavy rainfall occurred at 9 July
8	7 月 27~30 日 27-30 July	贝加尔湖以东 East to the Lake Baikal	1360	7 月 28 日黑龙江出现大范围暴雨 Large-area heavy rainfall occurred at 28 July over Heilongjiang province
9	8 月 1~2 日 1-2 August	贝加尔湖以东 East to the Lake Baikal	1380	8 月 1 日辽宁出现暴雨 Heavy rainfall occurred at 1 August over Liaoning province

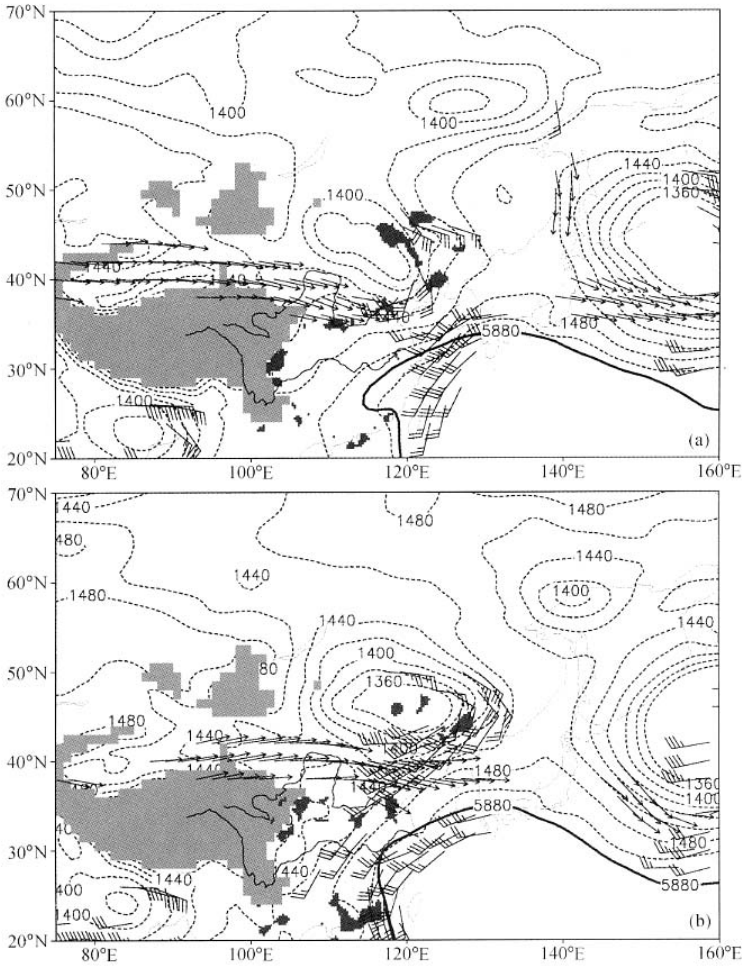


图 12 2005 年 6 月 29 日 (a) 和 30 日 (b) 天气形势合成。浅色阴影区为地形高于 1 500 m；深色阴影区表示 24 h 降雨量 >10 mm 的强降雨中心；箭矢线为 200 hPa 上风速 $>40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流，风标为 850 hPa 上风速 $>12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流；粗实线和虚线分别为 500 hPa 和 850 hPa 等高线（单位：gpm）

Fig. 12 The composite weather pattern for 29 June (a) and 30 June (b) 2005. Light shaded is topography greater than 1 500 m and dark shaded is 24 h precipitation more than 10 mm. The arrows are wind speed greater than $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 200 hPa and barbs represents wind speed larger than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 850 hPa. The thick solid and dashed lines are geopotential height in gpm at 500 hPa and 850 hPa, respectively

26~29 日降雨强度较小，只有个别站点超过 10 mm；8 月 4~12 日是 2005 年 6~8 月新疆地区最强的一次降雨过程，造成天池、吐鲁番地区严重的山洪爆发，损失严重，其中 8 月 5~6 日出现了大范围的中到大雨；8 月 27~29 日降雨持续时间短，并且主要出现在北疆。

2005 年夏季对流层中高层瞬变扰动的活动在巴尔喀什湖与日本海附近是两个集中区，使得这

两个地区降水偏多。从这几次过程天气系统的演变看，除了 7 月 8~9 日过程外，主要的影响系统是东移的低槽，并且槽中大多有闭合低压（时间较长者为切断低压）配合。6 月 20~29 日的持续降雨过程有 3 次低槽东移，其中第 2 次有闭合低压，8 月 4~12 日有 2 次低槽东移过程，其中有 1 次出现闭合低压。其他几次过程，也都有闭合低压生成。7 月 8~9 日过程在新疆和蒙古国西部是

高压脊, 高压脊东侧易生成低压, 在这种形势下, 新疆的中北部为什么会出现降雨呢? 新疆的地形除了两个盆地, 即准噶尔盆地和塔里木盆地外, 南面是青藏高原, 中部是天山山脉, 北部是阿尔泰山。3 个山脉之间在新疆的东部是相对较低的地区, 蒙古国东部的低槽和闭合低压西侧的偏东气流将相对湿润的空气带到新疆。由此可见, 新疆地区 2005 年夏季降雨偏多主要是由于中亚地区多低压活动之故。

5 西太平洋台风活动情况—8 个台风登陆我国

2005 年全球共发生了 82 个台风 (包括热带风暴), 在世界范围内造成巨大的损失, 特别是在美国南部沿海城市登陆的“卡特里娜”飓风。2005 年西太平洋共发生台风 (或热带风暴) 23 个, 单从西太平洋发生的台风来看, 并不比往年多, 特别是 6 月之前, 还明显地少于往年, 台风主要集中在 7 月中旬~8 月间。其中有 8 个台风登陆我国大陆, 登陆台风个数较常年略偏多, 为 20 世纪 90 年代以来仅次于 1996 年的台风重灾年, 造成的影响之广实属罕见。“麦莎”登陆时风力与 2004 年“云娜”台风相当, 登陆后影响时间长, 地域广, 是本年受灾面积最大、损失最重的台风。“泰利”登陆时风力强, 暴雨强度大, 也是本年造成人员伤亡和经济损失较重的台风。“卡努”是 1956 年“8.1”台风之后登陆浙江最强的台风, 强度超过了“云娜”和“麦莎”台风。“达维”是继 1973 年 14 号台风之后登陆海南最强的一个台风, 使海南农业生产遭受重创。“龙王”是本年造成人员死亡最多的台风, 共造成包括武警战士在内的 152 人死亡。

在 2005 年 9 月之前西太平洋共发生台风 6 个, 强热带风暴 7 个, 热带风暴 1 个 (表 2)。2005 年 6~8 月有 5 个台风 (包括热带风暴) 影响我国, 9 月后还有 3 个影响我国。第 5 号“海棠”、第 8 号“天鹰”、第 9 号“麦莎”、第 10 号“珊瑚”、第 13 号“泰利”先后在我国登陆。其中台风“海棠”和“麦莎”强度大、影响重。4 个登陆台风共造成 4612 万人 (次) 受灾, 死亡 42 人、失踪 6 人, 农作物受灾面积 258.1×10^4 hm, 倒塌房屋 9.2 万间, 直接经济损失 327.6 亿元。但登

陆台风和热带风暴带来的丰沛降雨基本解除了长江中下游沿江及海南等地前期的旱情, 也解除了部分地区的高温酷热天气。

为什么夏季 7~8 月西太平洋台风偏多呢? 7 月中旬以后当低频振荡 (the Madden-Julian oscillation, MJO) 的活跃位相通过菲律宾附近时, 对流层上层的辐散区在 7 月中旬至 8 月明显加强, 并向东移动, 于 7 月中旬至 8 月上中旬通过西太平洋地区; 同时, 在 2005 年 7 月中旬以后受 105°E 和 135°E 强劲的越赤道气流作用, 季风槽明显偏强, 最东端一直扩展到在气候意义下的台风重要源地 140°E 以东的太平洋暖池附近, 并且出现了有利于热带风暴产生的季风涡旋^[10] (图略)。暖的海温加上活跃的对流活动、相应的高层气流辐散区, 这些因素形成了极其有利于台风发生、发展的条件。这个时期, 影响我国的台风具有明显的群发性, 而且登陆台风也多。台风多则梅雨弱, 台风少则梅雨较强, 这二者之间是否有某些内在的联系, 这需要作更进一步的研究。

6 高温酷暑天气—副热带高压和大陆高压是重要影响因子

高温天气的定义为日最高气温 $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ 。2005 年高温天气主要出现在西北和东部地区, 东北地区基本没有出现高温天气。长江以南的大部分地区高温天气在 20 天以上, 其中浙江、江西地区达到 40 天以上 (图 13)。2004 年淮河以南大部

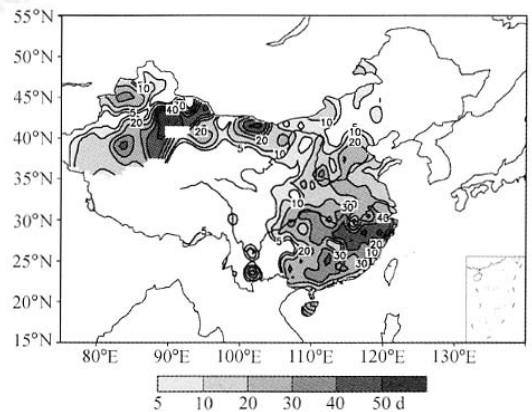


图 13 2005 年 6~8 月高温日数

Fig. 13 The number of the hot wave days in the summer of 2005

表 2 2005 年西太平洋热带气旋
Table 2 The tropical cyclones over western Pacific Ocean in 2005

编号 Number	名称 Name	生成时间 Initiation time	生成地点 Initiation location	消亡时间 Dissipating time	消亡地点 Dissipating location	强度 Intensity	影响我国时间 Time in Land
01	玫瑰 KULAP	2005-01-14	5.7 °N, 148.0 °E	2005-01-19	19.2 °N, 155.8 °E	强热带风暴 Severe tropical cyclone	
02	洛克 ROKE	2005-03-15	11.3 °N, 137.5 °E	2005-03-18	12.6 °N, 117.3 °E	强热带风暴 Severe tropical cyclone	
03	桑卡 SONCA	2005-04-23	11.6 °N, 132.8 °E	2005-04-27	26.7 °N, 145.7 °E	台风 Typhoon	
04	纳沙 NESAT	2005-06-01	10.5 °N, 143.2 °E	2005-06-11	36.3 °N, 147.0 °E	台风 Typhoon	
05	海棠 HAITANG	2005-07-12	23.1 °N, 151.8 °E	2005-07-20	27.8 °N, 117.6 °E	台风 Typhoon	7 月 18~20 日 18—20 July
06	尼格 NALGAE	2005-07-20	25.9 °N, 162.8 °E	2005-07-24	35.7 °N, 164.0 °E	热带风暴 tropical cyclone	
07	榕树 BANYAN	2005-07-22	15.0 °N, 137.2 °E	2005-07-27	41.2 °N, 146.5 °E	强热带风暴 Severe tropical cyclone	
08	天鹰 WASHI	2005-07-29	18.5 °N, 112.2 °E	2005-08-01	20.0 °N, 103.3 °E	强热带风暴 Severe tropical cyclone	7 月 29~31 日 29—31 July
09	麦莎 MATSA	2005-07-31	11.7 °N, 133.9 °E	2005-08-09	38.0 °N, 120.0 °E	台风 Typhoon	8 月 6~12 日 6—12 August
10	珊珊 SANVU	2005-08-11	17.3 °N, 124.7 °E	2005-08-13	24.9 °N, 115.7 °E	强热带风暴 Severe tropical cyclone	8 月 13~14 日 13—14 August
11	玛娃 MAWAR	2005-08-20	20.5 °N, 142.6 °E	2005-08-27	37.3 °N, 149.3 °E	台风 Typhoon	
12	古超 GUCHOL	2005-08-21	25.0 °N, 148.4 °E	2005-08-25	43.3 °N, 163.1 °E	强热带风暴 Severe tropical cyclone	
13	泰利 TALIM	2005-08-27	14.1 °N, 142.3 °E	2005-09-02	26.5 °N, 115.8 °E	台风 Typhoon	9 月 1~3 日 1—3 September
14	彩蝶 NABI	2005-08-29	15.0 °N, 153.4 °E	2005-09-07	38.9 °N, 135.6 °E	台风 Typhoon	

注: 热带气旋包括台风、强热带风暴、热带风暴; 9 月以后仍有“卡努”、“达维”和“龙王”台风影响我国, 表中未给出
Note: Tropical cyclone includes typhoon, severe tropical cyclone, tropical cyclone and tropical depression. Three tropical cyclones (Khanum, Damrey and Longwang) landing during September are not given in the table

地区及南疆等地夏季高温日数普遍有 10~20 天, 浙江、江西、福建大部以及广东中北部、重庆、南疆盆地大部达 20~30 天, 浙江、福建、江西和新疆 4 省区的局部地区达 30~40 天。2005 年与 2004 年对比, 高温天气分布主要差别在华北地区的高温日数偏多, 而东北基本没有出现高温天气, 江南部分地区的高温天数也偏多。下面分别对江南、华北和西北地区的高温天气作简单分析。

江南和华南高温时段: 6 月 26 日~7 月 8 日; 7 月 10~21 日; 7 月 23 日~8 月 18 日。6 月 26 日~7 月 8 日的高温天气先从浙江开始, 6 月 29 日前主要出现在江南, 6 月 29 日~7 月 2 日扩展到黄河以南的地区, 7 月 3 日以后高温范围缩小到

长江以南, 但在沿海地区出现了 40 °C 以上的高温, 这段高温主要影响江南和长江流域地区。在这段时间杭州出现了持续高温天气 (图 14a), 位于长江中游的武汉也出现了较多高温天气 (图 14b)。7 月 10~21 日这段时间的特点是高温天气不但发生在江南, 华南也出现了大范围持续高温天气, 华南的高温是 7 月 14 日以后出现的, 且 7 月 18 日后高温中心一直在两广。广州在这段时间就出现了持续性高温天气 (图 14c)。7 月 23 日~8 月 18 日这段高温一般也出现在江南和华南地区, 中间受“麦莎”台风登陆的影响, 高温范围有所缩小, 其中 8 月 11~12 日在黄河以南的我国东部大部分地区出现了高温天气, 但 14 日以后高温范

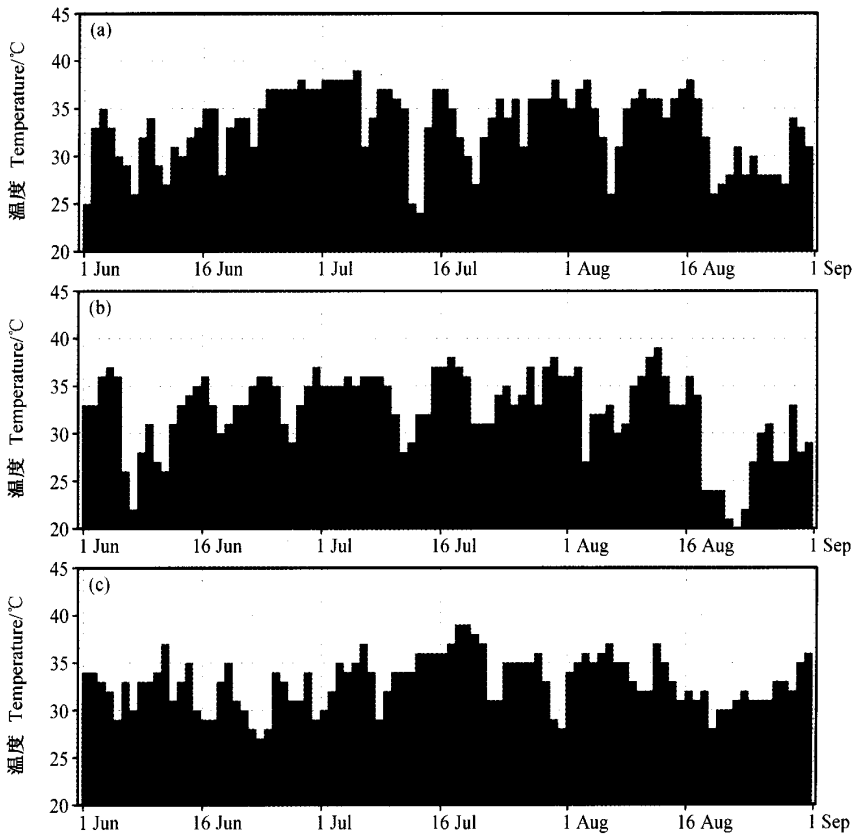


图 14 2005 年 6~8 月杭州 (a)、武汉 (b) 和广州 (c) 的日最高气温分布
Fig. 14 The daily maximal temperature in the summer of 2005: (a) Hangzhou, (b) Wuhan, and (c) Guangzhou

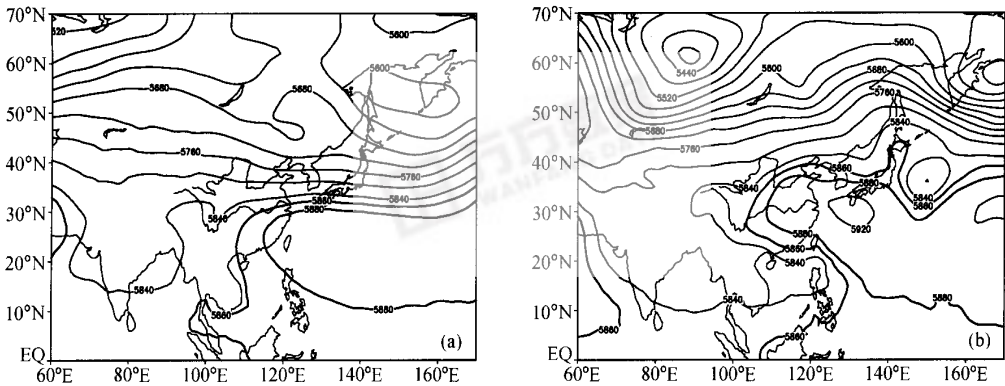


图 15 2005 年 6 月 26 日~7 月 8 日 (a) 和 8 月 11~12 日 (b) 的 500 hPa 平均高度场 (单位: gpm)
Fig. 15 The mean geopotential height (gpm) at 500 hPa: (a) 26 June—8 July 2005 and (b) 11 August—12 August 2005

围减小。造成南方高温天气的天气系统一般为副热带高压, 6 月 26 日~7 月 8 日的高温天气的 500 hPa 平均形势图显示 (图 15a), 中纬度地区气流平直, 副热带高压西伸控制江南、华南, 形成了持续高温。而 8 月中旬, 除了副热带高压的影响,

还有中纬度大陆高压脊的影响 (图 15b), 使我国东部地区从华南到华北都出现了大范围高温天气。

华北地区 6 月下旬到 7 月上旬出现了持续性高温 (图略), 特别是 6 月 19~24 日出现了大范围高温天气, 高温天气首先出现在河套和内蒙古

地区, 然后, 向西南延伸影响到华北和黄淮地区, 并且连续几天出现了范围较大的超过 40°C 的天气。此外, 8 月 11~15 日出现了闷热天气, 前面已经提到 8 月中旬出现了副高和大陆高压脊叠加的情况, 由于副高的偏北使华北地区湿度偏大, 形成了闷热天气。有关华北的高温天气过去有很多讨论^[2,11], 这里就不再详述。

7 小结与讨论

本文对 2005 夏季的主要天气过程和形势作了简单的总结和分析, 主要的结论如下:

(1) 2005 年夏季全国大部分地区降雨量接近常年同期或偏多, 为 1999 年以来同期最多的 1 年, 特别是西北地区降雨异常偏多, 华南地区出现严重洪涝, 但长江流域却出现了空梅。

(2) 6 月华南的强降雨主要有 3 次过程, 其影响天气系统为切变线和地面静止锋。切变线和静止锋主要是由于西风带急流偏南, 使从东北和西北来的冷空气与暖湿气流交汇于华南地区而形成。

(3) 2005 年与 1994、1998 年的对比研究显示, 2005 年副高北侧的强风速带在黄淮流域有一个稳定时期, 而 1994 年雨带直接从华南北跳到华北地区, 1998 年风速强度比 1994、2005 年都弱的多。2005 年的梅雨期与 1998 年的主要差别有: 东阻的位置偏西, 位于贝加尔湖以东, 而不在鄂霍次克海; 中纬度地区多小槽活动, 贝加尔湖地区没有长波槽建立; 中高层西风急流带偏北大约 10 个纬度, 低层西南风急流偏北。

(4) 2005 年夏季华北地区的暴雨过程多与登陆台风或邻近的西太平洋上活动的台风有关; 东北地区多低涡活动, 造成东北的中南部降雨偏多; 新疆地区降雨偏多主要是由于中亚地区多低压活动。2005 年西太平洋共发生台风 (包括热带风暴) 23 个, 其中有 8 个登陆我国大陆, 造成了巨大的影响和经济损失。

(5) 2005 年与 2004 年对比, 高温天气分布主要差别在华北地区的高温日数偏多, 而且出现持续闷热天气, 东北未见高温天气, 江南部分地区的高温天数也偏多。

本文对 2005 年夏季天气的分析还是初步的, 今后将继续开展以下 3 个问题的研究: 2005 年华

南地区又出现了特大洪涝, 福建、广东和广西都遭受了洪涝灾害, 应进一步开展从环流形势到中尺度暴雨系统发生发展机理的研究; 东北低涡十分活跃, 对东北低涡发展的环流背景以及发生、发展机理应开展研究; 为什么登陆台风多且强度高以及台风暴雨的产生等。

致 谢 中国科学院大气物理研究所的汛期天气预测一直是在曾庆存、黄荣辉、李崇银院士, 以及张庆云、周晓平、纪立人、孙淑清、陈烈庭、金祖辉、陈嘉滨、张道民等研究员的积极参与下, 在其他许多同事共同努力下完成的。此外, 中国科学院大气物理研究所科技处、计算信息科学中心、灾害性气候与预测研究中心和国际气候与环境科学中心一直大力支持汛期预测, 在此一并予以感谢。

参考文献 (References)

- [1] 林朝晖, 孙建华, 卫捷, 等. 2002 年夏季气候与汛期实时预测与检验. 气候与环境研究, 2003, **8** (3): 241~257
Lin Zhaohui, Sun Jianhua, Wei Jie, et al. Real-time weather and seasonal climate predictions for 2002 summer and their verification. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (3): 241~257
- [2] 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2003 年夏季的异常天气及预测试验. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 203~217
Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. The abnormal weather in the summer 2003 and its real-time prediction. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 203~217
- [3] 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2004 年夏季的天气及预测试验. 气候与环境研究, 2005, **10** (1): 1~18
Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. Weather system analysis and its real-time prediction in summer 2004. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (1): 1~18
- [4] 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 中国天气气候异常成因研究—2003 年. 北京: 气象出版社, 2004. 170pp
Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. *The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China—2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 170pp
- [5] 史学丽, 丁一汇. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的研究. 气象学报, 2000, **58** (6): 666~678
Shi Xueli, Ding Yihui. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in 1994. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000,

- 58 (6): 666~678
- [6] 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 of a strong heavy rainfall in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, 24 (3): 381~392
- [7] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 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. 184pp
Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. *The Study on Formation Mechanism and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 184pp
- [8] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 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, et al. *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, 张小玲, 卫捷, 等. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 492~506
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. A study on severe heavy rainfall in North China during 1990s. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10 (3): 492~506
- [10] Lander M A. Description of a Monsoon Gyre and Its Effects on the Tropical Cyclones in the Western North Pacific during August 1991. *Weather and Forecasting*, 1994, 9 (4), 640~654
- [11] 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 华北和北京的酷暑天气 II. 模拟试验和机理分析. 气候与环境研究, 1999, 4 (4): 334~345
Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong, et al. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part II: simulation and analysis. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4 (4): 334~345