

20世纪长江流域3次全流域灾害性 洪水事件的气象成因分析

张小玲¹ 陶诗言² 卫捷²

1 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 20世纪长江流域曾出现上游洪水7次, 中游洪水16次, 下游洪水7次, 其中有3次是全流域性洪水, 分别发生在1998、1954和1931年。1998、1954和1931年梅雨期开始前(3~5月), 长江流域降水比常年偏多。进入梅雨季以后, 先后出现两场持续性暴雨: 第1场出现在6月中旬至7月上旬, 这场暴雨造成中下游河流的水位达到或超过警戒水位, 出现局地洪涝; 7月下旬长江中下游又出现1场持续性范围广泛的暴雨, 雨水只能作为地面径流汇集到长江干流, 造成很高水位的洪流。第2场持续性暴雨使长江上下游强降水时段在7月下旬重合, 导致长江中下游干流洪水与来自上游的洪水在8月初至中旬遭遇, 造成长江中下游灾难性的大洪水。1998、1954和1931年长江全流域性大洪水与东亚中高纬地区大气环流和东亚夏季风活动异常有联系。大气环流和东亚季风活动异常导致7月下旬西太平洋副热带高压的位置偏南, 梅雨期持续到7月底, 有利于长江中下游持续性暴雨发生的环流条件在7月下旬仍然存在。

关键词 长江流域 洪水 暴雨

文章编号 1006-9585 (2006) 06-0669-14 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

An Analysis on the Basin-wide Catastrophic Floods in the Yangtze River during the 20th Century

ZHANG Xiao-Ling¹, TAO Shi-Yan², and WEI Jie²

1 *National Meteorology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

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

Abstract The Yangtze River is the largest river in Asia and is vulnerable to flood disasters. During the 20th century, there are seven disastrous floods in the upper reaches, sixteen in the middle reaches, and seven in the lower reaches of the Yangtze River, in which three of them are basin-wide floods (1998, 1954 and 1931). The hydrometeorological conditions for these floods are given. Before the onset of the Meiyu season (March to May), there was more precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River valley, resulting in high water level in rivers and above normal soil moisture level. In the Meiyu period, there were two spells of persistent intense rainfall, one in the spell from mid June to early July, and the other in the late-half of July. After the first intense rainfall period, the water level of the streams and rivers in the middle and lower reaches exceeded the warning water level and lakes and floods were full. In late July when there occurred persistent intense rains, the water from the ensuring persistent heavy rains had no place to go other than into the streams and river courses, finally converging into the main stream

收稿日期 2005-07-17 收到, 2006-08-16 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301

作者简介 张小玲, 女, 1972年出生, 博士, 副研究员, 主要从事灾害性天气的机理研究和预报方法研究。

E-mail: zxl@mail.iap.ac.cn

of the Yangtze River and forming torrents with very high water levels. At the same time, the intense rain period in the upper reaches began and the high water level torrents from the upper reached the middle reaches in the early August. These torrents merged together, and resulted in extreme catastrophic floods. Anomaly of atmospheric circulation and Asian summer monsoon results the Western Pacific subtropical high locating south of 30°N and available conditions for persistent heavy rainfall occurring in late-half of July.

Key words Yangtze River basin, floods, heavy rainfall

1 引言

长江是亚洲最大的河流,全长 6 300 km,流域面积 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。长江流域是我国总体经济实力最为雄厚的地区,也是洪涝灾害比较严重的地区。根据死亡人数超过 10 000 人起排的 20 世纪中国灾害性极端天气和气候事件表(表 1)^[1]可见:洪涝灾害是发生频率最高的灾害性极端气象事件,共发生 9 次,而其中有 5 次都发生在江淮流域,这还不包括因政府采取强有力利的抗洪措施后死亡人数未超过 10 000 人的 1998、1991 年长江、淮河大洪水。事实上,在 20 世纪长江流域曾出现上游洪水 7 次,中游洪水 16 次,下游洪水 7 次^[2],其中有 3 次是全流域的洪水,分别发生在 1998、1954 和 1931 年。

长江流域洪水的发生主要与梅雨期的降水强度有关系。梅雨(日本称 Baiu,韩国称 Changma)是东亚地区夏季最显著的气象特征。每年梅雨期(6 月中旬至 7 月中旬),梅雨锋维持在长江流域到日本南部地区,这期间也是这些地区全年降水量最集中的时期^[3, 4]。梅雨期的降水具有明显的年际变化。梅雨持续的时间及我国东部雨带的进退与东亚季风区的环流变化有密切关系^[5~10]。一些特殊年份的梅雨锋大尺度场分析研究表明,不同年份的梅雨在大尺度特征上存在差异,而其影响的降水也不同^[11~14]。

1998、1954 和 1931 年长江流域梅雨期异常长,出现了流域性的严重洪涝灾害。在 1931 年的大洪水灾害中,没有任何抗洪抢险措施,损失巨大,约 4×10^5 人死亡,汉口受淹达 100 天。1954 年洪水中采取了确保武汉的抗洪措施,并在宜昌以下的荆州河段采取人工分洪措施,但中下游的城镇,如黄石、九江、安庆、芜湖等城市均被水淹。1954 年死亡人数达 3.24×10^4 人。1998 年洪

水中采取了各种抗洪抢险措施,有 1.6×10^6 名干部和居民以及 3.25×10^5 名解放军官兵参加了抗洪斗争,使得由洪水引起的损失减少到最小,死亡 3 000 余人。关于这 3 年的大洪水已有不少研究^[15~20]。这些研究针对强降雨出现的条件做了分析,但没有说明为什么会出现全流域性洪水。全流域性洪水与持续性暴雨的时空分布特征关系尚不清楚,影响这种致洪暴雨时空分布的气象成因也不清楚。本文针对这两个问题进行研究。

2 资料和方法

本文使用中国气象局提供的 1951~1999 年全国 730 站的逐日降水及 1931 年 7 月的逐日降水资料,对长江上游(110°E 以西)和中下游(110°E 以东)梅雨期降水进行对比分析。其中长江上游选取 17 站,分别为:西昌、会理、雅安、乐山、宜宾、绵阳、成都、内江、泸州、南充、遂宁、重庆、涪陵、达县、万县、奉节、宜昌;长江中下游的 17 站为:上海、南京、合肥、杭州、安庆、九江、武汉、钟祥、岳阳、宜昌、常德、寿县、衢州、清江、贵溪、南昌、长沙。这些站点基本分布在长江沿江两岸或支流,其降水基本能反映长江流域旱涝灾害的情况。

此外,本文还使用了 NCAR/NCEP 的 1954~1999 年 6~8 月逐日全球 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点资料、1990~1999 年逐周海温(SST)资料、1979~1996 年全球 5 天平均格点降水资料,以及由 GMS 卫星资料反演的 1990~1999 年 5~8 月每 3 h 1 次的云顶黑体亮温(TBB)资料,对大洪水年夏季东亚大气环流和东亚夏季风活动的异常进行讨论。

3 长江流域梅雨期降水及其天气系统活动

江淮流域的梅雨期通常在 6 月的第 3 候建立,

表 1 20 世纪中国灾害性极端天气和气候事件^[2]
Table 1 The extreme weather and climate events in China during the 20th Century^[2]

灾害类型 Type	发生地 Location	时间 Date	死亡人数 Life loss
洪涝 Flood	长江 The Yangtze River Valley	1931 年夏季 Summer of 1931	400 000
	长江 The Yangtze River Valley	1935 年 7 月 July 1935	142 000
	长江和淮河 The Yangtze and Huaihe River Valley	1949 年 7 月 July 1949	57 000
	长江 The Yangtze River Valley	1954 年夏季 Summer of 1954	32 000
	长江 The Yangtze River Valley	1921 年 7 月 July 1921	24 900
	珠江 The Pearl River Valley	1915 年 5~7 月 May to July 1915	100 000
	松花江 The Songhua River Basin	1932 年 7~8 月 July to August 1931	20 000 (仅哈尔滨 Only in Harbin)
	海河 The Haihe River Basin	1939 年 7~8 月 July to August 1939	13 300
	黄河 The Yellow River Valley	1933 年 8 月 August 1933	12 700
台风 Typhoon	广东汕头 Shantou, Guangdong province	1922 年 8 月 August 1922	70 000 (台风登陆汕头 A typhoon landed at Shantou)
	河南 Henan province	1975 年 8 月 August 1975	26 000 (7503 号台风在河南省停留 2 天 Typhoon 7503 stagnated in the Henan province for two days)
	江苏 Jiangsu province	1939 年 8 月 August 1939	13 000 (台风引起风暴潮 A typhoon resulted in storm surge)
干旱 Drought	西北 Northwest China	1941~1942 From 1941 to 1942	3 000 000
	西北 Northwest China	1928~1929 From 1928 to 1929	1 400 000 (仅甘肃省 Only in Gansu province)

注：表中所列仅为死亡人数 10 000 人以上事件 Note: According to life losses more than 10 000

梅雨在长江中下游地区持续 20 天左右。7 月第 2 候，长江流域的降水减弱。7 月中旬，随着西太平洋副热带高压（以下简称副高）北进西伸控制长江中下游地区，雨带北跳到黄淮地区和朝鲜半岛，梅雨结束，长江中下游进入酷暑季节。1998、1954 和 1931 年梅雨期降水与正常年份不同，图 1 和图 2 分别是 1998 和 1954 年长江中下游梅雨期天气系统的配置。1998 年梅雨期降水分为两段，第一段从 6 月中旬到月底，另一段出现在 7 月下旬，两者中间有半个多月的中断（图 1d）。人们称 1998 年的梅雨期为二度梅雨季节。1954 年的情况与 1998 年略有不同，梅雨期从 6 月中旬开始一直持续到 7 月下旬（图 2d）。1931 年梅雨期降水与 1998 年相似，强降水从 6 月底持续到 7 月 10 日，7 月中旬出现中断，7 月下旬又出现强降水（图 3a）。1998、1954 年和 1931 年 7 月下旬长江中下游出现的持续性强降水在气候学上是不常见的现象。

在梅雨期的强降水时段，西太平洋副热带高压脊线的西端位于 120°E 以东，北界持续在 25°N 附近，使得大量的水汽从南面热带海洋沿副高外围的西南气流输送到长江流域（称作季风涌），这时从北方有冷空气南下，冷暖空气在长江中下游地区汇合，引起强烈锋生，而自青藏高原东移的 α 中尺度系统也同时达到梅雨锋上，梅雨锋上的扰动加强，造成一次次强降水。1931 年资料很有限，全国不到 150 个观测站每天只有一次地面天气图，在天气图上不分析锋面位置，只分析高低压系统。在 1931 年 7 月月平均海平面气压图上^[21]，40°N 以南大陆为热低压控制，脊线位于 28°N 附近。从日本到长江下游有一条低压槽，这是 6 次低压活动路径，也是梅雨锋的位置。另一条低压槽位于海南岛到菲律宾之间，代表南海季风槽的位置。大陆热低压和海上副热带高压之间等压线密集，表示从南面海上有大量的水汽输送到长江流域。图 3b 上所示的 6 条低压系统路径是根据文献

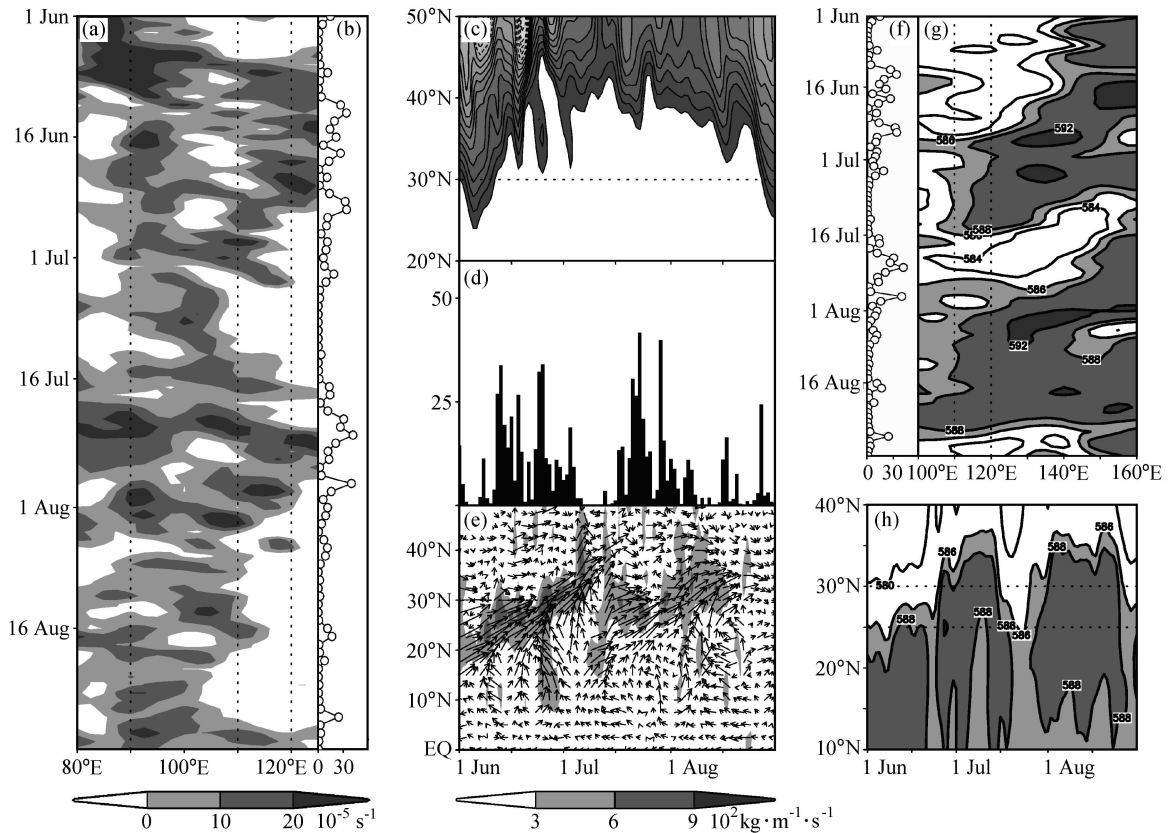


图1 1998年6~8月长江流域致洪暴雨的天气学模型: (a) 600 hPa 相对涡度沿 $30^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 的经度-时间剖面 (阴影为正涡度区); (b)、(d) 和 (f) 同期长江中下游 17 站逐日降水 (单位: mm); (c) 700 hPa 温度沿 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的时间-纬度剖面 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 阴影区温度小于 10°C , 等值线间隔 2°C); (e) 整层 (地面至 300 hPa) 水汽通量沿 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的时间-纬度剖面 (单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 阴影区水汽通量大于 $3\times 10^2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$); (g) 500 hPa 位势高度沿 $27.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$ 的经度-时间剖面 (单位: dgpm, 阴影区大于 586 dgpm); (h) 500 hPa 位势高度沿 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 的时间-纬度剖面

Fig. 1 Synoptic model of the heavy rainfalls in the Yangtze River valley during June to August 1998: (a) longitude-time cross-section of 600 hPa relative vorticity (values larger than 0 are shaded) along $30^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$; (b), (d) and (f) daily rainfall (units: mm) averaged over 17 rain gauges in the Yangtze River valley; (c) time-latitude cross-section of 700 hPa temperature (units: $^{\circ}\text{C}$, interval: 2°C , values less than 10 are shaded) along $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$; (e) time-latitude cross-section of moisture flux (units: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) integrated from surface to 300 hPa along $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, and values larger than 3×10^2 are shaded; (g) longitude-time cross-section of 500 hPa geopotential height (units: dgpm, values larger than 586 dgpm are shaded) along $27.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$; (h) time-latitude cross-section of 500 hPa geopotential height along $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$

[15] 绘制, 110°E 以西路径并不可靠, 用虚线表示。注意在 1931 年 7 月上旬有 2 次气旋活动 (3~8 日和 9~12 日), 7 月中下旬出现 4 次气旋活动 (18~20 日、21~25 日 (2 次)、25~27 日)。对应这段时间的气旋活动, 长江中下游出现两段持续性强降水 (图 3a)。

图 1~3 表明, 1998、1954 和 1931 年的 7 月下旬长江中下游仍然存在有利于持续性暴雨产生的环流条件。至于为什么这 3 年 7 月出现上述的大气环流异常, 可能有大气外部的强迫作用, 也

可能是大气内部本身的动力学不稳定, 这是目前需要研究的问题。

4 长江流域夏季上下游降水的时空分布特征及其与全流域大洪水的关系

一般情况下, 长江上下游地区夏季强降水出现在不同时段, 上游的强降水比中下游地区晚。气候状态下 (1960~1999 年平均), 6 月中旬长江

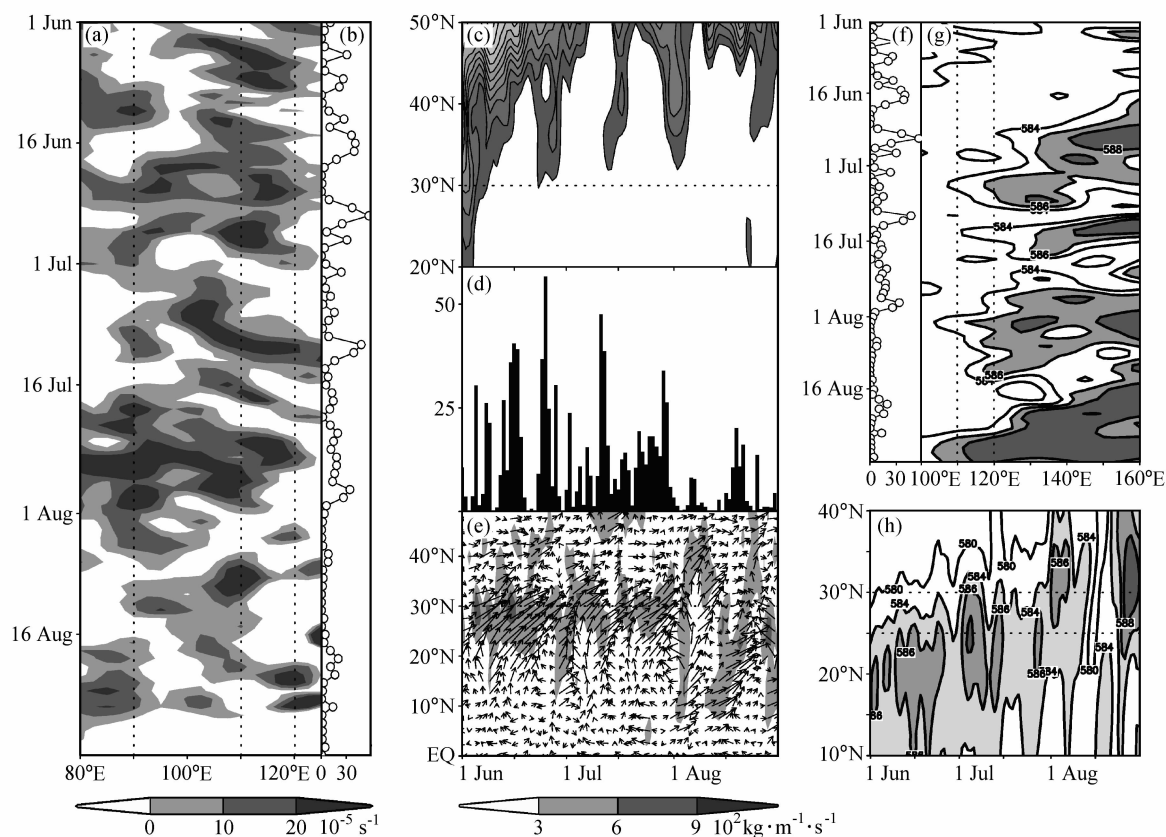


图 2 同图 1, 但为 1954 年

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for 1954

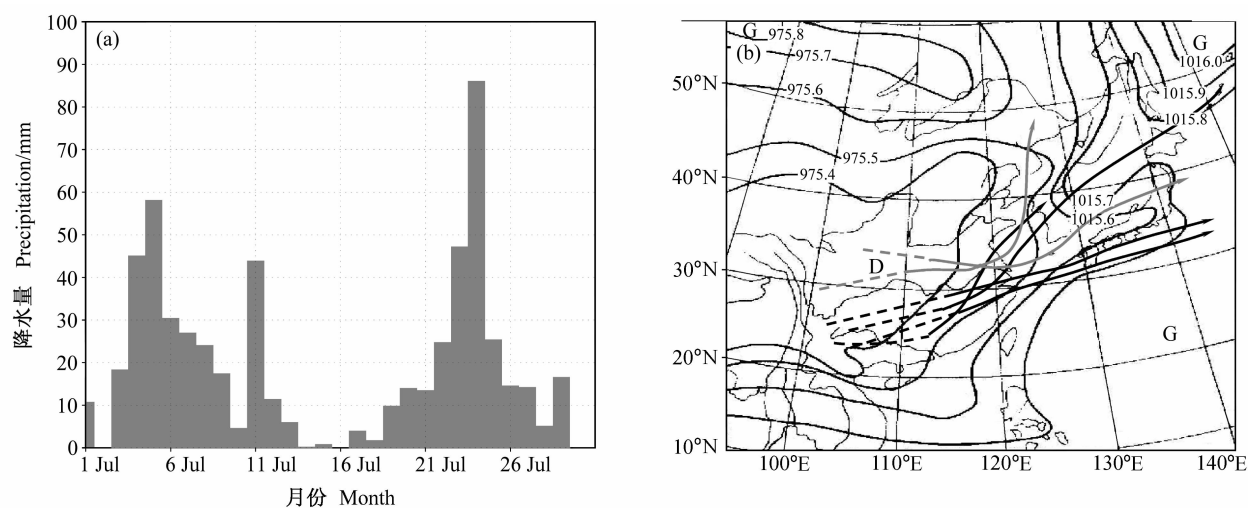


图 3 1931 年 7 月 (a) 长江中下游逐日降水和 (b) 海平面气压分布^[21] (单位: hPa, 流线为根据文献 [15] 绘制的低压路径, 浅色为 7 月上旬, 深色为 7 月中下旬, 虚线表示 110° E 以西路径不确定)

Fig. 3 (a) Daily rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River (units: mm) and (b) sea surface pressure distribution in July 1931^[21]; stream lines indicate the pathway of low pressure systems plotted from Zhu Kezhen^[15] (the light and deep lines indicate in early and late half of July, respectively, and dash lines present the unsure pathways in the west of 110°E)

中下游地区的降水急剧增加,到6月底达到全年降水的最高峰,7月以后降水急剧减少,6月中旬至7月上旬(梅雨期)成为中下游地区全年降水最为集中的时段;上游地区的雨季比中下游地区大概晚10天左右,上游降水主要发生在7月上旬至8月中旬,并且在7月上旬至9月中旬期间均处于降水的峰值期(图略)。由于一般年份长江上下游的强降水发生时段不一致,上下游洪水先后错开。但是,在异常年份,当中下游梅雨强降水持续时间长,或者在7月后半月出现持续性强降水,这时上下游降水的峰值相重叠,这便容易造成中下游严重洪涝。1998、1954和1931年的长江全流域性暴雨就是在这种情况下产生的。骆承政等^[2]从水文特征的分析指出1931年、1954年出现全流域大洪水的极端气候事件正是上下游洪水遭遇所致。1998年大洪水也属于这种情况。

图4表示20世纪50年代以来各年夏季(6~8月)长江上游、中下游以及全流域平均的降水距平。就全流域平均而言,20世纪后半半个世纪(1951~1999年)有23年降水超过正常年,其中7年的降水距平值超过30 mm,按它们的降水距平值由大到小为:1954(107.18 mm)、1998(76.93 mm)、1999、1980、1993、1969和1983年。虽然这些年份全流域的总降水量偏多,但仅

就上游或中下游的区域平均而言,并没有与全流域平均相一致的年际变化。在上游地区,降水最多的是1998年,其次是1954和1993年。而1980、1983和1999年的降水正常略偏多,1969年的降水则偏少。在中下游地区,降水最多的是1954年,距平值为161.9 mm,其次是1999、1969、1998、1980、1993和1983年。其中1998年夏季长江中游主要支流汉水没有强降水。在上述7年中,除1954和1998年出现了全流域性的特大洪水,其他年份仅在中下游地区出现了不同程度的洪涝,如1999和1969年在长江中或下游地区出现了洪涝灾害,1983年在汉江流域出现洪涝,而1980和1993年并未造成大的洪涝灾害。除1954和1998年,上游地区在另外5年均未出现流域性的洪涝灾害,虽然1993年上游地区的降水距平仅比1954年少4 mm。

从图4看出,长江全流域性的特大洪水灾害确与夏季(6~8月)上游和中下游同时出现异常多的降水密切相关,但是1980、1983、1993和1999年同样出现异常多降水时并没有发生全流域性的洪水。从水文学的角度研究表明,大洪水的发生不但与雨水径流有关系,还与土壤湿度以及江河湖库的底水有关系,这主要与前期降水有密切关系;当前期降水偏多时,土壤湿度达到或接

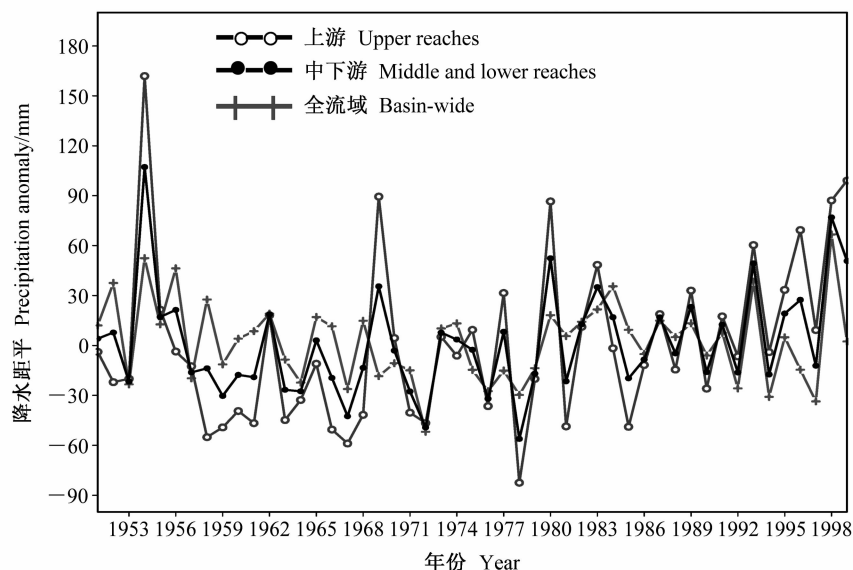


图4 1950~1999年长江上游、中下游及全流域平均的夏季降水距平演变

Fig. 4 Anomaly of summer rainfall amount in the upper reaches, the middle and lower reaches and the basin-wide of the Yangtze River during 1960—1999

近饱和, 江河湖泊具有较高的水位, 雨水只能作为径流流入时, 江河湖库的水位很容易超过警戒水位, 造成洪水泛滥。

长江上游在 1999、1998 和 1954 年春季的降水偏多, 1969、1980 和 1993 年基本正常, 1983 年偏少 (图 5a)。表明在主汛期来临前, 1999、1998 和 1954 年土壤含水量接近或达到饱和状态, 而 1969、1980 和 1993 年的土壤水分为正常状态。1998 年进入主汛期后, 长江上游地区降水不断, 在 6 月下旬至 7 月初和 8 月上旬发生了两段持续性的强降水过程, 使得该年夏季的降水较其他年多。1954 年 6~8 月也出现了数场大范围暴雨过程, 该年夏季的降水高达 570 mm, 仅次于 1998 年 (580 mm)。1999、1993、1983 和 1980 年比常年略偏多, 1969 年则偏少。在长江中下游, 除 1993 和 1969 年以外, 其余 5 年春季降水均多于气候平均 (图略), 降水最多的是 1954、1999 和 1998 年, 这种状况一直持续到 8 月底。6 月以后, 虽然长江中下游各年梅雨起讫具有明显的年际差异, 但这 7 年梅雨期都频繁有大面积暴雨发生, 降水比常年偏多, 1954 年春夏季共偏多 648 mm, 其次是 1999 和 1998 年。1999 年长江上、中下游春、夏季的降水均异常偏多, 其全流域总降水量甚至高于 1998 年 (图略), 但是并没有出现流域性的特大洪水。这表明, 汛期前异常多的降水和梅雨期长江中下游频繁的大面积暴雨, 都非常

有利于流域性大洪水的发生, 而如果要发生类似于 1954 和 1998 年的全流域大洪水, 与致洪暴雨的时空分布也有很大关系。

与上游地区相比, 中下游地区暴雨发生频率更高。1954 年中下游地区的强降水主要发生在 6 月 15 日~7 月 2 日和 7 月 15~28 日, 1998 年发生在 6 月 12~28 日和 7 月 20~30 日 (图 5b)。普查发现, 20 世纪的后 50 年, 仅在 1954 和 1998 年 7 月下旬出现了持续性的大面积暴雨过程 (图略)。也就是说, 长江流域春季和梅雨前期降水偏多, 同时在 7 月下旬出现持续性暴雨, 这是造成全流域大洪水的重要气象条件, 其中 7 月下旬的持续性强降水是造成全流域特大洪水的关键降雨。这一点从水文学的观点是易于理解的。当前期降水偏多时, 土壤的含水量达到或接近饱和, 湖泊底水充盈, 江河水位已经达到或超过警戒水位, 7 月中旬以后中下游地区强降水带来的大量雨水作为径流流入长江主干道, 使中下游的水位进一步抬高。而 7 月下旬至 8 月中旬正处于长江上游全年降水最为集中的时段, 上游的洪峰陆续达到长江中下游地区。上下游洪水遭遇, 在全流域引起大洪水。

5 1998、1954 和 1931 年夏季降水分析

1998 年我国主要江河珠江、长江、黄河上游

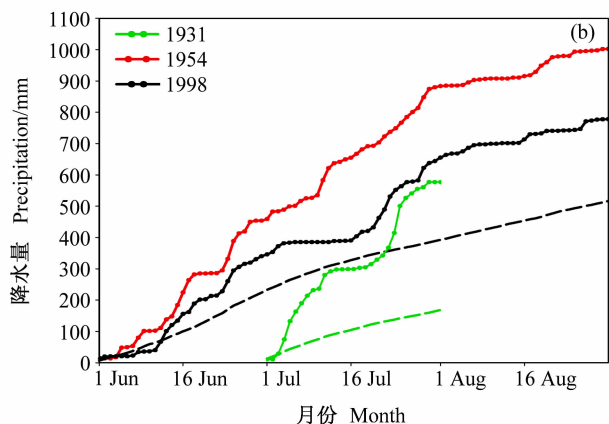
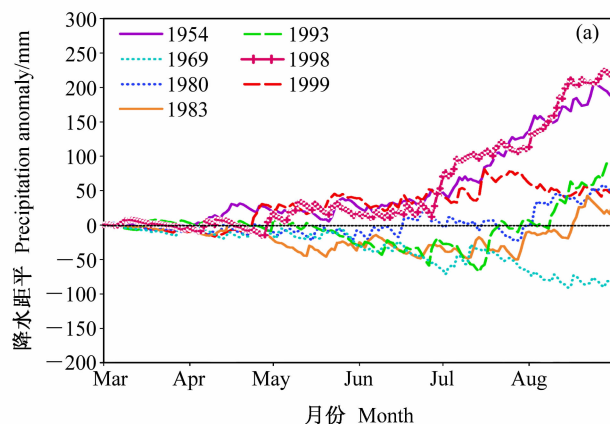


图 5 (a) 1954、1969、1980、1983、1993、1998 和 1999 年长江上游 3~8 月累积降水距平和 (b) 1954 和 1998 年的 6~8 月以及 1931 年 7 月长江中下游累积降水 (虚线为 1960~1999 年平均)

Fig. 5 (a) Anomaly of accumulated precipitation in the upper reaches from March to August of the years 1954, 1969, 1980, 1983, 1993, 1998 and 1999, and (b) accumulated precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River from June to August of the years 1954 and 1998 and in July 1931, dashed line presents the climatic value averaged in 1960—1999

以及嫩江先后出现了大范围的洪涝灾害,其中长江流域的灾害最为严重。图 6 是 1998 年 6~8 月长江上游和中下游主要代表站的逐日累积降水曲线。6 月中旬以后,长江上游的降水逐渐增多,重庆的累积降水在 6 月 17 日超过气候平均值,随后的 5 次暴雨过程使夏季降水比常年偏多 350 mm,

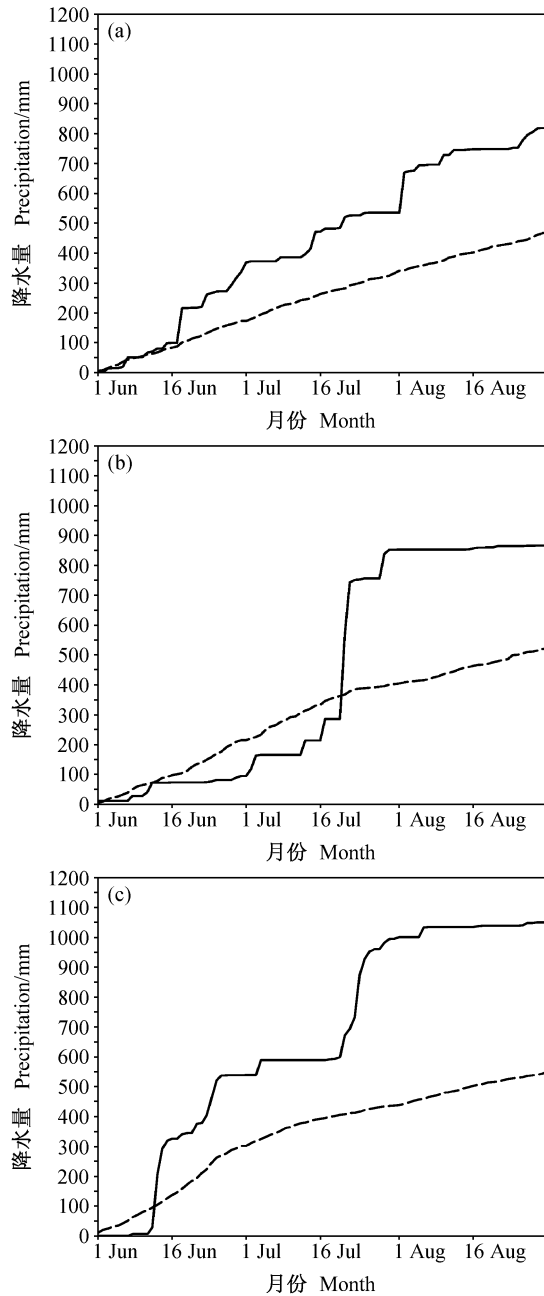


图 6 1998 年 6~8 月 (a) 重庆、(b) 武汉、(c) 南昌逐日累积降水 (虚线为 1960~1999 年平均)

Fig. 6 Accumulated precipitation in (a) Chongqing, (b) Wuhan, (c) Nanchang during June to August 1998; dashed line presents the climatic value averaged in 1960—1999

约为常年的 2 倍 (图 6a)。长江中下游的降水主要发生在两段梅雨期 (图 6b、c)。在第一段梅雨期 (6 月 12~28 日), 雨区主要在长江以南, 武汉并没有出现强降水, 因此在第一段梅雨期, 武汉的累积降水比常年偏低。第二段梅雨期 (7 月 20~30 日), 雨区位于长江沿岸, 7 月 20~23 日武汉遭遇了过程降水量达 457 mm 的持续性大暴雨。到 7 月底, 武汉的累积降水比常年偏多 450 mm, 是常年的 2 倍。下游南昌的累积降水曲线清楚表现出两段梅雨期的强降水, 其中 7 月下旬的持续性大暴雨时段降水比气候平均值高出 550 mm。7 月下旬长江中下游持续性大暴雨过程中的雨水流入长江主干道后, 上游强降水引起的洪峰也陆续到达中下游河道, 上下游洪水遭遇, 长江干流宜昌以下河段 8 月持续超过或接近历史最高水位。1998 年 6~8 月宜昌水文站的水位演变 (图 7a) 显示, 该年夏季有 8 次洪峰经过宜昌站, 其中 6 次出现在 8 月, 这是因为 8 月 1~29 日上游的岷江、嘉陵江、乌江、清江、三峡区间、汉江中下游先后出现了暴雨。九江水文站的水位演变 (图 7b) 显示, 7 月初九江水位第 1 次超过历史最高水位, 7 月下旬再次超过历史最高水位, 并持续到 8 月底。7 月初的洪水是中下游的第一段梅雨强降水引起的。而 7 月下旬第二段梅雨强降水再次引发洪水后, 8 月由于上游的洪水陆续到达长江中下游干流, 虽然中下游的降水已结束, 水位却居高不下。

1954 年 6 月, 重庆虽然有暴雨发生, 但其月降水总量低于气候平均值。7 月下旬, 长江上游进入强降水时段, 7 月下旬和 8 月初的两次暴雨过程使重庆的降水量迅速超过气候平均值 (图 8a)。长江中下游地区雨季开始早, 洞庭湖、鄱阳湖水系 4 月出现大雨和暴雨, 进入汛期。长江中下游的早梅于 5 月 16 日开始, 持续到 5 月 25 日。6 月长江流域大部分地区降水超过 200 mm, 比常年同期高。6 月 12 日长江中下游地区进入梅雨季节, 并持续到 7 月 31 日。梅雨期, 长江中下游多次出现大范围的持续性暴雨过程, 主要集中在两个时段: 6 月中旬和月底至 7 月下旬 (图 2d)。第 1 段强降水期, 武汉有 3 次大暴雨过程, 分别是 6 月 13 日 105 mm, 6 月 24~25 日 196.5 mm, 7 月 2 日 70.3 mm; 南京也在 6 月 24 日、7 月 2 日和 5 日

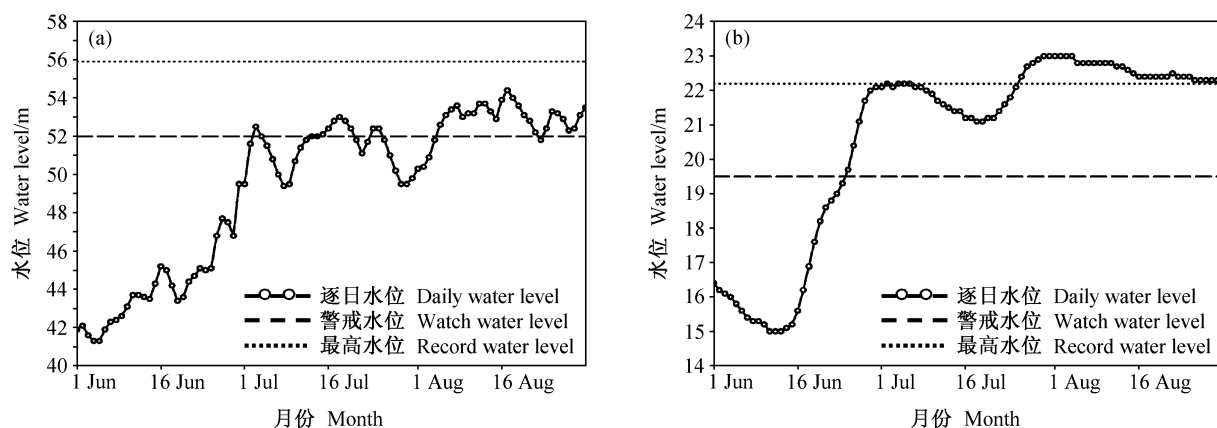


图 7 1998 年 6~8 月 (a) 宜昌和 (b) 九江水文站水位演变

Fig. 7 Evolution of water level in (a) Yichang and (b) Jiujiang during June to August 1998

发生暴雨, 其中 7 月 2 日降水最多, 为 119 mm。第 2 段强降雨期, 武汉 7 月 29~30 日出现 196.8 mm 的大暴雨; 南京在 7 月 21~22 日出现 150 mm 的暴雨过程, 另一次暴雨发生在 7 月 27 日, 为 59.3 mm (图 8b、c)。中下游地区的第 2 段强降雨正好与上游地区的强降雨发生在相同时段。

1931 年长江流域的雨季开始早, 4 月赣江、湘江进入雨季, 比常年提前半个月, 降水量比常年同期偏多 5 成至 1 倍^[21]。我们只收集到 1931 年 7 月汉口以下的江淮流域的日降水量资料, 上游没有资料, 因此仅能分析中下游地区 7 月的降水。7 月降水主要在安徽、湖北、湖南和江苏, 降水量在 300~500 mm, 部分地区降水超过 600 mm (图略), 较常年偏多 1.5~2 倍。长江中下游区域平均的逐日降水演变表明, 7 月的降水分为两个阶段: 3~11 日、19~29 日 (图 3a)。在第 1 段降水期, 7 月 4~8 日连续 5 天区域降水超过 20 mm, 第 2 段降水期在 22~25 日区域平均降水也超过了 20 mm, 表明这段时间长江中下游出现了大面积的持续性强降雨过程, 尤其是 7 月 24 日, 区域平均降水接近 90 mm, 降水强度和影响范围非常大。两段降水期都有大暴雨出现: 汉口 7 月 6、7 日出现了大暴雨, 7 日降水量达 142.2 mm; 南京 7 月 4、5 日出现了 106.8 mm 和 120.3 mm 的大暴雨, 24 日雨量达 198.5 mm, 为南京历史上罕见的特大暴雨 (图 9a、b)。7 月下旬的频繁强降雨使长江中下游的累积降水量增加了 250 mm 以上。长江干流、各支流水位大幅度上涨, 超过警戒水位,

与 1998 年类似。

对于该年上游降水情况, 根据骆承政等^[2]绘制的 1931 年夏季洪水泛滥图推断, 该年长江上游也频繁出现暴雨, 8 月 6 日长江干流寸滩站洪峰流量为 $63\,600\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 8 月 10 日宜昌洪峰流量为 $70\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

长江流域有一个水文学上的特征, 这就是在中下游的径流中 60% 来自上游, 而来自洞庭湖水系、鄱阳湖水系、汉水水系以及干流中由降水而造成的来水总合仅为 40%^①。这个事实说明在中下游的洪涝灾害中来自上游的洪水贡献非常大。1998、1954 和 1931 年的降水分析表明, 由于这 3 年东亚大气环流的异常, 使得梅雨期之前 (3~5 月), 长江中下游已经有较多降水, 在 6 月中旬至 7 月上旬这个时段, 出现持续性强降水。而 7 月下旬, 又异常地出现持续性强降水, 同时上游地区也出现强降水, 上下游强降雨时段重合, 造成 8 月出现全流域性洪水。有意思的是, 当 8 月上中旬长江出现严重洪涝时中下游的降水已完全停止。

6 1954、1998 年 7 月东亚大气环流和东亚夏季风活动的异常

1998、1954 和 1931 年长江中下游地区出梅

① 水电部长江流域规划办公室水文局. 长江流域汉口以上洪水组成遭遇分析. 三峡工程论证阶段水文成果 (油印本), 1987. 1~32

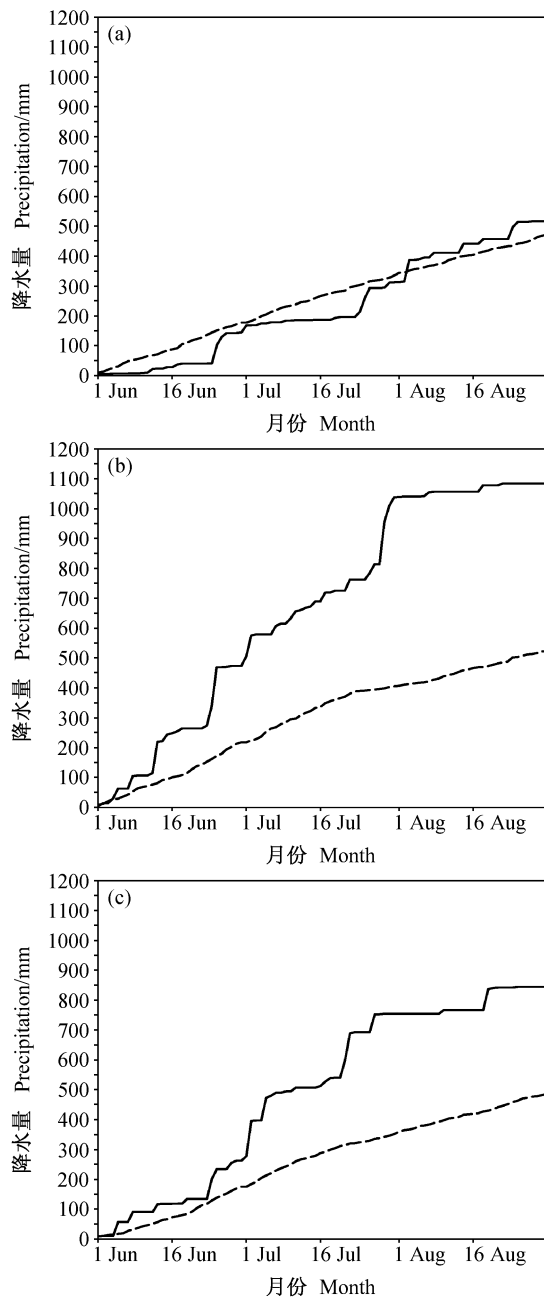


图8 同图6, 但为1954年且(c)为南京

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for 1954 and (c) for Nanjing

晚, 7月下旬仍出现持续性暴雨, 这与7月东亚大气环流的异常有关。由于资料原因, 下面主要分析1954和1998年的环流异常情况。图10是1954、1998年7月500 hPa位势高度及距平分布。1954年7月在中高纬度亚洲上空为阻塞所控制, 阻塞高压位于亚洲东部沿海和乌拉尔地区, 西太平洋副热带高压位于 25°N , 从日本到长江流域为负距平区, 反映准静止梅雨锋的位置。这种环流

型稳定少变, 例如亚洲东部沿海岸的阻塞高压持续性达90%, 即一个月有27天维持这个阻塞高压, 乌拉尔阻高的持续性达80%, 西太平洋副高的持续性为70% (图略)。由于这种环流形势稳定, 梅雨锋一直持续到7月底。1998年7月与1954年类似 (图10b), 不同之处在于西太平洋副高7月1~12日曾伸展到长江中下游, 造成梅雨期一度中断。中断期间中高纬度的阻塞形势仍然维持, 7月中旬以后副高撤退到 25°N , 中下游的梅雨锋重新建立并出现强降水, 称之为“二度梅”。

7月中下旬副高北跳是东亚夏季大气环流季节突变最明显的特征之一, 它对应着长江流域和日本的梅雨结束。通常情况下, 7月中旬以前副高的脊线位于 25°N 附近, 7月下旬副高脊线则已经到达 30°N 附近 (图11a)。1998年7月中旬梅雨中断时, 副高的脊线位置位于 30°N 附近, 与常年相当, 但7月下旬副高又南撤, 与上旬相比, 脊线南北位置几乎没有变化。1954年也出现了类似的情况 (图11b)。也就是说, 1998、1954年7月中下旬副高的位置异常偏南。在正常年份长江中下游7月中下旬正是伏暑天气, 但在1998、1954和1931年梅雨锋仍然维持在该地, 并出现持续性强降水。这是这3年东亚大气环流和夏季风活动异常的表现。由于这3年7月副高位置偏南, 南海地区受副高活动的影响频繁, 南海季风槽的强度比正常年弱。根据潘静^[22]定义的南海季风槽强度指数计算表明, 1998年夏季 (6~8月) 南海季风槽强度指数达到50年以来的最低值 (图12)。

1930~1931、1953~1954、1997~1998年赤道东太平洋出现暖水事件, 尤其是1997~1998年的El Niño事件引起的全球气候的异常令人记忆犹新。Wang等^[23]指出, El Niño年达到顶峰后的夏季, 西伯利亚东部容易出现阻塞形势, 西太平洋副高的位置偏西, 来自副高西南侧的季风气流比常年强。Ueda等^[24]的研究表明, 热带太平洋暖池地区 (20°N , 150°E) 的海温随季节变化 (海温随气温升高而升高), 在7月初海温超过 29°C , 导致对流20天后活跃, 进而导致副高北跳, 日本的梅雨结束, 热带西太平洋上台风活动达到盛期。图13是热带西太平洋地区 ($150\sim 60^{\circ}\text{E}$) 海表温度 (SST) 的时间-纬度剖面。可以看出, 菲律宾东面

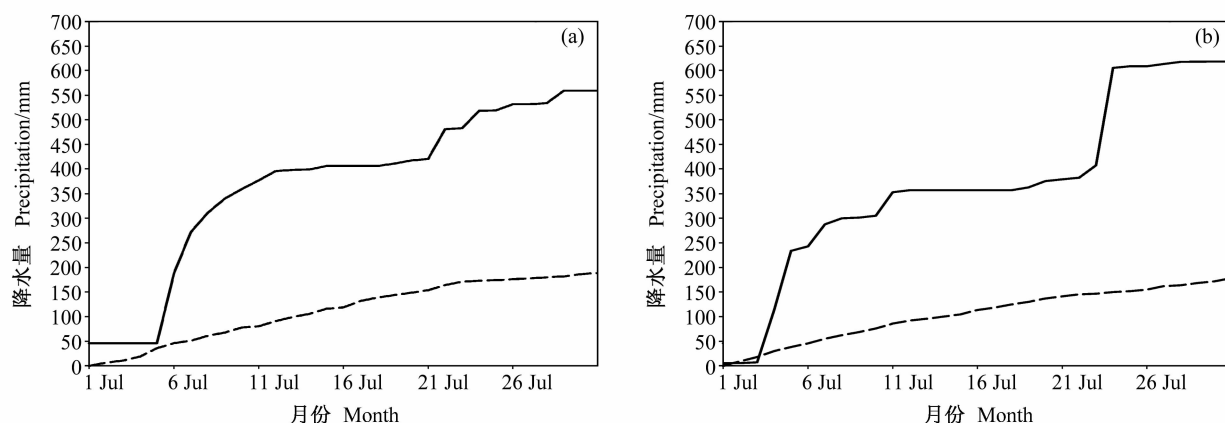


图 9 1931 年 7 月 (a) 汉口、(b) 南京累积降水演变 (虚线为 1960~1999 年平均)

Fig. 9 Accumulated precipitation in (a) Hankou, (b) Nanjing in July 1931, dashed line presents the climatic value averaged in 1960—1999

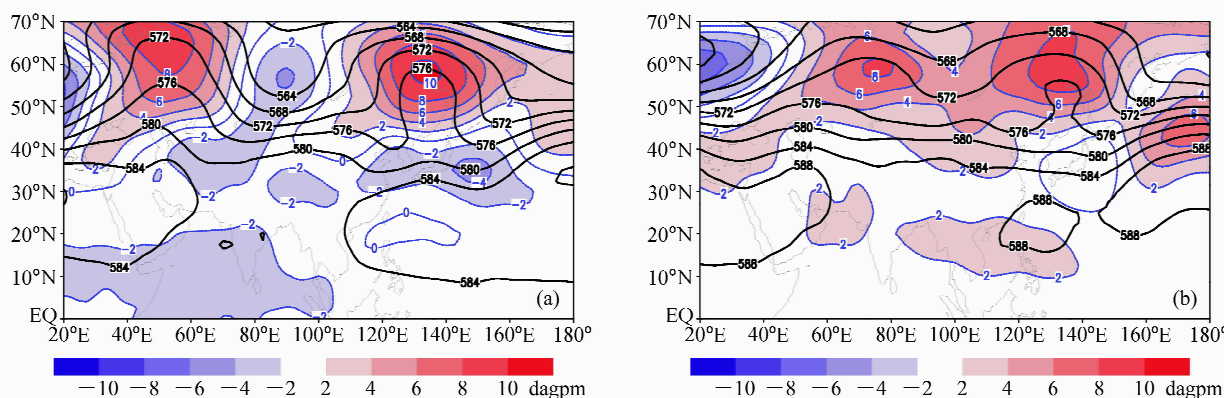


图 10 (a) 1954 年和 (b) 1998 年 7 月 500 hPa 位势高度 (实线) 及其距平 (阴影) 分布 (单位: dagpm, 红色阴影区为距平 ≥ 2 dagpm, 蓝色阴影区为距平 ≤ -2 dagpm)

Fig. 10 500 hPa geopotential height (solid lines) and anomaly (shading) in July of the years (a) 1954 and (b) 1998 (units: dagpm); The red and blue shading indicate anomaly value larger than 2 dagpm and less than -2 dagpm, respectively

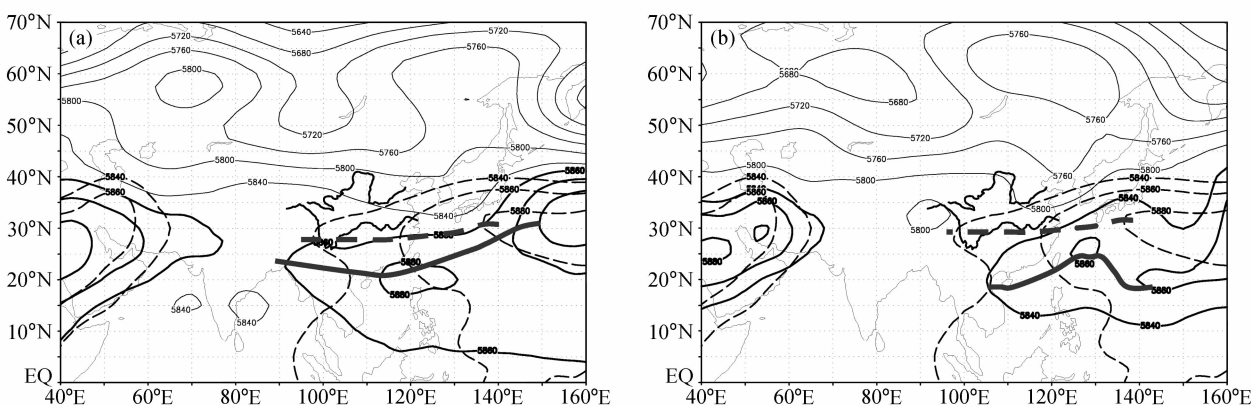


图 11 (a) 1998、(b) 1954 年 7 月 21~31 日平均的 500 hPa 高度场 (单位: gpm, 虚线为 1960~1999 年平均, 粗实线和粗虚线分别代表 1954 年和 1960~1999 年副高脊线)

Fig. 11 500 hPa geopotential height averaged in 21—31 July of the years (a) 1998 and (b) 1954 (units: gpm, dashed line present the climatic value averaged in 1960—1999; thick solid line and thick dashed line present the ridge of the subtropical high in 1998 and in 1960—1999, respectively)

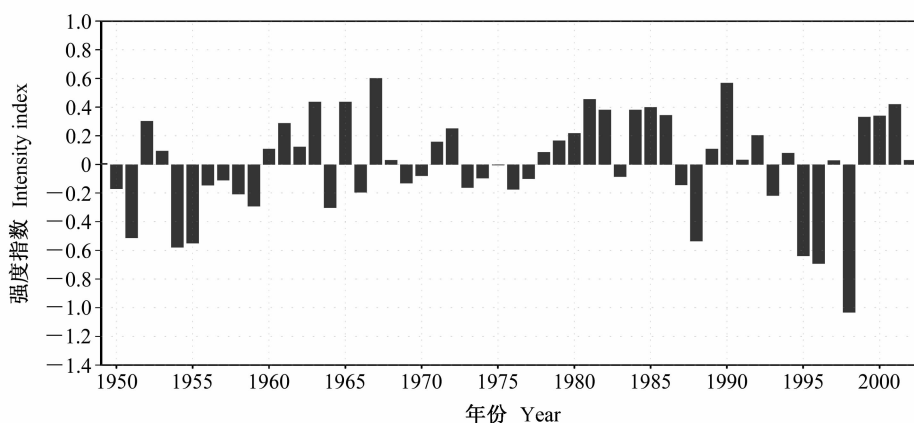


图 12 1949~2003 年夏季南海 (10~20°N, 105~120°E) 季风槽强度指数

Fig. 12 Evolution of the South China Sea (10—20°N, 105—120°E) summer monsoon trough intensity index during 1949—2003

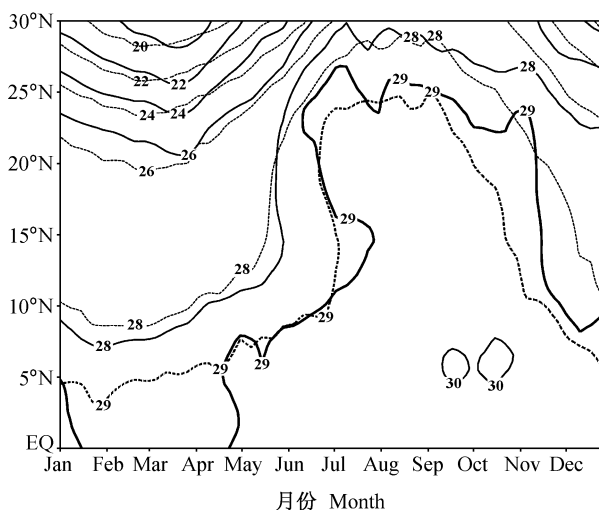


图 13 1998 年 (实线) 沿 150~160°E 逐周 SST 演变 (单位: °C, 虚线为 1990~1999 年平均)

Fig. 13 Time-latitude cross-section of weekly SST along 150—160°E in 1998 (units: °C, dashed lines indicate mean values in 1990—1999)

的暖池区 (10~15°N, 150~160°E) 1998 年海温由春至夏逐渐升高, 7 月 20 日左右, SST 突然增加到 29°C, 而正常年份这一区域的海温在 7 月初就达到 29°C。海温的异常使 1998 年 7 月菲律宾附近的对流在 7 月底开始活跃, 对流活跃期比常年推迟了 2 周左右, 该年的赤道辐合带 (ITCZ) 在 7 月底、8 月初北跳 (图 14)。由于热带西太平洋暖池的对流活动比常年弱, 这使得该年台风活动指数达到近 40 年来最低。

研究表明, El Niño 事件对 1998 年春季长江流域的降水异常偏多有重要作用^[12,25], 在 El Niño

事件盛期的冬季东亚沿海的高空东亚大槽比常年弱, 寒潮活动不活跃, 东亚冬季风偏弱, 青藏高原积雪异常多, 但亚洲南支西风瞬变扰动活跃, 造成长江以南地区冬春季降水异常偏多。1953~1954 年、1930~1931 年的 El Niño 事件也同样影响了长江流域春、夏季的降水。

7 结论和讨论

20 世纪长江流域曾出现上游洪水 7 次, 中游洪水 16 次, 下游洪水 7 次, 其中有 3 次是全流域的洪水, 分别发生在 1998、1954 和 1931 年。在这 3 次洪水年, 长江流域梅雨期开始前 (3~5 月), 长江中下游降水比常年偏多, 江河的水位已高过气候平均, 中下游的土壤含水量也很高。进入梅雨季以后, 先后出现两场持续性的暴雨: 第 1 场出现在 6 月中至 7 月上旬, 这场暴雨造成中下游河流的水位达到或超过警戒水位, 大小湖泊均已灌满, 土壤含水量已达饱和, 并出现局地区域的洪涝。7 月下旬长江中下游又出现一场范围广的持续性暴雨, 雨水只能作为地面径流汇集到长江干流, 造成很高水位的洪流。当 7 月下旬的持续性暴雨与上游的强降水时段重合时, 中下游干流洪水与来自上游的洪水在 8 月初至中旬遭遇, 造成长江中下游灾难性的大洪水。

通过对 20 世纪长江流域的 3 次全流域特大洪水的分析发现, 7 月下旬中下游地区出现持续性大面积强降水过程对全流域洪水的形成起着非常重要的作用。1951~1999 年虽然有不少年份长江流

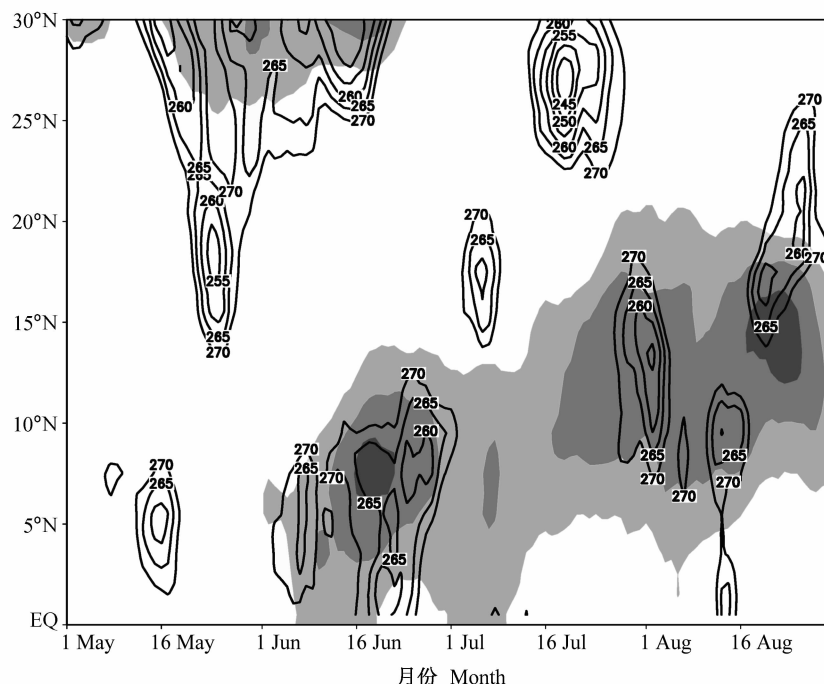


图 14 1998 年 5~8 月沿 120~150° E 逐周 TBB 演变 (单位: K): 阴影为 1990~1999 年平均的 TBB $\leq$ 270 K

Fig. 14 Time-latitude cross-section of weekly TBB (black-body temperature) along 120—150°E from May to August 1998 (units: K, the shading indicate mean value less than 270 in 1990—1999)

域春夏季的降水偏多, 但只有 1954 年和 1998 年梅雨期持续到 7 月底, 7 月下旬中下游地区出现持续性的大面积暴雨过程。1931 年也是在春夏季降水偏多的同时, 7 月 22~24 日出现持续性大暴雨。1999 年长江流域的降水就是很好的反证, 该年春夏季长江流域降水偏多, 梅雨期有数场暴雨发生, 但 7 月下旬中下游地区没有强降水发生, 因此虽然前期水位偏高, 但并没有出现流域性大洪水, 仅在长江中下游地区引起洪涝灾害。

1998、1954 和 1931 年长江全流域性大洪水与东亚中高纬地区大气环流和东亚夏季风活动异常有联系。El Niño 事件也起着一定作用, 但其中的动力学过程仍不清楚。7 月大气环流季风活动的异常使 7 月下旬有利于长江中下游持续性暴雨发生的环流条件仍然存在。7 月下旬西太平洋副热带高压的位置偏南, 长江流域处于副高西北侧有利于暴雨发生的危险区域。当西太平洋副热带高压、季风涌、中高纬度南侵的冷空气以及青藏高原东移的 α 中尺度系统协同作用时, 梅雨锋持续维持在长江流域, 梅雨锋上的扰动加强, 长江中下游地区出现持续性致洪暴雨。

1998、1954 和 1931 年出现的长江全流域灾难性特大洪水是极端的气候事件, 出现的概率很小, 20 世纪仅出现 3 次, 但损失巨大。这类极端气候事件不容易预报准确。因此怎样预报出这类极端气候事件, 对我国的预报员来讲是个挑战。

参考文献 (References)

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 水利部南京水文水资源研究所. 中国水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 1~584
Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters, Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources Ministry of Water Resources. *The Flood and Drought Disasters in China* (in Chinese). Beijing: China Water Power Press, 1997. 1~584
- [2] 骆承政, 乐嘉祥. 中国大洪水—灾害性洪水述要. 北京: 中国书店, 1996. 1~434
Luo Chengzheng, Luo Jiaxiang. *The Flood Disasters in China* (in Chinese). Beijing: China Bookstore, 1996. 1~434
- [3] Tao Shiyan, Ding Yihui. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1981, **62**: 23~30

- [4] Tao Shiyao, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asia summer monsoon in China. In: *Monsoon Meteorology*, Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 1987. 60~92
- [5] Ding Yihui. Summer monsoon rainfalls in China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 373~396.
- [6] Chen GT-J. Large-scale circulation associated with the East Asia summer monsoon and the Mei-yu over South China and Taiwan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1994, **72**: 959~983
- [7] 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 论梅雨的年际变异. 大气科学, 1988, (特刊): 13~21
Tao Shiyao, Zhu Wenmei, Zhao Wei. Interannual variability of Meiyu rainfalls. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1988, (Special Issue): 13~21
- [8] Chen Longxun, Dong Min, Shao Yongning. The characteristics of interannual variations on the East Asian monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 397~421
- [9] Lau K M. East Asian summer monsoon rainfall variability and climates teleconnection. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B): 211~242
- [10] Tian S F, Yasunari T. Time and space structure of interannual variations in summer rainfall over China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 585~596
- [11] 陶祖钰, 胡爱学. 1991 年梅雨期阻塞高压的维持和瞬变扰动. 气象学报, 1994, **52** (2): 231~234
Tao Zuyu, Hu Aixue. The blocking high and transient disturbance in Mei-yu Period of 1991. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (2): 231~234
- [12] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件. 气候与环境研究, 1998, **3** (4): 290~299
Tao Shiyao, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. The great floods in the Changjiang River Valley in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 290~299
- [13] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 1~255
Ding Yihui. *Study on Persistent Heavy Rainfalls in the Yangtze and Huaihe River Valley in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 1~255
- [14] Ding Yihui, Zhang Y, Ma Q, et al. Activities of East Asia summer monsoon and rainstorm concentrating period of Meiyu season over the Yangtze—Huaihe basins in 1999. GAME/HUBEX Project Office, 1999. 1~4
- [15] 竺可桢. 长江流域 30 年未有之大雨量及其影响. 竺可桢全集 (第 2 卷). 上海: 上海科技教育出版社, 1931. 74~87
Zhu Kezhen. The break-record heavy rain event and its effect in the Yangtze River Valley in recent thirty years. In: *Corpus Zhu Kezhen*, Vol. 2 (in Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1931. 74~87
- [16] 陈汉耀. 1954 年长江淮河流域洪水时期的环流特征. 气象学报, 1957, **28** (1), 1~12
Chen Hanyao. Atmospheric circulation characteristics in the Yangtze and Huaihe River Valley during flood episode of 1954. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1957, **28** (1), 1~12
- [17] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 1~225
Tao Shiyao. *Rainstorms in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 1~255
- [18] 章淹, 白建强. 江淮异常梅雨. 水科学进展, 1999, **10** (3), 278~287
Zhang Yan, Bai Jianqiang. Extremely heavy and light Meiyu in Yangtze and Huaihe valleys. *Advance in Water Science* (in Chinese), 1999, **10** (3): 278~287
- [19] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 1998 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 Shiyao, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. *Study of Mechanisms and Forecast of Heavy Rainfalls in China in Summer of 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 1~184
- [20] 国家气象中心, 国家卫星中心. 1998 中国大洪水与天气预报. 北京: 气象出版社, 1998. 1~352
National Meteorological Center, National Satellite Meteorological Center. *Floods and Weather Forecasting in China in 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998. 1~352
- [21] 胡思明, 骆承政. 中国历史大洪水 (下卷). 北京: 中国书店, 1992. 1~725
Hu Siming, Luo Chengzheng. *History of floods in China* (2nd) (in Chinese). Beijing: China Bookstore, 1992. 1~725
- [22] 潘静. 南海夏季风槽的活动及其对北半球天气气候的影响. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 2004
Pan Jing. South China summer monsoon activities and its effect to the weather and climate in North hemisphere. Ph.D dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004
- [23] Wang Y, Wang B, Oh Jai-Ho. Impact of the preceding El Nino on the East Asian summer atmospheric circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**: 575~588
- [24] Ueda H, Yasunari T, Kawamura R. Abrupt seasonal change of large-scale convective activity over the western Pacific in the northern summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1995, **73**: 795~809
- [25] 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 1998 年夏季中国暴雨洪涝灾害的气象水文特征. 应用气象学报, 2001, **12**: 442~457
Zhang Shunli, Tao Shiyao, Zhang Qingyun, et al. Meteorological and hydrological Characteristics of severe flooding in China during the summer of 1998. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (4): 442~457