

印度洋和南海海温与长江中下游旱涝^{*}

张 琼 刘 平 吴国雄

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 作者统计分析 1958~1999 年 42 年长江中下游地区夏季 5~8 月旱涝事件的分布特征。结果表明, 42 年中旱涝月出现频次相等, 但洪涝强度远大于干旱强度。对比分析旱涝月的环流异常和海温异常 (SSTA) 发现, 南海地区 SSTA 和对流层低层经向风异常均与长江中下游旱涝显著相关, 尤其正 SSTA 和涝月的关系更为密切, 因此南海 SSTA 为我国长江中下游地区旱涝的一个强讯号。进一步分析发现, 夏季南海 SSTA 与前春赤道南印度洋 SSTA 存在显著相关, 可将其作为预报因子。最后得到的预报思路为: 当前春赤道南印度洋海温异常偏暖, 则夏季南海海温异常偏暖, 南海低空出现异常偏南风, 异常多的水汽向我国南方输送, 长江中下游地区易涝; 反之当前春南印度洋海温异常偏冷, 夏季南海海温亦异常偏冷, 南海低空出现异常偏北风, 向北输送水汽偏少, 长江中下游易旱。

关键词: 旱涝; 海温异常; 年际变化

1 引言

长江中下游是夏季大范围旱涝灾害发生频繁且严重的地区, 对该区夏季的旱涝预报, 历来倍受关注。近年来, 由于认识到 ENSO 事件的发生对全球气候异常的影响, 许多研究工作致力于从热带太平洋海温异常寻找旱涝预报因子, Liu 和 Ding^[1] 对这类研究结果进行比较, 指出由于 ENSO 事件的复杂性, 以及由于不同研究所用的资料长度、雨区的划分以及分析方法的不同, 结果并不一致。Huang 和 Wu^[2] 指出, 尽管夏季黄河和长江流域降水与 ENSO 事件有关, 但相关不显著, 大涝和大早年与 ENSO 事件并不一致对应。Simmonds 等^[3] 也指出夏季长江中下游地区的降水异常与 ENSO 指数无明确的对应关系, 而与西太平洋海温异常呈显著正相关。吴国雄等^[4] 的数值试验结果表明, 降水对热带海表温度异常的响应基本上是一种邻域响应。最近, 张琼和吴国雄^[5] 通过资料分析再次证明长江流域降水与赤道中东太平洋海温的关系不确定, 而与邻近海域如西太平洋、南海、印度洋有较密切的关系。可见, 在探寻夏季长江流域旱涝预报因子时, 应特别关注邻近海区海温异常。

我国是世界上季风最显著的地区之一, 长江中下游及其以南地区雨季的起讫、雨带的移动以及降水的变异, 与季风环流密切相关。印度洋和南海位于夏季风气流上游,

2002-10-08 收到, 2003-02-08 收到修改稿

^{*} 中国科学院资源环境领域知识创新工程 ZKCX2-SW-210、国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 和国家自然科学基金资助项目 40005006、40135020 共同资助。

是我国夏季降水和各种能量的重要源地之一。因此，该海区海温的变化及其与季风的相互作用，都可能影响我国东部地区的降水。罗绍华等^[6]通过相关分析研究了印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的关系，归纳总结了海温和降水的相关区如南海、孟加拉湾、阿拉伯海、索马里沿海、印度爪哇岛附近海区等，指出利用这些相关区前期海温变化来预报长江中下游夏季降水和旱涝趋势。吴国雄等^[7]发现，海表温度的异常增暖，可以通过两级热力适应引起低层偏南气流的异常增强。这些研究作为夏季旱涝预报提供了新的思路，考虑到所用资料在时间长度和覆盖空间范围等方面的局限性，有必要利用现有的更长时间序列的资料，对这一重要问题进行更客观系统的研究，以期获得与长江中下游地区旱涝密切相关的关键海区，为短期气候预测提供参考。

本文利用最近 42 年的资料，统计分析长江中下游地区旱、涝事件的分布特征以及同期的大气环流异常和海温异常，寻找与旱涝事件密切相关的海区。再通过相关分析寻找与相关海区海温异常密切相关的前期海温异常区，这样，通过前期相关海区的海温异常预报夏季相关海区的海温异常，进而形成夏季降水异常的一个预报思路。第 2 节介绍所用资料和方法；第 3 节统计得到 42 年长江中下游地区旱、涝月的分布；第 4 节对比分析旱、涝月的环流异常和海温异常，并得到同期相关最密切的海区；第 5 节通过对相关海区的海温和前期冬春季全球海温的相关分析得到前期海温相关区，由此给出长江中下游地区夏季旱涝的一个预报思路；主要结论在第 6 节给出。

2 资料和方法

本文所用月平均降水资料是由国家气候中心提供的 1958~1999 年中国 160 个站地面观测资料，同期内月平均全球海表温度取自 Smith 等^[8]用 EOF 重建资料，水平分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 。850 hPa 风场资料取自 NCEP/NCAR 再分析数据资料集^[9]，水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。本文主要研究长江流域旱涝分布的年际变化，因此为消除长期变化趋势的影响，分析之前均去掉了降水、风场和海温等各变量的长期线性变化趋势。

通常，将 6~8 月的平均降水作为整个夏季降水，季节平均虽然反映了夏季主要的降水特征，但由于我国降水具有明显的区域性，而且 6~8 月，我国雨带有逐渐北移再南退的特点，季节平均将会消除降水的部分区域差异。并且，随着 5 月份南海夏季风的建立，长江中下游及其以南地区已经进入雨季。因此，本文将分别研究 5、6、7、8 月份降水异常。各月的降水距平均指该月与 42 年平均之差，环流距平和海温距平的取法与此相同。

以往的研究工作中对长江中下游地区平均降水量的定义各不相同，较常用的是选取长江两岸附近若干个测站的降水平均，如罗绍华等^[6]用武汉、九江、南昌、屯溪、安庆和合肥 6 个站的平均降水量作为长江中下游地区的平均降水量。本文参考 Ting 和 Wang^[10]采用统计手段划分降水区的方法，先计算全国 160 个站 5~8 月平均的降水标准差，得到夏季长江流域降水变率最大的测站。然后以该测站为基点，计算其与 160 个站的单点相关，得到降水的空间相关图。相关系数在基点处为 1，然后向周围逐渐减小，显著相关的区域代表了较为一致的降水变率。将这些测站的平均降水量作为长江流域的平均降水量，进而研究其年际变化。

在划分旱涝月份时，为消除季节变化的影响，使夏季各月之间具有可比性，对 5、6、7、8 月份的降水量分别进行标准化处理，将标准化值大于标准差 σ 的月定义为涝月，标准化值小于标准差 σ 的月为旱月。

3 长江中下游地区旱、涝月分布

图 1a 是全国 160 个站 5~8 月平均降水的标准差分布，夏季降水变率较大的区域是我国华南沿海地区及长江流域，尤其长江中下游地区呈现为大范围的大降水变率区，这些地区往往也是灾害性旱涝事件多发地区。降水变率最大的测站为位于长江下游南岸的屯溪 (66 mm/月)，因此选择屯溪站作为基点计算降水的单点相关。单点相关系

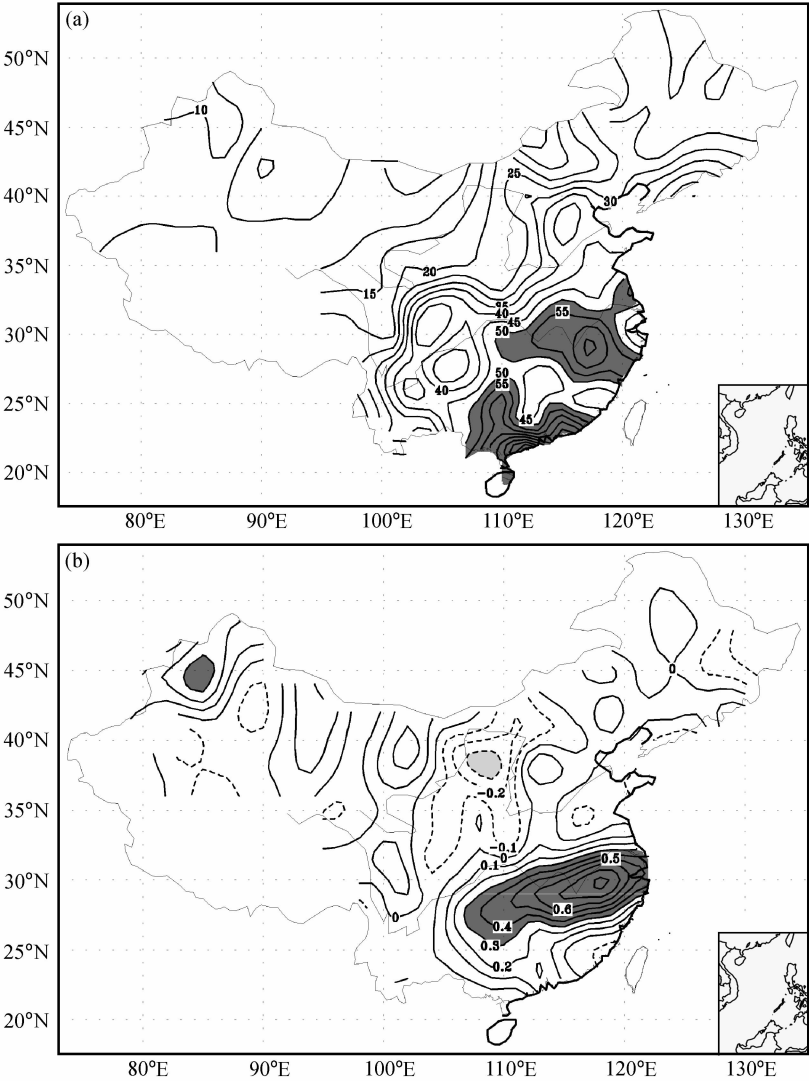


图 1 (a) 全国 160 个站夏季平均 (5~8 月) 降水标准差分布 (mm/月)，标准差大于 50 mm/月的区域用阴影表示；(b) 以屯溪站为基点的夏季降水单点相关分布，相关系数达到信度 95% 的区域 ($r=0.3$) 用阴影表示

数如图 1b 所示，带状阴影区反映长江中下游地区及其以南地区的降水为显著正相关，其北侧的黄河流域的降水与长江流域降水呈负相关。达到显著正相关的测站有 20 个，其中包括罗绍华等^[6]采用的 6 个站。将这 20 个测站的降水平均作为长江中下游地区的平均降水量。

图 2 为经标准化的 1958~1999 年长江中下游地区 5~8 月各月及夏季平均降水距平分布。显然，夏季各月降水变化各异。从各月的年变化来看，涝的强度明显强于旱，但发生干旱的频次较高。将标准化降水距平 (r') 大于 2σ 的月定义为特涝月，降水距平小于 -1.5σ 的月定义为特旱月，则可将 1958~1999 年 42 年的旱、涝月及其中的特旱、特涝月归纳如表 1 所示。

对表 1 进行统计发现，42 年中共有 25 个涝月，其中特涝月 11 个；共有 25 个旱月，其中特旱月 6 个。6、7 月份长江中下游地区降水变率大，发生旱涝事件相对较多，

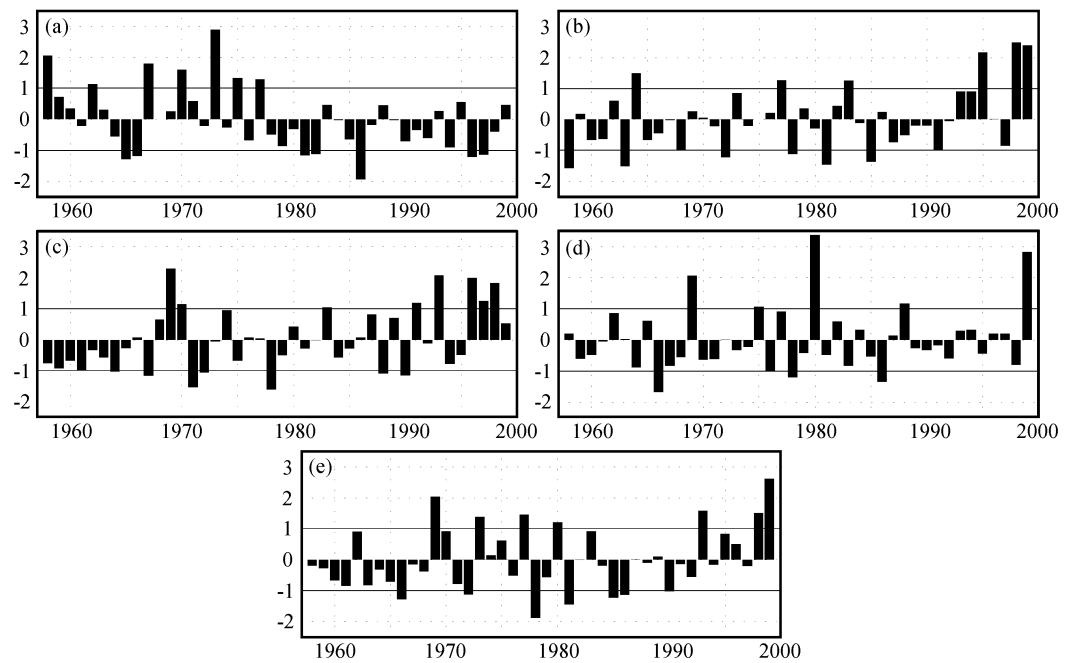


图 2 经标准化的长江中下游夏季平均降水距平序列
(a) 5 月；(b) 6 月；(c) 7 月；(d) 8 月；(e) 5~8 月平均

表 1 1958~1999 年旱、涝年表

月份	标准差 σ	涝年 ($r' \geq 2\sigma$)	旱年 ($r' \leq -1.5\sigma$)
5 月	53.8	1958 1967 1970 1973 1975 1977	1965 1966 1981 1982 1986 1996 1997
6 月	63.8	1964 1977 1983 1995 1998 1999	1958 1963 1972 1978 1981 1985 1991
7 月	61.0	1969 1970 1983 1991 1993 1996 1997 1998	1961 1964 1967 1971 1972 1978 1988 1990
8 月	52.6	1969 1975 1980 1988 1999	1966 1976 1978 1986
5~8 平均	34.2	1969 1973 1977 1980 1993 1998 1999	1966 1972 1978 1981 1985 1986 1990

注：黑体分别代表特涝和特旱年。

8月平均降水变率较小,发生旱涝事件也相对较少。进行夏季平均后,降水变率大幅减小。另外,还发现有时同一年夏季会出现多个涝月(如1970年5月和7月,1969年7月和8月,1975年5月和8月,1977年5月和6月,1983年6月和7月,1998年6月和7月以及1999年6月和8月等)或多个旱月(如1966年5月和8月,1972年6月和7月,1978年6、7和8月,1981年5月和6月以及1986年5月和8月等);有时同一年中既可出现涝月,也可出现旱月(如1958年5月涝6月旱,1991年6月旱而7月涝),这些年份进行夏季平均后由于正负距平的相互抵消而可能无法体现旱涝的实际分布。

4 旱、涝月的环流异常和海温异常

依照表1中旱、涝月的分布,以下分析对应于异常旱涝事件的大气环流异常和海温异常。首先分别选择4个特涝月(1973年5月,1998年6月,1969年7月和1990年8月)和4个特旱月(1986年5月,1958年6月,1963年6月和1978年7月)进行个例分析。

图3分别给出4个特涝月(图3a~d)和4个特旱月(图3e~h)的降水距平分布。可见,由统计方法划分雨区而得到的旱、涝分布集中体现了长江中下游地区降水的异常分布,旱涝的分布有时是大范围的,如1973年5月、1998年6月两次特涝及1958年6月的特旱波及长江中下游及其以南的广大区域;有时旱涝仅集中发生在长江流域,如1969年7月特涝和1986年5月特旱。比较旱、涝的强度可见,洪涝的中心强度远大于干旱的强度,因而洪涝灾害往往带来更严重的后果。

图4是对应上述4个特涝月和4个特旱月的对流层低层850 hPa环流异常分布。4个特涝月的共同特征是在南海(图4a)或西太平洋地区(图4b~d)存在异常反气旋环流中心,在该异常环流影响下,从台湾海峡到南海有异常强的西南风。特旱月的情形与涝月相反,西太平洋地区存在异常气旋环流中心,从台湾海峡到南海有异常的偏北风(图4e~h)。也就是说,涝月在西太平洋地区有异常反气旋环流中心,我国东南沿海为偏南风异常;旱月有异常的气旋环流中心,我国东南沿海为偏北风异常。

对应于如上4个特涝和特旱月的全球SSTA分布如图5所示。与环流异常相比较发现,在副热带及中纬地区,异常反气旋环流大多与正SSTA对应(图5a~d),而异常气旋环流大多与负SSTA对应(图5e~h),这与归佩兰¹⁾、吴国雄和王敬方^[11]的结果一致。对赤道东太平洋SSTA的分析发现,特涝月和特旱月中SSTA正负各半,没有明显的规律,即赤道东太平洋的SSTA与长江流域旱涝没有显著的同时相关,与引言中所提到的相关工作结果一致。但是在中国南海地区旱涝月的SSTA分布有明显差异,4个特涝月南海SSTA全为正(图5a~d),而4个特旱月中除1978年7月外(图5h),其余3个特旱月南海SSTA全为负(图5e~g)。

总结如上对4个特涝月和4个特旱月的环流和海温的分析可知,当我国南海地区

1) 归佩兰,北太平洋海水表面特征及相应的大气环流型:海气相互作用与旱涝长期预报,中国科学院大气物理研究所集刊,1978,13~26.

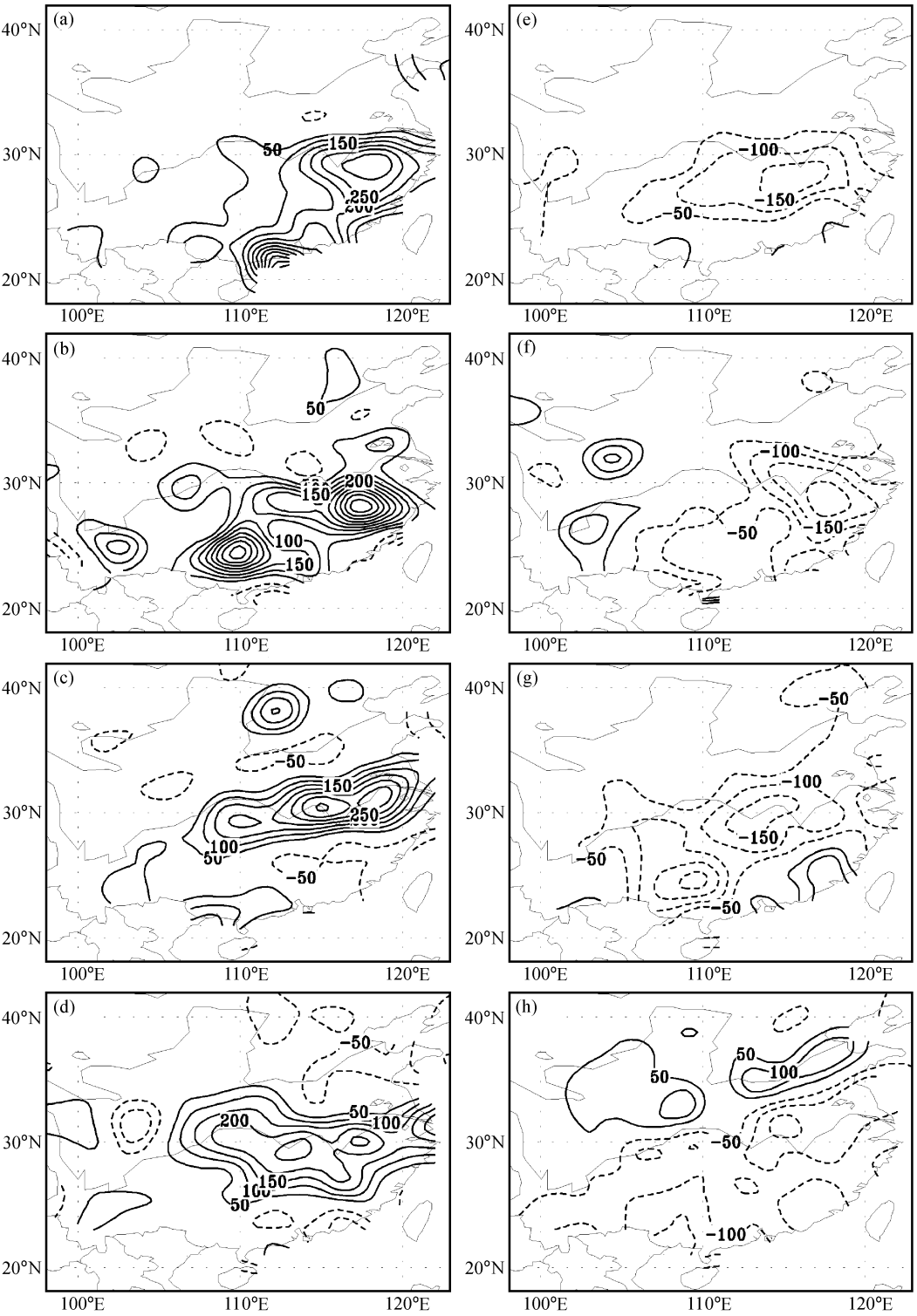


图3 4个特涝月(a~d)和4个特旱月(e~h)的降水距平分布
(a) 1973年5月; (b) 1998年6月; (c) 1969年7月; (d) 1980年8月; (e) 1986年5月;
(f) 1958年6月; (g) 1963年6月; (h) 1978年7月。等值线间距为50 mm/月, 零线未绘

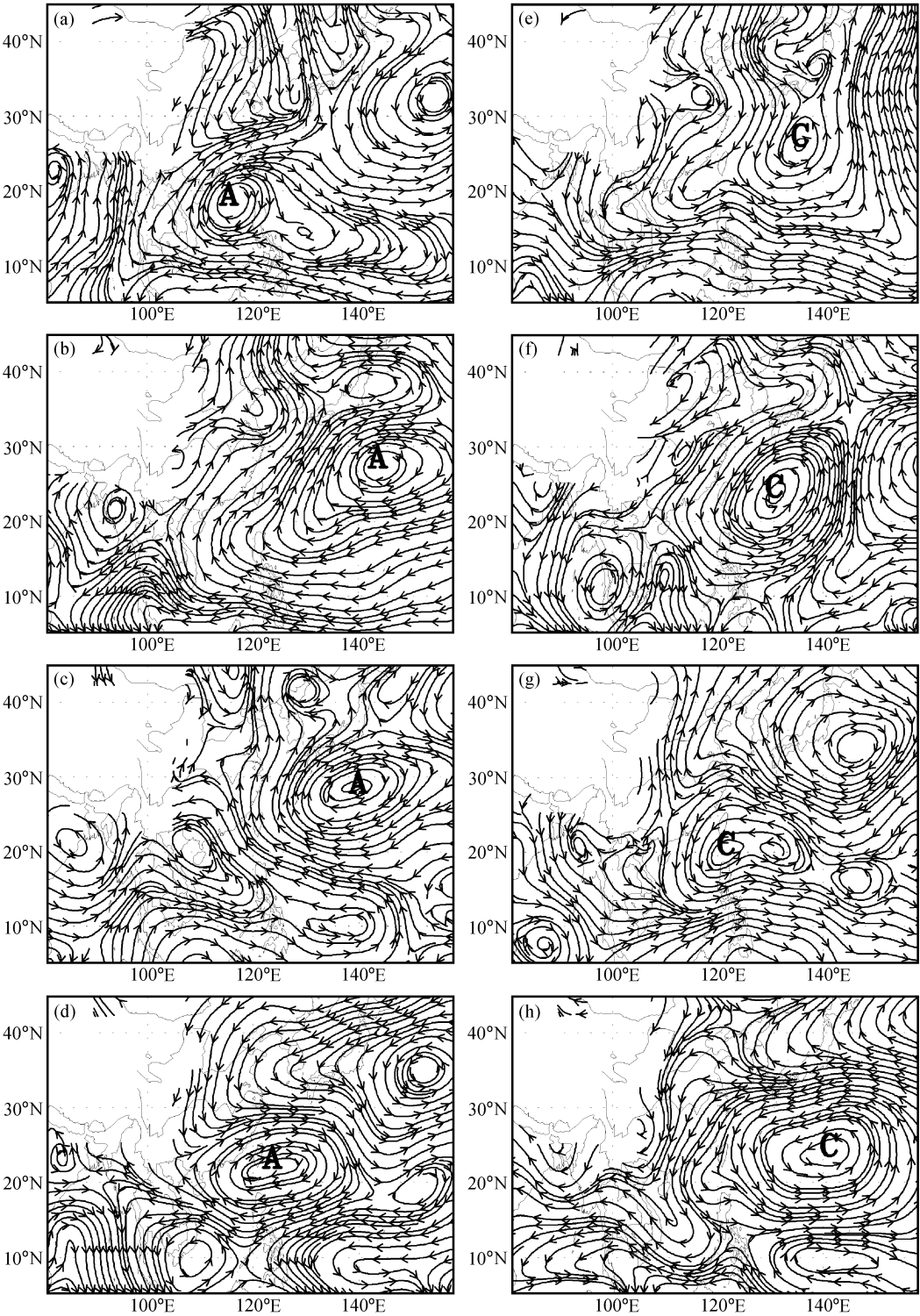


图 4 对应于图 3 中 4 个特涝月和 4 个特旱月的 850 hPa 环流距平分布，其余同图 3
A：反气旋环流中心；C：气旋环流中心

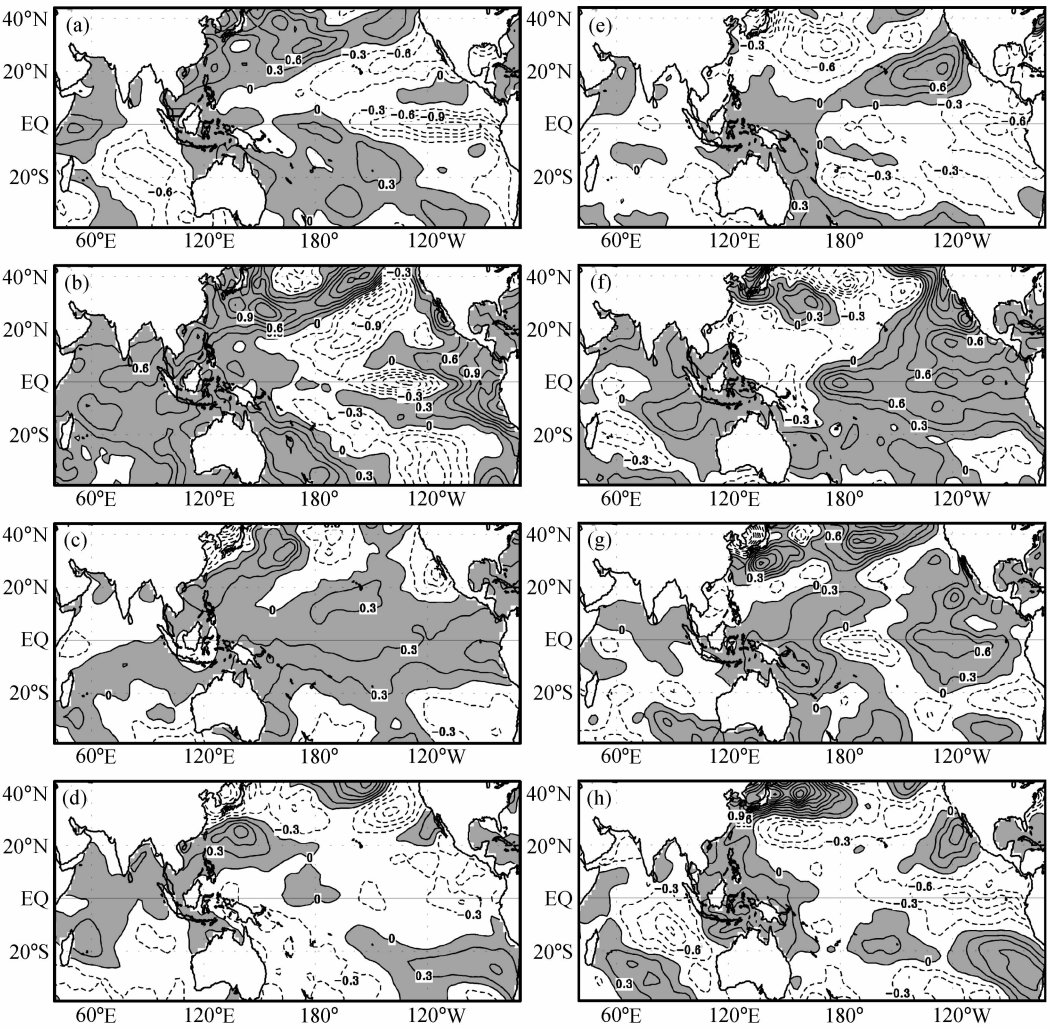


图 5 对应于图 3 中 4 个特涝月和 4 个特旱月的全球 SSTA 分布，其余同图 3

阴影：正距平

SSTA 为正时，该区域低空出现异常偏南风，有充足的水汽向我国南方输送，长江流域易涝；反之当南海 SSTA 为负时，该区域出现异常偏北风，向北输送水汽匮乏，长江流域易旱。

为验证以上结论在统计上的显著性，将对应于表 1 中的 25 个涝月和 25 个旱月的南海地区经向风异常（图 6）和 SSTA 逐一给出（图 7），发现 25 个涝月中南海北部为异常偏南风的有 23 个月，准确率为 92%；南海地区 SSTA 为正的有 21 个月，准确率为 84%。25 个旱月中南海北部为异常偏北风的有 22 个月，准确率为 88%；南海地区 SSTA 为负的有 17 个月，准确率为 68%。可见，南海地区海温异常和低层经向风异常均与长江流域旱涝显著相关，尤其和涝月的关系更为密切。因此，南海 SSTA 可作为我国长江中下游地区旱涝的一个讯号。

进一步分析了 1958~1999 年夏季各月长江中下游降水距平与同期南海地区 850 hPa 经向风异常及 SSTA 的相关关系（表 2），发现 5~7 月份的相关很好，均达到 95%

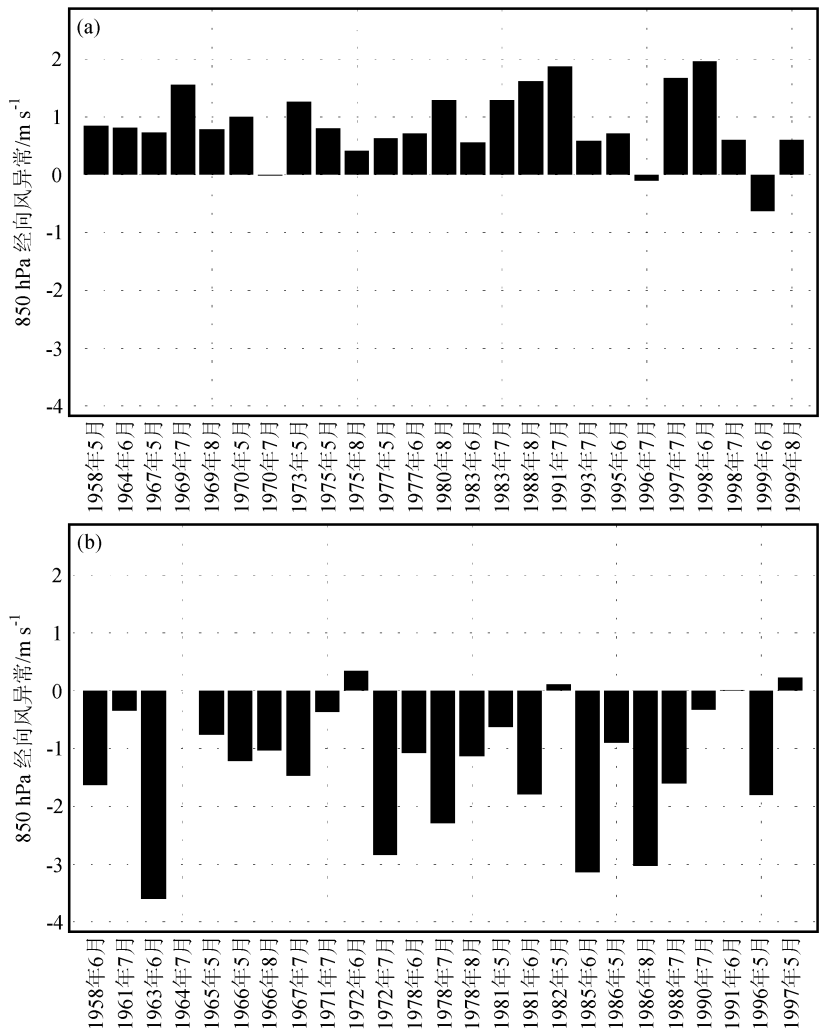


图 6 对应于 25 个涝月和 25 个旱月的南海北部 ($20\sim22.5^{\circ}N$, $112.5\sim117.5^{\circ}E$) 范围内区域平均的经向风距平
(a) 对应表 1 中 5~8 月涝月; (b) 对应表 1 中 5~8 月旱月, 横坐标表示对应的年及月份

的统计显著性检验 ($r=0.3$)。8 月份经向风与长江中下游降水的相关虽然较 5~7 月有所减弱, 但仍是显著相关, 而 SSTa 与降水的相关迅速减弱, 相关系数仅为 0.02。说明 8 月份南海地区并不是长江流域降水的主要水汽来源, 因此在利用 SSTa 与夏季长江中下游降水之间的关系进行预测研究时, 还需要注意其他邻近海域如西太平洋地区的海温异常。

表 2 1958~1999 年 5~8 月各月长江中下游降水指数与
同期南海区域 850 hPa 经向风及 SSTa 的相关

	相关系数			
	5 月	6 月	7 月	8 月
降水与经向风 v	0.68	0.50	0.53	0.31
降水与 SSTa	0.55	0.41	0.35	0.02

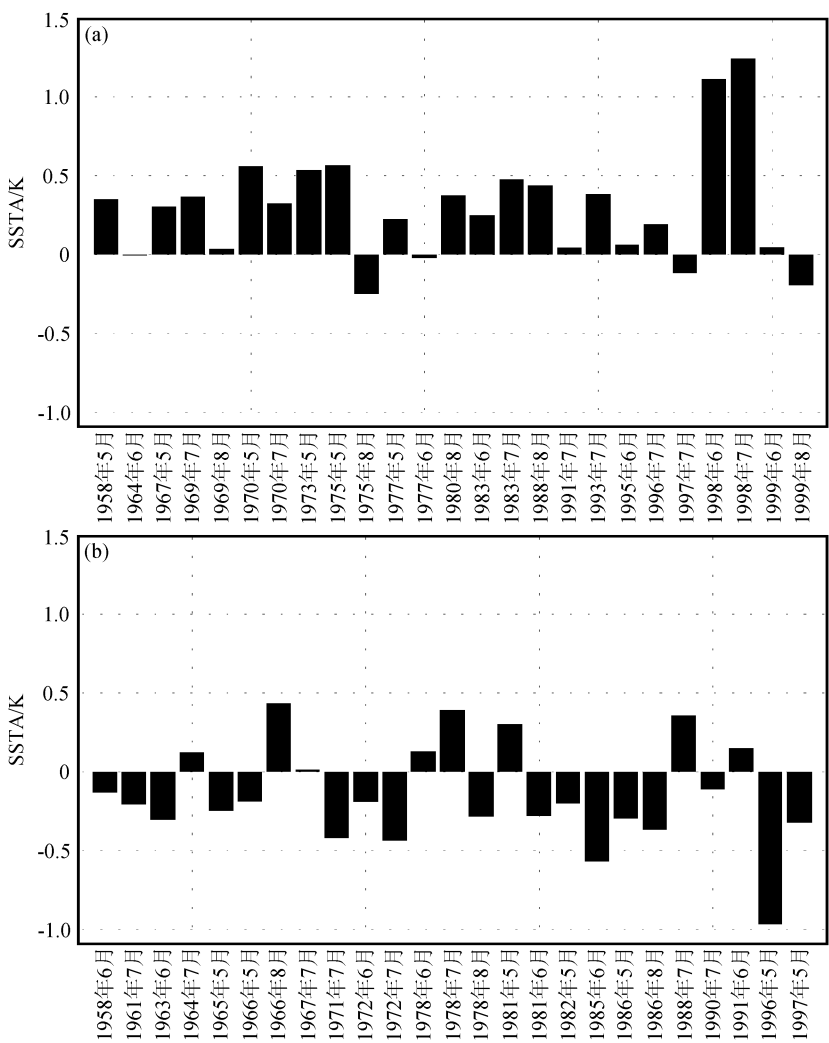


图 7 对应于 25 个涝月和 25 个旱月的南海地区 (15~22°N, 115~120°E) 范围内区域平均的 SSTa
其余同图 6

5 南海 SSTa 与前期冬春季全球 SSTa 的相关分析

既然南海 SSTa 与夏季尤其是 5~7 月长江中下游的旱涝有很好的同期对应关系，为了寻求预报因子，我们利用夏季 5~7 月各月的南海地区 (15~22°N, 115~120°E) 范围内区域平均的 SSTa 与前期 12、1、2、3、4、5 及 6 月全球 SSTa 求相关，结果发现赤道东太平洋的 SSTa 与南海夏季 SSTa 的相关从冬到夏逐渐减弱，在前冬 12 月和 1 月相关最好；而赤道印度洋 SSTa 与南海 SSTa 的相关从冬到夏一直持续并加强，在 2、3 月份相关最好，5~7 月各月均是如此。图 8 给出 5~7 月平均的南海 SSTa 与前期 12、1、2 和 3 月全球 SSTa 的相关图。这种相关关系说明，若前期冬季赤道东太平洋 SST 异常偏暖 (冷)，则该年夏季南海 SST 异常偏暖 (冷)，长江中下游地区易涝

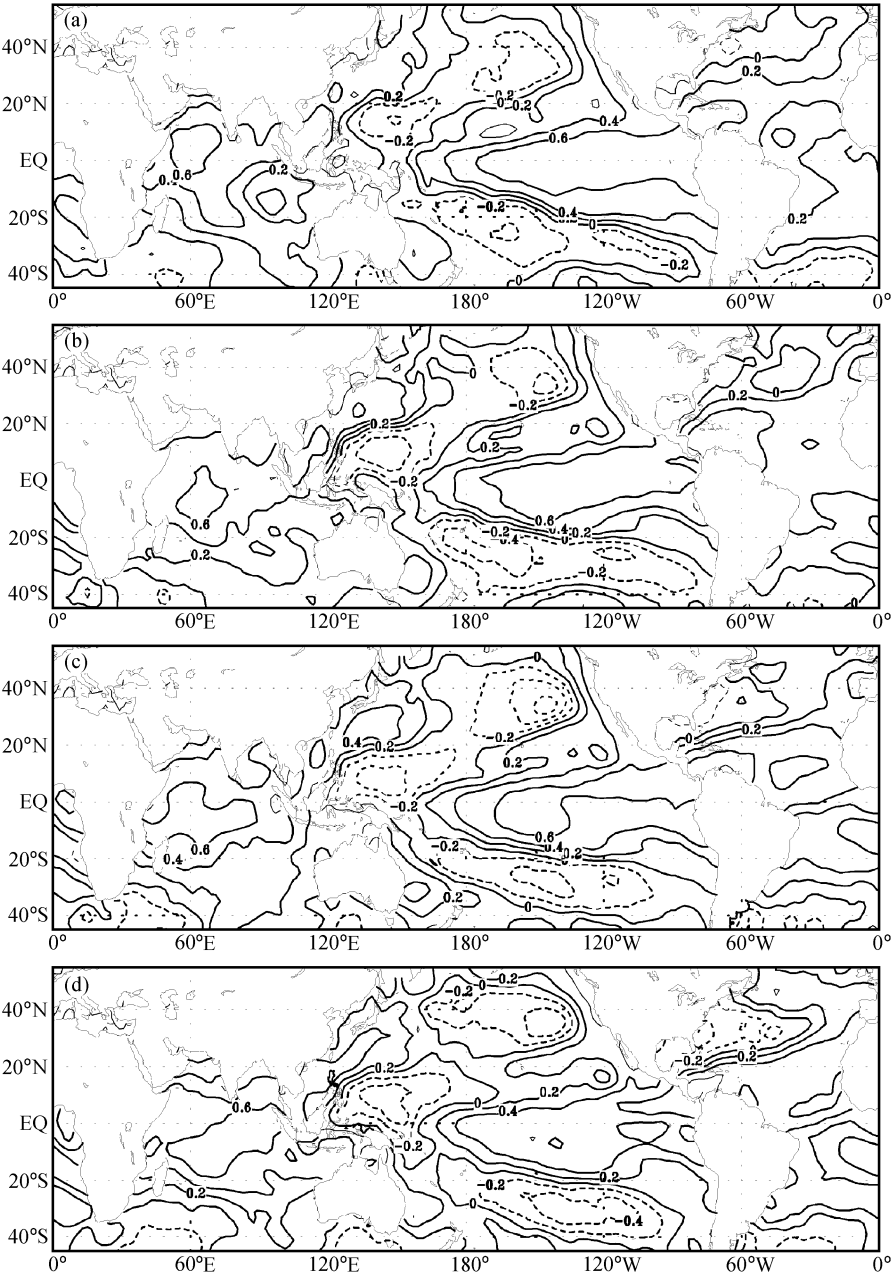


图 8 5~7 月平均的南海地区 (15~22°N, 115~120°E) 范围内区域平均 SSTA 与前期 12 月 (a)、1 月 (b)、2 月 (c) 和 3 月 (d) 全球 SSTA 的相关

(旱), 或者若前期冬春季赤道印度洋 SST 异常偏暖 (冷), 则当年夏季南海 SST 异常偏暖 (冷), 长江中下游地区易涝 (旱)。从预报角度来讲, 当然预报信号出现得愈早愈好。但是因为这里的相关海区是通过“间接相关”而找到的关键区, 因此还需要进一步验证其和长江中下游旱涝事件的直接对应关系。

根据图 8 所示的与夏季南海 SSTA 显著相关的前期 SSTA 分布, 在图 9 中分别给

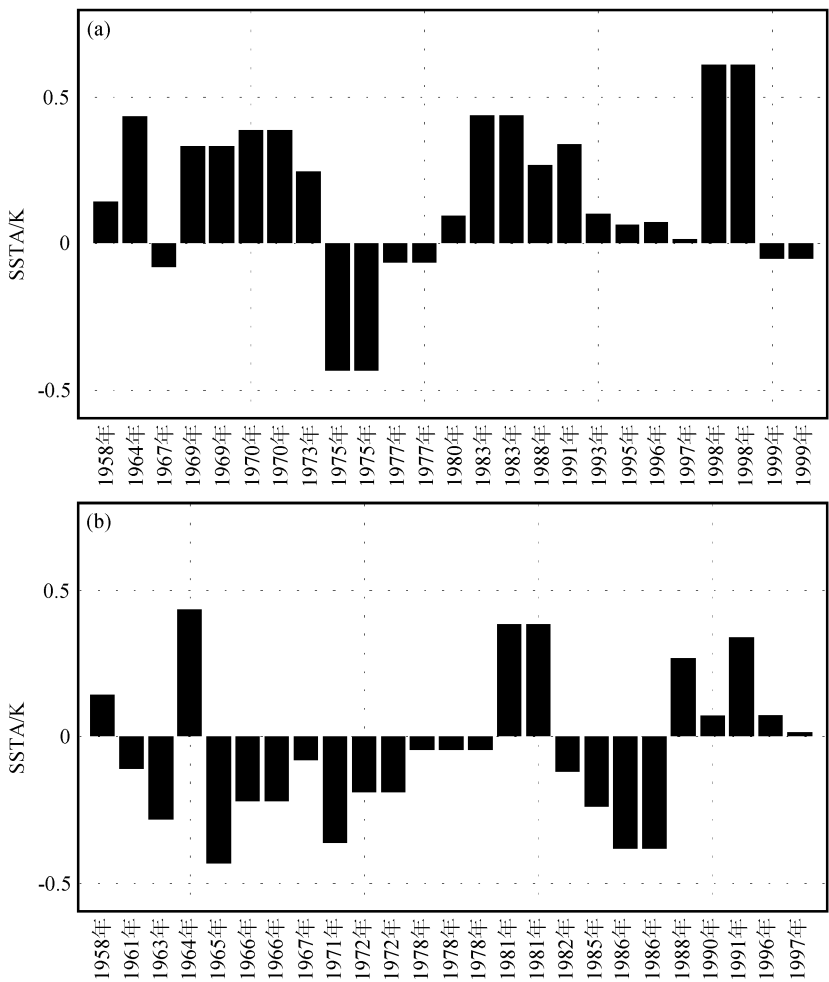


图 9 对应于 25 个涝月和 25 个旱月的前期 3 月赤道南印度洋 (10°S~0°, 60~90°E) 区域平均 SSTA
其余同图 6

出对应于 25 个涝月 (图 9a) 和 25 个旱月 (图 9b) 的前期 3 月赤道印度洋 (10°S~0°, 60~90°E) 区域平均 SSTA。图 10 分别给出对应于 25 个涝月 (图 10a) 和 25 个旱月 (图 10b) 的前期 1 月赤道东太平洋 (0~10°N, 60~100°W) 区域平均 SSTA。统计结果表明, 对应于 25 个涝月, 前期 3 月赤道印度洋 SSTA 和前期 1 月赤道东太平洋 SSTA 的变化基本一致对应, 二者预报准确率分别为 72% 和 68%; 对应于 25 个旱月, 前期 3 月赤道印度洋 SSTA 的预报准确率为 68%, 明显高于前期 1 月赤道东太平洋 SSTA 的预报准确率 44%。因此, 用 3 月份赤道南印度洋 SSTA 可以更准确地预测夏季长江中下游旱涝事件。

6 结论

本文利用统计方法得到的雨区划分法集中体现了长江中下游地区夏季旱涝的实际

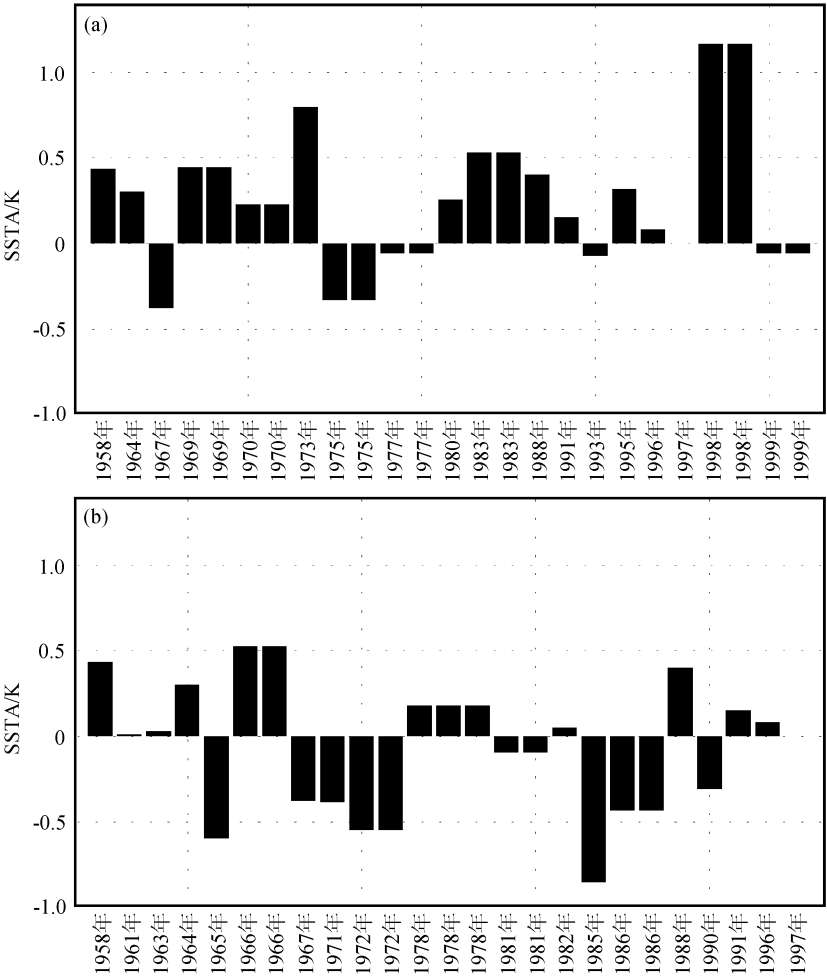


图 10 对应于 25 个涝月和 25 个旱月的前期 1 月赤道东太平洋 (0~10°N, 60~100°W) 区域平均 SSTA
其余同图 6

分布,而逐月分析法又消除了由季节平均造成的降水变率的相互抵消。在 1958~1999 年 42 年中,旱涝月出现频次相等,有 25 个涝月和 25 个旱月,但涝的强度远大于干旱,其中特涝月 11 个,特旱月 6 个。

长江中下游地区发生旱涝事件时,我国南海及其附近海区 SSTA 及其低空环流呈现明显的差异。涝月时南海 SSTA 为正,南海或西太平洋区域低空出现异常反气旋环流中心,我国东南沿海为偏南风异常;相反,旱月时南海 SSTA 为负,南海或西太平洋区域低空出现异常气旋环流中心,我国东南沿海为偏北风异常。经统计检验,南海地区海温异常和低层经向风异常均与长江中下游旱涝显著相关,尤其正 SSTA 和涝月的关系更为密切。因此,南海 SSTA 可作为我国长江中下游地区旱涝的一个讯号。

相关分析表明,夏季南海 SSTA 与前冬赤道东太平洋 SSTA 和赤道印度洋 SSTA 呈显著相关,说明可用这两个海区的前期 SSTA 预测夏季南海 SSTA,进而预测长江中下游地区旱涝事件。对以上的间接预测方法进行验证发现,利用前春 3 月赤道南印度

洋 SSTA 进行预测具有更高的准确率。

因此，本文分析得到的预测思路为：当前春赤道印度洋海温异常偏暖，则夏季南海海温异常偏暖，南海低空出现异常偏南风，有充足的水汽向我国南方输送，长江中下游地区易涝；反之当前春赤道印度洋海温异常偏冷，夏季南海海温亦异常偏冷，南海低空出现异常偏北风，向北输送水汽匮乏，长江中下游易旱。

参 考 文 献

1 Liu Ying, and Ding Yihui, Influence of El Niño on weather and climate in China, *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, **6**, 117~131.

2 Huang Ronghui, and Wu Yifang, The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 21~32.

3 Simmonds, I., D. Bi, and B. Yan, Relationships between summer rainfall over China and ocean temperature in the tropical western Pacific, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, **74**, 273~279.

4 吴国雄、刘还珠, 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I. 数值试验, *大气科学*, 1995, **19** (4), 422~434.

5 张琼、吴国雄, 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系, *气象学报*, 2001, **59** (5), 569~577.

6 罗绍华、金祖辉、陈烈庭, 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析, *大气科学*, 1985, **9**, 314~320.

7 吴国雄、刘平、刘屹岷等, 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响—大气中的两极热力适应, *气象学报*, 2000, **58** (5), 513~522.

8 Smith, T. M., R. W. Reynolds, R. E. Livezey et al., Reconstruction of historical Sea Surface Temperatures using Empirical Orthogonal Functions, *J. Climate*, 1996, **9**, 1403~1434.

9 Kalnay, E. et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3), 437~471.

10 Ting, M. F., and H. Wang, Summertime U. S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature, *J. Climate*, 1997, **10**, 1853~1873.

11 吴国雄、王敬方, 热带和热带外海表温度异常与低空环流特征比较, *气象学报*, 1996, **54** (4), 385~397.

The Relationship between the Flood and Drought over the Lower Reach of the Yangtze River Valley and the SST over the Indian Ocean and the South China Sea

Zhang Qiong, Liu Ping, and Wu Guoxiong

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The variabilities of the summertime flood and drought events over the lower reach of the Yangtze River Valley (YRV) are examined in this paper by employing monthly mean observation data from 1958 to 1999. The results show that the frequency of occurrence of the flood and drought month is approximately equivalent. However, the disaster intensity of the flood is much severer than that of the drought. The composites for circulation anomaly and sea surface temperature anomaly (SSTA) show that both the low-level meridional wind anomaly and SSTA over the South China Sea (SCS) are significantly correlated to the flood and drought over the YRV. In particular, the flood months are mostly in correspondence with the positive SSTA over the SCS. Thus the SSTA over the SCS is then considered as a strong anomalous signal for the flood and drought over the YRV. The further correlation analysis detects that the SSTA over the southern equatorial Indian Ocean can be used as a prediction signal for the summer SSTA over the SCS. Therefore, the anomalous warm SST over the southern equatorial Indian Ocean in preceding spring will be followed by the anomalous warm SST over the SCS in the following summer, then the anomalous northward wind will be enhanced over the SCS and more moisture will be transferred to south China, which will probably result in the flood event over the YRV.

Key words: flood and drought; sea surface temperature anomaly; interannual variability