

# 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季 长周期旱涝急转

吴志伟 李建平\* 何金海 江志红

(南京信息工程大学气象灾害重点实验室, 南京 210044; 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; 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080. \* 联系人, E-mail: ljp@lasg.iap.ac.cn)

**摘要** 利用国家气象信息中心提供的 1957~2003 年中国 720 站夏季(5~8 月)逐日降水资料, 对长江中下游地区夏季长周期旱涝急转现象(分旱转涝和涝转旱两种类型)进行研究, 定义了一个长周期旱涝急转指数(LDFAI), 再结合 ERA-40 再分析资料及 1957~2003 年南半球和北半球环状模(SAM 和 NAM)指数时间序列, 分析了异常年的同期和前期的大尺度大气环流异常特征, 结果表明: 旱转涝年早期西太平洋副高主体偏南, 长江流域低层负涡度中心发展伴随着辐散、下沉的加强和水汽输送减弱, 同时南亚高压和高空西风急流位置偏南, 长江中下游地区干旱少雨; 涝期西太平洋副高北抬, 该地区低层有正涡度发展并伴随辐合、上升运动和水汽输送较强, 南亚高压和高空西风急流北抬, 导致该地区降水增多. 涝转旱年涝期北方冷空气活跃, 冷暖空气交汇于长江中下游地区, 低层正涡度发展同时辐合、上升运动和水汽输送较强, 南亚高压位于高原南侧上空, 长江中下游地区偏涝; 早期低层有负涡度中心发展伴随着辐散、下沉的加强和水汽输送减弱, 副高异常显著的北跳, 南亚高压向东向北扩展至华北地区, 长江中下游转为东风急流所控制, 干旱少雨. 另外, 长江中下游夏季 LDFAI 与其前期 2 月份的 SAM 和 NAM 存在显著的负相关, 这为长江中下游夏季长周期旱涝急转现象的预测提供了有参考意义的前兆信号.

**关键词** 长江中下游 旱涝急转 大尺度环流异常 长周期尺度

长江中下游地区夏季旱涝异常长期以来一直是中国汛期降水预测的重要内容. 大量研究显示, 长江中下游地区的夏季降水实际上就是东亚夏季风推进的产物<sup>[1,2]</sup>, 其旱涝异常与全球大尺度环流异常密切相关<sup>[3~7]</sup>. 以往针对长江中下游地区旱涝异常的研究大多立足于夏季总降水的异常, 对旱涝的季节内变化关注较少. 而季内变化同夏季整体的降水量一样重要, 对水资源调配、工农业生产和人民生活同样具有重大影响. “旱涝并存、旱涝急转”现象正是降水季节内变化的典型代表, 多发生于长江中下游地区夏季. 事实上, “旱涝并存”实际是由不同周期尺度的“旱涝急转”所构成<sup>[8]</sup>, 本文重点立足于长江中下游地区长周期尺度“旱涝急转”与大尺度环流异常的研究. 对其进行探讨, 不仅可以更深入认识长江中下游夏季季节内降水长周期变化与同期及前期大尺度大气环流异常的联系, 而且可为夏季防汛抗旱工作提供具有参考意义的结果.

## 1 资料和方法

本文所用中国 720 站 1957~2003 年逐日降水资料由国家气象信息中心提供, 1958~2002 年高度场、风

场、涡度场和海平面气压场等再分析资料(水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ )取自 ERA-40 资料集, 1957~2003 年 SAM<sup>[5]</sup>和 NAM<sup>[9]</sup>指数时间序列由中国科学院大气物理研究所 LASG 提供.

本文定义长周期尺度为旱和涝时间尺度均在 2 个月左右(5 和 6 月份旱, 7 和 8 月份涝或 5 和 6 月份涝, 7 和 8 月份旱, 即所谓的“旱转涝”或“涝转旱”). 以 5~8 月累积降水量来表征长江中下游地区夏季降水. 首先参考 Ting 和 Wang<sup>[10]</sup>划分降水区的方法, 先计算全国 720 站 1957~2003 年夏季降水标准差, 得到长江中下游地区降水变率最大的站点, 以之为基点站再计算其与全国 720 站的单点相关(如图 1(a)所示), 阴影所覆盖的显著相关区域(通过 95% 水平的置信度检验)有着与基点站较为一致的降水变率, 使用该区域内的测站(共 42 个测站)的降水平均值来表征长江中下游地区夏季降水.

为定量地研究夏季长周期“旱涝急转”的科学内涵和基本特征, 反映这一气候现象, 我们定义了一个长周期旱涝急转指数 LDFAI(Long-cycle Drought-Flood Abrupt Alternation Index):

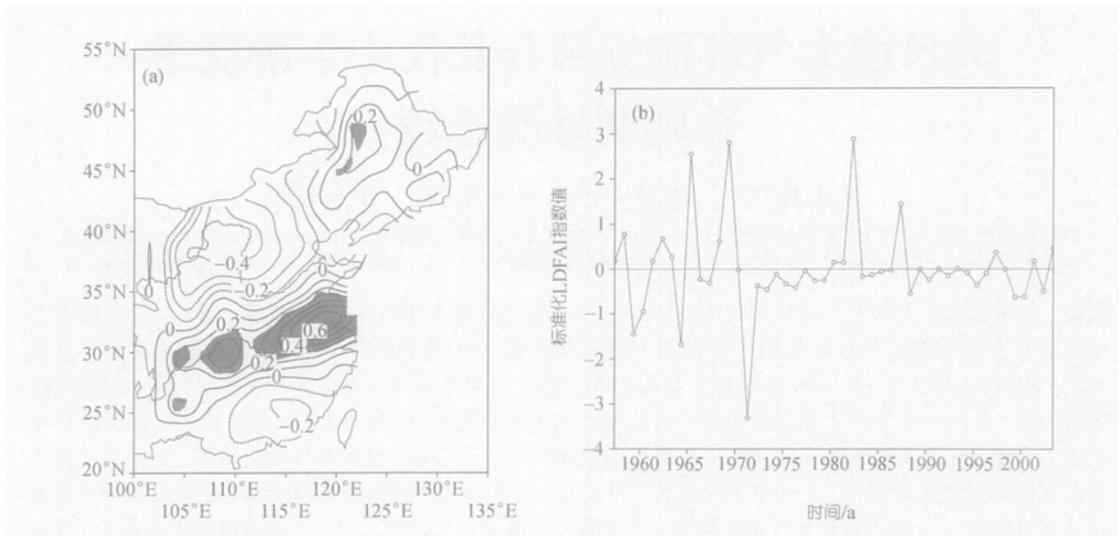


图 1 长江中下游地区夏季(5~8 月)降水代表站及该地区 1957~2003 年夏季长周期旱涝急转指数(LDFAI)时间序列  
(a) 长江中下游地区代表站(阴影区所覆盖的站点); (b) LDFAI 时间序列

表 1 1957~2003 年夏季 LDFAI 最高(低)前 6 年及其标准化降水量分布

高指数夏季	5~6 月雨量	7~8 月雨量	低指数夏季	5~6 月雨量	7~8 月雨量
1982	-1.18	1.33	1971	1.48	-1.25
1969	-1.09	2.12	1964	1.39	-0.77
1965	-1.93	1.03	1959	0.61	-1.69
1987	-0.63	1.78	1960	1.02	-0.53
1958	-1.65	0.27	1999	1.2	-0.02
1962	-0.41	1.04	2000	0.67	-0.27

$$LDFAI = (R_{78} - R_{56}) \cdot (|R_{56}| + |R_{78}|) \cdot 1.8^{-|R_{56} + R_{78}|}$$

其中:  $R_{78}$  为 7~8 月份标准化降水量,  $R_{56}$  为 5~6 月份标准化降水量.  $(R_{78} - R_{56})$  为旱涝急转强度项,  $(|R_{56}| + |R_{78}|)$  为旱涝强度项;  $1.8^{-|R_{56} + R_{78}|}$  是权重系数, 作用是增加长周期旱涝急转事件所占权重, 降低全旱或全涝事件权重. 本文将降水距平小于 0.5 个标准差, 定义为偏旱, 将降水距平大于 0.5 个标准差, 定义为偏涝.

## 2 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年的选取及其时间演变

上面所定义的长江中下游夏季 LDFAI 究竟能不能体现夏季长周期旱涝急转(旱转涝及涝转旱)的变化趋势? 是否可以根据它来确定长周期旱涝急转异常年? 这里给出了 1957~2003 年 6 个最高(低)LDFAI 年及其 5~6 月份、7~8 月份的标准化降水量(表 1).

从表 1 中可以看到, 总体特征是高 LDFAI 年 7~8 月份降水量均大于 5~6 月份降水量, 而低 LDFAI 年正好相反, 即高 LDFAI 反映出了从 5~6 月到 7~8 月降水量递增的趋势, 而低 LDFAI 反映出了从 5~6 月到 7~8 月降水量递减的趋势. 另外, 高 LDFAI 年 7~8 月份降水距平全部在 0.5 倍标准差以上, 其中 5 年超过 1 个标准差, 说明 6 个高 LDFAI 年全部偏涝, 其 5~6 月份降水距平有 4 年小于 1 个标准差(显著偏旱); 6 个低 LDFAI 年 7~8 月份降水距平有 4 年偏少 0.5 个标准差以上(偏旱), 其 5~6 月份降水距平有 6 年大于 0.5 个标准差(偏涝). 因此, LDFAI 基本能够反映长江中下游地区夏季长周期旱涝急转的变化趋势, 高 LDFAI 对应着“旱转涝”, 而低 LDFAI 对应着“涝转旱”.

选取 6 个高 LDFAI 年(1958, 1962, 1965, 1969, 1982 和 1987)作为“旱转涝”异常年的代表; 从 6 个低 LDFAI 年中, 选取前 4 年(1959, 1960, 1964 和 1971 年)

作为“涝转旱”异常年的代表. 需要说明的是, 在“旱转涝”异常年中, 虽然 1958 年的 7~8 月份和 1962 年的 5~6 月份的降水距平绝对值不到 0.5 个标准差, 但是考虑到 1958 年的 5~6 月份和 1962 年的 7~8 月份降水距平异常明显(降水距平绝对值超过了 1 个标准差), 同时为增加合成分析的样本数, 故将这两年近似地作为“旱转涝”异常年的代表.

图 1(b)是 1957~2003 年 LDFAI 随时间的演变情况, 由图可见 LDFAI 指数存在着较大的年际差异, 这种年际差异在 1972 年以前似乎更为显著, 即长江中下游地区夏季长周期尺度旱涝急转在 1972 年以前更为频发, 而 1972 年以后 LDFAI 指数较为平稳, 除了 1982 和 1987 年外其余年份振荡不明显. 分析 1957~2003 年长江中下游地区 5~6 月份、7~8 月份的标准化降水分布(表略), 1972~2003 年 32 年间“全旱”和“全涝”共计发生了 11 次, 且强度较大(如历史罕见

的重涝年 1991, 1998 年和重旱年 1994, 1997 年), 而 1957~1971 年 15 年间仅发生了 3 次, 且旱的强度相对较大(如历史罕见的重旱年 1966 年). 由此可见, 近 47 年来长江中下游地区夏季存在着长周期“旱涝急转”发生频率减小, 而“全旱”或“全涝”发生频率增加的趋势, 也就是从长周期“旱涝急转”向“全旱”或“全涝”过渡. 这可能是导致 LDFAI 指数在 1972 年以后年际振荡不明显的原因之一. 另外, 从 1997 年以来, LDFAI 似乎有振荡加剧的趋势.

### 3 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年同期北半球大气环流特征

从长江中下游地区夏季长周期旱涝急转异常年 500 hPa 合成高度场(如图 2 所示)可以看出如下特征:

旱转涝年的早期(5~6 月份, 图 2(a))西太平洋存在大范围的显著正距平区, 585 线位于南海至西太平

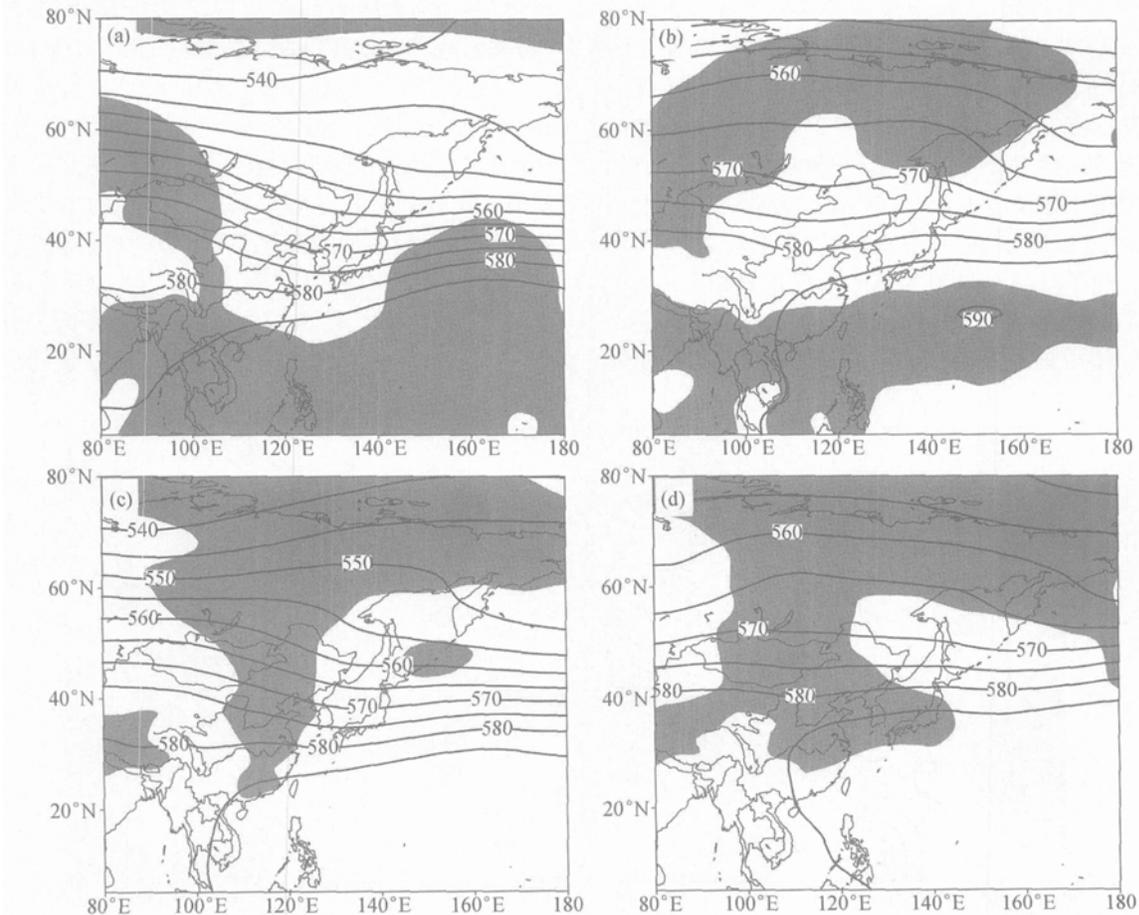


图 2 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年 500 hPa 合成高度场

单位: 10 gpm; 阴影区置信度检验达 95%. (a) 旱转涝年 5~6 月(早期); (b) 旱转涝年 7~8 月(涝期); (c) 涝转旱年 5~6 月(涝期); (d) 涝转旱年 7~8 月(早期)

洋上,表明西太平洋副高主体偏南,中国东部大陆基本上为干冷高压脊所控制,导致长江中下游地区干旱少雨;到了涝期(7~8 月份,图 2(b))西太平洋上的显著正距平中心明显北抬至台湾岛北部地区,585 线同时向东北方向移动至长江以南地区,表明西太平洋副高显著北跳,长江中下游地区正好位于副高西北侧边缘,水汽输送充沛,有利于降水增多。

涝转旱年的涝期(图 2(c))大范围显著正距平位于从西伯利亚经中国河套至长江中下游的广大中高纬地区,表明北方冷空气较为活跃,并向南扩散影响长江流域,西太平洋副高处于正常位置,冷暖空气交汇有利于长江中下游地区前期降水增多<sup>[11]</sup>;早期(图 2(d))一个最为显著的特征是副高异常显著的北跳,冷暖空气交汇区北推至淮河以北,华北降水增多,长江中下游地区处于高压脊控制下,干旱少雨。

我们还计算了长周期旱涝急转异常年 850 hPa 合成相对涡度差值场(旱转涝年减去涝转旱年,如图 3 所示)。可以看到 5~6 月份(图 3(a))从朝鲜半岛经东海至长江中下游地区为一个显著的负相对涡度差值中心所控制,低层负涡度中心常常伴随着辐散和其上方下沉运动的加强,因此,旱转涝(涝转旱)年旱(涝)期低层辐散(辐合),下沉(上升)运动较强,这就为长江中下游地区降水减少(增多)提供了必要的大气环流条件。到了涝(旱)期(图 3(b)),情况正好相反,从东海至长江中下游地区为显著的正相对涡度差值中心所覆盖,使得该地区在旱转涝(涝转旱)年涝(旱)期低

层辐合(辐散),上升(下沉)运动较强,有利于长江中下游地区降水的增加(减少)。

图 4 为长江中下游地区夏季长周期旱涝急转异常年 100 hPa 合成高度场和风场,旱转涝年早期(图 4(a))南亚高压中心位于孟加拉湾至中南半岛北部地区,位置偏南,高空西风急流同样偏南,这恰好与 500 hPa 西太平洋副高位置偏南相匹配(图 2(a)),到了涝期(图 4(b)),南亚高压向西北方向移动至青藏高原上空,高空西风急流相应北抬至长江中下游地区,该地区降雨增多,这时中低层的副高同时发生了向东北方向的移动,这与陶诗言等<sup>[12]</sup>提出的南亚高压和西太副高相向而行的观点相一致。从图 4(c)中可以看到,涝转旱年涝期南亚高压位于高原南侧上空,长江中下游地区降水增多,到了早期(图 4(d)),南亚高压强度增强并向东北扩展至华北地区,西风急流也北抬至华北地区,长江中下游转为东风急流所控制,导致华北降水增多而长江中下游干旱少雨。这时,500 hPa 的西太副高也发生了相应的北跳(图 2(d))。

从长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年 850 hPa 合成水汽输送差值场(图 5)可以看到,5~6 月份(图 5(a))长江中下游低层主要存在显著的偏北水汽输送差值,我们知道长江中下游夏季降水的主要水汽源地是源于印度西南季风区的西南水汽输送和东亚季风区的偏南水汽输送<sup>[13,14]</sup>,因此,旱转涝(涝转旱)年旱(涝)期低层水汽输送较弱(强),这就为长江中下游地区降水减少(增多)提供了必要的水汽条件。到了

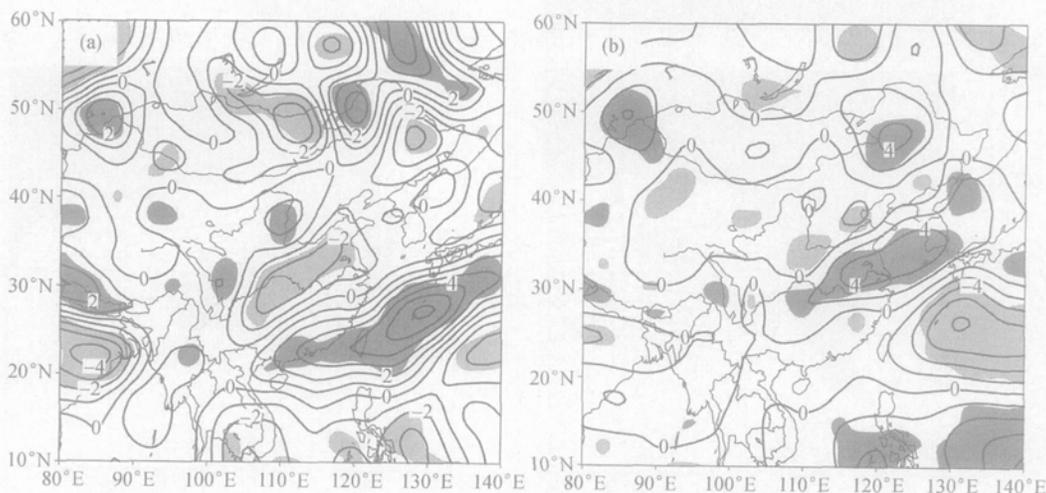


图 3 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年 850 hPa 合成相对涡度差值场

单位:  $10^{-5} s^{-1}$ ; 旱转涝年减去涝转旱年; 阴影区置信度检验达 95%, 浅色为显著负涡度区, 深色为显著正涡度区。(a) 5~6 月; (b) 7~8 月

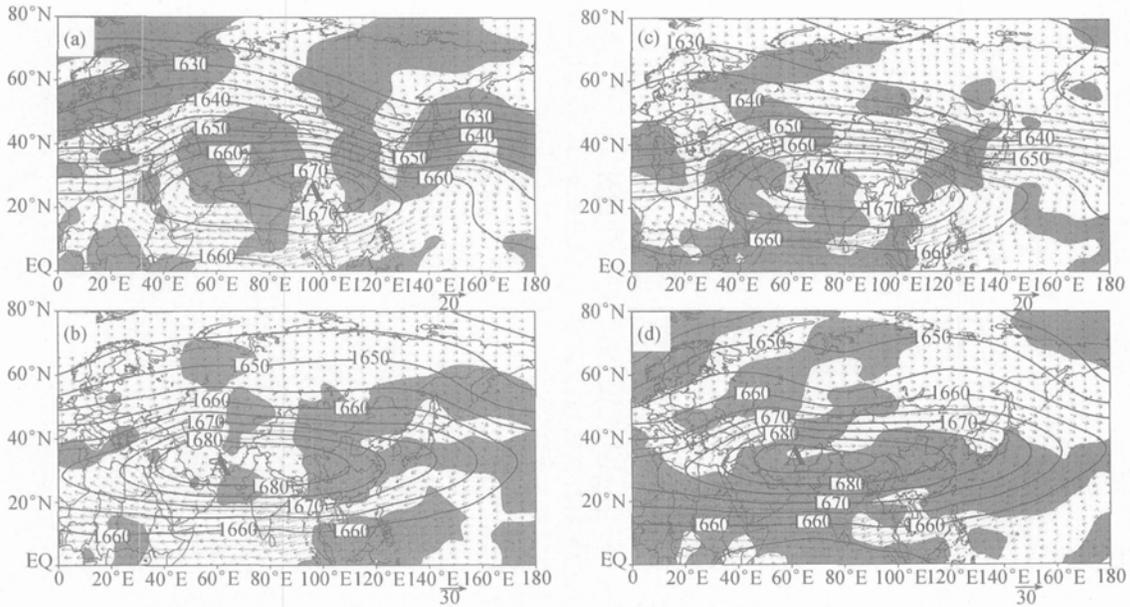


图 4 100 hPa 合成位势高度场和风场

位势高度场单位: 10 gpm, 风场单位: m/s; 阴影区为合成风场差异显著性检验达 95% 的区域, 其余同图 2

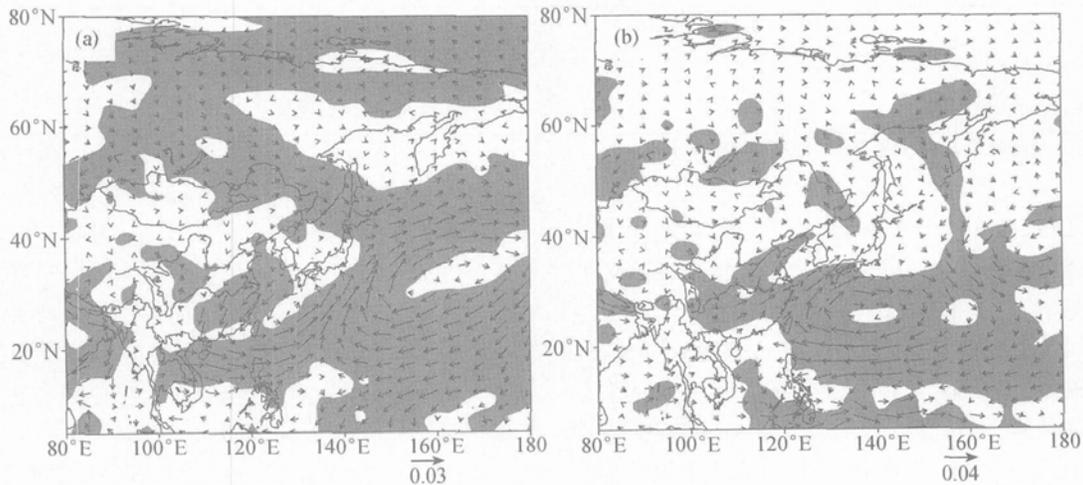


图 5 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年 850 hPa 合成水汽输送差值场

单位: g/(cm·s); 阴影区为差异显著性检验达 95% 的区域, 其余同图 3

7~8 月份(图 5(b)), 情况正好相反, 长江中下游地区为显著的西南水汽输送差值区所覆盖, 使得该地区在旱转涝(涝转旱)年涝(旱)期底层水汽输送较强(弱), 有利于长江中下游地区降水的增加(减少)。

图 6 为长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年 700 hPa 合成垂直速度差值场, 一个显著的特征就是: 5~6 月份长江中下游为显著的正差值区所控制, 表明旱转涝(涝转旱)年旱(涝)期底层下沉(上升)运动较强, 这就为长江中下游地区降水减少(增多)提供了必要

的动力条件. 到了 7~8 月份(图 6(b)), 正好相反, 长江中下游地区为显著的负差值区所覆盖, 就是说该地区在旱转涝(涝转旱)年涝(旱)期底层上升(下沉)运动较强, 有利于长江中下游地区降水的增加(减少)。

#### 4 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年前期大尺度大气环流的异常

为研究长江中下游地区夏季长周期旱涝急转异常年前期全球大尺度大气环流的异常特征, 我们首

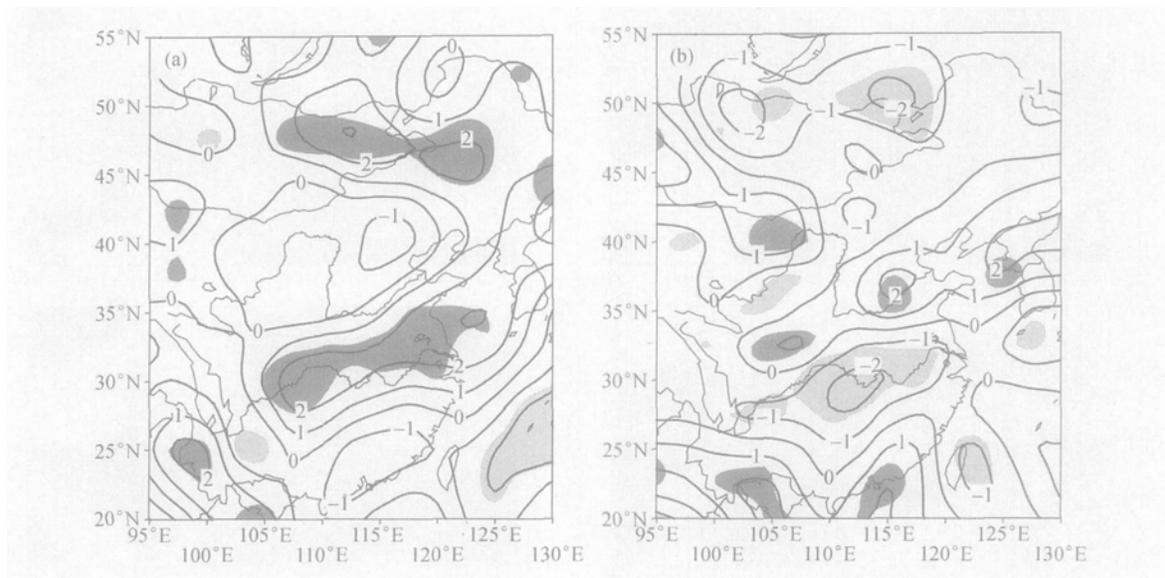


图 6 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常年 700 hPa 合成垂直速度差值场  
单位:  $10^{-2}$  百帕/s; 浅色为显著下沉运动区, 深色为显著上升运动区, 其余同图 3

表 2 1957~2003 年夏季 LDFAI 与其前期 1~6 个月的 SAMI 和 NAMI 的相关系数

月份	前一年 11 月	前一年 12 月	当年 1 月	当年 2 月	当年 3 月	当年 4 月
与 SAM 的相关	-0.27	0.05	-0.12	-0.32 <sup>a)</sup>	-0.03	0.00
与 NAM 的相关	-0.13	-0.15	-0.23	-0.25	-0.10	0.23

a) 为异常显著的相关系数(通过了 95%的置信度检验)

先计算了 1957~2003 年夏季 LDFAI 与其前期 1~6 个月(从前一年 11 月份到当年 4 月份)SAM 和 NAM 指数时间序列的相关系数, 如表 2 所示。

由表可见, 在前期 6 个月当中, LDFAI 与 SAMI 在 2 月份相关最显著, 达到-0.32, 通过了 95%的置信度检验。就是说, 当前期 2 月份 SAM 偏强(弱)时, LDFAI 往往偏小(大), 进而长江中下游夏季很可能发生“涝转旱”(“旱转涝”)。另外, LDFAI 与 NAMI 的相关也在 2 月份最显著, 达到-0.25, 通过了 90%的置信度检验。

SAM<sup>[5]</sup>实际上表征的是南半球中低纬地区和高纬地区纬向平均海平面气压所存在的“跷跷板”效应。为进一步揭示前期 SAM 和长江中下游长周期旱涝急转异常年的联系, 这里给出了长江中下游 夏季“旱转涝”(高 LDFAI)和“涝转旱”(低 LDFAI)异常年前期 2 月份南半球海平面气压合成分析结果(图 7)。由图可见, “旱转涝”前期(图 7(a))70°~90°S 为显著的正距平所覆盖, 而南半球中低纬地区基本为显著的负距平

所覆盖, 因而南北气压梯度较小, SAM 较弱; 而“涝转旱”前期(图 7(b))情况与之不同, 原先 70°~90°S 范围内大范围显著的正距平为南极附近小片的正距平和大范围的负距平所代替, 而南半球中纬地区除了南太平洋的部分海区外, 基本为显著的正距平所覆盖, 因此南北气压梯度较大, SAM 较强。

为进一步验证 LDFAI 与 SAM 的这种可能的相关关系, 我们还计算了长江中下游夏季 LDFAI 与其前期 2 月份南半球海平面气压的相关系数(如图 8 所示)。图中最为显著的特征是, LDFAI 与南极地区的海平面气压存在显著的正相关, 而南半球中纬地区基本为环状的负相关区所覆盖, 就是说夏季 LDFAI 偏大(小)时, 其前期 2 月份南极地区的海平面气压显著升高(降低), 而南半球中纬地区的气压显著下降(升高), 因而南半球中纬和高纬地区气压梯度减小(加大), 造成 2 月 SAM 偏弱(偏强)。

NAM<sup>[9]</sup>实际上表征的是北半球中纬地区和高纬地区纬向平均海平面气压所存在的“跷跷板”效应。

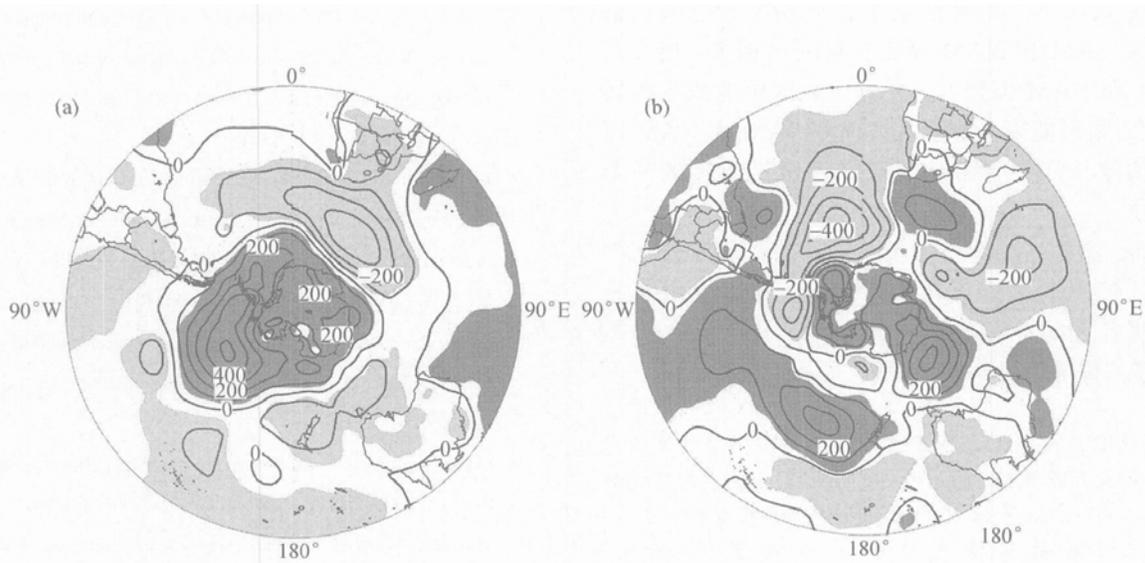


图 7 长江中下游夏季长周期旱涝急转异常前期 2 月份南半球(10°~90°S)合成海平面气压距平场  
单位: Pa; 阴影区置信度检验达 95%, 浅色为显著负距平区, 深色为显著正距平区. (a) 旱转涝; (b) 涝转旱

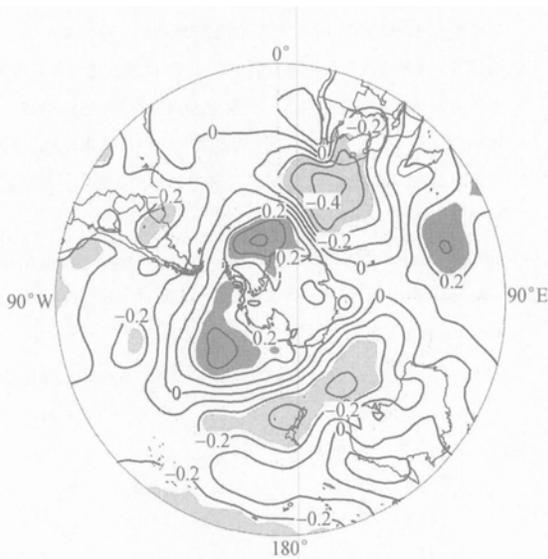


图 8 长江中下游夏季 LDFAI 与其前期 2 月份南半球(10°~90°S)海平面气压的相关系数分布  
阴影区置信度检验达 95%, 浅色为显著负相关区, 深色为显著正相关区

长江中下游地区夏季 LDFAI 与其前期 2 月份北半球海平面气压的相关分析表明(图略), 存在着与图 6 类似的相关系数分布, 即北极地区存在显著的正相关, 而中纬地区存在显著的负相关, 但强度稍弱.

因此, 前期 2 月份 SAM 和 NAM 的异常似乎可以作为长江中下游地区夏季 LDFAI 异常的一个先兆

信号, 进而为长江中下游地区夏季长周期旱涝急转的预测提供科学的参考依据.

### 5 结论

“旱涝急转”在中国夏季时有发生, 但长期以来对之研究不多, 本文重点分析了长江中下游地区夏季长周期旱涝急转异常年同期和前期大尺度大气环流异常的一些基本特征, 根据以上的分析, 我们可以得出以下一些结论:

( ) 旱转涝年早期西太平洋副高主体偏南, 低层负涡度中心发展, 伴随着辐散和垂直下沉运动的加强, 水汽输送的减弱, 南亚高压和高空西风急流位置偏南, 长江中下游地区干旱少雨, 涝期西太平洋副高边缘北抬至长江流域, 该地区低层有正涡度发展, 同时辐合、上升运动和水汽输送加强, 南亚高压向西北方向移动至青藏高原上空, 高空西风急流北抬至长江中下游地区, 导致该地区降水增多.

( ) 涝转旱年涝期北方冷空气活跃, 冷暖空气交汇于长江中下游地区, 低层有正涡度中心发展, 伴随着辐合、上升运动和水汽输送加强, 南亚高压位于高原南侧上空, 长江中下游地区偏涝; 早期低层有负涡度中心发展, 伴随着辐散和下沉运动加强, 水汽输送偏弱, 副高异常显著的北跳, 南亚高压向东向北扩展至华北地区, 长江中下游转为东风急流所控制, 干旱少雨.

( ) 长江中下游地区夏季长周期旱涝急转与前期2月份SAM和NAM存在显著的负相关,当2月份SAM和NAM偏强时,夏季该地区可能发生涝转旱,反之,则可能发生旱转涝.前期SAM和NAM可以作为预测长江中下游地区长周期旱涝急转的一个前兆信号.

然而,前期SAM和NAM是如何作用于长江中下游地区长周期旱涝急转事件,其内在影响机制是什么?两者之间存在什么样的联系?目前为止还不是很清楚,有待于进一步细致深入的研究.

致谢 感谢欧洲中心(ECMWF)和中国气象局国家气象信息中心提供相关气象资料,感谢两位匿名审稿人提供的建议和帮助.本工作受热带海洋气象科学研究基金(批准号:200508)、国家基础研究发展规划项目(批准号:2004CB418303)、国家自然科学基金项目(批准号:40221503,40375032)和中国气象局热带季风重点开放实验室共同资助.

### 参 考 文 献

- 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, 1(1): 1—27
- 涂长望, 黄土松. 中国夏季风之进退. 气象学报, 1944, 18: 1—20
- 陶诗言, 徐淑英. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征. 气象学报, 1962, 32: 1—10
- He J H, Zhou B, Wen M, et al. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(4): 497—510
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关. *科学通报*, 2002, 47(7): 546—549
- Nan S L, Li J P. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(24): 2266, doi:10.1029/2003GL018381
- Ju J H, Lu J M, Cao J, et al. Possible Impacts of the Arctic Oscillation on the Interdecadal Variation of Summer Monsoon Rainfall in East Asia. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22(1): 39—48
- Wu Z W, Li J P, He J H, et al. The occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L05813, doi: 10.1029/2005GL024487
- Li J P, Wang J. A modified zonal index and its physical sense. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(12): 1632, doi:10.1029/2003GL017441
- Ting M F, Wang H. Summer time U.S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature. *J Clim*, 1997, 10: 1853—1873
- 吴志伟, 何金海, 江志红. 近50年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析. *大气科学*, 2006, 30(3): 391—401
- 陶诗言, 朱福康. 夏季亚洲南部100 mb流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系. *气象学报*, 1964, 34: 385—395
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原——季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. *气象学报*, 2002, 60(3): 257—267
- Zhang R H. Relations of water vapor transport from Indian Monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(5): 1005—1017

(2006-01-18 收稿, 2006-03-23 接受)