

## 对长江宜昌站月平均径流量突变的分析\*

江剑民<sup>1</sup> 谷湘潜<sup>2</sup> 游性恬<sup>1</sup>

(1: 中国气象局培训中心, 北京 100081; 2: 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**提 要** 本文简要叙述了一阶矩突变扫描式  $t$  检验和二阶矩突变扫描式  $F$  检验算法, 并应用于长江宜昌水文站 1882-2002 年间历年月平均径流量的实测序列, 划分出 24 个年际至十年际时间尺度的相对 5 级旱、涝时段及其变率特征, 与有关长江上游洪水、干旱灾害的历史记载相吻合.

**关键词** 突变 月径流 宜昌水文站 长江

**分类号** P332.3

科学家们通常使用滑动平均或低通滤波算法来揭示时间序列的长期变化特征. 然而, Karl & Riebsame<sup>[1]</sup> 应用经典的学生氏  $t$  检验分析了美国气温和降水量 10-20 年际的振荡. Yamamoto, et al.<sup>[2]</sup> 采用修改的  $t$  检验来检测“气候跃变”. Goossen & Berger<sup>[3]</sup> 采用 Mann-Kendall 秩和检验来鉴别气候突变. 这些方法每次计算都只能检测一个突变点. 在 Foufoula-Georgiou & Kumar<sup>[4]</sup> 编辑的《地球物理学中的小波分析》一书中, 介绍了用小波变换来揭示大气湍流观测长时间序列中多次突变现象, 以及分析两序列间突变相干性的方法. 但是, 小波变换不能给出判别突变点的统计显著性检验标准.

将小波变换技术移植到学生氏  $t$  检验和  $F$  检验<sup>[5]</sup> 上, 分别拓展成一阶矩突变扫描式  $t$  检验<sup>[6,7]</sup> 和二阶矩突变扫描式  $F$  检验算法. 这样既可使学生氏  $t$  检验和  $F$  检验具有检测长时间序列中不同时间尺度上多次突变的现象, 又能给出判别突变点的统计显著性检验标准. 用扫描式  $t$  检验来检测长江宜昌水文站 1882-2002 年间历年月平均径流量的实测序列中不同时段相邻子序列之间平均值(一阶矩)的突变, 从而划分出年际至十年际时间尺度的相对旱、涝期. 又用扫描式  $F$  检验来检测该序列中不同时段相邻子序列之间均方差(二阶矩)的突变, 从而划分出年际至十年际时间尺度上, 长江宜昌水文站月平均径流量变化的相对稳定和不稳定阶段. 然后综合上述扫描式  $t$  检验和扫描式  $F$  检验的结果, 概括得出 24 个相对稳定或不稳定的旱、涝期, 与有关长江上游洪水、干旱灾害的历史记载相吻合.

## 1 方法

### 1.1 扫描式 $t$ 检验

定义一阶矩突变扫描式  $t$  检验的统计量  $t(n, j)$ , 对于长序列中第  $j$  时间点前后两个相邻子序列样本量 ( $n$ ) 相等时, 为下列算式<sup>[6, 7]</sup>:

\*国家重点基础研究发展规划项目(G1998040901)和国家自然科学基金项目(40175027)联合资助.  
2003-06-26 收稿; 2003-11-21 收到修改稿. 江剑民, 男, 1939 年生, 教授, email: jmjiangjm@sina.com.

$$t(n, j) = (\bar{x}_{j_2} - \bar{x}_{j_1}) \cdot n^{1/2} \cdot (s_{j_2}^2 + s_{j_1}^2)^{-1/2} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \bar{x}_{j_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=j-n}^{j-1} x(i); \quad \bar{x}_{j_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=j}^{j+n-1} x(i)$$

$$s_{j_1}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=j-n}^{j-1} (x(i) - \bar{x}_{j_1})^2 \quad s_{j_2}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=j}^{j+n-1} (x(i) - \bar{x}_{j_2})^2$$

其中  $n$  表示两相邻子序列的长度,  $n=2, 3, \dots, < N/2$ , 也可以选择适当的间隔.  $j$  是检测突变现象的参考点,  $j=n+1, n+2, \dots, N-n$ .  $t$  检验要求序列应是独立的和遵从正态分布的. 在实际应用中需加注意, 或者进行适当的处理.

这里, 采用一种称作“Table-Look-Up 测试”<sup>[8]</sup> 来订正检验子序列的非独立性. 该表是通过蒙特卡罗方法, 按各子序列非独立程度下, 一阶自相关系数与样本量大小计算得到的  $t$  检验统计显著性临界值. 本文选用置信水平为 95% 的临界值作为显著性检验标准.

为使图表直观, 分析方便, 再取比值:

$$t_r(n, j) = t(n, j) / t_{0.05} \quad (2)$$

作为一阶矩突变扫描式  $t$  检验的显著性指数. 显然, 当  $|t_r(n, j)| > 1.0$  时, 可判断该突变是通过了置信度为 0.05 的统计显著性标准的. 其中  $t_r(n, j) < -1.0$  表示变化趋势为下降的突变事件,  $t_r(n, j) > 1.0$  代表上升的突变事件.

## 1.2 扫描式 $F$ 检验

类似地, 定义二阶矩突变扫描式  $F$  检验的统计量  $F_r(n, j)$ , 对于长序列中第  $j$  时间点前后两个相邻子序列样本量 ( $n$ ) 相等时, 为下列算式:

$$F_r(n, j) = \begin{cases} (S_{j_1}^2 / S_{j_2}^2) / F_\alpha, & \text{当 } S_{j_2} < S_{j_1} \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } S_{j_2} = S_{j_1}, \text{ 或 } S_{j_1} = 0, \text{ 或 } S_{j_2} = 0 \text{ 时} \\ (S_{j_2}^2 / S_{j_1}^2) / F_\alpha, & \text{当 } S_{j_2} > S_{j_1} \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $S_{j_1}$  和  $S_{j_2}$  的算法与上述 (1) 式相同,  $n=2, 3, \dots, < N/2, j=n+1, n+2, \dots, N-n$ .  $F_\alpha$  是经过对子序列非独立性进行订正之后的有效自由度下, 置信水平在 95% 上  $F$  检验的显著性临界值. 这样,  $F_r(n, j) < -1.0$  表示在置信水平 95% 上子序列均方差 (二阶矩) 显著减小的, 序列变得相对稳定; 而  $F_r(n, j) > 1.0$  表示子序列均方差发生了显著增大的突变, 序列变为相对不稳定. 这里的均方差表示子序列样本单元相对于该子序列平值的偏离程度.

## 2 对长江宜昌站月径流量突变的分析

### 2.1 扫描式 $t$ 检验结果

对长江宜昌水文站 1882-2002 年间历年月平均径流量的实测序列, 按照公式 (1) 和 (2) 进行计算, 再将  $t_r(n, j)$  的输出结果绘成二维等值线图 (图 1a), 横坐标为时间, 以年代

标记. 纵坐标为子样本大小, 即时间尺度, 以月为单位和对数尺度标记. 图 1a 中可见, 在 256 个月以上的较长时间尺度上, 1936 年前后发生了显著减小的突变. 即 1936 年之后的长期平均径流量与该年之前相比变小了. 在 256 个月以下的时间尺度上, 有 12 个正值中心和 11 个负值中心, 分别表示径流量的突然增加或减少. 例如, 第一个正值中心 (径流量突然增大) 出现在 1892 年 11 月, 64 个月的时间尺度上. 该中心极大值为 0.982, 接近 1.0, 只是由于绘图时分辨率的限制以及平滑处理的影响, 未能绘出对应的等值线来. 其它一些较小的中心, 如 1910 年 11 月 128 个月时间尺度上的正值中心, 1912 年 9 月 38 个月时间尺度上的负值中心, 1952 年 8 月 32 个月时间尺度上的正值中心等处的情况均类似. 随后的一个负值中心 (径流量突然减小) 很明显, 是在 1899 年 7 月, 45 个月的时间尺度上, 中心极小值为  $-1.265$ .

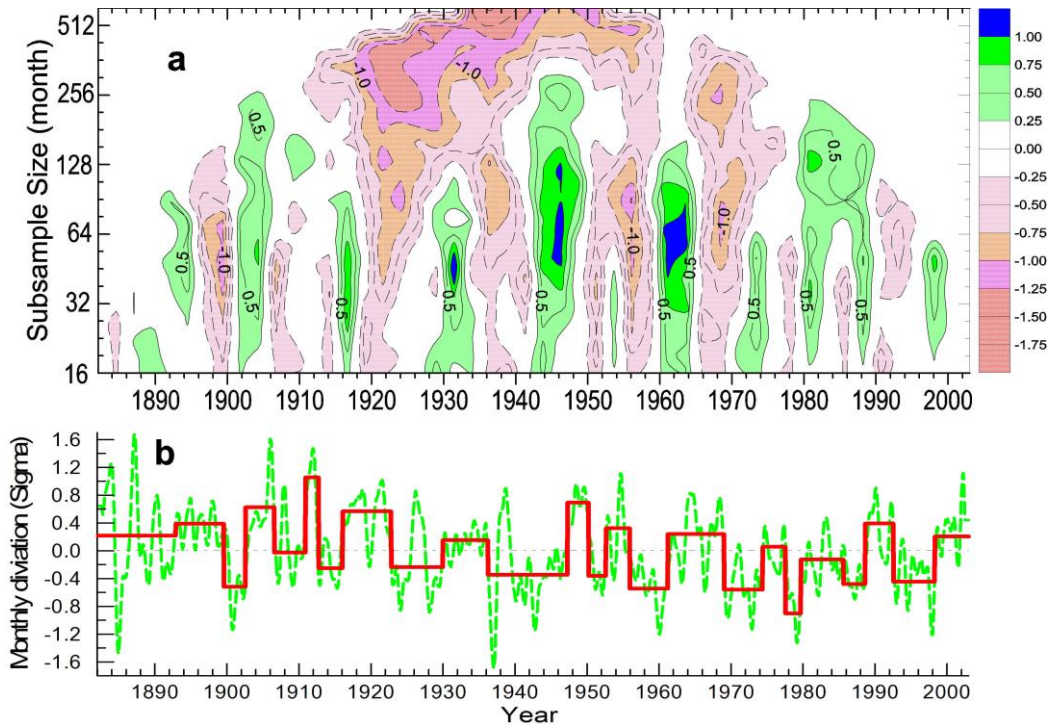


图 1 (a) 宜昌水文站 1882-2002 年间历年月平均径流量序列的扫描式  $t$  检验结果的等值线图.

(b) 各旱、涝时段的平均径流量(粗实线); 由 13 点构成的高斯滤波器处理过的低通滤波曲线(虚线); 整个序列 121 年的平均径流量(点线)

Fig. 1(a) Contours of the significant indices of the scanning  $t$  test at confidence 0.05 for the monthly Mean streamflow at Yichang section of Yantze River. (b) The episode-average streamflow (thick solid line); curve of the low-pass values with a 13-point scale Gaussian filter (dashed curve); average streamflow over total series of the Monthly mean streamflow at Yichang section of Yangtze River

按照每个中心作为一个突变点, 每两个相邻的中心划分为一个相对的旱、涝时段. 再分别计算出每个时段的平均径流量, 绘制成图 1b. 图中粗实线显示各突变点和各旱、涝时段的平均径流量, 粗虚线是经由 13 个点构成的高斯滤波器处理过的低通滤波值, 水平细点

线表示整个序列 121 年的平均径流量. 按各个旱、涝时段的平均径流量数值大小, 可将粗实线显示的 24 个时段归属为如下 5 个等级: 大旱(SD)  $< -0.54\sigma$ ;  $-0.54\sigma \leq$  干旱(D)  $< -0.22\sigma$ ;  $-0.22\sigma \leq$  正常(N)  $< 0.22\sigma$ ;  $0.22\sigma \leq$  洪涝(W)  $< 0.60\sigma$  和  $0.60\sigma <$  大涝(SW) 等级. 表 1 中第一列列出了所有突变点的年代月份, 第二列是相对应的 5 级旱、涝时段长度(月数)和 5 级划分. 第三列列出历史上记载有该时段内长江上游发生过洪涝或干旱灾害的年代<sup>[9-13]</sup>, 以作为验证. 例如, 在 1902 年 7 月径流量突变增大后, 至 1906 年 7 月的 4 年(48 个月)期间, 属大涝(SW)时段, 记载有 1904, 1905 年上游大洪水<sup>[9-11]</sup>和 1903 年上游一般洪水<sup>[11]</sup>(F1904/05/03). 1974 年 5 月径流量增大后, 至 1977 年 7 月的 38 个月期间, 属正常(N)时段, 记载有 1976 年上游四川、陕西干旱<sup>[10]</sup>(D1976). 1977 年 7 月径流量突变减小后, 至 1979 年 9 月的 26 个月期间, 属大旱(SD)时段, 记载有 1978 年长江全流域包括上游大旱<sup>[10]</sup>和 1979 年上游四川、云南干旱<sup>[10]</sup>(D1978/79).

表 1 宜昌月径流量的突变点, 5 级旱涝时段和洪涝, 干旱年代

Tab. 1 Change points, episodes of the 5-grade wetness and years of flood or drought events

突 变 点 (年.月)	时段长度 5 级旱涝	洪涝,干旱 年代	突 变 点 (年.月)	时段长度 5 级旱涝	洪涝,干旱 年代
(1882.01)	130+, N,U	F1892	1952.08↑	40, W,N	F1954
1892.11↑	80, W, N	F1896	1955.12↓	63, SD,N	D1959
1899.07↓	36, D, N	D1900	1961.03↑	94, W,N	F1966
1902.07↑	48, SW,U	F1904/05/03	1969.01↓	64, SD,N	D1972
1906.07↓	52, N,U	NO	1974.05↑	38, N,N	D1976
1910.11↑	22, SW, N	NO	1977.07↓	26, SD,N	D1978/79
1912.09↓	40, D,N	NO	1979.09↑	71, N,S	F1981
1916.01↑	81, W,S	F1917/21	1985.08↓	36, D,N	D1986
1922.10↓	86, D,N	D1925	1988.06↑	47, W,N	F1991
1929.12↑	75, N,S	F1931/34	1992.07↓	69, D,N	NO
1936.03↓	133, D,U	D1945/41	1998.04↑	57, N,U	F1998/99
1947.04↑	35, SW,N	F1947/48	(2002.12)		
1950.03↓	29, D,N	NO			

1) ↑ 表示径流量增大的突变; ↓ 表示径流量减小.

2) 第 2 列的数字表示两个相邻突变点之间持续时段长度的月数.

3) SD: 大旱; D: 干旱; N: 正常; W: 洪涝; SW: 大涝; . S: 稳定; U: 不稳定; N: 常态.

4) F19xx 表示该年长江上游洪涝; D19xx 表示该年长江上游干旱. NO: 未发现旱涝记载.

5) ( ): 圆括号内的年月表示序列资料始末年分.

表 1 列出的 24 个旱、涝时段中, 最短有 22 个月(1910 年 11 月-1912 年 9 月), 最长达 133 个月(1936 年 3 月-1947 年 4 月), 平均为 60.5 个月(5a). 1936 年之前的 10 个时段中, 只有 3 个干旱期并无大旱期. 其后的 14 个时段中, 却有 3 个大干旱期加 4 个干旱期, 而且 1950 年 3 月以来未有过大涝期. 由此也可见, 近 121a 里, 后半段的平均径流量较前半段有所减小.

2.2 扫描式  $F$  检验结果

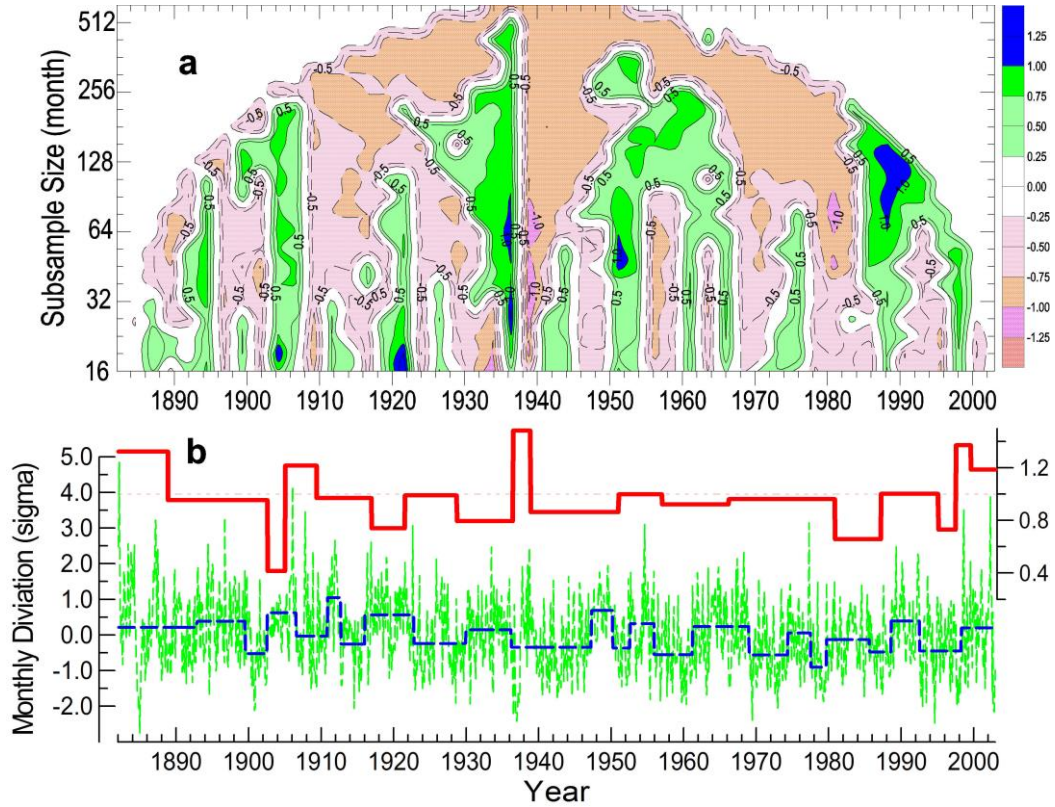


图 2 (a) 宜昌水文站 1882-2002 年间历年月平均径流量序列的扫描式  $F$  检验结果的等值线图.

(b) 上方：各方差突变时段的均方根差(粗实线)和整个序列 121a 的均方根差(水平点线)；下方：宜昌月径流量原序列(细虚线)和各旱、涝时段的平均径流量(粗虚线).

Fig .1(a) Contours of the significant indices of the scanning  $F$  test at confidence 0.05 for the monthly mean streamflow at Yichang section of Yangtze River.(b) Upper panel: the episode-variance of the variance-episodes (thick solid line) and total variance over the whole series for 121 years; Lower panel: curve of the original series of the monthly streamflow at Yichang section of Yangtze River (dashed curve) and the episode-average streamflow (thick solid line) as same as in Fig.1b

对同一径流量实测序列，按照公式(3)进行计算，将  $F_r(n, j)$  的输出结果绘成二维等值线图，如图 2a 所示，纵、横坐标与图 1a 相同. 图 2a 中显示， $|F_r(n, j)| < 0.75$  的等值线分布密集并且近乎平行. 这是由于定义公式(3)计算的必然结果. 因为  $-(S_{j1}^2/S_{j2}^2)$  和  $(S_{j2}^2/S_{j1}^2)$  的绝对值都大于 1.0，而  $F_{0.05}$  的数值一般为 1.16 (当  $n=501$  时) 与 161.0 (当  $n=2$  时) 之间. 其中当  $n \geq 24$  时， $F_{0.05} \leq 2.0^{[5]}$ ，就导致  $F_r(n, j)$  的输出值在  $-0.50$  与  $0.50$  之间会出现不连续. 图中  $-0.75$  至  $0.75$  的等值线大多是用内插方法计算出来的. 虽然这是本定义公式一大缺陷，但它并无碍于本文的分析. 因为只需考查  $F_r(n, j)$  绝对值大于 1.0 的极值中心，并不关心其绝对值小于 1.0 或 0.5 的结果. 图 2a 中等值线分布的另一特点是

-0.5 至 0.5 的等值线大多呈垂直状态, 表明二阶矩(方差)的突变对于年际与十年时间尺度的变化不敏感.

图 2a 中有 10 个负值中心和 7 个正值中心的绝对值大于 1.0, 分别表示径流量的方差(二阶矩)突然减小(突变为相对稳定)或增大(变为相对不稳定)的突变点. 例如, 第一个负值中心(方差突然减小)出现在 1888 年 11 月, 64 个月的时间尺度上, 中心极小值为 -1.048. 1902 年 8 月是其后的第二个负值中心. 随后明显是 1905 年 1 月于 19 个月时间尺度上的一个正值中心(方差增大), 中心极大值为 2.327. 同样, 计算所有相邻两突变点之间子序列的均方差, 绘制成图 2b(粗实线). 一般来说, 二阶矩突变点与一阶矩突变点不相同. 与整个序列的均方差相比较, 1888 年 11 月之前, 1905 年 8 月至 1909 年 5 月间, 1936 年 6 月至 1938 年 11 月间, 及 1997 年 7 月之后等 4 个时段的均方差较大. 1902 年 7 月至 1905 年 8 月间, 1916 年 12 月至 1921 年 7 月间, 1928 年 10 月至 1936 年 6 月间, 1980 年 11 月至 1987 年 3 月间, 和 1995 年 2 月至 1997 年 7 月间等 5 个时段的均方差较小. 为分析直观方便, 图 2b 下方还给出了宜昌月径流量原序列(细虚线)和各旱、涝时段的平均径流量(粗虚线). 综合粗虚线与粗实线的演变, 可判断各旱、涝时段的方差大小, 即变化的稳定程度, 用小大写字母 *s* 表示稳定, *u* 表示不稳定, *n* 表示常态-与总方差相近, 标记在表 1 第 2 栏的最后一列.

### 3 小结

本文简要叙述了一阶矩突变扫描式 *t* 检验和二阶矩突变扫描式 *F* 检验算法. 将扫描式 *t* 检验算法应用于对长江宜昌水文站 1882-2002 年间历年月平均径流量的实测序列进行一阶矩突变分析的结果表明, 长江宜昌站 1936 年之后的多年平均径流量, 与 1936 年之前相比较, 有所减小. 在年际与十年际时间尺度上, 可划分出 24 个旱、涝时段. 各时段的长度在 22 个月与 133 个月之间, 平均为 60.5 个月(5a). 按各时段的平均径流量大小, 又可划分为 5 种旱、涝等级.

将扫描式 *F* 检验算法应用于对同一序列进行二阶矩突变分析的结果表明, 长江宜昌站月径流量的均方差(变率), 在 1888 年 11 月之前, 1936 年 6 月至 1938 年 11 月间, 及 1997 年 7 月之后等 3 个时段明显较大, 其间长江上游旱、涝灾害兼有. 1902 年 7 月至 1905 年 8 月间, 1980 年 11 月至 1987 年 3 月间, 和 1995 年 2 月至 1997 年 7 月间等 3 个时段的变率明显较小.

综合两种算法的应用结果, 划分出 24 个 5 级旱、涝时段及其变率特征, 归纳在表 1 中. 表中第 3 栏还列出了历史记载该时段里上游旱、涝灾害的年代. 最近时段 1998 年 4 月以来属正常偏涝的时期.

#### 参 考 文 献

- 1 Karl T R, Riebsame W E. The identification of 10- to 20-year temperature and precipitation fluctuations in the contiguous United States. *J Clim Appl Meteorol*, 1984, 23: 950-966
- 2 Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K, et al. An analysis of climate jump. *J Meteorol Jpn*, 1986, 64: 273-281
- 3 Goossens C, Berger A. How to recognize an abrupt climatic change? In :Berger W H, ed. *Mathematical and Physical Sciences*. Vol. 216, D Reidel, Dordrecht, 1987: 31-46
- 4 Foufoula-Georgiou E, Kumar P, Eds. *Wavelets in Geophysics*. San Diego: Academic Press, 1994

- 5 中国科学院数学研究所概率统计室编. 常用数理统计表. 北京: 科学出版社, 1974:7-13, 105-110
- 6 江剑民, K Fraedrich, 邹耀仁. 多尺度突变现象的扫描式  $t$  检验方法及其相干性分析. 地球物理学报, 2001, 44 (1): 31-39
- 7 Jiang J, Mendelssohn R, Schwing F, et al. Coherency detection of Multiscale abrupt changes in historic Nile flood levels. *Geophys Res Lett*, 2002,29(8): 1121-1124
- 8 Storch H V, Zwiers F. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 116
- 9 骆承政, 乐家祥主编. 中国大洪水-灾害性洪水述要. 北京: 中国书店, 1996:235-295
- 10 水利部长江水利委员会编著. 中国水、旱灾害系列专著: 长江流域水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- 11 国家防汛抗旱指挥部办公室, 水利部水资源研究所. 中国水旱灾害系列专著: 中国水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 513-569
- 12 赵春明, 刘雅鸣, 张金良等主编. 20 世纪中国水旱灾害警示录, 郑州:黄河水利出版社, 2002
- 13 黄忠恕. 长江流域历史水旱灾害分析. 人民长江, 2003, 34 (2): 1-3
- 14 肖天国, 金沙江. 岷江洪水遭遇分析. 人民长江, 2001, 32 (1): 30-32

## An Analysis of Abrupt Changes in Monthly Streamflow at Yichang Section of the Changjiang River

JIANG Jianmin<sup>1</sup>, GU Xiangqian<sup>2</sup> & YOU Xingtian<sup>1</sup>

(1: Training Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, P.R. China;

2: Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, P.R. China)

### Abstract

In this article, two algorithms of the scanning  $t$  test and of the scanning  $F$  test were briefly described separately. The scanning  $t$  test detects multiscale abrupt changes in the first moment (subsample mean), i.e. the differences of subsample means between two adjoined sub-samples in a long time series. The scanning  $F$  test detects multiscale abrupt changes in the second moment (subsample variance), i.e. the differences of subsample variances (or standard deviations) between two adjoined sub-samples in a long time series.

An application of these two algorithms to monthly Streamflow observations at Yichang section of the Changjiang River (Yangtze River) was carried out for the period from January 1882 to December 2002.

Based on the scanning  $t$  test, 12 change points at which the Streamflow abruptly increases, and 11 change points with decrease of the Streamflow were detected. Then, twenty-four episodes of wetness were partitioned in 5 grades on interannual to decadal time-scales, according to the average level of streamflow over each episode.

Based on the scanning  $F$  test, 10 change points, at which the sub-sample variance reduces (becomes steady), and 7 change points toward larger sub-sample variances were detected. By combining with the results from the scanning  $t$  test, each of the twenty four wetness episodes was characterized as steady (with small variance) or unsteady (with large variance), and listed in Tab.1.

It is confirmed that each of the twenty-four wetness episodes coincides well with historical records of floods or droughts in the upper reaches of Changjiang River. Tab.1 summarizes the main results in this work.

**Keywords:** Abruption, monthly streamflow, Yichang hydrological station, Yangtze River