

长江干流径流的时序结构与长期记忆

王国杰^{1,2}, 姜 彤¹, 陈桂亚³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

摘要: 基于宜昌、汉口、大通 3 个典型控制站的长期月径流序列, 本文采用奇异谱分析方法、消除波动趋势法 (DFA) 等手段, 识别长江干流径流序列的趋势、突变、周期振荡等时序结构及其长期记忆特征。主要结论有: ①长江干流径流序列存在明显的准 15 年周期振荡特征, 该周期振荡 1970s 以来受到某种扰动而弱化; ②宜昌站径流序列于 1926 年、1970 年发生两次突变, 均以径流减少为特征; 汉口站径流序列于 1955a 发生突变, 也以径流减少为特征; 大通站径流于 1955 年、1988 年发生两次突变, 前者以径流减少为特征, 后者以增加为特征; ③长江干流月径流序列存在较强的确定性成分, 长期记忆特征明显; 集水面积越大, 径流序列的长期记忆越强, 表现出明显的记忆累积效应。

关键词: 径流序列; 时序结构; 长期记忆; 长江

对径流序列进行趋势、突变和周期分析, 是认识水文系统动态演化特征的基本途径。近些年来, 径流序列的长期记忆特征也开始受到水文学家们的广泛关注。1950s Hurst 发现水文序列存在长期记忆特征^[1], 1970s Mandelbrot 把分形理论引入水文时间序列长期记忆特征的研究, 使之与水文系统的非线性动力机制建立起密切关系^[2]。当前, 识别气候、水文变量的长期记忆特征, 探讨复杂气候、水文现象不确定性的行为机制, 是国际气候和水文学领域的热点问题之一。一般认为, 气候、水文序列的长期记忆特征反映其年代际可变性, 对于探索序列的可预测性具有重要意义。Fraedrich、Blender、Jiang 等利用气候、水文变量的长期记忆特征探索水循环要素之间的 (遥) 相关关系, 寻找极端气候事件和旱、涝灾害之间的时空组合特征, 并指出时间序列的长期记忆特征是探索未来人类活动对水循环系统影响的重要途径^[3-8]。但是, 对于气候、水文要素的长期记忆特征在全球范围内尚需进行大量的实证研究, 而目前对其物理意义的认识也还处于一个比较肤浅的层面, 仍需进行深入挖掘。长江流域水资源量占全国水资源总量的 38%, 对长江流域不同空间尺度径流序列的时序结构与长期记忆特征做对比研究, 对于长江流域水循环机理的探索具有重要意义。

1 数据

本文选取长江干流宜昌、汉口、大通 3 个主要控制站的月径流序列做时序结构与长期记忆特征分析 (图 1)。宜昌水文站, 位于长江三峡的东出口, 扼长江中游与下游的咽喉, 控制流域面积 100 万 km², 是长江上游山区和中下游洪泛平原之间的总控制站。宜昌站作为上游来水进入中游的入口, 其径流序列能够准确地反映长江流域上游山区与中下游洪泛平原之间的水量交换过程。汉口水文站位于长江中游干流的下段, 控制流域面积

收稿日期: 2005-08-11; 修订日期: 2005-11-03

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向性项目 (KZCX3-SW-331), 国家自然科学基金 (40371112) [Foundation: Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCX3-SW-331; National Natural Science Fund, No.40371112]

作者简介: 王国杰 (1976-), 男, 山东潍坊人, 博士生, 主要从事气候水文过程模拟研究。E-mail: wgjie1976@163.com

通讯作者: 姜彤 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事气候变化与长江洪水研究。E-mail: jiang.t@niglas.ac.cn

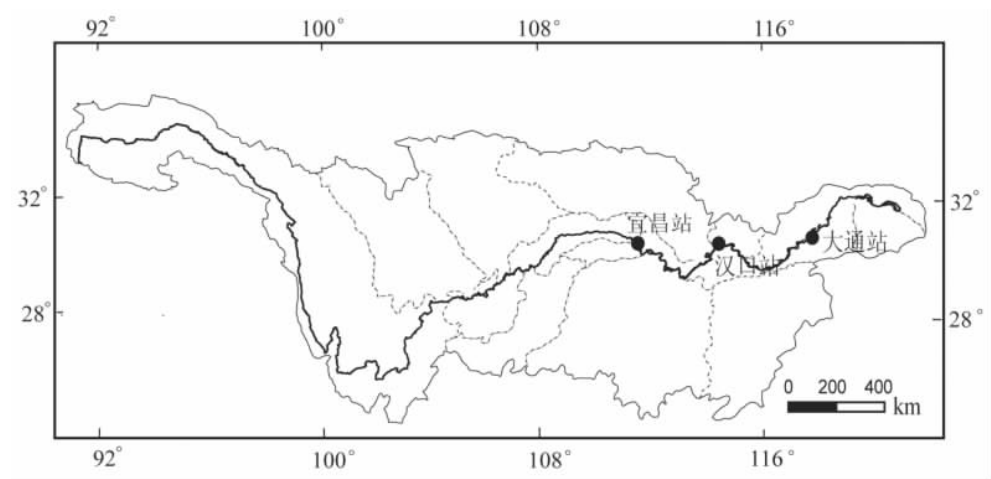


图 1 宜昌、汉口、大通 3 站在长江的位置
Fig. 1 The locations of Yichang, Hankou and Datong stations on the Yangtze River

148 万 km²，集水区域主要包括长江上游地区，洞庭湖流域和汉江流域，是长江干流在汉江入汇后重要的防洪控制站。汉口水文站径流序列的演化特征，与长江中下游防洪规划、预报调度、灌溉、航运等关系极为密切。大通水文站为长江下游干流的控制站，是长江冬季大潮的潮区界，集水面积 170 万 km²。长江流域下游面积只有 12 万 km²，相对较小且无大河汇入，故通过大通站的径流量可代表进入长江河口区的流量。长江河口区生态环境恶化，是制约长江三角洲可持续发展的重要限制因子之一。研究表明，导致河口区生态环境恶化的诸多因素中，中上游来水量是最直接和最主要的因素^[9, 10]。径流数据由长江水利委员会水文局提供，序列长度分别为宜昌站 1882.1~2000.12，汉口站 1870.1~2000.12，大通站 1950.1~2000.12。采用 Von Neumann ratio (N)，Cumulative deviations ($Q/n^{0.5}$ ， $R/n^{0.5}$) 和 Bayesian procedures (U，A)^[11]统计量的方法，在 95%置信度下对 3 站径流序列进行均一性检验。

2 研究方法

2.1 时序结构：奇异谱与 Mann Kendall

水文系统是一个由流域众多自然要素和人类活动因子耦合而成的复合系统。由于自然要素与人类活动在不同的时空尺度上的复杂耦合机制，水文系统表现为高度非线性的行为特征。1980s 发展起来的奇异谱分析 (SSA, Singular Spectrum Analysis) 方法，以重构相空间为基本手段，通过经验正交函数 (EOF) 提取序列主要成分，实现振荡与趋势的分离，为分析貌似随机的复杂非线性时间序列提供了有效途径^[12-14]。SSA 较一般的功率谱而言，序列波形无需正弦假定，而且对信号有强化放大作用，特别适合探索非线性系统中的弱信号，因而在识别气候、水文等地学变量的周期振荡和历史趋势方面获得广泛应用^[15-17]。为了从相同的时间尺度考察径流序列的周期振荡特征，本文均以 20a 为嵌入维数对长江干流 3 站年径流序列进行滤波，提取其振荡周期，并且重建其趋势分量。由 SSA 重建趋势分量，可以避免噪音影响而使检验结果更为可靠。

历史趋势的识别采用 Mann Kendall 非参数检验法 (以下简称 MK 法) 对由 SSA 重建的趋势分量进行检验。MK 法因其尤其适合于水文、气象等非正态数据，而受到世界气象组织推荐并广泛应用。

历史突变的检测基于 CUSUM (cumulative sum) 统计量进行。传统的 CUSUM 方法，

并不能对突变点作出准确判定。本文基于 CUSUM 统计量初步判定突变点发生的可能区间, 并根据均方误 (Mean Square Error) 最小原则判定突变发生的准确时间, 其显著性水平采用“解靴” (bootstrap) 算法进行检验^[18]。

2.2 长期记忆: 消除波动趋势法

传统的确定性和随机性研究方法在探索非线性系统的长期行为特征方面有很大缺陷, 用以识别短期相关性的各种独立性检验方法往往不能正确识别长期记忆序列^[19]。所以, 很多水文学家着眼于水文序列的混沌特征, 以分形理论为工具研究水文序列的长期记忆特征^[20-24]。长期记忆分析的理论基础是确定性系统由于非线性变量之间的相互作用而产生的貌似随机性现象, 即所谓“确定的随机”。在过去的几十年里, 研究时间序列长期记忆特征的基本工具是 Hurst 指数, 其主要估算方法是以重构相空间为基本途径的 R/S 法 (Rescaled Scale Variance Mothed, 重标度极差分析法)^[25-30], 也有研究者提出了绝对值法 (Absolute Value Method)^[31]、聚合方差法 (Aggregated Variance Mothed)^[32]、周期图法 (Periodogram Method)^[33]、Whittle 法 (Whittle Estimator)^[33]、残差方差法 (Variance of Residuals)^[33]和小波分析法 (Abry-Veitch Estimator)^[34]等 Hurst 指数估算方法。在实际应用中, 不同的估算方法得出的 Hurst 指数往往不同。在过去的 40 年里, R/S 法因其适用范围广、估值可靠而得到广泛应用。但是 R/S 法对序列极值具有很强的依赖性, 对奇异值很敏感, 时间序列的趋势特征对其有很大影响^[35]。1994 年, Peng 等在研究核糖核酸行为机制的过程中提出了分析幂律函数关系的 DFA 分析法 (Detrended Fluctuation Analysis, 消除波动趋势分析)^[36, 37]。DFA 是基于经典随机行走 (random walk) 的分析方法, 与 R/S 法等常规分析方法相比, 其显著的优越性在于可以消除非平稳时间序列中长周期波动所造成的伪相关现象^[38, 39]。标准的 DFA 分析是利用一次函数剔除序列的线性趋势; 也可扩展到应用二次或三次函数剔除序列的多项式趋势。DFA 方法提出后, 受到气候和水文学家的广泛关注并引入相关领域, 已经成为探索气候、水文序列长期记忆特征的典型工具^[40-43]。

标准 DFA 分析的基本过程如下^[36, 44]:

第一步: 计算原序列 $\{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 累计离差, 转换为新序列 $\{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$,

$$y_i = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

第二步: 把 $\{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 以等长度 n 划分为不重叠的 k 个区间 $y(k)$, $k = (N/n)$ 的整数部分; 并以最小二乘法拟合每个区间 $y(k)$ 的局部趋势 $y_n(k)$ 。

第三步: 剔除每个区间的局部趋势, 并计算新序列的均方根 (root-mean-square)

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (2)$$

第四步: 分析波动函数 $F(n)$ 与分割区间长度 n 之间的关系

$$F(n) \propto n^\alpha \quad (3)$$

式中: α 为标度指数, 其取值范围为 $[0, 1]$ 。经过严格的数学证明, α 与序列的关联函数具有如下关系:

$$C(\tau) = 2^{2\alpha-1} - 1 \quad (4)$$

由式 (4) 可知, α 的取值反映了数据序列不同的物理特性: 1) $\alpha = 0.5$ 时, $C(\tau) = 0$, 序列是相互独立的白噪音 (white noise) 序列; $\alpha = 1$ 时, $C(\tau) = 1$, 序列是 $1/f$ 噪音序列; 2) $0.5 < \alpha < 1$ 时, $C(\tau) > 0$, 表明该序列具有持续性 (persistence) 的长期记忆, 即序列未来发展趋势与过去的趋势相同, α 越大, 记忆的持续性越强; 3) $0 < \alpha < 0.5$ 时, $C(\tau) < 0$,

表明该序列具有反持续性 (anti-persistence) 的长期记忆，即序列未来发展趋势与过去的趋势相反， α 越小，记忆的反持续性越强。

根据 Kun H.^[45]、Taqqu M. S.^[46]、Montanari A.^[47] 和 Chen Z.^[48] 等的研究，序列的周期性波动对长期记忆的检测会产生显著的影响，容易导致检测到并不存在的长期记忆。水文、气象等地学变量往往存在以年为周期的季节性波动，合理地消除其季节性波动是准确估计 α 值的一个重要环节。在探讨地学变量长期记忆特征的研究中，常用同期比率平均法消除其季节性波动 (deseasonality)。同期比率平均法以季节比率间的差异体现序列随机变动的影响，但是消除了同一周期中不同季相或月相的差异，在一定程度上仍然破坏了原始序列的随机结构，不可避免地对序列长期记忆的测算产生影响。

一般说来，对于含有 K 个周期项的时间序列，可考虑用如下形式的正弦函数组合模型来描述：

$$x_u = \sum_{j=1}^K B_j e^{b_j t} \sin(j\omega t + \varphi_j) + y_t \tag{5}$$

式中： y_t 是随机序列， K 为序列含有周期项的项数， ω 是基频 (由序列物理性质决定，单位为弧度 / 秒)， B_j 和 φ_j 分别为周期项的振幅和相位， $e^{b_j t}$ 控制周期振荡的增长或衰减趋势。

式 (5) 中，周期项所采用的正弦函数是对称的，而实际水文序列中周期往往并不对称，流量的增减或水位的升降速度并不一致。为反映这种水文序列的时间动态趋势，使模型更为精确地拟合周期项，有学者最近提出不对称周期模型^[49]，如式 (6)：

$$x_u = \sum_{j=1}^K B_j e^{b_j t} \sin(2\pi \|\frac{t}{s}\|^d + \varphi_j) + y_t \tag{6}$$

式中： $\|\frac{t}{s}\|$ 表示时间 t 除以周期长度 s 的所得商的小数部分， $0 \leq \|\frac{t}{s}\| \leq 1$ ， d 为不对称指数。显然，当 d 等于 1 时，式 (5) 与式 (6) 等价；当的 $d < 1$ 时，式 (6) 表达的周期趋势为上升较下降快；当 $d > 1$ 时，式 (6) 表达的周期趋势为上升较下降慢。为了保持原始径流序列的随机结构不受破坏，本文采用不对称周期模型拟合并剔除序列的季节性波动，以期获得更为合理的 DFA 标度指数。

3 结果与分析

3.1 时序结构

3.1.1 宜昌站 SSA 分析发现，宜昌站径流序列存在一个比较显著的 15a 周期振荡，15a 周期项在所有主分量 (PCs, principal components) 中方差贡献率为 21.4%。1970s 开始，这个周期振荡受到某种比较强烈的干扰而弱化，序列出现一个准 7a 的小周期振荡 (图 2)。

从提取 SSA 中提取第一主分量作为序列趋势项，方差贡献率达到 98.93%。从图 3 可以看出，100 多年来宜昌径流序列的结构特征在 1926 年和 1970 年发生了 2 次显著的突变，均以径流显著减少为特征，突变检验量的显著性水平都达到 99.9%。序列趋势项的 MK 统计量为 -7.815，显著性水平 99.99%，表明序列总体上表现为显著的减少趋势。

3.1.2 汉口站 汉口站径流序列中同样发现了 15 年的周期振荡，在 1900~1971 年间尤为显著，15 年周期项在所有主分量中方差贡献率为 21.2%。与宜昌站相同，1970s 开始汉口站径流序列的 15 年周期受到某种机制的干扰而弱化，出现了准 7 年的小周期 (图 4)。

汉口站径流趋势分量的方差贡献率达到 98.93%，序列结构在 1955a 发生突变，统计检验量的显著性水平达到 99.9%。径流量减少，年际波动幅度减小，是其突变的主要特征

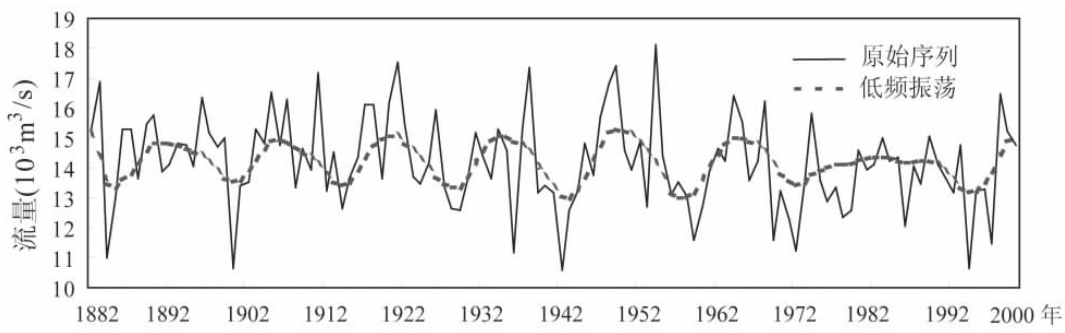


图 2 宜昌站径流序列 15a 周期振荡特征
Fig. 2 The 15a periodity of the Yichang discharge series

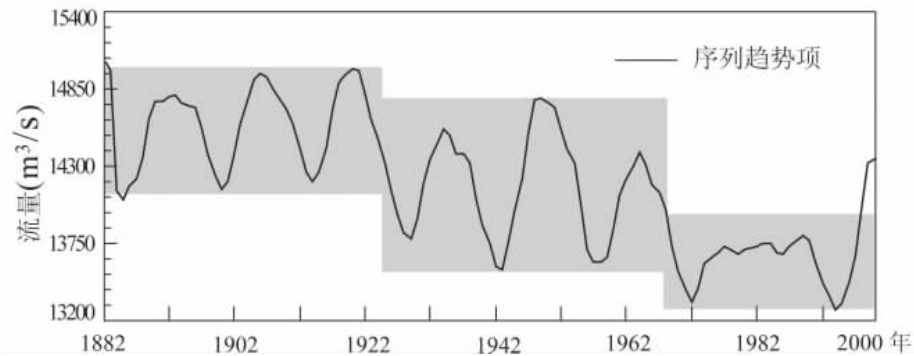


图 3 宜昌站径流序列的趋势与突变特征
Fig. 3 Trends and abrupt changes of the Yichang discharge series

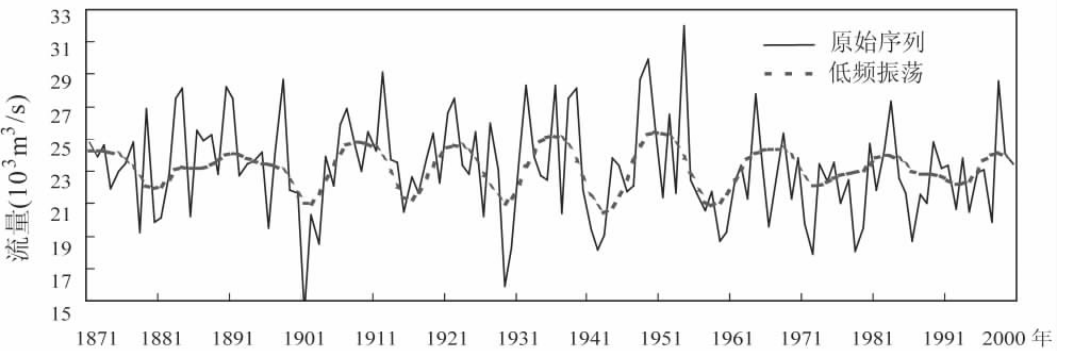


图 4 汉口站径流序列 15a 周期振荡特征
Fig. 4 The 15a periodity of the Hankou discharge series

(图 5)。序列趋势项的 MK 统计量为 -7.13，显著性水平 99.99%，表明径流序列总体存在显著的径流减少趋势。

3.1.3 大通站 本项研究中大通站径流序列没有发现明显的 15a 周期振荡，据推测主要是因为采用的时间序列太短，而 1970 年以后又遭受比较强烈的扰动，15a 周期被削弱所致。但是根据王^[50]等对 1923~2000 年的径流资料的最大熵谱分析，大通站也存在 15a 和 7a 的显著周期。趋势项的方差贡献率为 98.34%，其结构性突变发生在 1955 年和 1988 年，显著性水平均达到 99.9% (图 6)。1955 年突变以径流量减少为特征，而 1988 年突变以径流量增加为特征。就序列总体而言，趋势分量的 MK 统计量为 1.48，显著性水平 86.12%，没有通过显著性水平检验，表明近 50 年大通站径流序列没有明显的增加趋势；

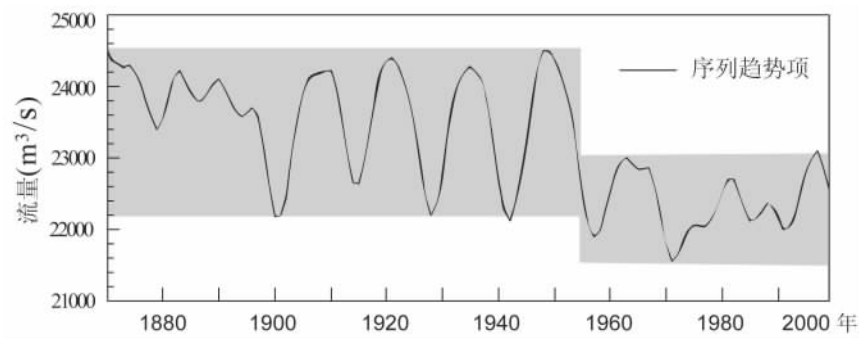


图 5 汉口站径流序列的趋势与突变特征

Fig. 5 Trends and abrupt changes of the Hankou discharge series

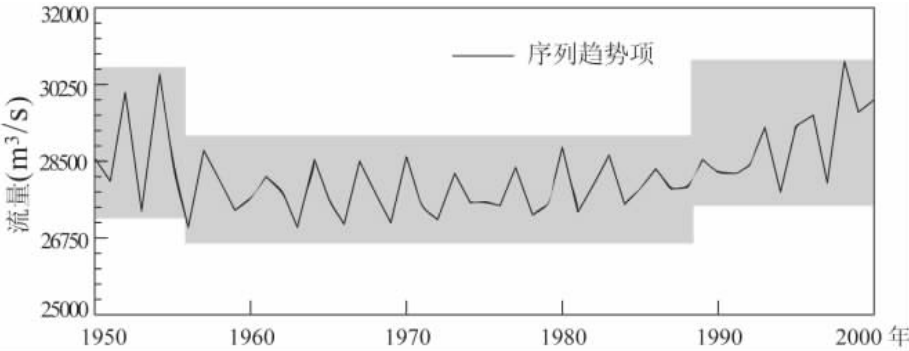


图 6 大通站径流序列的趋势与突变特征

Fig. 6 Trends and abrupt changes of the Datong discharge series

但是，1990 年以来径流增加的趋势却是比较明显的。

3.2 长期记忆

按照式 (6) 提出的不对称周期模型分别拟合宜昌、汉口、大通 3 站的月径流序列的 12 个月周期，得到其 12 个月的周期函数，拟合度都达到 80% 以上 (表 1)。宜昌、汉口、大通 3 站的不对称指数分别为 1.16、1.05 和 1.02，都大于 1，表明长江干流月径流序列在年周期内普遍存在上升慢、下降快的特点；但是，随着集水面积的增大，不对称指数越来越小，表明越大尺度的水文系统，其径流序列的周期振荡越具对称特征。

从原始序列中滤掉周期项，对残差序列做 DFA 分析，制作残差序列的 $F(n) \sim n$ 双对数曲线，其斜率即为标度指数 (图 7)。宜昌站标度指数为 0.60，表明宜昌站月径流序列存在长期记忆特征，但是比较微弱；汉口站标度指数为 0.72，月径流序列的长期记忆特征比较强烈；大通站月径流序列标度指数为 0.76，具有比较强烈的长期记忆。宜昌、汉口、大通 3 站集水面积与其标度系数呈现出类似正比关系的特征，随着集水面积的增大，径流序列的记忆特征有加强的趋势，记忆累积效应比较明显。从图 7 可以看出，长江干流 3 站月径流序列的长期记忆标度指数估计值都非常稳健，可见利用不对称周期模型剔除序

表 1 宜昌、汉口、大通 3 站径流序列主要统计量

Tab. 1 The main statistics of the Yichang, Hankou and Datong discharge series

站点	特征值				年周期模型		DFA
	突变		趋势				
	突变点 (a)	显著性水平 (%)	MK 统计量	显著性水平 (%)	d	拟合度 C(%)	
宜昌	1926, 1970	99.9	-7.82	99.99	1.16	82.35	0.60
汉口	1955	99.9	-7.13	99.99	1.05	80.75	0.72
大通	1955, 1988	99.9	1.48	86.12	1.02	87.65	0.76

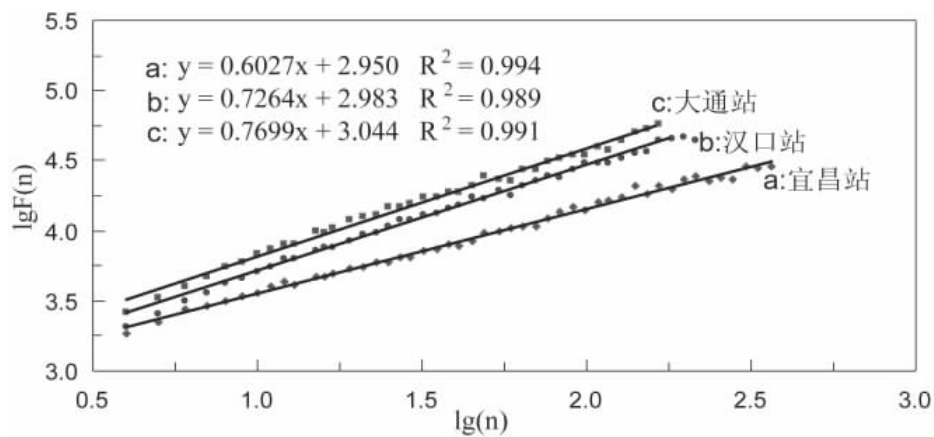


图 7 宜昌、汉口、大通 3 站径流序列波动函数 $F(n)$ 与分割区间长度 n 的关系
Fig. 7 Fluctuation functions $F(n)$ for the time scale n of the Yichang, Hankou and Datong series

列周期项，在 DFA 分析中具有良好的应用效果。

4 讨论与结论

基于历史观测资料，本文采用奇异谱分析、Mann Kendall 分析、突变点分析等方法识别长江干流宜昌、汉口、大通 3 个水文站月径流序列的周期振荡、趋势、突变等结构性特征，并利用消除波动趋势法 (DFA) 探索其长期记忆特征 (表 1)。

(1) 长江干流宜昌、汉口、大通站月径流序列存在显著的准 15a 周期振荡；1970 年以来，这个 15a 周期振荡受到某种比较强烈的干扰而弱化，同期出现准 7 年的小周期振荡。文献[51]认为，宜昌站年径流序列不存在第 2 周期，文献[50]则认为大通站年径流序列存在准 7 年周期，但是两者都是采用的是全局检验的方法，没有考虑序列可能存在周期转换。本文分析认为，在 1970 年以前相当长的一段时间里，长江干流年径流序列主要表现为准 15 年的周期振荡；1970 年以来，受某种机制干扰，序列主要表现为准 7 年的周期振荡。关于长江干流年径流序列周期振荡形成及其干扰的物理因子十分复杂，但是迄今没有发现长江流域降水存在 15a 的周期，因此可以认定，径流序列的 15 年周期振荡并非由于降水因素引起，而是在降水与下垫面因素相互作用的过程中产生。至于 1970 年以来的 15a 周期振荡的破坏，则可能与 1970s 以来人类改造活动对下垫面产汇流条件的强烈干扰有关。

(2) 宜昌、汉口站百余年来年径流序列均有明显下降趋势。宜昌站年径流序列分别于 1926 年、1970 年发生 2 次突变，均以径流减少为显著特征；汉口站年径流序列于 1955 年发生突变，也以径流量减少为特征。大通站年径流序列在 1955 年和 1988 年发生两次突变，第 1 次以径流减少为特征，第 2 次以径流增加为特征，但是增减幅度都不大。可见，虽然下游站点继承了上游来水，但是长江中下游地区面积广阔，降水与蒸发条件存在巨大的区域分异，在一定程度上改变了上游来水的突变结构，使之呈现不同的特点。为了探讨突变发生的物理机制，本文对长江上游 77 个气象站、长江中游鄱阳湖流域 14 个气象站 1960 年以来的降水和参照蒸散量 (按照 Penman-Monteith 公式计算) 做了突变分析。长江上游地区 1960 年来年降水量没有明显的突变过程，但是在 1970 年左右，长江上游的参照蒸散量发生突变式增加；按照水平衡原理，1970 年宜昌站径流突变可能由参照蒸散量的突变过程所致。长江中游鄱阳湖流域，1960 年以来参照蒸散量持续而稳定地减少，没有明显的突变过程；而年降水在 1988 年左右发生突变，降水量显著增加，这可

能是大通站年径流在 1988 年发生突变的主要因子。人类活动对水资源的消耗和空间再分配过程,也会对径流的序列结构产生重大影响,有必要就人类活动对径流序列关键过程的影响进行深入研究。受资料限制,文中未对 1960 年以前径流突变过程的物理机制进行探讨。

(3) DFA 分析结果表明,长江干流月径流序列存在明显的长期记忆特征,序列中存在较强的确定性成分。宜昌、汉口、大通 3 站的标度指数分别为 0.60、0.72、0.76,而且随着集水面积的增大,径流序列的长期记忆特征增强,表现出明显的记忆累积效应,揭示越大尺度的水文系统,越具确定性特征。在长江流域,降水是径流的主要补给来源。对长江流域 51 个气象站近 40 年的月降水资料进行分析表明,月降水序列是白噪音序列,不具有长期记忆能力。缺乏记忆能力的降水,到达地面后与下垫面相互作用进行信息交流,最终获得了记忆能力。那么,到底是哪种下垫面要素释放了记忆?这种记忆释放与获取机制在水循环过程中如何发挥作用?这成为深化水循环研究必须回答的一个科学问题。

致谢:长江水利委员会水文局和中国气象局提供了本文所需的水文和气象数据,特表感谢。

参考文献 (References)

- [1] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116: 770-799.
- [2] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records. Water Resources Research, 1969, 5(2): 321-340.
- [3] Jiang T, Zhang Q, Blender R et al. Yangtze delta floods and droughts of the last millennium: Abrupt changes and long term memory. Theoretical and Applied Climatology, 2005. DOI 10.1007/s00704-005-0125-4.
- [4] Fraedrich K, Luksch U, Blender R. 1/f-model for long-time memory of the ocean surface temperature. Physica Review E, 2004, 70:1-4.
- [5] Bordi I, Fraedrich K, Gerstengarbe F W et al. Potential predictability of dry and wet periods: Sicily and Elbe-Basin (Germany). Theor. Appl. Climatol., 2004, 77: 125-138.
- [6] Yano J I, Blender R, Zhang C et al. 1/f - noise and pulse-like events in the tropical atmospheric surface variabilities. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2004, 130: 1697-1721.
- [7] Fraedrich K, Blender R. Scaling of atmosphere and ocean temperature correlations in observations and climate models. Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 108501-(1-4).
- [8] Blender R, Fraedrich K. Long time memory in global warming simulations. Geophys. Res. Letters, 2003, 30, 14, 7-(1-4).
- [9] Chen Huanting, Mao Zhichang, Gu Yuliang. Impact of south-north water transfer (east route) on salt water intrusion in the Changjiang estuary with consideration of its countermeasures. Resources and Environment of Yangtze Basin, 2002, 11(2): 150-154. [沈焕庭, 茅志昌, 顾玉亮. 东线南水北调工程对长江口咸水入侵的影响与对策. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 150-154.]
- [10] Yang Shilun, Chen Shenliang, Wang Xingfang. Controlling factors of changes of natural environment and countermeasures in the Yangtze river estuary. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(4): 74-81. [杨世伦, 陈沈良, 王兴放. 长江口未来环境演变的若干影响因素及减灾对策. 自然灾害学报, 1997, 6(4): 74-81.]
- [11] Buishand T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology, 1982, 58: 11-27.
- [12] Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. New York: Chapman & Hall/CRC, 2001. 1-305.
- [13] Elsner J B, Tsonis A A. Singular spectral analysis: a new tool in time series analysis. New York: Plenum Press, 1996: 1-163.
- [14] Vautard R, Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. Physica D, 1989, (35): 395-424.
- [15] Liu Yu, V Shishov, Shi Jiangfeng et al. Precipitation prediction for the next 20 years of Helan hill and Baiyinaobao in Inner Mongolia. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(3): 270-274. [刘禹, V.Shishov, 史江峰 等. 内蒙古西部贺兰山和东部白音敖包未来 20 年降水趋势预测. 科学通报, 2004, 49(3): 270-274.]
- [16] Mann M E, Lees J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series, Climatic

- Change, 1996 (33): 409-445.
- [17] Duan Keqin, Yao Tandong, Pu Jianchen. Monsoon rainfall variability in central Himalaya Mountains over the past ca. 300 years. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(3): 236-242. [段克勤, 姚檀栋, 蒲健辰. 喜马拉雅山中部过去约 300 年季风降水变化. 第四纪研究, 2002, 22(3): 236-242.]
- [18] Michael B C. Determining the time of a permanent shift in the process mean of CUSUM control charts. *Quality Engineering*, 2005, 17(1): 87-93.
- [19] Booy C, Lye L M. A new look at flood risk determination. *Water Resour. Bull.*, 1989, 25(5): 933-942.
- [20] Hense A. On the possible existence of a strange attractor for the southern oscillation. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1987, 60(1): 34-47.
- [21] Tsonis A A, Elsner J B, Georgakakos K P. Estimating of the dimension of weather and climate attractors: important issue about the procedure and interpretation. *Journal of Atmospheric Science*, 1993, 50: 2549-2555.
- [22] Porato A, Ridolfi L. Nonlinear analysis of river time sequences. *Water Resour. Res.*, 1997, 33(6): 1353-1367.
- [23] Liu Q, Islam S, Rodriguez-Iturbe I et al. Phase-space analysis of daily streamflow: characterization and prediction. *Water Resource*, 1998, 21: 463-475.
- [24] Wang Q, Gan T Y. Biases of correlation dimension estimates of streamflow data in the Canadian prairies. *Water Resour. Res.*, 1998, 34(9): 2329-2339.
- [25] Mandelbrot B B. Statistical methodology for non-periodic cycles: from the covariance to R/S analysis. *Annals of Economic and Social Measurement*, 1972, 1: 259-290.
- [26] Koutsoyiannis D. The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(4): 573-595.
- [27] Koutsoyiannis D. Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(1): 3-24.
- [28] Hastings H M, Kissells R. Is the Nile outflow fractal? Hurst's analysis revisited. *Natural Resource Modeling*, 1998, 11 (2): 83-93.
- [29] Anis A A, Loyd E H. Skew inputs and the Hurst effect. *Journal of Hydrology*, 1975, 26: 39-53.
- [30] Anis A A, Lloyd E H. The expected value of the adjusted rescaled Hurst range of independent normal summands. *Biometrika*, 1976, 63: 155-164.
- [31] Taqqu M S, Teverovsky V. Estimators for long range dependence: an empirical study. *Fractals*, 1995, 3(4): 785-798.
- [32] Tomsett A C, Toumi R. Annual persistence in observed and modelled UK precipitation. *Geographical Research Letters*, 2001, 28 (20): 3891-3894.
- [33] Montanari A, Taqqu M S, Teverovsky V. Estimating long range dependence in the presence of periodicity: an empirical study. *Mathematical and Computer Modeling*, 1999, 29: 217-228.
- [34] Abry P, Veitch D. Wavelet analysis of long range dependent traffic. *IEEE Trans. Inform Theory*, 1996, 44(1): 2-15.
- [35] Dang T D, Molnar S. On the effects of non-stationarity in long range dependence tests. *Periodica Polytechnica Ser. El. Eng.*, 1999, 43(4): 227-250.
- [36] Peng C K, Havlin S, Stanley H E et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time-series. *Chaos*, 1995, 5: 82-87.
- [37] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys. Rev. E.*, 1994, 49: 1685-1689.
- [38] Weron R. Estimating long-range dependence: finite sample property and confidence intervals. *Physica A*, 2002, 312: 285-299.
- [39] Taqqu M S, Teverovsky V, Willinger W. Estimators for long-range dependence: an empirical study. *Fractals-an Interdisciplinary Journal on the Complex Geometry of Nature* 1995, 3: 785-798.
- [40] Govindan R B, Vyushin D, Bunde A et al. Global climate models violate scaling of the observed atmospheric variability. *Physical Review Letters*, 2002, 89(2).
- [41] Kiraly A and Janosi IM. Stochastic modeling of daily temperature fluctuations. *Physical Review E*, 2002, 65.
- [42] Blender R., Fraedrich K. Long time memory in global warming simulations. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30.
- [43] Caballero R, Jewson S, Brix A. Long memory in surface air temperature: detection, modeling, and application to weather derivative valuation. *Climate Research*, 2002, 21: 127-140.
- [44] Kantelhardt J W, Koscielny-Bunde E, Rego H A et al. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis. *Physica A*, 2001, 295: 441-454.
- [45] Hu K, Ivanov P C, Chen Z et al. Effect of trends on detrended fluctuation analysis. *Physical Review E*, 2001, 6401.
- [46] Taqqu M S, Teverovsky V. Robustness of whittle type estimators for time series with long range dependence. *Stochastic Model*, 1997, 13:723-757.

- [47] Montanari A, Taqqu M.S., Teverovsky V. Estimating long-range dependence in the presence of periodicity: an empirical study. *Mathematical and Computer Modelling*, 1999, 29: 217-228.
- [48] Chen Z, Ivanov P C, Hu K et al. Effect of nonstationaries on detrended fluctuation analysis. *Physical Review E*, 2002, 65.
- [49] Tang Qiyi, Feng Mingguang. *Practical Statistics and DPS Data Processing System*. Beijing: China Agricultural Press, 2002. 407. [唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 中国农业出版社, 2002. 407.]
- [50] Wang Pancheng, He Songlin. The basic character on the process runoff and sediment discharge at Datong station of the Changjiang River. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2004, (2): 72-80. [王盼成, 贺松林. 长江大通站水沙过程的基本特征 I: 径流过程分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 2004, (2): 72-80.]
- [51] Qin Aiji, Chen Xueying, Zheng Yanxia. The analysis of Yichang discharge series. *Hydrology*, 1993, (5): 15-21. [覃爱基, 陈雪英, 郑艳霞. 宜昌径流时间序列的统计分析. 水文, 1993, (5): 15-21.]

Structure and Long-term Memory of Discharge Series in Yangtze River

WANG Guojie^{1,2}, JIANG Tong¹, CHEN Guiya³

(1. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)*

Abstract: Based on the long-term monthly discharge series of Yichang, Hankou and Datong stations, this paper has explored the discharge series structure of periodicity, trend and abrupt changes as well as its long-term memory with Singular Spectrum Analysis, and Detrended Fluctuation Analysis in employment. The results revealed that: 1) there is a significant 15a periodicity in the discharge series of the Yangtze River, and the 15a periodicity has been disturbed since the 1970s; 2) two abrupt and negative changes of Yichang series respectively in 1926 and 1970 have been detected in Hankou series in 1954; two abrupt changes occurred in Datong series respectively in 1955 and 1988, the former negative and the latter positive; and 3) the performance of DFA revealed a long memory in the discharge series of the Yangtze River, and the larger the upslope contributing area is, the stronger the long memory, which exhibits a cumulative effect.

Key words: discharge series; time series structure; long-term memory; Yangtze River