

# 长江干流日径流序列的多重分形特征

陈 莹, 许有鹏, 尹义星, 刘星才

(南京大学地理与海洋学院, 南京 210093)

**摘要:** 基于长江干流寸滩、宜昌和大通三个主要控制水文站多年的日径流资料, 运用多重分形消除趋势波动分析(MF-DFA) 等方法, 识别长江流域不同空间尺度上径流序列的多重分形特征, 并采用推广的乘积阶次模型, 对多重分形谱进行拟合。结果表明: (1) 长江干流的日径流序列具有自相似的多重分形特征, 该多重分形特征是由序列内在的长程相关性引起的; (2) 长江干流日径流序列的多重分形谱可用推广的乘积阶次模型进行描述, 模型拟合的参数  $a$ 、 $b$  可作为该水文站点的特征参数, 能够对降雨径流模型有效地进行检测; (3) 长江干流日径流变化的复杂程度具有空间差异性。下游大通水文站径流序列的奇异性大于上游两站点, 其径流变化过程更为复杂, 而上游两站奇异性相差不大。造成三个站点径流过程变化复杂程度差异的主要原因, 包括集水面积、来水组成、降水特点和下垫面状况等。

**关键词:** 径流; 多重分形; 消除趋势波动分析; 长江

**文章编号:** 1000-0585(2008)04-0819-10

## 1 引言

径流是水循环的重要组成要素, 其过程携带着水循环动力机制的大量信息。对径流序列的内在规律进行分析是认识水循环动态演化特征的基本途径之一。上个世纪 50 年代 Hurst 发现水文序列在时间上存在长程相关的特征<sup>[1]</sup>; 60 年代 Mandelbrot 等把分形理论引入水文时间序列自相似特征的研究, 使之与水文系统的非线性动力机制建立起密切联系<sup>[2]</sup>。随着研究的深入, 水文学家们发现单一分形维数不足以描述水文过程的复杂结构, 径流序列的多重分形研究开始受到广泛关注。多重分形可以分解为使用不同分形维数描述的多个子集, 通过计算奇异谱来描述系统的非线性动力学行为<sup>[3,4]</sup>。因而, 探讨径流序列的多重分形特征能够更好地揭示水文过程的非均匀结构, 对深化对水循环动力机制的认识具有重要的意义。当前国际上已经开展对河流径流多重分形特征的研究。Pandey 等<sup>[5]</sup>对美国 19 个流域日径流序列的分析结果表明, 日径流在  $2^3 \sim 2^{16}$  天的时间尺度上具有多重分形的特征; Kantelhardt 和 Koscielny-Bunde 等<sup>[6,7]</sup>对全球范围内 40 多条河流多重分形谱的分析结果表明, 各河流的奇异谱谱宽存在显著差异, 然而谱宽的大小与各流域的面积并不存在相关关系; 而 Dahlstedt 等<sup>[8]</sup>的研究表明, 多瑙河、密西西比河以及英国怀河之间的多重分形特征存在差异, 而这种差别与各流域水资源利用、调度以及流域面积有很大的关系。

目前, 对径流多重分形物理意义的认识还处于探索阶段<sup>[9~11]</sup>, 仍需要进行大量的实证研究。长江是世界最长的河流之一, 流域面积 180 万  $\text{km}^2$ , 水资源量占全国水资源总量

收稿日期: 2007-06-25; 修订日期: 2008-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (405710257)

作者简介: 陈莹 (1982-), 女, 福建南平人, 博士。主要从事水资源与水环境研究。E-mail: chenying\_nju@163.com

的 38%，是开展实证研究的理想区域。王国杰等<sup>[12,13]</sup>采用消除趋势波动分析法，研究了长江径流的线性与非线性标度特征；并模拟了长江中游洪泛平原通江湖泊对长江干流径流过程的滤波作用。本文基于长江干流的寸滩、宜昌和大通三个主要控制水文站多年的日径流资料，采用多重分形消除趋势波动分析（MultiFractal Detrended Fluctuation Analysis，以下简称 MF-DFA）等方法，探讨了长江流域不同空间尺度上径流时间序列的多重分形特征，以期对长江流域水循环的动力机制获取更为深入的认识。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

本文选取长江干流的寸滩、宜昌和大通三个主要控制站（图 1）的日径流序列进行多重分形分析。寸滩水文站位于长江干流与嘉陵江汇合口处以下 7.5 km，控制流域面积 86 万 km<sup>2</sup>，是三峡水库的入库站点、长江上游的主要控制站，控制着雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江及长江上游干流的来水。宜昌水文站位于长江三峡的东出口，控制流域面积 100 万 km<sup>2</sup>，是长江上游山区和中下游洪泛平原之间的总控制站，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<sup>[14]</sup>。大通水文站是海洋潮汐上涨所能到达的河流上界，长江下游干流的总控制站，集水面积 170 万 km<sup>2</sup>，其径流量可代表长江河口区的流量。选用三个水文站点 1950~2000 年的日径流序列资料（见图 2），并采用 Von Neumann ratio (N)，Cumulative deviations ( $Q/\sqrt{n-0.5}$ ,  $R/\sqrt{n-0.5}$ ) 和 Bayesian procedures (U, A)<sup>[15]</sup> 统计量的方法，在 95% 置信度下对 3 站点径流序列进行均一性检验。

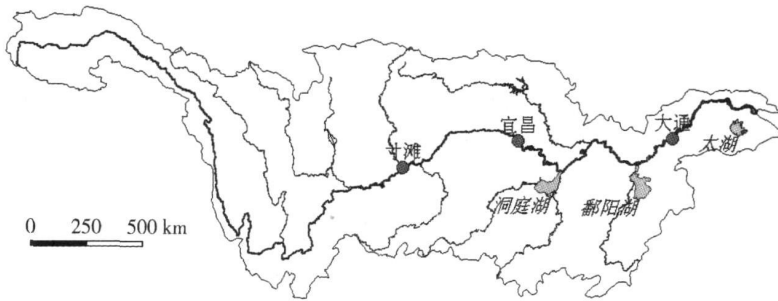


图 1 长江干流寸滩、宜昌和大通水文站的地理位置

Fig 1 The locations of Cuntan, Yichang and Datong stations on the Yangtze River

### 2.2 分析方法

**2.2.1 日径流序列的预处理** 径流变化受到季节因素的强烈影响，具有显著的年周期特征，将会对标度指数的估计产生影响<sup>[16]</sup>。因而，合理地消除序列周期带来的影响，是正确估计多重分形特征的一个重要环节。对于给定的日径流序列  $x(d, y)$ ， $d$  代表观测日期， $y$  代表年份， $y = 1, 2, \dots, N_y$ ， $\langle x \rangle_d$ 、 $\sigma_d$  分别代表径流的日平均和标准偏差，则消除年周期后的径流序列可以表达为<sup>[8]</sup>：

$$w_x = \frac{x(d, y) - \langle x \rangle_d}{\sigma_d}, \quad \text{式中} \quad (1)$$

$$\langle x \rangle_d = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} x(d, y) \quad (2) \quad \sigma_d = \sqrt{\frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} (x(d, y) - \langle x \rangle_d)^2} \quad (3)$$

消除年周期后的数据序列  $\alpha = 1$ ， $\langle w \rangle = 0$ 。

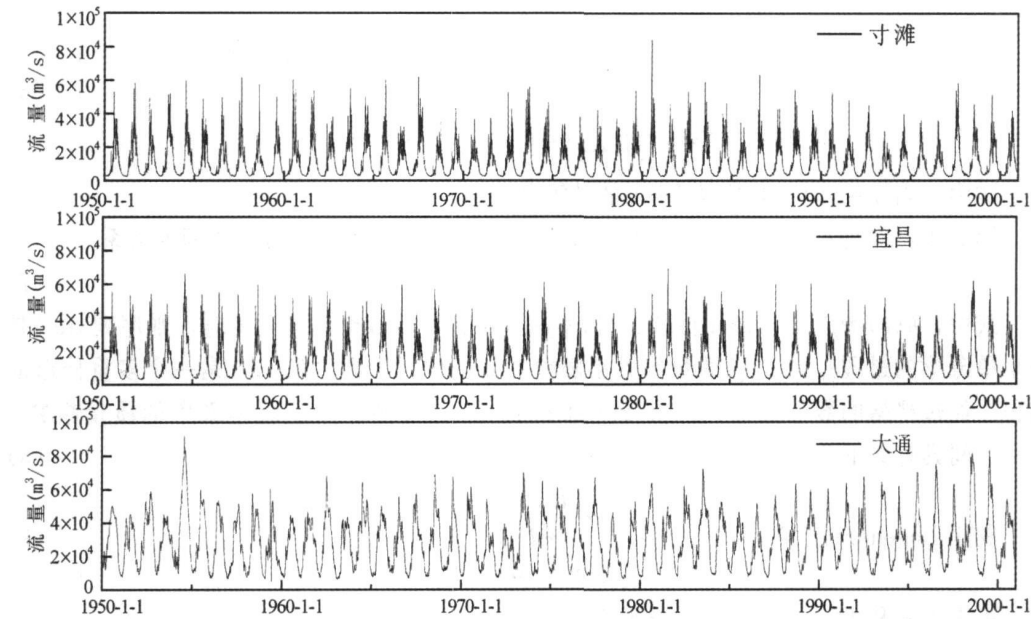


图 2 长江干流 1950~ 2000 年寸滩、宜昌和大通水文站日径流序列  
Fig 2 The daily runoff records of Cuntan, Yichang and Datong stations  
on the Yangtze River between 1950 and 2000

2.2.2 多重分形消除趋势波动分析 (MF-DFA) 方法 消除趋势波动分析方法 (DFA) 是 Peng 等<sup>[17]</sup>在研究核糖核酸行为机制过程中提出的一种分析幂律函数关系的方法, 现已成功地应用于生命科学、地质学、气象学和水文学等领域, 被证明是检测非平稳时间序列长期相关特征最重要、最可靠的工具之一<sup>[18~ 21]</sup>。2002 年, Kantelhardt 等<sup>[11]</sup>在一维分形 DFA 的基础上将其推广, 并与基于标准配分函数的多重分形公式体系联系起来, 提出了 MF-DFA 方法。该方法可以对平稳和非平稳的信号结构及涨落奇异性进行度量, 为多重分形谱的估计提供了有力的工具。

MF-DFA 分析的基本过程如下<sup>[7, 11]</sup>:

第一步: 对消除年周期后的序列计算其累积离差

$$Z_i = \sum_{k=1}^i (w_k - w), \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{4}$$

式中,  $w$  为该序列的平均值。

第二步: 以等长度  $s$  把  $Z(i)$  分割为不重叠的  $N_s$  个区间  $z(k)$ ,  $N_s = [N/s]$ 。由于序列长度并不总是时间长度  $s$  的倍数, 因此, 对  $Z(i)$  的逆序进行同样操作, 共有  $2N_s$  个等长度的区间。

第三步: 用最小二乘法拟合并剔除每个区间  $v$  的局部趋势  $y_v(i)$ , 计算新序列的方差

$$\begin{cases} F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \{ Z[(v-1)s + i] - y_v(i) \}^2, & v = 1, 2, \dots, N_s \\ F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \{ Z[N - (v - N_s)s + i] - y_v(i) \}^2, & v = N_s + 1, \dots, 2N_s \end{cases} \tag{5}$$

第四步: 确定全序列的  $q$  阶波动函数,

$$\begin{cases} F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2Ns} \sum_{v=1}^{2Ns} [F^2(v, s)]^{q/2} \right\}^{1/q}, & q \in R \text{ 且 } q \neq 0 \\ F_q(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4Ns} \sum_{v=1}^{2Ns} \ln [F^2(v, s)] \right\}, & q = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, 当  $q=2$  时, 是标准 DFA 的计算公式。

第五步: 对每一阶数  $q$  值, 分析波动函数  $F_q(s)$  与分割区间长度  $s$  之间的关系

$$F_q(s) \sim s^{h(q)} \quad (7)$$

式中,  $h(q)$  为广义 Hurst 指数。当  $h(q)$  的数值大小与阶数  $q$  无关时, 则序列  $\{w_i\}$  是一个单分形的过程; 当  $h(q)$  的数值大小随阶数  $q$  变化时, 则序列  $\{w_i\}$  是一个多重分形的过程。经过严格的数学证明, 广义 Hurst 指数  $h(q)$  与多分形公式体系中的质量指数  $\tau(q)$  之间具有如下关系:

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad (8)$$

利用 Legendre 变换

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d\tau(q)}{dq} \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (9)$$

可求出  $\alpha$  及  $f(\alpha)$ , 即为多重分形谱。

### 2.2.3 质量指数谱的拟合

本文利用公式 
$$\tau(q) = - \frac{\ln(a^q + b^q)}{\ln 2} \quad (10)$$

对质量指数谱  $\tau(q)$  进行最小二乘拟合, 该公式是乘积阶次模型的推广, 具体的推导过程可见参考文献 [11]。该模式仅通过参数  $a$  和  $b$  就可对质量指数  $\tau(q)$  的数值进行拟合, 拟合的结果还可用于奇异谱  $f(\alpha)$  的计算。将式 (10) 与式 (8) 和 (9) 相结合, 可得

$$\begin{cases} \alpha = - \frac{1}{\ln 2} \frac{a^q \ln a + b^q \ln b}{a^q + b^q} \\ f(\alpha) = - \frac{q}{\ln 2} \frac{a^q \ln a + b^q \ln b}{a^q + b^q} - \frac{\ln(a^q + b^q)}{\ln 2} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\alpha(-\infty) = \ln a / \ln 2$  对应最弱的奇异性  $\alpha_{\max}$ ,  $\alpha(+\infty) = \ln b / \ln 2$  对应最强的奇异性  $\alpha_{\min}$ 。一般使用参数  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  来描述多重分形谱奇异强度的范围,  $\Delta\alpha$  是反映多重分形程度的量,  $\Delta\alpha$  小则信号趋向于单重分形, 反之, 则趋向于多重分形。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 多重分形特征的判定

为了正确地估算多重分形谱, 本文首先分析了当局部趋势函数  $y_v(i)$  采用不同  $m$  阶次多项式拟合时, 阶数  $m$  与  $q$  之间的关系。图 3 是当  $q=2, -2$  时, 宜昌站  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  关系随阶数  $m$  变化的曲线。研究表明, 近百年来宜昌站径流存在显著的下降趋势, 相关研究<sup>[14]</sup>认为可能与长江上游地区蒸散发能力增大有关。二阶指数多项式, 即  $m=2$ , 能消除该序列中的线性成分; 高阶指数多项式, 即  $m>2$  能消除序列中的非线性成分。图 3 显示, 宜昌站日径流序列具有两个不同的标度区间, 在 50~100 天的时间尺度上存在一个显著的交叉点, 并且在这两个标度区域内, 宜昌站日径流变化遵循着幂指数分布规律, 表明其日径流序列具有分形特征; 同时, 当阶数  $m \geq 2$  时,  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  曲线的线性拟合斜率是相同的, 表明趋势中非线性的成分并非显著。经计算,  $q$  取其他值时, 宜昌、寸滩和大通站点均具有相类似的结果。因而, 采用二阶指数多项式就能够较好地滤除长江干流径流

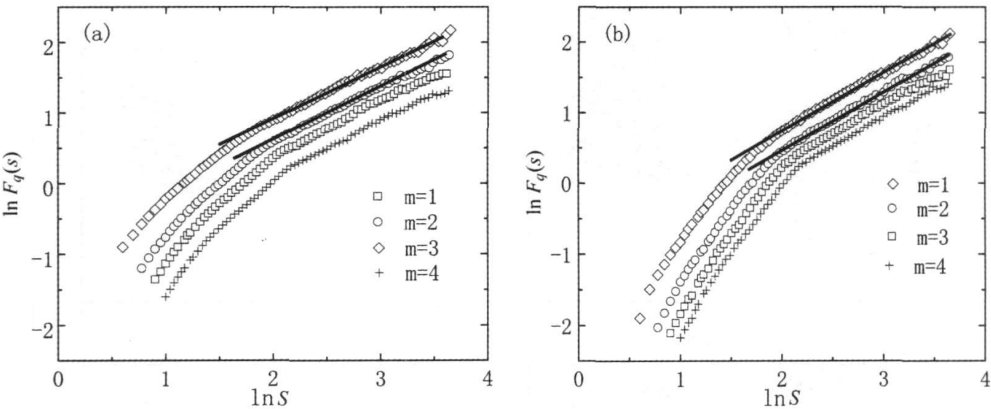


图 3 宜昌站日径流序列  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  关系曲线((a)  $q = 2$ , (b)  $q = -2$ )  
Fig 3  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  of daily runoffs for Yichang station ((a)  $q = 2$ , (b)  $q = -2$ )

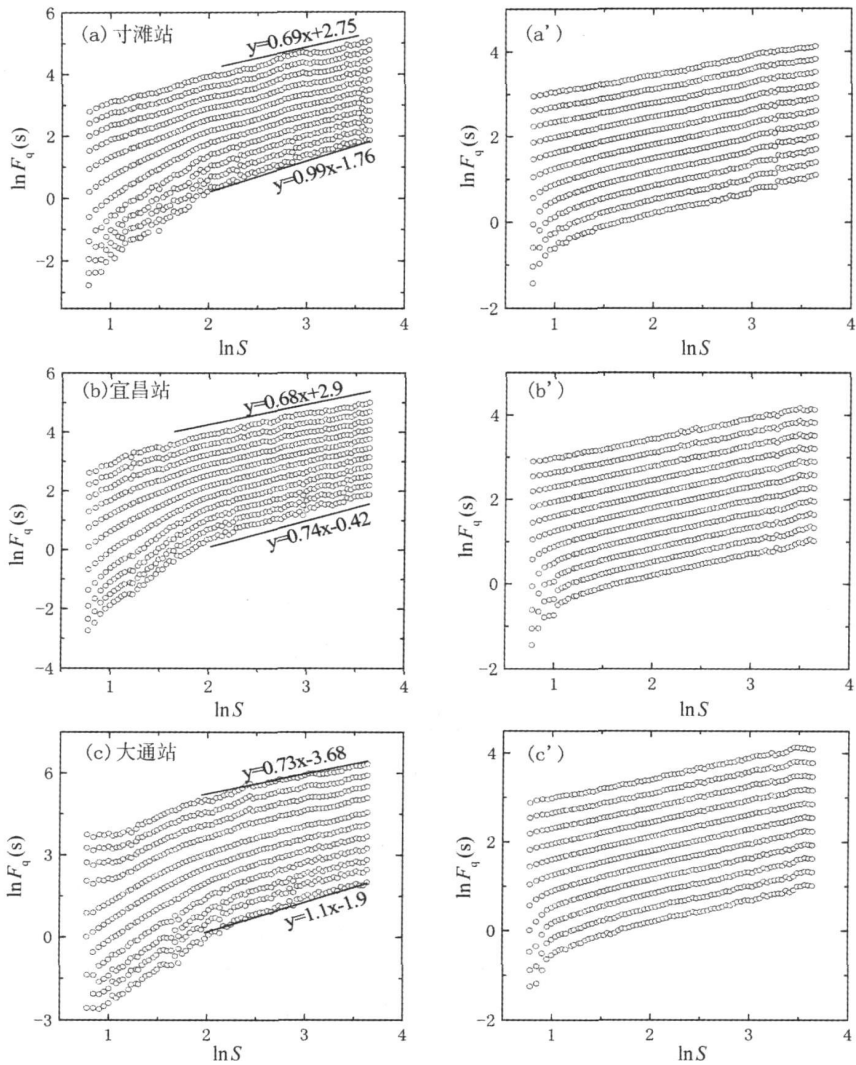
序列中的趋势成分。

考虑到要有较好的谱特征，本文在进行 MF-DFA 计算时，统一采用二阶指数多项式，分割区间长度  $s$  取  $[8, N/4]$ ， $q$  取  $[-10, 10]$ 。由于各站点在 50~100 天的时间尺度上均存在一个显著的交叉点(见图 3)，因此，本文仅考虑在大于 100 天的时间尺度上长江径流的多重分形特征。图 4(a、b、c) 是寸滩、宜昌和大通三个水文站的  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  关系曲线，可以看出，在大于 100 天的时间尺度上， $F_q(s)$  与  $S$  之间是幂律相关的，并且曲线拟合的斜率  $h(q)$  随  $q$  的减小而单调增加，这证明了长江干流日径流序列存在多重分形特征。

具有多重分形特征的时间序列存在两种不同的类型，一种是源于序列的概率分布，另一种是由于尺度不同的长程波动相关引起的，而这两种多重分形的特征可以通过随机化原始序列进行识别<sup>[11]</sup>。如果随机化后的新序列是单分形，则表明原始序列的多重分形特征是由序列的长程相关引起的；如果随机化后的序列与原始序列的多重分形特征一致，则说明原始序列的多重分形特征是由序列的概率分布所引起的。图 4(a'、b'、c') 是寸滩、宜昌和大通三个水文站径流序列随机化后的分析结果，可以看出，三个站点  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  曲线的拟合斜率  $h(q) \approx 0.5$ ，这表明长江干流日径流序列随机化后呈单分形，其多重分形特征是由序列内在的长程相关引起的。这一结果与 Koscielny-Bunde 等<sup>[7]</sup> 对全球 41 个水文站点日径流序列的分析结果相吻合。然而，径流序列的长程相关性从何而来？因为该问题与地表水文过程的物理机制密切联系，目前受到国际上水文学与物理学领域的广泛关注<sup>[22,23]</sup>。在长江流域，降水是径流的主要补给来源。王国杰等<sup>[14]</sup> 对长江流域 51 个气象站近 40 年的月降水资料进行分析，结果表明月降水序列是白噪音序列，这说明径流的长程相关性并不是由降水的长程相关引起的，可能是由于降雨与流域下垫面在不同时空尺度上相互作用而产生。Grange<sup>[24]</sup> 研究表明，具有不同回归系数的相互独立的 AR(1) 过程进行聚合，可以产生遵循幂率波动的长程相关。Mudelsee<sup>[25]</sup> 模拟了 AR(1) 过程的聚合作用，并认为径流的长程相关来自江河网络对降水短期记忆的空间集聚效应。

3.2 多重分形谱的拟合及奇异谱分析

3.2.1 多重分形谱的拟合 图 5 是寸滩、宜昌和大通三个站点日径流序列的质量指数谱及其拟合结果。由图可见，各站点质量指数  $\tau(q)$  的拟合是比较准确的，推广的乘积阶次



注：图中曲线从上到下依次对应为  $q=10, 8, 6, 4, 2, 0, -2, -4, -6, -8, -10$ ，实线为相应的线性拟合

图4 长江干流日径流序列 MF-DFA2 的  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  关系曲线

Fig 4  $\ln F_q(s) \sim \ln S$  obtained from MF-DFA2 for three typical hydrological stations on the Yangtze River

模型不仅可以对  $q > 0$  的阶数进行拟合，还适用于  $q < 0$  的阶数，表明该模型可以对日径流序列的多重分形谱进行精确描述。同时，各站点拟合参数  $a, b$  的数值是不同的（见表1），其数值是由广义波动函数的渐近部分得到，不受季节的影响。因而，在实际应用中，参数  $a, b$  可作为水文站点或某一河流的特征参数，这对于降雨径流模型的检验具有重要的意义。

表1 寸滩、宜昌、大通三站日径流序列统计特征量  
Tab 1 The main statistics of the Cuntan, Yichang, and Datong daily runoff records

站名	控制面积 (万 km <sup>2</sup> )	$a$	$b$	$\Delta\alpha$
寸滩	86	0.48	0.66	0.46
宜昌	100	0.50	0.68	0.44
大通	170	0.43	0.63	0.55

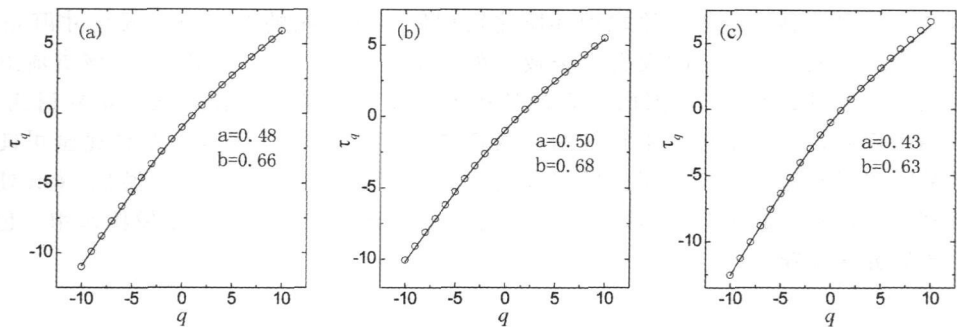


图 5 长江干流日径流质量指数谱 (圆圈) 及其拟合 (实线) (a) 寸滩站, (b) 宜昌站, (c) 大通站

Fig. 5 The quality exponential spectrum  $\tau(q)$  for three typical hydrological stations on the Yangtze River and its fitting line (a) Cuntan, (b) Yichang, (c) Datong

**3.2.2 奇异谱分析** 图 6 为长江干流日径流序列的多重分形奇异谱。由图可见, 三个站点的奇异谱不对称, 且谱线都是向右钩状的凸曲线, 奇异谱在  $q > 0$  (对应于较小的  $\alpha$ ) 的分布区间小于  $q < 0$  (对应于较大的  $\alpha$ ) 的分布区间, 即  $\alpha$  较大的部分占优势。 $q > 0$  时, 奇异谱刻画了大涨落的标度行为;  $q < 0$  时, 奇异谱则描述了小涨落的标度行为。因而, 奇异谱的分析结果表明小涨落的影响在日径流序列中占优势, 这也是日径流序列具有长程相关性的重要原因之一。

大通水文站位于流域的下游, 不仅继承了上游寸滩、宜昌的来水, 还接受了众多支流汇入, 其中就有长江最大的支流汉江、以及水系庞杂的洞庭湖、鄱阳湖两大水系, 这使得径流沿程的组合特性越来越复杂, 必将增加大通站日径流的复杂性。同时, 大通站的汇水面积远大于寸滩站和宜昌站, 大通与宜昌站的控制面积相差 70 万  $\text{km}^2$ , 在这 70 万  $\text{km}^2$  的汇水区间内降水、蒸发、地形条件以及下垫面特征的空间差异很大, 造成径流的产汇流条件更为复杂, 因而, 大通站径流形成的物理机制更为复杂, 径流变化的复杂性增强。另一方面, 长江中下游平原是我国湖泊分布最为集中的地区之一, 湖泊的蓄水和时滞排放过程也会对大通站径流变化的复杂性产生影响。王国杰等<sup>[13]</sup> 用一个线性的低通滤波器对长江中下游的通江湖泊对干流径流过程的滤波作用进行了模拟, 结果表明, 通江湖泊对长江干流径流大约存在 8~10 天左右的滤波作用, 即长江中下游通江湖泊与干流径流线性相互作用的尺度是大约 8~10 天。然而, 江湖系统之间的非线性过程有可能突破这个尺度, 在大于 100 天的尺度上产生影响。因而也不能完全排除通江湖泊在本文研究尺度上对干流径流复杂性产生影响。

寸滩和宜昌水文站均位于长江流域上游, 寸滩站的来水量约占宜昌站水量的 80%,

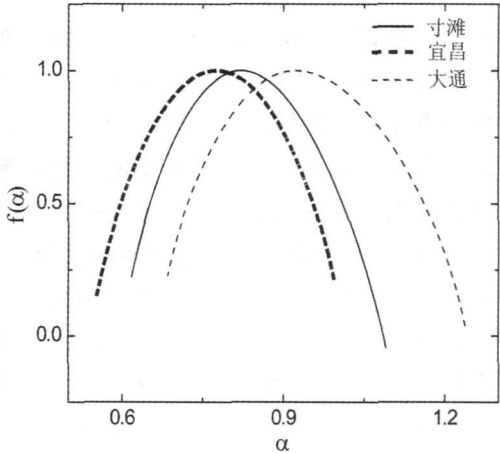


图 6 寸滩、宜昌和大通三站日径流的多重分形奇异谱  $f(\alpha)$

Fig. 6 The singularity spectrums  $f(\alpha)$  for Cuntan, Yichang and Datong daily runoff records

两个水文站各自控制流域的自然地理环境比较相似。宜昌站的控制面积仅比寸滩站大 14 万  $\text{km}^2$ , 来水组成上两站之间仅有一条较大的支流——乌江汇入 (图 1), 该支流的来水量只占宜昌站水量的 8.8%, 因而对宜昌站径流的复杂性增加比较有限。奇异谱谱宽  $\Delta\alpha$  的分析结果表明, 寸滩站略大于宜昌站, 两者之间仅差 0.02, 该微小差异完全可能是由于径流数据本身和运算过程的误差所引起的。另一方面, 位于宜昌站上游仅 6km 处的葛洲坝水利工程, 其径流调节作用是否在两个站点的径流复杂程度变化中发挥作用, 也是值得进一步研究的问题。

## 4 结论

本文采用 MF-DFA 等方法识别长江干流寸滩、宜昌和大通 3 个水文站日径流序列在大于 100 天尺度上的多重分形特征, 得到以下结论:

(1) 长江干流日径流序列具有自相似的多重分形特征, 该多重分形特征是由序列内在的长程相关性引起的, 而这种长程相关性可能是在降雨与流域下垫面相互作用的过程中产生的。近期的研究表明水文数据内在的长程相关性反映了极端事件群集的自然机制<sup>[26~28]</sup>, 因而, 对长程相关性的正确认识将有助于极端事件重现期的计算, 并可以对未来极端事件的发生做出较准确的预测。近几十年来, 长江流域洪涝发生频繁, 灾害发生的物理机制尚不明了。从幂律波动的角度, 探讨长江流域水文气候极端事件的发生机制, 进而预测极端事件的发生, 是一个值得深入研究的课题。

(2) 长江干流日径流序列的多重分形谱可用推广的乘积阶次模型精确地进行描述, 该模型计算过程简单, 且仅有两个参数  $a$ 、 $b$ , 同时, 拟合得到的参数  $a$  和  $b$  还可以用于计算多重分形奇异谱的谱宽  $\Delta\alpha$ 。通过某个物理参数来刻画和分析水文、气候系统的动力学特征, 已经有不少相关的研究<sup>[29~31]</sup>。本研究中,  $\Delta\alpha$  的物理意义明确, 可以反映径流变化复杂度的空间差异, 提供了一个新的表征径流序列特征的动力学参数。从实际应用的角度, 参数  $\Delta\alpha$  以及  $a$  和  $b$  可作为某个水文站或某条河流的特征参数, 是检测降雨径流模型的有效手段; 同时, 还可将这些参数引入到水文模型中, 发展更为有效的水文预测模式, 这对于深化水循环的研究具有重要的现实意义和应用价值。

(3) 基于三个水文站奇异谱谱宽  $\Delta\alpha$  的比较分析, 发现该参数能够很好的反映长江干流日径流变化复杂度的空间差异。上游寸滩和宜昌两站奇异性相差不大, 主要是集水面积相近所致。下游大通站日径流的奇异性大于上游的寸滩和宜昌水文站, 其径流过程更为复杂。造成这三个站点径流过程复杂程度差异的可能原因, 包括降水特点、蒸散发条件和下垫面状况等, 湖泊也可能在本文研究尺度上产生影响。长江流域水循环过程的复杂性, 有待进一步深入研究。

(4) 本研究表明长江干流日径流序列在 50~100 天的时间尺度上存在一个显著的交叉点, 反映了径流在不同时间尺度上的波动特征, 具有不同的物理机制。而本文只考虑在大于 100 天时间尺度上日径流的多重分形特征, 小于 100 天时间尺度上的波动特征, 还有待进一步的研究。此外, 今后还可选择不同气候特征、地貌条件下的更多流域, 对其径流资料进行多重分形特征比较, 包括对 50~100 天的交叉点进行验证, 从而更深入地认识水循环过程的复杂物理机制。



## 参考文献:

- [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] 马千里, 宁新宝, 王俊. 描述睡眠脑电多重分形特性的一种新参数. 科学通报, 2006, 51 (15): 1841~ 1846
- [4] 江田汉, 邓莲堂. 全球气温变化的多重分形谱. 热带气象学报, 2004, 20 (6): 673~ 678
- [5] Pandey G, Lovejoy S, Schertzer D Multifractal analysis of daily river flows including extremes for basins of five to two million square kilometers, one day to 75 years Journal of Hydrology, 1998, 208, 62~ 81
- [6] Kantelhardt J W, Koscielny-Bunde E, Rybski D P, *et al.* Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records Journal of Geophysical Research, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JD005881
- [7] Koscielny-Bunde E, Kantelhardt J W, Braun P, *et al.* Long-term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies. Journal of Hydrology, 2006, 322: 120~ 137
- [8] Dahlstedt K, Jensen H J Fluctuation spectrum and size scaling of river flow and level. Physica A, 2005, 348: 596~ 610
- [9] Tessier Y, Lovejoy S, Hubert P, *et al.* Multifractal analysis and modeling of rainfall and river flows and scaling, causal transfer functions. Journal of Geophysical Research, 1996, 101, 26427~ 26440
- [10] Kantelhardt J W, Rybski D, Zschiegner S A, *et al.* Multifractality of river runoff and precipitation: Comparison of fluctuation analysis and wavelet methods Physica A, 2003, 330: 240~ 245
- [11] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, *et al.* Multifractal detrended fluctuation analysis of non-stationary time series Physica A, 2002, 316: 87~ 114
- [12] Wang G J, Su B D, Kundzewicz Z W, *et al.* Linear and non-linear scaling of the Yangtze River flow. Hydrological Processes, 2007, DOI: 10.1002/hyp.6689
- [13] 王国杰. 水文气候过程中的幂律波动——以长江流域和西北地区为例. 南京: 中国科学院研究生院, 2007
- [14] 王国杰, 姜彤, 陈桂亚. 长江干流径流的时序结构与长期记忆. 地理学报, 2006, 61(1): 47~ 56
- [15] Buishand T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology, 1982, 58: 11 ~ 27
- [16] 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
- [17] Peng G-K, Buldyrev S V, Havlin. Mosaic organization of DNA nucleotides Physical Review E, 1994, 49(2): 1685 ~ 1689
- [18] 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
- [19] Blender R, Fraedrich K. Long time memory in global warming simulations. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1769~ 1772
- [20] Amaral L, Goldberger A L, Ivanov P Ch, *et al.* Scale-independent measures and pathologic cardiac dynamics Physical Review Letter, 1998, 81(11): 2388~ 2391
- [21] 郑祚芳, 张秀丽, 曹鸿兴, 等. 用去趋势涨落分析研究北京气候的长程变化特征. 地球物理学报, 2007, 50 (2): 420~ 424
- [22] Kantelhardt J W, Koscielny-Bunde E, Rybski D, *et al.* Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records, Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (D1), D01106
- [23] Kirchner J W, Feng X, Neal C Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments Nature, 2000, 403, 524~ 527
- [24] Grange C W J Long memory relationships and the aggregation of dynamic models Journal of Econometrics, 1980, 14, 227~ 238
- [25] Mudelsee Long memory of rivers from spatial aggregation Water Resources Research, 2007, doi: 10.1029/2006WR005721
- [26] Bunde A, Eichner J F, Kantelhardt J W, *et al.* Long-term memory: A natural mechanism for the clustering of ex-

- treme events and anomalous residual times in climate records. *Physical Review Letter*, 2005, 94, 048701.
- [27] Antal T, Droz M, Gyorgyi G, *et al.* 1/f Noise and Extreme Value Statistics. *Physical Review Letter*, 2001, 87, 240601.
- [28] Bunde A, Eichner J F, Havlin S, *et al.* The effects of long-term correlations on the return periods of rare events. *Physica A*, 2003, 330.
- [29] 郝成元, 吴绍洪, 李双成. 排列熵应用于气候复杂性度量. *地理研究*, 2007, 26(1): 46~ 52.
- [30] 马建华, 楚纯洁. 黄河流域动力系统泥沙时序混沌特征分析——地理系统综合研究的一种尝试. *地理研究*, 2006, 25(6): 949~ 958.
- [31] 佟春生, 黄强, 刘涵, 等. 基于近似熵的径流序列复杂性研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 121~ 126.

## Multifractal characteristics of daily discharge series in the Yangtze River

CHEN Ying, XU You-peng, YIN Yi-xing, LIU Xing-cai

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The hydrologic process is a very complicated nonlinear system, of which runoff is a very significant component. Single parameter is difficult to characterize the change in the daily runoff time series completely, while the multifractality method with singular spectrum analysis enables us to get more information about the nonlinear behavior of runoff. Based on long-term daily runoff records of Cuntan, Yichang and Datong stations, this article has studied the multifractal temporal scaling properties of the Yangtze River, and fitted the multifractal spectrum by the modified version of the multiplicative cascade model. The results revealed that (1) The discharge series of the Yangtze River is a similar multifractal, and the multifractality is caused by the long-term persistence. The long-term persistence of daily runoff may be related to the interactions between precipitation and underlying surface over various ranges of space-time scales. (2) The fits based on universal multifractal model describe well the scaling behavior of positive as well as negative moments in the 3 daily runoff records. The two parameters  $a$  and  $b$  obtained from the model can be used to calculate the width  $\Delta\alpha$  of singularity spectrum, and the values of  $a$ ,  $b$  and  $\Delta\alpha$  can be regarded as 'fingerprints' for each station, which can be served as an efficient test for the state-of-the-art precipitation-runoff models. (3) The comparison of the width  $\Delta\alpha$  of singularity spectrum among these three stations revealed that there are spatial differences in the complexity of the daily runoff change on the Yangtze River. The complexity of runoff records on Datong is larger than those of the upper reaches of the Yangtze River, while there is no significant difference between Cuntan and Yichang. The factors contributed to the complexity include the drainage area, constitution of water quantity, the characteristics of precipitation and underlying surface, and so on.

**Key words:** runoff; multifractal; DFA; the Yangtze River