

基于分形理论的湘江流域洪水分期研究

石月珍^{1,2}, 李淼^{1,2}, 郑仰奇^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 洪水点据序列具有随机性、非线性、确定性和相似性, 这些特性与分形理论研究的对象一致, 因此可应用分形理论进行洪水分期的研究。以湘江流域为例, 通过分析湘潭水文站洪水散点序列, 计算容量维数, 确定洪水分期数目, 最终划定了湘江流域的洪水分期, 并与传统洪水分期方法进行了比较。结果表明, 用分形分析法得到的湘江汛期洪水分期和传统方法结果基本一致, 但分形理论计算较为客观, 说明分形理论在洪水分期中是可行的, 值得深入探讨和应用。

关键词: 分形理论; 湘江流域; 洪水分期

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)05-0165-03

中图分类号: TV213.9

Flood Season Staged in Xiangjiang River Basin Based on Fractal Theory

SHI Yue-zhen^{1,2}, LI Miao^{1,2}, ZHENG Yang-qi^{1,2}

(1. Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hu'nan 410114, China; 2. Hunan Province

Key Laboratory of Water and Sediment Sciences & Flood Hazard Prevention, Changsha, Hu'nan 410114, China)

Abstract: Flood data sequences are characterized by randomness, nonlinear, uncertainty, and similarity. The characteristics are consistent with the study object of the fractal theory, so flood can be staged using fractal theory. Taking Xiangjiang River basin as an example, flood season of Xiangjiang River basin is staged through analyzing flood data sequences of Xiangtan staff gauge station, computing capacity dimension, and determining the number of flood season staged. The new method is then compared with the traditional method of flood season staged. It is revealed that the stages of Xiangjiang river basin determined by using fractal theory are consistent with those from traditional method, but the method using fractal theory is much more objective. It is feasible in flood season staged and needs to be discussed and applied further.

Keywords: fractal theory; Xiangjiang River basin; flood season staged

湘江流域地处湿润多雨地区, 降雨充沛。然而, 由于降水时空分布极不均匀, 70%的降雨量集中在汛期, 大量的水资源在春夏以洪水的形式体现, 而且年际丰枯变化很大, 容易形成非涝即旱, 旱涝交替发生的局面。毛德华等^[1]的研究指出, 1949—1998年间, 湘江流域中下游区平均1.7 a发生一次洪涝灾害。而1998年、1999年和2003年秋冬季曾遇特大干旱, 湘江长沙段创历史最低水位, 自来水厂取水频频告急, 2009年10月6日湘潭水文站最低水位25.06 m, 更是创历史新低。湘江流域水资源供需矛盾十分尖锐, 严重阻碍了长株潭城市群两型社会配套改革试验区的建设。很多学者和专家提出了洪水资源化的管理理念并进行研究, 取得了不少成果^[2-4]。对于湘江流域, 在保证防洪安全的前提下, 利用流域蓄、滞洪工程对汛期洪水实行分期调度将是解决水资源供需矛

盾, 提高洪水资源利用效率的重要举措。因此, 对湘江流域汛期洪水进行合理分期就显得尤为重要。

洪水具有季节性变化规律, 在洪水资源利用过程中, 必须考虑这种特性。目前洪水分期的划分一般靠经验方法确定, 将洪峰量级大体一致的时段划分为一个分期, 这种方法带有主观性。洪水流量随季节、时间变化的过程是自然界中的一种复杂现象, 在这种复杂现象的背后隐藏着特定的规律性, 这种规律性在通常尺度不变规则下不易直观观测到, 在分形理论特定尺度变换规则下, 其规律性则显而易见。且洪水点据系列具有随机性、非线性、确定性和相似性, 洪水点据系列的这些特性与分形理论研究的对象一致, 因此可应用分形理论进行洪水分期的研究。

目前国内外在分形研究中普遍的做法是在对研究对象自相似性的定性认识基础上, 根据

$\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 关系曲线中是否存在直线段即无标度区来判断是否为分形的^[5-9]。本文的研究即是在上述宗旨下进行的。

1 分形维数的计算

样本集具有标度不变性是以分形维数来定量的, 即分形维数是一个常数。在一个洪水分期中如果分形维数 D_c 是相近的, 那么就称为同一洪水分期^[10]。一般选用容量维进行分维计算^[11], 即对于一个时间序列且对任意 ϵ , 在尺度小于 ϵ 的不规则集下, 观察 $\epsilon \rightarrow 0$ 时其度量 $N(\epsilon)$ 的变化。分形维数 D_c 可用下式表示:

$$D_c = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (1)$$

显然当 $\epsilon \approx 0$ 时, 下式成立:

$$\ln N(\epsilon) \approx -D_c \ln \epsilon = D_c \ln(1/\epsilon) \quad (2)$$

点绘 $\ln N(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 图形, 如果曲线中间直线段存在, 则可认为此序列为分形, 直线段的斜率为 D_c , 即计算出分形维数。

Smally 等^[12] 在计算新赫布里底群岛地震谱系列的时间分维时, 引入了一个新的量 NN , 即相对度量:

$$NN(\epsilon) = N(\epsilon) / N_T \quad (3)$$

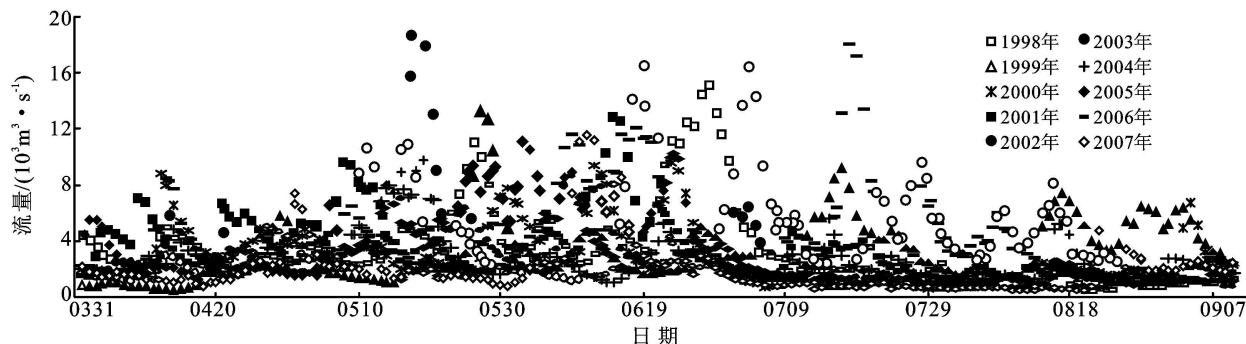


图 1 湘潭水文站历年汛期实测日最大流量散点

从图 2—4 可以看出, $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 曲线中有直线段存在, 可初步断定洪水点据序列为分形。此外, 还可看出, 汛期各分期 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 关系曲线簇中, A, B 曲线的直线段斜率大体一致, 而 C 曲线中直线段的斜率与 A, B 曲线的直线段斜率相差较大。因此, 可认为 B 曲线对应的时期作为一个分期。据此, 本文将湘潭水文站汛期洪水分期划分为 3 段。表 1 列出了湘潭水文站汛期洪水分期结果。按照传统经验统计分析, 由图 1 可以看出, 洪水分期分界点大概在 5 月 10 日, 7 月 31 日前后。如果洪水期划分为 3 个洪水分期, 那么第一个分期从 4 月 1 至 5 月 9 日, 称为前汛期; 第二分期从 5 月 10 至 7 月 31 日, 称为主汛期; 第三分期从 8 月 1 日至 9 月 10 日, 称为后汛期。

式中: $N(\epsilon)$ ——绝对度量; N_T ——划分的总时段数, $N_T \approx T/\epsilon$, T ——研究时段总长; ϵ ——时段步长。作出 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 关系图, 若直线段的斜率为 b , 则容量维 D_m 为:

$$D_m = d - b \quad (4)$$

式中: d ——拓扑维, 洪水流量散点分布在 $Q-t$ 二维平面上, 故 d 取 2, 则容量维 $D_m = 2 - b$ 。

2 湘江流域洪水分期

2.1 传统方法确定洪水分期

湘潭水文站是国家重要水文站和湘江干流控制站, 集水面积 81 638 km²。本文以湘潭水文站 1997—2007 年汛期实测日流量资料(4 月 1 日至 9 月 10 日)作为分析对象, 取历年汛期日最大流量作为研究系列样本。

如前所述, 传统洪水分期的划分一般靠经验确定, 即将洪水量级大体一致的时段划分为一个分期。具体做法为: 以湘潭水文站 1997—2007 年历年汛期实测日最大流量数据为基础, 绘制以时间为横轴, 流量值为纵轴的流量过程散点图, 如图 1 所示。

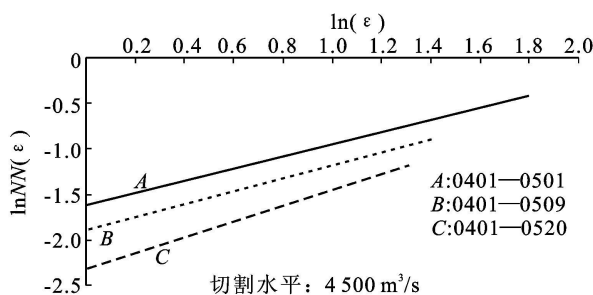


图 2 前汛期 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 曲线关系变化情况

表 1 分形分析法得到的湘江湘潭水文站洪水分期结果

分段名	起止时间	容量维数	切割水平/(m ³ · s ⁻¹)
前汛期	0410—0590	1.83	4 500
主汛期	0510—0731	1.76	9 000
后汛期	0810—0910	1.93	4 000

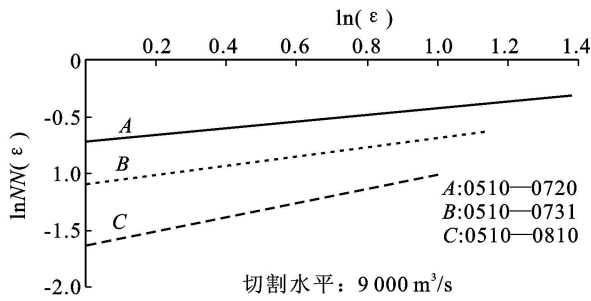


图3 主汛期 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 曲线关系变化情况

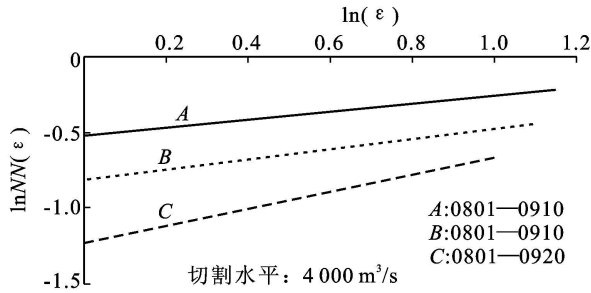


图4 后汛期 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 曲线关系变化情况

2.2 分形法确定洪水分期

在一定的切割水平下, 用尺度变换法求容量维数。具体步骤为:

- (1) 取样本点据系列: $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ 。
- (2) 根据样本点据的跨度, 确定总时段长 T 。
- (3) 取定能反映某一洪水分期的样本固定值 Y_Q 。
- (4) 取某一时段长 ϵ 作为时间尺度, 量度样本值 X_i 超过 Y_Q 的时段数 $N(\epsilon)$ 。
- (5) 根据总时段长 T 和时间尺度 ϵ , 计算相对的时间尺度 $N_T = T/\epsilon$ 。
- (6) 计算相对量度值 $NN(\epsilon) = N(\epsilon)/N_T$ 。
- (7) 计算 $\ln NN(\epsilon)$, $\ln(\epsilon)$, 并将点据 $[\ln(\epsilon), \ln NN(\epsilon)]$ 点在 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 相关图上, 获得一个点。
- (8) 取不同的时间尺度 ϵ , 重复上述(4)–(7)步, 获得一系列点。
- (9) 在一系列点中, 确定所存在的直线段, 并求直线的斜率 b , 即可计算出总时段长为 T 的样本分形的容量维数 $D_m = 2 - b$ 。
- (10) 重复上述(1)–(9)步, 得到不同总时段长为 T 的样本分形的容量维数 D_m , 如 D_m 在某一时段 T 左右为基本相等, 则这个 T 时段即为分形法确定的一个洪水分期。

图2列出了在一定切割水平下, 湘潭水文站汛期各分期 $\ln NN(\epsilon) - \ln(\epsilon)$ 关系曲线的变化情况。

2.3 传统方法与分形法确定洪水分期结果比较

从图1及其分析结论对比表1可以看出, 传统法与分形法确定的湘潭水文站洪水分期大体一致。与传统方法相比, 用分形理论划分洪水分期, 其结果相对较为客观, 受经验和人为影响较小, 但分析计算的工作量较大。

3 结论

(1) 水文现象的随机性、非线性、确定性和相似性具有分形特性, 以此作为应用分形理论划分洪水分期的依据。本文利用分形理论确定了湘江湘潭水文站汛期洪水的分期, 结果比较客观、合理。

(2) 由于选取样本、切割水平以及水文序列本身的复杂性, 洪水汛期的分期可能不同, 更深入的水文序列时空分布的确定性、规律性及应用有待更深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 毛德华, 李景保, 龚重惠, 等. 湖南省洪涝灾害研究[M]. 湖南: 湖南师范大学出版社, 2000: 45-72.
- [2] 胡四一, 高波, 王忠静. 海河流域洪水资源安全利用[J]. 中国水利, 2002(10): 105-108.
- [3] 曹永强. 洪水资源利用与管理研究[J]. 资源·产业, 2004, 6(2): 21-23.
- [4] 王本德, 刘金禄, 王淑英. 水库洪水调度系统的模糊循环迭代模型及应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 233-237.
- [5] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco: Freeman, 1983.
- [6] Mandelbrot B B. Fractal: Form, Chance and Dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1988.
- [7] 宋立松, 曹娥江低潮位序列突变成份分析[J]. 泥沙研究, 2000(2): 69-72.
- [8] 丁晶, 刘国东. 日流量过程分维估计[J]. 四川水力发电, 2002, 18(4): 74-76.
- [9] 董前进, 王先甲, 王建平, 等. 分形理论在三峡水库汛期洪水分期中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3): 400-404.
- [10] 方崇惠, 郭生练, 段亚辉, 等. 应用分形理论划分洪水分期的两种新途径[J]. 科学通报, 2009, 54(11): 1613-1617.
- [11] 候玉, 吴伯贤, 郑国权. 分形理论用于洪水分期的初步探讨[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 140-143.
- [12] Smally R F. A fractal approach to the clusterring of earth quakes: Application to the simility of the new hebmdes[J]. BSSA, 1987, 27(4): 32-49.