

基于分形理论的洪泽湖洪水分期研究

张继路, 赵黎明

(江苏省水利厅, 江苏 南京 210098)

摘要: 以合理调整洪泽湖的湖容量, 实现洪水资源化为目标背景, 应用分维计算来定量划分确定洪水分期。基于淮河流域多年降水以及洪泽湖多年入湖流量统计资料, 通过理论分析、统计计算、规律总结进行阶段的划分, 分别采用经验统计分期方法和分形理论计算法, 综合洪泽湖实际调度情况, 提出阶段划分方案。

关键词: 洪泽湖; 淮河流域; 洪水分期; 经验统计法; 分形理论

中图分类号: TV122 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2016)07-0015-04

Study on flood stage of Hongze Lake based on Fractal Theory

ZHANG Jilu, ZHAO Liming

(Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210098, Jiangsu)

Abstract: For the reasonable adjustment of the Hongze lake capacity and implement of flood water utilization, flood stage is quantifiably divided by fractal theory. Based on the analysis of long series of rainfall and inflow discharge statistical information for many years, stage is divided by theoretical analysis, statistical calculation, and law summary. Stage division method is put forward by empirical statistical method and calculation method of fractal theory with the comprehensive scheduling situation of Hongze Lake.

Key words: Hongze Lake; Huaihe basin; flood stage; empirical statistical method; fractal theory

0 引言

随着人类改造自然控制洪水的能力空前提高, 平原地区大规模防洪工程的建设, 造成河流结点化、水流短路化、洪泛区与河流绝缘化, 从根本上制约了淮河流域自然洪水资源特性的发挥。然而, 淮河流域一面是洪水灾害严重, 另一面却是水资源匮乏, 两者形成了尖锐的矛盾。因此, 研究如何解决这一矛盾, 变害为利, 实现洪水资源化是一个既具有理论意义, 又具有现实价值的课题^[1]。

洪水资源化就是利用洪水自身有利的一面, 是针对过去考虑防洪安全多、考虑洪水兴利少而提出来的, 既有助于缓解汛期河流的防洪压力, 又可促进洪水资源的合理配置, 提高水资源供给保障能力, 缓解供需矛盾, 为经济社会的发展提供有力的防洪抗旱支撑^[1]。气候变化下, 水文极端事件频率、峰值具有高度不确定性, 同时随着经济社会发展, 人口和财富聚集对水安全保障的要求不断提高, 在保障防洪安全的前提下尽可能地实现洪水资源化, 成为水安全研究的重点和难点^[2]。

收稿日期: 2016-06-02

作者简介: 张继路(1982-), 男, 硕士, 主要从事水利工程管理工作。

本文从时间阶段划分、典型年份的选择以及针对淮河流域降雨气象规律过程等方面展开研究。

1 流域概况

洪泽湖位于江苏省西部淮河下游,湖区处于雨量丰沛的南方和干旱少雨的北方过渡区,降水时空分布不均,年内分布也极不均匀。一般集中在汛期,最大、最小月降水量相差悬殊,多年平均6~9月份降水量为606.3 mm,占多年平均年降水量的65.4%,集中程度从南向北递增。洪泽湖区降水量的年际变化较大,最大年降水量为1240.9 mm(1965年),最小年降水量为532.9 mm(1978年)。

洪泽湖的径流量主要由入湖地表径流、湖区地表径流和少量的地下径流组成,洪泽湖区的总径流量约为307亿 m^3 。径流的年内分配不均,径流分配夏季最多,占全年的50%上,冬季最少,不足10%。年际变化剧烈,最大年径流量达800亿 m^3 (1954年),最小年径流量仅为28亿 m^3 ,年际丰枯极值比达28.6。

2 洪水分期研究

本文采用经验分析法、分形理论法分别研究汛期的划分规律,并对各自的研究计算结果进行对比分析。

对于河川径流、湖泊来说,为了便于工程的调度运行管理,确保水利工程的汛期防洪安全及充分拦蓄雨水,把洪水变为宝贵水资源,充分发挥水库效益,制定下列原则来定量划分洪水分期的时间段。

(1) 同一个分期内,洪水量级一般相近,洪峰外包值无太大差异。

(2) 要使各分期的洪水不仅在成因上,而且在数量级和洪水特性等方面有明显差异。

(3) 分期起终日期界定,应使所选的洪水样本基本不跨峰,避免分割天然洪水过程。

(4) 为了便于水库的调度操作,每期不宜太短,即分期不宜太多。

(5) 要满足工程设计的需要,例如为选择截流时间,合理安排施工计划,常需求出枯水期、平水期和洪水期的设计洪水或分月设计洪水。

(6) 分期设计洪水的计算方法原则上与全年设计洪水的计算方法相同,但其计算成果一般误差较大,要作认真的合理性分析^[3]。

3 基于分析理论的研究

3.1 分形理论方法

分形是指一种破碎的形体,其局部和整体之间存在着自相似性。由于科学研究和实际需要,在自相似性的概念中,逐渐加入了功能和信息的意义。分形维数(dimensionality)是分形理论中最核心的概念与内容,是刻划分形体复杂结构的主要工具,应用分形理论研究自然现象最重要的问题是如何解释分形维数的意义^[4]。

分维有多种定义,其中相似维数是最基本和最易理解的。

(1) 豪斯道夫维数。设集合 $A \subset E^n$, E^n 为 n 维欧氏空间, $\{E_i\}$ 为集合 A 的一个复盖, S 为一非负实数, $|E_i| \geq \delta$, 对于 $\delta > 0$, 定义 $H_\delta^S(A) = \inf \sum_{i=1}^{\infty} |U_i^S|$, 令 $\delta \rightarrow 0$, 其极限 $H^S(A)$ 称为集合 A 的 S 维测度。若存在一个非负实数 $D_H(A)$, 满足: ①若 $0 < S < D_H(A)$, 则 $H^S(A) = \infty$; ②若 $D_H(A) < S < \infty$, 则 $H^S(A) = 0$ 。那么 $D_H(A)$ 称为 A 的豪斯道夫维数。

(2) 相似维数。相似维数用于描述整体与部分严格相似的分形集合,其适用范围有限。若某集合 A 由与它相似的 $N(r)$ 个部分组成,并且相似比为 r , 则该集合的相似维数定义为:

$$D = -\frac{\log N(r)}{\log r}$$

(3) 盒维数。盒维数又称容量维,盒维数是应用最为广泛的维数之一。设 A 是 n 维欧氏空间 E^n 的一个子集,用 $N(\delta, A)$ 表示复盖集合 A 所需直径最大为 δ 集的最少数目。

3.2 分形理论在水文领域的应用

由于水文水资源中普遍存在的自相似现象,自相似意味着标度不变性,分形理论将不同尺度下的水文变量通过标度变换联系起来,因此水文尺度问题的研究往往与分形理论结合起来。水文尺度问题研究和分形理论在水文水资源中的应用包括以下几个方面的内容:水系河网结构和流域地形地貌及其演变,河床表面形态及其演变,降雨时空分布,径流过程的分形特征,暴雨时空分布,洪水时空分布,土壤水、下渗水与地下水,以及产汇流模型中的尺度问题等。

3.3 基于容量维算法的洪水分期研究

根据上述容量维数的定义,就可以推算径流、洪峰点据关于时间系列的容量维数。具体步骤为:

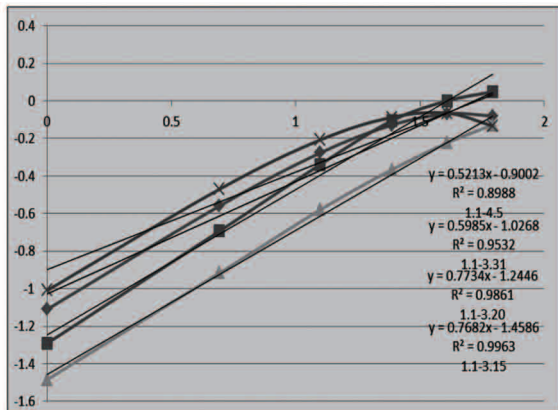
- (1) 取样本点据系列: $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$;
- (2) 按样本发生的时间先后顺序, 将样本点绘在以时间为横坐标、样本值为纵坐标的坐标系中, 这就是通常所说的样本散布图;
- (3) 根据样本点据的跨度, 确定总时段长 T ;
- (4) 取定能反映某一洪水分期的样本固定值 Y_Q ;
- (5) 取某一时段长作为时间尺度, 量度样本值 X_i 超过 Y_Q 的时段数 $N(\varepsilon)$;
- (6) 根据总时段长 T 和时间尺度 ε , 计算相对的时间尺度 $NT = T/\varepsilon$;
- (7) 计算相对量度值 $NN(\varepsilon) = N(\varepsilon)/NT$;
- (8) 计算 $\ln NN(\varepsilon)$ 、 $\ln(\varepsilon)$, 并将 $(\ln(\varepsilon), \ln NN(\varepsilon))$ 点绘在 $\ln(\varepsilon) - \ln NN(\varepsilon)$ 相关图上;
- (9) 取变换的(不同的)时间尺度 ε , 重复上述(5)~(8)步, 获得一系列点;
- (10) 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 $D_b = 2 - b$;
- (11) 重复上述(1)~(10)步, 得到不同总时

段长为 T 的样本分形的容量维数 D_b , 如 D_b 在某一时段下为基本相等, 则这个 T 时段即为分形法确定的一个洪水分期。

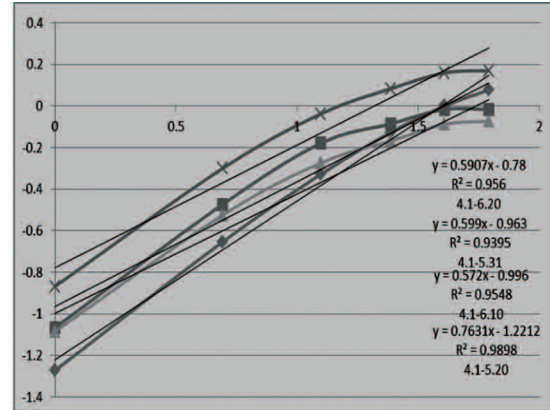
4 研究实例

根据 1950 ~ 2013 年洪泽湖逐日入湖流量计算成果, 考虑本次分形分析研究的最小时段为 1 d (即以 1 d 为步长), 研究对象为全年 (1 月 1 日 ~ 12 月 31 日) 洪水分期, 取历年汛期日最大日均流量作为研究系列样本。首先, 计算以 1 月 1 日为起点的第一洪水分期。先取第一分期时间为 1 月 1 日 ~ 3 月 15 日, 即 $T=75$, 同时, 取 $Y_Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (略大于平均流量) 作为固定流量, 变换不同的时间尺度 ε , 分别取 1 日、2 日、3 日……、29 日、30 日, 根据上述步骤, 就可绘制出 $\ln(\varepsilon) - \ln NN(\varepsilon)$ 相关图, 找到直线段及其斜率 b , 亦可求得该 T 分期的容量维数 $D_c = 2 - b$ 。

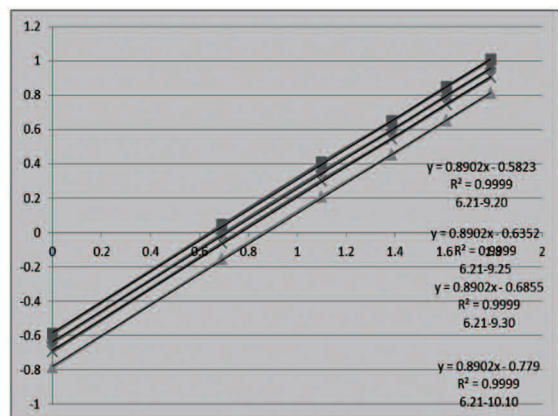
在一定范围内, 不断加长或缩短 T , 即可求得一组随 T 的 $\ln(\varepsilon) - \ln NN(\varepsilon)$ 关系直线, 具体见图 1。通过散点趋势线图可以看出, 随着时间尺



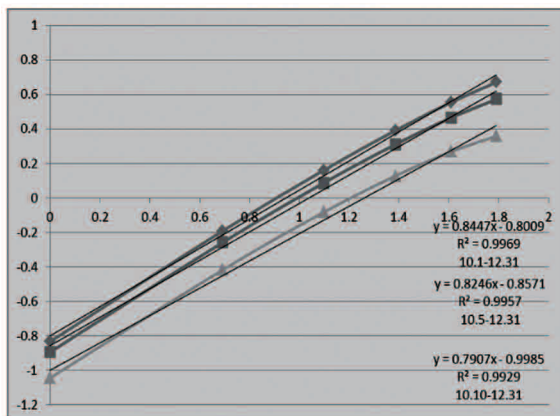
(a) 1 ~ 3 月容量维散点趋势图



(b) 4 ~ 5 月容量维散点趋势图



(c) 6 ~ 9 月容量维散点趋势图



(d) 10 ~ 12 月容量维散点趋势图

图 1 全年各分期容量维散点趋势图

度 ε 的加长, 一般 ε 取不大于 6 时, 线性关系较好。

20 日。

由表 3 可知, 由于峰值较为明显, 1、2、3、4 四个分期的容量维数绝对值相差在相对值 5% 以

全年各分期容量维计算表分别见表 1 ~ 4。

表 1 1 ~ 3 月不同分期容量维计算表

序号	日期			相关系数 R^2	斜率 b	容量维数
	T (日)	起 (月、日)	至 (月、日)			
1	75	1.1	3.15	0.9963	0.7682	1.2318
2	80	1.1	3.20	0.9861	0.7734	1.2266
3	91	1.1	3.31	0.9532	0.5985	1.4015
4	96	1.1	4.50	0.8988	0.5213	1.4787

由表 1 可知, 1、2 两个分期的容量维数绝对值相差在相对值 5% 以内, 基本相近, 故认为是同一个分期, 同理, 3、4 两个分期也认为是同一个分期, 为便于调度操作, 分期起止日期定为 1 月 1 日 ~ 3 月 31 日。

由表 2 可知, 2、3、4 分期的容量维数绝对值相差在相对值 5% 以内, 基本相近, 故认为是同一个分期, 分期起止日期定为 4 月 1 日 ~ 6 月

内, 为便于调度操作, 分期起止日期定为 6 月 20 日 ~ 9 月 30 日。

由表 4 可知, 1、2、3 分期的容量维数中, 10 月 1 日至 12 月 31 日的容量维最大。故认为 1、2、3 分期属于同一分期, 分期起止日期定为 10 月 1 日 ~ 12 月 31 日。

5 结 论

表 2 4 ~ 5 月不同分期容量维计算表

序号	日期			相关系数 R^2	斜率 b	容量维数
	T (日)	起 (月、日)	至 (月、日)			
1	50	4.1	5.20	0.9898	0.7631	1.2369
2	61	4.1	5.31	0.9395	0.5990	1.4010
3	71	4.1	6.10	0.9548	0.5720	1.4280
4	81	4.1	6.20	0.9560	0.5907	1.4093

表 3 6 ~ 9 月不同分期容量维计算表

序号	日期			相关系数 R^2	斜率 b	容量维数
	T (日)	起 (月、日)	至 (月、日)			
1	92	6.21	9.20	0.9999	0.8902	1.1098
2	97	6.21	9.25	0.9999	0.8902	1.1098
3	102	6.21	9.30	0.9999	0.8902	1.1098
4	112	6.21	10.10	0.9999	0.8902	1.1098

表 4 10 ~ 12 月不同分期容量维计算表

序号	日期			相关系数 R^2	斜率 b	容量维数
	T (日)	起 (月、日)	至 (月、日)			
1	92	10.1	12.31	0.9969	0.8447	1.1553
2	88	10.5	12.31	0.9957	0.8246	1.1754
3	83	10.1	12.31	0.9929	0.7907	1.2093

