

## 【防洪治河】

# 流域降雨量分形方法在水库汛期分期中的应用

魏 炜<sup>1,2</sup> 莫崇勋<sup>1</sup> 刘 俐<sup>1</sup> 姜庆玲<sup>1</sup> 孙桂凯<sup>1</sup> 蒋海艳<sup>1</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西交通职业技术学院, 广西 南宁 530023)

**摘 要:** 针对传统的水库汛期分期方法主观性大且分期判定指标因子单一的问题, 基于分形方法, 以降雨量为指标对澄碧河水库汛期进行了分期。在分期前, 先根据流域历史日均降雨量确定水库汛期的起讫时间, 再根据分形的聚类性确定水库分期的数量。结果表明: 澄碧河水库汛期为4月13日—10月31日, 其中前汛期为4月13日—6月6日、主汛期为6月7日—8月25日、后汛期为8月26日—10月31日。

**关 键 词:** 降雨量; 分形理论; 汛期; 澄碧河水库

中图分类号: TV697.1<sup>+</sup>1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.10.012

## Application of Watershed Rainfall Fractal Theory in Reservoir Flood Season Staging

WEI Wei<sup>1,2</sup>, MO Chong-xun<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, JIANG Qing-ling<sup>1</sup>, SUN Gui-kai<sup>1</sup>, JIANG Hai-yan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Vocation and Technical College of Communication, Nanjing 530023, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of traditional method of reservoir flood season staging of subjectivity and single index factor of staging determination, this paper explored the use of fractal theory in rainfall of the index factor on Chengbihe Reservoir flood season. In the staging process, according to the reservoir historical average daily rainfall, it determined the reservoir flood season start and end time and determined the number of installments of the reservoir based on fractal clustering. The results indicate that the flood season of Chengbihe Reservoir is from April 13 to October 31, of which, the early flood season is from April 13 to June 6, main flood season is from June 7 to August 25 and late - flood season is from August 26 to October 31.

**Key words:** rainfall; fractal theory; flood season; Chengbihe Reservoir

汛期是河湖出现大洪水最多的时段或者说是流域内季节性和定时性河水位上涨的时期<sup>[1-2]</sup>, 较大的降雨量是洪水形成和河水位上涨的必要条件。因此, 水库的汛期研究可以基于流域降水量来进行。

Mandelbrot 教授于 1975 年提出了分形(fractal)一词, 并指出分形主要是用来描述和处理粗糙或不规则的对象<sup>[3-5]</sup>。分形具有自相似性与标度不变性两个重要特性, 其揭示了非线性系统中有序与无序的统一以及确定性与非确定性的统一, 分形的定量化方法即分维<sup>[3]</sup>。

受到确定性因素影响而表现出周期性变化的水文过程, 依据分形理论可认为其具有自相似性<sup>[6-7]</sup>, 而汛期季节性和定时性的出现可认为具有相似机制。因此, 分形理论在汛期分期中得到了一定的应用。侯玉等<sup>[8]</sup>以洪峰流量为指标因子, 用分形理论对二滩电站水库进行了汛期分期研究; 董前进等<sup>[9-10]</sup>以日流量为指标因子, 用分形理论分别对三峡水库、漳河水库进行了汛期分期, 取得了较好的效果。综观分形理论在汛期分期中的应用, 存在以下共性: ①基本上是基于流量这个指标因子进行分析; ②一般都是根据水库所在地区或流域划分汛期与非汛期; ③在汛期分期过程中, 通常预先固定分期数目。

基于定时性发生一定量级的降雨量具有相似性的机制, 笔者

尝试以分形理论为基础进行两方面研究: ①依据水库历史日均降雨量来划分水库的汛期与非汛期; ②以降雨量为指标因子, 用分形理论对水库的汛期进行分期研究。

## 1 汛期分期中的分形方法

分形特征用分形维数这一定量参数来描述, 计算方法主要有以下 3 种: 信息维数、关联维数、容量维数<sup>[3]</sup>。本文用容量维数进行分析, 其步骤如下<sup>[10]</sup>。

(1) 获取汛期内的样本点据系列 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。

(2) 根据样本时段的起始长度和步长, 确定某时段长  $T$ , 单位为  $d$ 。

(3) 在时段  $T$  内选定能反映其样本的汛期分割水平  $Y$ , 单位为  $mm$ 。

(4) 分别取时间尺度(单位为  $d$ )  $\varepsilon = \{1, 2, \dots, 10\}$ , 并统计

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50969001); 广西自然科学基金资助项目(2012GXNSFAA053199); 广西大学科研基金资助项目(XBZ110592)。

作者简介: 魏炜(1988—), 男, 广西灌阳人, 硕士, 研究方向为水库调度。

通信作者: 莫崇勋(1974—), 男(壮族), 广西忻城人, 教授, 研究方向为水库调度。

E-mail: 184857740@qq.com

样本  $X_i$  超过分割水平  $Y$  的时段数  $N(\varepsilon)$ 。

(5) 根据该时段长  $T$  和不同时间尺度  $\varepsilon$ , 按式(1) 计算与  $\varepsilon$  对应的相对时间尺度  $NT(\varepsilon)$ :

$$NT(\varepsilon) = T/\varepsilon \quad (1)$$

(6) 按式(2) 计算相对量度值  $NN(\varepsilon)$ :

$$NN(\varepsilon) = N(\varepsilon) / NT(\varepsilon) \quad (2)$$

(7) 计算与各时间尺度  $\varepsilon$  相对应的  $\ln NN(\varepsilon)$ 、 $\ln \varepsilon$ , 并点绘  $\ln \varepsilon - \ln NN(\varepsilon)$  相关图。

(8) 在  $\ln \varepsilon - \ln NN(\varepsilon)$  相关图上, 选择无标度区间直线段并求出其斜率  $b$ , 由式(3) 可求得容量维数  $D_b$ :

$$D_b = 2 - b \quad (3)$$

(9) 若增大和减小  $T$ , 重复步骤(2) ~ (8) 所得的容量维数  $D_b$  基本相等, 则  $T$  为同一个分期。

(10) 重复步骤(1) ~ (9), 即可确定汛期的分期。

## 2 实例分析

澄碧水库位于广西壮族自治区百色市辖区, 属于珠江水系, 建库时间为1961年。水库总库容为11.5亿  $m^3$ , 属I等大(1)型水库工程, 是一座以发电为主综合利用的大型水利工程。由于缺乏水库实测入库流量资料, 因此无法对水库坝址洪水进行时序规律分析, 但其上游有平塘水文站, 距坝址39.6 km, 控制面积为1326  $km^2$ , 占坝址以上流域面积的67%, 该站洪水资料较齐全, 历时较长, 且与入库洪水的成因是一致的, 能代表入库洪水的时序规律。故笔者以平塘水文站1963—2011年49 a系列日降雨量为基础, 用分形理论进行汛期分期研究。

### 2.1 汛期与非汛期的划分

在汛期与非汛期划分中, 通常的做法是根据水库所在的地区或流域来确定。笔者认为, 特定的水库有特定的汛期, 并不能根据流域或地区一概而论。因此, 笔者尝试通过降雨量这个指标来划分汛期和非汛期。汛期主要是由季节性暴雨和冰雪融化所引起的<sup>[2]</sup>, 澄碧河水库的汛期主要是由季节性暴雨引起的。根据气象部门规定的降雨量等级的划分, 24 h内降雨量达到50 mm则为暴雨等级。笔者对平塘水文站1963—2011年49 a日降雨量进行分析, 发现日降雨量超过50 mm的样本有261个, 其旬分布见表1。

表1 平塘水文站1963—2011年暴雨样本的旬分布情况

月份	上旬	中旬	下旬
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	0	1
4	0	3	4
5	10	13	20
6	20	29	25
7	23	16	19
8	18	15	11
9	8	2	3
10	6	9	5
11	0	0	0
12	0	0	0

从表1可以看出, 4月中旬到10月下旬都出现过暴雨, 2月和3月下旬各有1次暴雨, 但因为分期不能破坏水文系列的时序性<sup>[11]</sup>, 故将2、3月下旬的2次样本舍掉。笔者认为汛期时

间段的判定在于连续发生超过特定暴雨等级的持续时间; 而汛期分期时间段的判定则主要考虑暴雨的等级, 因为只有暴雨形成足够大量级的洪水才能对水库构成威胁。以此分析剩余的样本数据, 发现出现暴雨的最早时间是1969年的4月13日, 最晚时间是2008年的10月31日, 由此可确定澄碧河水库的汛期为4月13日—10月31日, 共202 d, 非汛期为11月1日—次年4月12日, 共163 d。

### 2.2 汛期的分期

分形理论容量维数法要求样本是连续的, 因此在分期研究之前首先要推求连续的降雨量系列。根据平塘水文站49 a长系列逐日降雨量, 由式(4) 可推求汛期49 a的平均日降雨量:

$$H_j = \frac{\sum_{i=a}^b h_{ij}}{c-a+1} \quad (4)$$

式中:  $h_{ij}$  为系列中汛期某天的日降雨量,  $mm$ ;  $a$  为系列的起始年份, 本文为1963年;  $c$  为系列结束年份, 本文为2011年;  $j$  为汛期中的某天。

#### 2.2.1 分维计算过程

考虑到汛期变化规律的季节性以及其成因特点, 分期不宜太短, 一般以不短于30 d为宜<sup>[12]</sup>。以  $T=30$  d为起始计算时间段, 参照部分学者的计算经验, 当各分期的切割水平取该分期时段样本平均值的1.1倍时, 所求的  $\ln \varepsilon - \ln NN(\varepsilon)$  线性关系较好<sup>[8-10]</sup>, 故笔者采用这一处理方法, 计算结果见表2。

表2 第一分期分维计算结果

$Y/mm$	$T/d$	分期时段	$b$	$D_b$
65.0	30	04-13-05-12	0.547	1.453
71.4	40	04-13-05-22	0.575	1.425
74.8	50	04-13-06-01	0.569	1.431
73.8	55	04-13-06-06	0.563	1.437
75.3	60	04-13-06-11	0.389	1.611

从表2可知: 第一分期计算过程中,  $T=30, 40, 50, 55$  d时, 容量维数最大偏差值为0.028, 最大偏差值与其中最小容量维数比值仅为1.96%, 可以认为前面时段的容量维数基本相等, 处于同一分期;  $T=60$  d时, 容量维数值与前面各时段容量维数值最大偏差为0.186, 最大偏差值与最小容量维数值比值为13.05%, 相差比较大, 认为与前面时段不在同一分期。由此, 可确定汛期第一分期时间段为4月13日—6月6日。

同样的方法, 可得第二分期和第三分期的分维计算结果, 分别见表3、表4。

表3 第二分期分维计算结果

$Y/mm$	$T/d$	分期时段	$b$	$D_b$
113.4	30	06-07-07-06	0.499	1.501
105.0	40	06-07-07-16	0.493	1.507
100.0	50	06-07-07-26	0.509	1.491
100.7	60	06-07-08-05	0.490	1.510
103.0	70	06-07-08-15	0.483	1.517
98.0	80	06-07-08-25	0.489	1.511
97.3	85	06-07-08-30	0.342	1.658

从表3可知  $\ln \varepsilon - \ln NN(\varepsilon)$  斜率  $b$  在时段  $T=85$  d时发生突变, 前面各时段最大偏差值为0.026, 斜率值基本相等, 最

大偏差值与其中最小容量维数比值为 1.74% ,可视为同一分期。相应地 ,汛期第二分期时间段为 6 月 7 日—8 月 25 日。

表 4 第三分期分维计算结果

$Y/mm$	$T/d$	分期时段	$b$	$D_b$
64.5	30	08-26—09-24	0.529	1.471
64.0	40	08-26—10-04	0.519	1.481
64.5	50	08-26—10-14	0.523	1.477
62.0	60	08-26—10-24	0.523	1.477
62.0	67	08-26—10-31	0.501	1.499

从表 4 可知 ,8 月 26 日到汛期结束(10 月 31 日) ,各时段的容量维数值基本相等 ,最大偏差值为 0.028 ,与最小容量维数值比值为 1.9% ,故可视为同一分期。

根据上述分析 ,可确定澄碧河水库汛期分期数为三期 ,分别对应前汛期、主汛期、后汛期 ,见表 5。

表 5 澄碧河水库汛期分期结果

分期名	$Y/mm$	$T/d$	分期时段	$b$	$D_b$
前汛期	73.8	55	04-13—06-06	0.563	1.437
主汛期	98.0	80	06-07—08-25	0.489	1.511
后汛期	62.0	67	08-26—10-31	0.501	1.499

## 2.2.2 分期结果合理性分析

上述分期结果与文献[13]通过洪水频率分析对澄碧河水库进行汛期分期的结果基本一致 ,只是本文基于 49 a 系列流域日均降雨量 ,通过分形理论可将汛期精确到日;文献[9]在计算中把分形理论容量维数的相对误差小于 9.9% 视为同一分期 ,本文结果容量维数相对误差都小于 2% ,可见分期结果精度较高。根据 49 a 系列资料 ,流域发生日平均降雨量超过 250 mm 的特大暴雨有两次 ,分别是 1967 年 8 月 6 日、1977 年 6 月 27 日 ,都落在主汛期时间段。

根据澄碧河水库上游平塘站 2001—2010 年的洪水资料 ,统计每年洪水的起涨时间、截止时间、最大洪峰流量及出现日期 ,见表 6。

(上接第 38 页)中常洪水 ,平工段随时有堤防坍塌、发生重大险情的可能 ,严重威胁堤防安全。

河势在滑封形成 S 形河弯后 ,南王险工下端靠溜较好 ,南王一武陟河段 ,河势沿着 1998 年以前的流路行进 ,河势比较稳定。

## 4 武陟(水文站)—沁河入黄口河段河势变化

该河段长 24 km ,河道比降 0.028% ,主槽宽 440 m ,两岸平均堤距 1 100 m ,为沙质河床 ,河势基本稳定 ,属弯曲型河道。

武陟—老龙湾河段河道蜿蜒曲折 ,工程布点已基本完成 ,河势趋于稳定。当来水条件发生变化时 ,工程靠河部位变化不大 ,河势有上提下挫的现象。老龙湾至沁河入黄口河段受黄河下游河道的溯源淤积、冲刷的影响 ,河势摆动的范围不大 ,入黄口 c. s. 36 断面以下河道蜿蜒曲折 ,河势稍有变化。

表 6 平塘站 2001—2010 年洪水信息统计结果

年份	洪水起止时间	最大洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	最大洪峰流量 出现日期
2001	07-01—08-23	347	07-03
2002	06-01—07-02	548	06-16
2003	06-08—07-08	308	06-22
2004	07-10—08-15	347	07-10
2005	06-06—07-09	413	06-11
2008	06-02—06-23	435	06-12
2010	06-28—07-13	605	06-28

由表 6 可知 ,近几年每年发生的洪水都落在主汛期时间段内 ,最大洪峰流量也出现在主汛期时间段内。综合以上分析 ,本文分期结果是合理可信的。

## 参考文献:

- [1] 全国科学技术名词审定委员会.水利科技名词[M].北京:科学出版社,1997.
- [2] 严恺.水利词典[M].上海:上海辞书出版社,1991.
- [3] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [4] 刘式达,刘式适.分形和分维引论[M].北京:气象出版社,1995.
- [5] Mandelbrot B B. Fractal: Form ,Chance and Dimension [M]. San Francisco: Freeman ,1977.
- [6] 李长兴.论流域水文尺度化和相似性[J].水利学报,1995(1):40-46.
- [7] 丁晶,王文圣,金菊良.论水文学中的尺度分析[J].四川大学学报:工程科学版,2003,35(3):9-13.
- [8] 侯玉,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.
- [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,魏文生.分形理论在洪水分期研究中的应用[J].水利水电科技进展,2005,25(6):9-13.
- [11] 张建生,黄强,马永胜,等.水库汛期分期及其评价方法[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(10):229-232.
- [12] 长江水利委员会. SL44—93 水利水电工程设计洪水计算规范[S].北京:水利电力出版社,1993.
- [13] 莫崇勋,麻荣永.广西澄碧河水库汛期洪水分期及其汛期水位浮动控制运用研究[J].水文,2007,27(5):52-54.

【责任编辑 翟戌亮】

## 5 结 语

沁河下游没有进行过系统的河道整治 ,河道工程均为险工 ,没有控导河势的作用。近期由于来水来沙锐减 ,河势发生了较大的变化。根据河势套汇分析 ,河势变化较大的河段主要在丹河口—武陟的过渡型河段 ,河势上提下挫严重 ,溜势多变 ,形成“横河”、“斜河”、S 形等畸形河弯 ,危及堤防安全。因此 ,建议尽快把沁河下游的河道整治列入日程 ,研究沁河下游的河道治理方案 ,尽快实施 ,提高沁河下游堤防工程的防洪能力。

## 参考文献:

- [1] 张伟中,张文林,曹金刚,等.沁河志[M].郑州:黄河水利出版社,2009.

【责任编辑 许立新】