

石羊河下游年径流序列的变异点分析*

马 岚, 魏晓妹*

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了较准确地判断人类活动对石羊河径流的干扰点, 利用重新标度极差分析法(Rescaled Range Analysis), 对下游红崖山水库1956~2000年的入库径流序列进行了分析。结果表明, 径流序列变异年份为1977年, 以其为分界点的前后两个序列的统计特征值及回归方程均具有明显的差异, 这与石羊河流域水土资源开发利用情况基本一致, 说明变异点分析结果符合实际。由此可见, 自从20世纪70年代后期, 自然条件已不是影响石羊河下游径流变化的主要因素, 而上中游人类活动对径流起着主导作用。

关键词: 石羊河; 年径流; 变异点; 人类活动; R/S 分析

中图分类号: S273.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)02-0174-04

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部、祁连山北麓, 是我国西北内陆河流域灌溉农业发展最早、人口密度最大、社会经济发达、水资源开发利用程度最高、水资源供需矛盾最突出、生态环境问题最严重的区域。石羊河发源于祁连山区, 流经武威盆地并汇入下游民勤县境内, 其径流量主要由上中游灌溉渗漏形成的出露泉水和汛期洪水组成, 经汇集后流入位于民勤县城南的红崖山水库, 因此红崖山水库的入库径流量就反映了下游的径流量。石羊河的径流组成决定了红崖山水库入库径流的时空分布特点, 即受上游灌区人类活动影响较大^[1]。近几十年来, 由于上游祁连山区毁林开荒, 修建水库, 中游灌区工农业发展迅猛, 衬砌渠道, 打井提水, 使泉水溢出水量大幅度减少, 进而导致进入下游民勤的径流量锐减。由于受到人类大规模开发利用水土资源活动影响, 流域的下垫面条件和水循环条件改变, 使下游径流时间序列的统计特征值也发生了明显变化, 径流序列已不符合“一致性”的要求。因此必须对其进行分析、处理, 关键便是寻找序列的变异点, 即人类活动对石羊河下游径流的干扰点^[2]。研究干扰点, 一方面是使序列符合“一致性”要求的需要, 更重要的是使人们更加全面深刻地认识人类活动对石羊河流域水文过程的影响, 进而指导人们合理开发利用流域水土资源, 促进流域社会经济与生态环境的协调发展。

1 分析方法

R/S 分析法(Rescaled Range Analysis, 重新标

度极差分析法)是由英国学者赫斯特(H. E. Hurst)在总结尼罗河的多年水文观测资料时, 于1965年提出的一种处理时间序列的方法, 它在分形理论中有着重要的作用^[3,4]。该方法认为, 人类水事活动能使流域水文过程序列的分形特征值、赫斯特指数、分形维数发生明显变化, 使水文过程成为非平稳过程。因此, 可通过流域分形特征值、赫斯特指数、分形维数来判断水文过程的变异点。R/S 分析法的基本原理与方法如下:

考虑一个时间序列 $\{\xi_t\} \}, t = 1, 2, \dots, n$ 。对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义均值序列

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi_t, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

即 $\langle \xi \rangle_1 = \frac{1}{1} \sum_{t=1}^1 \xi_t = \xi_1$;

$$\langle \xi \rangle_2 = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^2 \xi_t = \frac{1}{2} [\xi_1 + \xi_2];$$

$$\begin{aligned} \langle \xi \rangle_3 &= \frac{1}{3} \sum_{t=1}^3 \xi_t \\ &= \frac{1}{3} [\xi_1 + \xi_2 + \xi_3]; \end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned} \langle \xi \rangle_n &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \xi_t \\ &= \frac{1}{n} [\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \dots + \xi_n]。 \end{aligned}$$

定义累积离差为:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} [\xi_u - \langle \xi \rangle_\tau] \quad (2)$$

* 收稿日期:2005-10-20
基金项目:国家自然科学基金重点项目(90202001)资助。
作者简介:马 岚(1981-),女,陕西宁强人,硕士,主要从事旱区水文水资源研究。E-mail:mlpzc@sina.com
通讯作者:魏晓妹,教授,长期从事水资源转化理论与调控技术。E-mail:weixiaomei57@tom.com
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

即 当 $\tau=1$ 时, $t=1$

$$X(1,1)=\sum_{u=1}^1[\xi_u]-\langle \xi_1\rangle=\xi_1-\langle \xi_1\rangle;$$

当 $\tau=2$ 时, $1\leq t\leq 2$

$$X(1,2)=\sum_{u=1}^1[\xi_u]-\langle \xi_2\rangle=\xi_1-\langle \xi_2\rangle;$$

$$\begin{aligned} X(2,2)&=\sum_{u=1}^2[\xi_u]-\langle \xi_2\rangle \\ &=[\xi_1]-\langle \xi_2\rangle+[\xi_2]-\langle \xi_2\rangle; \end{aligned}$$

当 $\tau=3$ 时, $1\leq t\leq 3$

$$X(1,3)=\sum_{u=1}^1[\xi_u]-\langle \xi_3\rangle=\xi_1-\langle \xi_3\rangle;$$

$$\begin{aligned} X(2,3)&=\sum_{u=1}^2[\xi_u]-\langle \xi_3\rangle \\ &=[\xi_1]-\langle \xi_3\rangle+[\xi_2]-\langle \xi_3\rangle; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X(3,3)&=\sum_{u=1}^3[\xi_u]-\langle \xi_3\rangle= \\ &[\xi_1]-\langle \xi_3\rangle+[\xi_2]-\langle \xi_3\rangle \\ &+[\xi_3]-\langle \xi_3\rangle; \\ &\dots\dots \end{aligned}$$

定义标准差为:

$$S(\tau)=\left|\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}[\xi_t]-\langle \xi_{\tau}\rangle\right|^{\frac{1}{2}},\tau=1,2,\dots,$$

n (3)

即:

$$\begin{aligned} S(1)&=\frac{1}{1}\sum_{t=1}^1[\xi_t]-\langle \xi_1\rangle^2 \\ &=[\xi_1]-\langle \xi_1\rangle^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(2)&=\frac{1}{2}\sum_{t=1}^2[\xi_t]-\langle \xi_2\rangle^2 \\ &=\frac{1}{2}\{[\xi_1]-\langle \xi_2\rangle^2+[\xi_2]-\langle \xi_2\rangle^2\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(3)&=\frac{1}{3}\sum_{t=1}^3[\xi_t]-\langle \xi_3\rangle^2= \\ &\frac{1}{3}\{[\xi_1]-\langle \xi_3\rangle^2+[\xi_2]-\langle \xi_3\rangle^2+[\xi_3]-\langle \xi_3\rangle^2\}; \end{aligned}$$

定义极差为

$$R(\tau)=\max_{1\leq t\leq \tau}X(t,\tau)-\min_{1\leq t\leq \tau}X(t,\tau),\tau=1,2,\dots,n$$

即:

$$\begin{aligned} R(1)&=\max_{1\leq t\leq 1}X(t,1)-\min_{1\leq t\leq 1}X(t,1) \\ &=\max\{X(1,1)\}-\min\{X(1,1)\} \\ &=X(1,1)-X(1,1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(2)&=\max_{1\leq t\leq 2}X(t,2)-\min_{1\leq t\leq 2}X(t,2) \\ &=\max\{X(1,2),X(2,2)\} \\ &\quad -\min\{X(1,2),X(2,2)\}; \end{aligned}$$

$$R(3)=\max_{1\leq t\leq 3}X(t,3)-\min_{1\leq t\leq 3}X(t,3)$$

$$\begin{aligned} &=\max\{X(1,3),X(2,3),X(3,3)\} \\ &\quad -\min\{X(1,3),X(2,3),X(3,3)\}; \\ &\dots\dots \end{aligned}$$

对于 $\{\xi_t\}$, $t=1,2,\dots,n$, 是相互独立、方差有限的随机序列,即布朗运动,赫斯特和费勒证明了如下结果:

$$R(\tau)/S(\tau)=(\pi\tau^2)^H\tag{5}$$

其中 $H=1/2$ 。

对于 $\{\xi_t\}$, $t=1,2,\dots,n$, 不是相互独立的分维布朗运动,可以证明:

$$R(\tau)/S(\tau)=(c\tau)^H\tag{6}$$

其中 H 为赫斯特指数。

由于一维布朗运动样本函数的赫斯特指数 H 与其分维数 D_0 之间有如下关系:

$$D_0=2-H\tag{7}$$

我们求任意的一维布朗运动样本函数的分维 D_0 时,可以先对其数据用上述方法进行 R/S 分析,用线性回归方法从下式中算出 H :

$$\ln\frac{R(\tau)}{S(\tau)}=H\ln c+H\ln\tau\tag{8}$$

进而由 $D_0=2-H$ 求出 D_0 。分维 D_0 表示运动轨迹的不平滑和运动的激烈程度。所以对于一维布朗运动样本函数,随着 H 的减小, D_0 的增大,其运动轨迹的平滑程度越差,变化越激烈。可见,赫斯特指数 H 与分布式布朗运动的分维密切相关,它表示分布式布朗运动的持久性(或反持久性),这从一个侧面反映了赫斯特指数的意义。 H 的具体计算方法如下:

$$\text{令 } \ln\frac{R(\tau)}{S(\tau)}=Y, \ln(\tau)=X$$

$$\text{则 } Y=H\ln c+HX\tag{9}$$

通过对 Y 和 X 进行线性回归分析,可确定 H 和 $H\ln c$ 值。

2 径流序列变异点分析

由于红崖山水库的入库径流量反映了石羊河流域下游的径流量,因此为了判断人类活动对石羊河下游径流的干扰点,本文以红崖山水库 1956~2000 年的入库径流序列为分析对象,借助上述 R/S 分析法来进行径流序列变异点的诊断。

将红崖山水库入库径流序列作为分布式布朗函数的取值 $\{\xi_t\}$, $t=1,2,\dots,45$ 。首先按照上述分析步骤分别计算得到序列的标准差 $S(\tau)$ 和极差 $R(\tau)$ ($\tau=1,2,\dots,45$) (见表 1),进而可得公式(9)的形式,通过线性回归分析,计算得 $H=1.042$, $H\ln c=$

-1.1050, 所以样本回归方程为

$R(\tau)/S(\tau) = 0.3312\tau^{0.42}$

表 1 原序列的标准差和极差

Table 1 Standard difference and range difference of original serial

τ	$S(\tau)$	$R(\tau)$	τ	$S(\tau)$	$R(\tau)$	τ	$S(\tau)$	$R(\tau)$
1	0	0	16	0.7005	3.1251	31	1.1366	15.1496
2	0.2670	0.2670	17	0.7328	2.8000	32	1.1478	15.8869
3	0.2654	0.3740	18	0.7598	3.1852	33	1.1614	16.6425
4	0.4075	0.6025	19	0.7971	3.6057	34	1.1642	17.2408
5	0.4546	0.8742	20	0.8412	4.5148	35	1.1844	18.0471
6	0.4200	0.9320	21	0.8831	5.6069	36	1.2106	18.9256
7	0.5991	1.4033	22	0.9174	6.6834	37	1.2434	19.9229
8	0.6644	1.9430	23	0.9707	7.9472	38	1.2402	20.4571
9	0.6382	2.1157	24	0.9887	8.8570	39	1.2524	21.2293
10	0.7197	2.4450	25	1.0227	9.9282	40	1.2689	22.0480
11	0.7099	2.7903	26	1.0466	10.8869	41	1.2821	22.8175
12	0.7870	3.3884	27	1.0796	11.9305	42	1.2969	23.5992
13	0.7585	3.4766	28	1.0868	12.6675	43	1.3173	24.4701
14	0.7405	3.3087	29	1.1066	13.5446	44	1.3391	25.3733
15	0.7170	3.2457	30	1.1269	14.4165	45	1.3545	26.1904

由于 $H > 1/2$, 因此入库径流时间序列作为分布运动的轨迹表现出持久性, 也就是说, 入库径流过去的一个增长或减少趋势意味着将来的一个增长或减少趋势, 且入库径流统计数据表现出了一定的非随机性。

从变异点的定义^[2]可知, 在变异点处, 制约系统的因素发生变异, 分维数 D_0 发生较大变化, 即赫斯特指数 H 发生较大变化。因此, 为了确定序列的变异点, 需寻找 H 变化较大的点。为此, 分别以 $\xi(t)$,

$t = 15, 16, \dots, 31$ 为分界点将原序列分为两部分 (即以此点为前一部分的结束点和后一部分的起始点), 对这两部分分别进行 R/S 分析, 相应的赫斯特指数记为 H_1 和 H_2 , 然后求出 H_1 与 H_2 之差的绝对值 ΔH , 逐个比较, 找出 ΔH 最大的那一点, 即为变异最大点。这一点是与所分析的其他样本点相比较而言的, 因而是相对的。基于上述计算思路, 并借助 Matlab 程序, 计算得到一系列 ΔH 值, 见表 2。

表 2 不同分段年径流序列赫斯特指数及其差异

Table 2 The Hurst indexes and their annual differences of runoff serials in different divisions

t	H_1	H_2	ΔH	t	H_1	H_2	ΔH
15	0.8062	0.8843	0.0781	24	0.7932	0.9669	0.1737
16	0.7893	0.9208	0.1315	25	0.8168	0.9942	0.1774
17	0.7515	0.8993	0.1478	26	0.8396	1.0048	0.1652
18	0.7276	0.9186	0.1910	27	0.8611	0.9446	0.0835
19	0.7125	0.9361	0.2236	28	0.881	0.9448	0.0638
20	0.7135	0.9299	0.2164	29	0.8994	0.9785	0.0791
21	0.7265	0.9358	0.2093	30	0.9164	0.9082	0.0082
22	0.7462	1.0008	0.2546	31	0.9319	0.8491	0.0828
23	0.7693	0.9655	0.1962				

从表 2 可以明显看出, $t = 22$ (对应 1977 年) 时, ΔH 值最大, 因此诊断这一点为变异最大点, 即 1977 年为红崖山水库入库径流序列变异年份。

为了验证以上计算结果, 以 1977 年为分界点将原序列分为两部分 (1956~1977 年和 1977 ~2000 年), 分别求出前后两个径流序列的统计特征值(均值, C_v , C_s) 以及回归方程进行比较分析, 结果见表 3。

由表 3 可诊断出, 前后两个序列的统计特征值及回归方程均具有明显的差异, 已经不符合一致性的要求, 因此 1977 年为红崖山水库 1956~2000 年入库径流序列的变异点是准确的。

同时, 大量研究资料表明^[5,6], 流域人类大规模地开发利用水土资源也正是始于上世纪 70 年代。由于上游祁连山区毁林开荒, 修建水库, 中游灌区工业发展迅猛, 衬砌渠道, 打井提水, 使泉水溢出水量大

幅度减少,进而导致进入下游的径流量锐减。这说明变异点分析结果与石羊河流域水土资源开发利用情况基本一致,是符合实际的。

表3 1956~1977 和 1977~2000 年径流序列统计特征值及回归方程

Table 3 The statistical eigenvalues and regression equations of runoff serials during in 1956~1977 and 1977~2000		
项 目 Item	1956~1977	1977~2000
均值(10^8 m^3) Mean value	4.1937	1.9524
变差系数 C_v Coefficient of vatiance	0.2239	0.2713
偏差系数 C_s Coefficient of skewness	0.155	-0.286
回归方程 Regression equation	$y = -0.1015x + 5.3612$ ($R^2 = 0.4929$)	$y = -0.0677x + 2.7293$ ($R^2 = 0.8047$)

3 结 论

本文以石羊河下游红崖山水库 1956~2000 年的入库径流序列为分析对象,借助R/S 分析法,对人类活动对石羊河下游径流的干扰点进行了诊断。得到了如下结论:

1) 由于入库径流时间序列的 $H = 1.042 > 1/2$, 因此序列作为分布运动的轨迹表现出持久性,也就是说,入库径流过去的一个增长或减少趋势意味着将来的一个增长或减少趋势,且入库径流统计数据表现出了一定的非随机性。

2) 诊断 1977 年为红崖山水库 1956~2000 年入

库径流序列的变异年份。以该年为分界点的前后两个序列的统计特征值及回归方程均具有明显的差异,表明径流序列已经不符合一致性的要求,因此确定 1977 年为红崖山水库入库径流序列变异年份是准确的。同时,变异点分析结果与石羊河流域水土资源开发利用情况基本一致,是符合实际的。

3) 由于红崖山水库入库径流序列变异点反映了人类活动对石羊河下游径流的干扰点,因此可以看出,自从 20 世纪 70 年代后期,自然条件已不是影响石羊河下游径流的主要因素,而上中游以水土资源开发为主的人类活动对径流起着主导作用。所以,必须对水土资源进行合理开发利用,否则,石羊河下游径流量将持续减少,长此以往发展下去,民勤将成为第二个“罗布泊”。

参 考 文 献:

[1] 钟华平,刘 恒,顾 颖. 石羊河下游民勤水资源与生态环境治理对策[J]. 西北水资源与水工程, 2002, 13 (1) : 10-13.

[2] 王孝礼,胡宝清,夏 军. 水文时序趋势与变异点的R/S 分析法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35 (2) : 10-12.

[3] 黄 勇,周志芳,王锦国,等. R/S 分析法在地下水动态分析中的应用[J]. 河海大学学报, 2002, 30 (1) : 83-87.

[4] 赵 晶,王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25 (1) : 90-95.

[5] 袁生禄. 石羊河流域水资源大规模开发对生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1991, 5 (3) : 44-51.

[6] 陈隆享,曲耀光. 河西地区水土资源及其合理开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

Analysis on aberrance point of annual runoff serials in the downstream of Shiyang River

MA Lan, WEI Xiao-mei

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University Yangling, Shaanxi 712100, China.)

Abstract: In order to exactly determine the disturbance point of human activities to the runoff in Shiyang River, this paper analyzed the serial of runoff into the Hongyashan Reservoir in the lower reaches from 1956 to 2000 by R/S analysis (Rescaled Range Analysis) . The results showed that, the aberrance year of the runoff sequence was 1977. There were significant differences between both the statistical eigenvalues and the regressive equations of the two sequences divided by 1977. This approximately accorded with the status of exploitation and use of water and land resources in the Shiyang River basin, which showed that the analysis result of the aberrance point was reliable. Thus it could be seen that since later 1970s, the natural conditions have not been the main factor that influences the change of runoff in the downstream of Shiyang River, and human activities in the upper and middle reaches have produced a dominant effect on the runoff.

Key words: Shiyang River; annual runoff; aberrance point; human activities; R/S analysis