

石羊河流域年径流序列的变异诊断

邓建伟¹, 宋松柏², 卢书超¹

(1 甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000;

2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 采用重新标度极差分析法(R/S分析方法),对石羊河流域8条河流的年径流序列进行了变异诊断,计算了变异前后序列均值和年径流随时间的变化关系。结果表明,石羊河流域8条河流的年径流序列已发生了变异,变异年份分别为:杂木河1989年,西营河1989年,金塔河1973年,黄羊河1982年,古浪河1984年,大靖河1959年,东大河1967年,西大河1960年。经回归分析表明,对这些变异年份的诊断是合理的。

[关键词] 重新标度法(R/S分析法);年径流序列;变异点;石羊河流域

[中图分类号] TV121⁺.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)04-0121-04

由于受水文循环、自然条件和人类活动的影响,水文情势在时间和空间上往往会发生变异,破坏了水文资料的一致性,这时就需要了解和诊断水文时间序列在什么时期和哪些地区的分布规律发生了明显变异,从而为水文模拟及其预测、分析计算等工作提供可靠的依据^[1-3]。文献[1]首次将分形理论中的重新标度极差分析法(R/S分析方法, Rescaled Range Analysis)应用于水库年来水量变化的趋势分析和变异诊断研究。本文将R/S分析方法应用于石羊河流域的水文序列研究,分析其年径流的变化趋势,并对年径流序列的变异进行诊断,以期对石羊河流域的综合治理提供参考。

1 流域概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠南缘,地理位置为东经101°41'~104°16',北纬36°29'~39°27',流域面积4.16万km²。流域内干旱少雨,日照强烈,蒸发量大,属于大陆性温带干旱气候。流域水系发源于南部的祁连山区,自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等8条河流组成,以山区大气降水和高山冰雪融水为主要补给来源。

石羊河流域上游山区为主要产流区,产流面积1.1万km²。中游走廊平原绿洲区与下游荒漠区基本上不产生地表径流。近年来,石羊河流域人口迅速增长,经济快速发展,城镇化趋势加快,对自然状态下

的水文、气象等要素产生了干扰,尤其是对上游祁连山森林植被的人为砍伐、过度放牧以及矿业开发和开荒种植,使水循环要素、过程和水文情势等发生了变化,从而引起流域水文序列的变异。

2 R/S 分析方法

变异点是由自然或人为原因引起的,是水文序列急剧变化的一种形式,通常在水文序列从一种状态过渡到另一种状态时表现出来^[4]。

R/S分析法是赫斯特在大量实证基础上提出的一种时间序列统计方法,其在分形理论中有着重要作用。其基本原理和方法^[2,5]如下:

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

$$\bar{\xi}_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), \tau=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

累积离差为:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \bar{\xi}_{\tau}], 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

定义标准差为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \bar{\xi}_{\tau}]^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \tau=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

定义极差为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau); \tau=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

* [收稿日期] 2005-08-11

[基金项目] 科学技术部“西部开发科技行动”重大项目(2003BA901A15)

[作者简介] 邓建伟(1980-),男,河北唐山人,助理工程师,主要从事水文与水资源研究。E-mail: djw415@163.com

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

$$R(\tau)/S(\tau) = (\pi\tau/2)^H \quad (5)$$

其中分形特征值 $H=1/2$ 时, 对于 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \dots, n$, 不是相互独立的分式布朗运动, 可以证明:

$$R(\tau)/S(\tau) = (c\tau)^H \quad (6)$$

式中, c 为常数。

由于一维分式布朗运动样本函数的分形特征值 H 与其分维 D_0 之间有如下关系:

$$D_0 = 2 - H \quad (7)$$

求任意的一维分式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, 用线性回归方法由下式算出 H , 即

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

进而可由 $D_0 = 2 - H$ 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, 所以对于一维分式布朗运动样本函数, 随着 H 的减小和 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 与分式布朗运动的分维密切相关, 其表示分式布朗运动的持久性(或反持久性), 这从一个侧面阐明了赫斯特指数的意义。

3 流域主要河流变异点诊断

如果流域受到自然及人类大规模活动的影响, 引起自然条件、下垫面条件改变, 就会使该流域水文序列的分形特征值 H 指数、分维 D_0 发生明显变化, 此时水文序列称为非平稳序列。因此, 可以通过流域

水文序列的分形特征值 H 指数、分维 D_0 的变化, 找出该水文序列的变异点。下面以杂木河为例进行分析。

3.1 变异点诊断

利用杂木河1950~2000年的年径流序列作为分式布朗运动函数 $\{\xi(t), t=1, 2, \dots, n\}$ 的取值, 对所给的序列进行 R/S 分析, 并进行直线拟和, 得到各时段年径流分式布朗运动模型, 样本的回归方程为:

$$R(\tau)/S(\tau) = 0.3958\tau^{0.8602}$$

于是得到 $H=0.8602$, 由于 $H > 0.5$, 因此年径流时间序列作为分式布朗运动的轨迹表现出持久性。从平均的观点来看, 来水量过去的增长趋势可预示将来的增长趋势, 过去的减少趋势可预示将来的减少趋势, 同时也暗示着来水量统计数据表现出了一定的非随机性。

因分形研究的是具有特定特征的无序序列, 当分形的制约因素发生变化时, 分形和分维值也随之发生变化。由于 H 与 D_0 的直线变化, H 的变化可以反映 D_0 的变化, 故 H 变化较大处, 即为制约系统的因素发生变异处, 此处即为变异点。为此, 分别以 $\xi(t)$ ($t=10, 11, \dots, n-10$) 为分界点将原始数据分为两部分(即以此点为前一部分的结束点), 对这两部分进行 R/S 分析, 相应的 H 指数记为 H_1 和 H_2 , 然后求出 H_1 与 H_2 之差的绝对值 $\Delta H = |H_1 - H_2|$, 逐个比较, 找出 ΔH 最大点, 则视这一点为变异最大点, 相应便可诊断出变异年份。这一变异最大点是与所分析的其他样本点相比较而言的, 因而是相对的。杂木河年径流分段分析计算结果见表1。

表1 杂木河年径流分段分析

Table 1 Rescaled range analysis of annual river runoff

序号 Number	H_1	H_2	ΔH	序号 Number	H_1	H_2	ΔH
1	0.6541	0.6211	0.0330	17	0.8196	0.6374	0.1822
2	0.6210	0.6412	0.0202	18	0.8261	0.6713	0.1548
3	0.6006	0.7156	0.1150	19	0.8319	0.6548	0.1771
4	0.5975	0.6374	0.0399	20	0.8374	0.6645	0.1729
5	0.6210	0.5457	0.0753	21	0.8423	0.6706	0.1717
6	0.6396	0.6307	0.0089	22	0.8470	0.6386	0.2084
7	0.6668	0.6099	0.0569	23	0.8507	0.6869	0.1638
8	0.6992	0.5763	0.1229	24	0.8540	0.6742	0.1798
9	0.7269	0.6669	0.0600	25	0.8565	0.7159	0.1406
10	0.7420	0.6942	0.0478	26	0.8592	0.6749	0.1843
11	0.7573	0.6640	0.0933	27	0.8619	0.6645	0.1974
12	0.7697	0.7200	0.0497	28	0.8643	0.6847	0.1796
13	0.7813	0.7189	0.0624	29	0.8666	0.6937	0.1729
14	0.7927	0.6610	0.1317	30	0.8704	0.5373	0.3331
15	0.8022	0.6586	0.1436	31	0.8748	0.5254	0.3494
16	0.8116	0.6190	0.1926	32	0.8781	0.6721	0.2060

由表1可知,在序号31对应的点处(对应于1989年) ΔH 最大,因此,杂木河年径流序列变异诊断年份为1989年。以诊断的变异年份1989年作为分段点,分别对1950~1989年和1990~2000年的数据进行R/S分析并进行分段拟合,1950~1989年样本的H指数为0.8748,其回归方程为:

$$R(\tau)/S(\tau) = 0.3868\tau^{0.8748}$$

1990~2000年样本的H指数为0.5254,回归方程为:

$$R(\tau)/S(\tau) = 0.5472\tau^{0.5254}$$

为了验证以上计算结果的准确性,分别求出前后两个序列的均值并进行比较。杂木河1950~1989年年径流序列的均值为2.5426亿 m^3 ,1990~2000年年径流序列的均值为2.1093亿 m^3 ,二者均值具有明显的差异。用 y 表示年径流序列, t 表示时间序

列($t=1, 2, 3, \dots, n$),将杂木河前后两个年径流序列分别与时间进行直线回归分析,得杂木河1950~1989年和1990~2000年年径流序列的回归方程分别为 $y = -0.0185t + 2.9226$, $y = -0.0229t + 2.246$ 。比较杂木河前后两个序列的均值和回归方程可知,前后两个序列已经明显不符合一致性的要求,因此判断1989年为杂木河1950~2000年年径流序列的变异点是准确的。

3.2 主要河流变异点诊断结果

运用同样的分析方法,对石羊河流域的另外7条河流进行诊断,最后得到的8条河流年径流序列变异点分析结果见表2。依据诊断结果,计算了变异前后序列的均值和年径流随时间的变化过程,见表3。

表2 石羊河流域8条河流的变异点及回归方程

Table 2 Change points and regression equations of eight branches in Shiyang River basin

河流 Branches	回归方程 Equation	变异点 A berrance point	变异前后年径流序列回归方程 Fore-and-aft equations	
			时段 Period	回归方程 Equation
杂木河 Zam u river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.3958\tau^{0.8602}$	1989	1950~1989	$R(\tau)/S(\tau) = 0.3868\tau^{0.8748}$
			1990~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.5472\tau^{0.5254}$
西营河 Xiying river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4695\tau^{0.7621}$	1989	1950~1989	$R(\tau)/S(\tau) = 0.486\tau^{0.7554}$
			1990~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.6386\tau^{0.4422}$
金塔河 Jinta river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.455\tau^{0.835}$	1973	1950~1973	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4424\tau^{0.8477}$
			1974~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.6386\tau^{0.4422}$
黄羊河 Huanyang river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4695\tau^{0.7621}$	1982	1950~1982	$R(\tau)/S(\tau) = 0.424\tau^{0.7677}$
			1983~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.6897\tau^{0.4797}$
古浪河 Gulang river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4658\tau^{0.8084}$	1984	1950~1984	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4363\tau^{0.8459}$
			1985~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.8803\tau^{0.3891}$
大靖河 Dajing river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4661\tau^{0.7972}$	1959	1950~1959	$R(\tau)/S(\tau) = 0.5454\tau^{0.6784}$
			1960~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.7309\tau^{0.4329}$
东大河 Dongda river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.5304\tau^{0.7783}$	1967	1950~1967	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4445\tau^{0.8806}$
			1968~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.743\tau^{0.5142}$
西大河 Xida river	$R(\tau)/S(\tau) = 0.7316\tau^{0.6410}$	1960	1950~1960	$R(\tau)/S(\tau) = 0.4912\tau^{0.8813}$
			1961~2000	$R(\tau)/S(\tau) = 0.5918\tau^{0.5305}$

表3 石羊河流域8条河流的年径流均值及其回归方程

Table 3 A verage and regression equation of annual runoff sequence in Shiyang River basin's eight branches

河流 Branches	时段 Period	变异前后 均值/ m^3 Fore-and- aft average	回归方程 Equation	河流 Branches	时段 Period	变异前后 均值/ m^3 Fore-and- aft average	回归方程 Equation
杂木河 Zam u river	1950~1989	2.54×10^8	$Y = 0.0185t + 2.9226$	古浪河 Gulang river	1950~1984	0.82×10^8	$Y = -0.0073t + 0.9472$
	1990~2000	2.11×10^8	$Y = -0.0229t + 2.246$		1985~2000	0.62×10^8	$Y = -0.0045t + 0.6529$
西营河 Xiying river	1950~1989	3.86×10^8	$Y = -0.0165t + 4.1975$	大靖河 Dajing river	1950~1959	0.24×10^8	$Y = 0.0096t + 0.1837$
	1990~2000	2.76×10^8	$Y = -0.0308t + 2.8891$		1960~2000	0.12×10^8	$Y = 0.0005t + 0.1139$
金塔河 Jinta river	1950~1973	1.55×10^8	$Y = -0.0289t + 2.9026$	东大河 Dongda river	1950~1967	3.36×10^8	$Y = -0.0631t + 3.9753$
	1974~2000	1.31×10^8	$Y = -0.0027t + 1.3445$		1968~2000	2.93×10^8	$Y = -0.0107t + 3.1067$
黄羊河 Huanyang river	1950~1982	1.44×10^8	$Y = -0.0149t + 1.6947$	西大河 Xida river	1950~1960	1.82×10^8	$Y = -0.0088t + 3.9753$
	1983~2000	1.26×10^8	$Y = -0.0292t + 1.534$		1961~2000	1.58×10^8	$Y = 0.0025t + 1.4683$

3.3 物理成因分析

一般可根据下列因素来帮助确定人类活动对水文生态系统的影响: 引起下垫面条件变化的人类活动情况; 水资源开发利用现状; 水质污染和环境情况^[6]。近年来, 杂木河上游祁连山产流区的人为砍伐、过度放牧、开矿挖药和毁林毁草开荒种植, 使山区的植被覆盖率只有40%左右, 造成的结果是植被涵养水源能力减弱、保水能力降低, 水土流失面积增大, 从而破坏了水文的有序循环过程。自20世纪70年代以来, 随着农业生产的迅速发展、城镇化趋势的加大及人口的迅速增加, 势必会造成人类对自然环境的破坏及其对流域水质的影响。据统计^[6], 全流域目前土地沙化面积已达2.22万km², 占流域总面积的53.3%。同时由于对石羊河流域的开发利用, 造成石羊河干流地表流量减小、流程缩短、河道自净

能力减弱、水环境容量减小、纳污能力下降、下游地下水水质严重恶化等问题日趋加剧。

4 结论

1) 对水文序列的变异诊断, 应用R/S分析方法能准确诊断出变异年份, 检验分辨率较高, 同时根据石羊河流域的现状并从物理成因上分析, 增强了诊断结果的可靠性。

2) 运用R/S分析法, 分析了单变点情况下石羊河流域年径流的变异情况, 并计算了石羊河流域8条河流的分形特征值 H , 通过前后序列的分形特征值 H 之差 $\max(\Delta H)$, 判断水文序列变异点。其中于1959~1970年发生变异的有3条河流; 于1970~1980年发生变异的有1条河流; 于1980~1990年发生变异的有4条河流。

[参考文献]

- [1] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文序列趋势与变异点的R/S分析法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(2): 10-12
- [2] 丁晶, 刘权授. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [3] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- [4] 谢平, 陈广才, 李德, 等. 水文变异综合诊断方法及其应用研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(2): 11-14
- [5] 黄登仕, 李后强. 分形几何学R/S分析法与分式布朗运动[J]. 自然杂志, 1990, 13(8): 477-482
- [6] 甘肃省水利水电勘测设计研究院. 石羊河流域近期综合治理报告[R]. 甘肃兰州: 甘肃省水利科学研究院, 2003

Diagnosing aberrance point of hydrological sequence in Shiyang River basin using R/S method

DENG Jian-wei¹, SONG Song-bai², LU Shu-chao¹

(¹ Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou, Gansu 730000, China;

² College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The article deals with researches on the hydrologic sequence of Shiyang River basin. The aberrance point of the hydrologic sequence were found out by using R/S (Rescaled Range Analysis) method for all eight branches. The average values of annual runoff sequence at fore-and-aft changes were calculated. The equations of annual runoff sequence and time were regressed. As an example, aberrance happened in the annual runoff sequence of Shiyang River basin's 8 branches, and the aberrance point was: Zamu River, 1989; Xiyang River, 1989; Jinta River, 1973; Huangyang River, 1982; Gulang River, 1984; Dajing River, 1959; Dongda River, 1967; Xida River, 1960. The result is rational.

Key words: Rescaled Range Analysis; annual runoff sequence; aberrance point; Shiyang River basin