

文章编号: 1006-4710(2014)02-0170-05

渭河流域水文变异诊断研究

朱悦璐¹, 畅建霞^{1,2}, 刘宸岩³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 西安市地下道有限责任公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 利用分数布朗运动及 R/S 分析理论, 将相关函数与 Hurst 系数结合在一起, 从整体上识别与判定渭河流域的水文变异及其变异程度。诊断结果表明: 泾河流域降雨与径流序列变异不明显, 变异程度为无变异, 渭河中上游及整个渭河流域的降雨序列均为弱变异, 渭河流域径流序列为中变异, 渭河中上游径流序列变异最为明显, 为强变异。

关键词: 变异诊断; R/S 分析; Hurst 系数; 渭河流域

中图分类号: P333.9 **文献标志码:** A

The research on the hydrological variation diagnosis of the Weihe River basin

ZHU Yuelu¹, CHANG Jianxia^{1,2}, LIU Chenyan³

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Xi'an City Underground Railway Limited Liability Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Based on the fractional Brownian motion and R/S analysis theory, some related functions combined with Hurst coefficients are employed to recognize and determine the hydrological variations and their variation degrees on the whole in the weihe river basin. The results of the diagnosis suggest that: the variation of precipitation and runoff series in the Jinghe basin is not obvious, and the degree of the variation is no variation, the variation of precipitation series in the middle and upper reaches of the Weihe River basin and the whole Weihe River basin is weak alteration, the variation of the runoff series in the Weihe River basin is moderate alteration, the variation of runoff in the middle and upper reaches of the Weihe River basin is the most obvious, strong alteration.

Key words: variation diagnosis; R/S analysis; Hurst coefficient; Weihe River basin

水文资料的一致性为水文模拟、水文分析、水文计算以及流域水资源规划等工作提供重要的依据^[1-3], 假若水文资料的一致性遭到破坏, 将会使水文预测的精度大大降低, 因此水文资料一致性研究具有重要的意义。邓建伟^[4]使用 R/S 分析方法对石羊河流域的 8 条河流的年径流量进行了变异分析, 认为石羊河流域的 8 条河流的年径流序列均已发生了变异。拜存有^[5]采用基于灰色系统差异信息测度理论的逐时段滑动分割比较序列法对渭河的 4 个干流站的年径流量进行了变异诊断。Zhang Qiang^[6]通过使用两阶段回归法对珠江流域的马口、三水以

及博罗站进行了水文变异分析。Yang yonghui^[7]运用 Mann-kendall 法对海河流域径流进行了水文变异分析, 并且发现其变异点在七十年代末八十年代初。然而上述研究只是在跳跃或者趋势一个侧面对水文变异进行分析, 缺乏整体水文变异的判断^[8]。此外, 上述研究均停留在判断某一水文序列变异与否, 只是对变异进行简单的定性判断, 并未对变异程度进行划分, 而在实际的应用中, 知晓水文资料的变异程度更具有现实意义。

鉴于此, 受谢平^[8]教授的启发, 本文基于 R/S 分析原理, 运用 Hurst 系数能够定量描绘时间序列

收稿日期: 2014-02-15

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(510093); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2012490511)。

作者简介: 朱悦璐, 男, 博士生, 研究方向为水资源配置、水库调度、边坡稳定。E-mail: yuelu_zhu@163.com。

畅建霞, 女, 教授, 博导, 博士, 研究方向为水文水资源。E-mail: chxiang@xaut.edu.cn。

长期相关性的特点,结合 Hurst 系数与相关函数值对渭河流域的水文序列变异及其变异程度进行研究。

1 研究区域及数据

渭河流域位于 $34^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $104^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,流域的地貌十分复杂,大致可分为陕北、陇东黄土高原,渭河谷地以及秦岭山地^[9]。流域为大陆性季风气候,春季温暖少雨,夏季雨热同期,秋季凉爽湿润,冬季寒冷少雨。流域降雨空间分布不均,由东南向西北递减。流域降水年内分配不均且年际变化大,汛期降水量约为年降水量的 65%。自从国家实行西部大开发以来,渭河流域尤其是关中天水一带经济社会发展迅速,工业用水、农业用水量剧增,加之全球

气候变暖的影响,渭河流域的径流量呈显著下降趋势,渭河流域水文情势存在变异的可能^[10]。鉴于渭河流域水安全的重要性,对该流域的水文变异诊断分析具有重要的意义。为了使研究结果更有说服力,将研究区域划分为林家村水文站以上流域,该区域代表渭流域的中上游;张家山水文站以上流域,该区域代表渭河最大的支流泾河流域,华县水文站以上流域,该区域表示整个渭河流域。

本研究涉及的数据有渭河流域 21 个气象站的 1960—2010 年的年降雨序列;林家村、张家山以及华县水文站的 1960—2010 年的年径流序列,各个站点所在的位置如图 1 所示。数据来源于中国国家气象中心,数据在使用之前进行了三性审查,所用数据皆通过了三性审查。

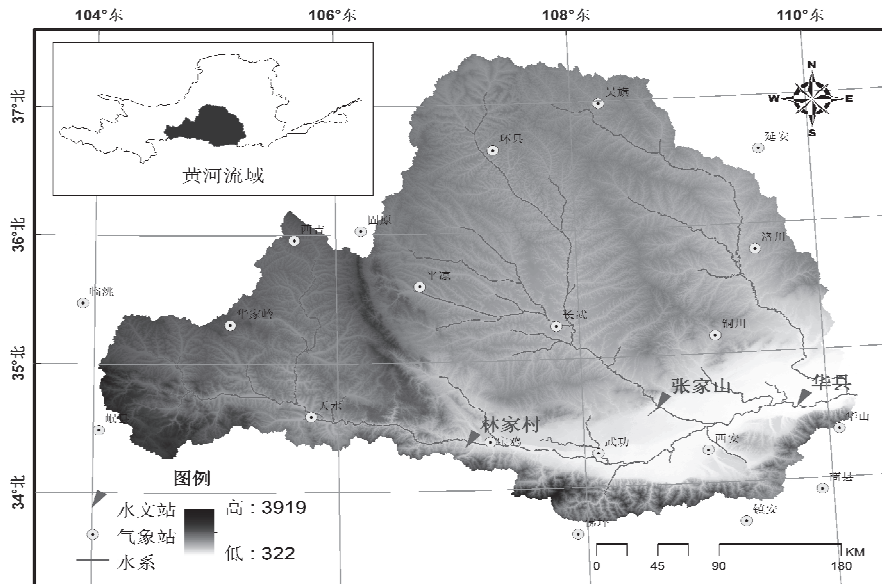


图 1 研究区域及站点位置

Fig. 1 Study area and the position of the stations

2 研究方法

2.1 R/S 分析方法

R/S 分析法是由赫斯特在经过反复实证的基础上提出的一种有关时间序列的统计方法,该方法在分形理论中起着举足轻重的作用。其基本原理与方法^[11-12]如下。

假设某一时间序列为 $\{X(t)\}$, $t=1, 2, \dots, n$ 。对于任意的正整数 $\tau \geq 1$, 均值序列可表示为:

$$U_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} X(t) \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

累积离差可表示为:

$$D(t, \tau) = \sum_{i=1}^t [X(i) - U_{\tau}] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

标准差可表示为:

$$S(\tau) = \left| \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [X(t) - U_{\tau}]^2 \right|^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

定义极差为:

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

当随机序列(分式布朗运动) $\{X(t)\}$, $t=1, 2, \dots, n$, 是相互独立并且其方差是有限时,可以证明:

$$R(\tau)/S(\tau) = (c\tau)^h \quad (5)$$

式中, c 为常数。

根据实测资料,求其对数,然后利用最小二乘法即可求得参数 c 以及 Hurst 系数 h 。

2.2 分数布朗运动与相关函数的关系

由分形理论的创始人曼德布罗特提出的分数布朗运动是将分形理论与随机过程相结合的产物^[12]。它不但可以描述粒子的随机运动,而且能够揭示粒子运动的时间增量与位移增量的标度性质。其标度律的指数 H 揭示了粒子振动的长期相关性。

指数 H 和它的相关函数 C 的关系如下式所示^[12-14]:

$$C(t) = \frac{E[B_H(-t)B_H(t)]}{E[B_H(t)]^2} = 2^{2H-1} - 1 \quad (6)$$

2.3 水文变异分析原理

当 Hurst 系数 $h=0.5$ 时,对应的分数布朗运动的相关函数 $C=0$,此时的序列为随机序列;当 $h>0.5$ 时, $C>0$,此时分数布朗运动表现为正相关,表明该序列未来的发展趋势受过去和现在的影响,并与其变化趋势一致,反之亦然^[8]。

相关函数的大小反映了水文序列未来发展趋势受过去及现在的影响程度, C 越接近于 0,则序列的相关性越不明显,其未来的发展趋势受过去及现在的影响程度越小, C 越接近于 -1 或者 1,则表明水文序列相关性越强,其未来的发展趋势受过去及现在的影响程度越大^[8]。由此可知,能够通过水文序列相关函数的大小判定某一水文序列是否变异及其变异程度^[8]。

2.4 水文变异分析方法

目前,定性分析是判断变异的主要方法,但若不了解水文序列的变异程度,则无法实际应用。基于此,本文应用分数布朗运动相关函数和 Hurst 系数,将水文变异的程度进行等级划分(本文只展示正相关变异程度分级的部分,负相关类似)^[8]。

1) 基于 R/S 分析原理^[8],将水文序列相关函数 C 值与 Hurst 系数求出;

2) 对相关函数 C 值在给定的显著性水平为 α 的条件下进行假设检验;

3) 当 C 值小于临界值 r_α 时,表明该序列的长期相关性并不显著,反之,当 C 值大于临界值 r_α 时,说明该序列的变异是显著的。

2.5 变异程度的划分

本文在假设检验中取 $\alpha=0.05$, $\beta=0.01$ 。当 $C<r_\alpha$ 时,将该变异程度划分为无变异;当 $C>r_\beta$ 时,则该水文序列变异显著。基于这种原理,变异等级还能根据其相关程度进一步细分。通常,水文序列的相关系数大于 0.8 时认为其相关性较好,故而该相关系数可以通过一定显著性水平的假设检验(如 0.01、0.05、0.1 等)^[8]。当某一水文序列未来径流

量^[8]与其过去径流量的相关函数值 $C \geq 0.8$ 时,表明过去径流量对未来径流量的影响非常显著,故认为该序列的持续性很强。因此从变异的角度来分析,当 $C > 0.8$ 时,这一序列的变异程度可划分成巨变异。

在水文过程的研究中,通常要求不少于 20 的长系列资料,这是因为如资料长度过短,会导致较大的抽样误差^[8]。因此,当水文系列的自由度为 18,长度为 20 时,在常规的显著性水平下, r_α 的最大值介于 0.561 4 和 0.6 之间(当自由度 >18 ,且其显著性水平是 0.01、0.05、0.1 时相关系数的最大临界值 r_α 是 0.561 4)。由此可知,当序列长度大于 20 且其相关函数值 $C > 0.6$ 时,该相关函数值均能通过假设检验,表明未来径流量受过去径流量影响的程度显著^[8]。故从水文变异的视角上看, C 值介于 0.6 与 0.8 之间的序列变异显著,本文把这个区间内的变异程度划分成强变异。当某一水文序列的相关函数满足 $r_\beta \leq C < 0.6$,则表明过去径流量在一定程度上影响未来径流量。因此本研究将这一情形划分成中变异^[8]。

综上所述,可知因相关函数 C 划分后所处的区间不同,其序列的变异程度亦不同,可分为巨、强、中、弱和无变异几种情况,由此便完成了序列的变异判定以及变异程度的识别^[8]。在实际应用中,相关函数 C 不易计算,因此通过公式(6)将相关系数转换成 Hurst 系数来对变异进行分等定级,如表 1 所示。

表 1 变异程度等级划分表
Tab. 1 Classification of alteration degree

相关函数 C	Hurst 系数 h	变异程度
$0 \leq C < r_\alpha$	$0.5 \leq h < h_\alpha$	无变异
$r_\alpha \leq C < r_\beta$	$h_\alpha \leq h < h_\beta$	弱变异
$r_\beta \leq C < 0.6$	$h_\beta \leq h < 0.839$	中变异
$0 \leq C < 0.8$	$0.839 \leq h < 0.924$	强变异
$0.8 \leq C < 1.0$	$0.924 \leq h < 1.0$	巨变异

其中:

$$h_\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\ln(1+r_\alpha)}{\ln 2} \right) \quad \alpha > \beta \quad (7)$$

3 结果与讨论

采用基于 Hurst 系数的水文变异分析方法,分别对渭河流域、林家村以上流域以及张家山以上流域的年径流与降雨序列进行变异诊断,序列长度均为 1960—2010 年共 51 年。取显著性水平 $\alpha=0.05$,

$\beta=0.01$,经过 R/S 分析法,计算出研究区水文序列的 Hurst 系数值,以及相关函数值 C 并对其定义了变异程度,其结果见表 2。

表 2 水文序列变异分析结果
Tab. 2 The analysis results of alteration of hydrological series

时间序列	相关系数 C	Hurst 系数 h	变异程度
渭河中上游降雨序列	0.368	0.722	弱变异
泾河降雨序列	0.045	0.535	无变异
整个渭河流域降雨序列	0.357	0.714	弱变异
渭河中上游径流序列	0.615	0.839	强变异
泾河径流序列	0.061	0.550	无变异
整个渭河流域径流序列	0.455	0.768	中变异

将表 1 和表 2 进行对比分析,可知林家村以上流域降雨序列的相关函数值 $C=0.368$,而 $r_{0.05}=0.31 < 0.368 < r_{0.01}=0.39$,说明该序列虽然没有通过显著性水平 $\beta=0.01$ 的假设检验,但通过了 $\alpha=0.05$ 的假设检验,因此认为该序列具有相对弱的相关性,其变异程度应为弱变异。同样地,渭河流域降雨序列的相关函数值为 0.357,介于 $r_{0.05}$ 与 $r_{0.01}$ 之间,其变异程度亦为弱变异。张家山以上流域降雨及径流序列的相关函数值分别为 0.045 和 0.061,均小于 $r_{0.05}$,且接近于 0,表明这两个序列未来径流量几乎不受过去径流量的影响,其变异程度都是无变异。渭河流域径流序列的相关系数值为 0.455,介于 $r_{0.01}$ 和 0.6 之间,因此该序列的变异程度应为中变异。林家村以上径流序列的相关系数值最大,为 0.615,介于 0.6 和 0.8 之间,由此可以判定该序列的变异程度应该属于强变异。据马晓超^[15]的研究结果可知,渭河林家村站年平均流量有显著下降趋势,其生态水文指标的整体改变度是 70.61%,为高度改变。因此,该结论侧面印证了本文结论的正确性。

通过表 2 可以看到,变异程度最强的是渭河中上游径流序列,其次是渭河流域径流序列,而泾河流域的降雨和径流序列变异程度最小,均为无变异。由此可见,泾河流域的水文资料的一致性相对稳定。进一步分析可以发现,渭河中上游流域与整个渭河流域的降雨及径流序列的变异程度不一致,径流的变异程度均大于降雨的变异程度。由于降雨是径流的主要来源,尤其是在渭河流域。在无人类活动影响的前提下,年降雨序列与年径流序列的变异程度应该一致,由此可以推断主要是人类活动的影响包括取水量的增加,下垫面的改变以及水利工程建设等加剧了年径流序列的变异程度。其中,渭河中上

游径流序列的变异主要是由于灌区的取水,而整个渭河流域的径流序列变异主要是由于灌区取水、水利工程建设、水土保持措施的实施。相比之下,泾河流域人类活动对于径流序列的变异程度影响较小。

为进一步分析本研究区的 6 个水文序列的相对变异程度,用模比系数将各序列进行转换。 $(K_i = x_i/\bar{x})$,该方法可以消除均值大小带来的影响,如图 2~4 所示。

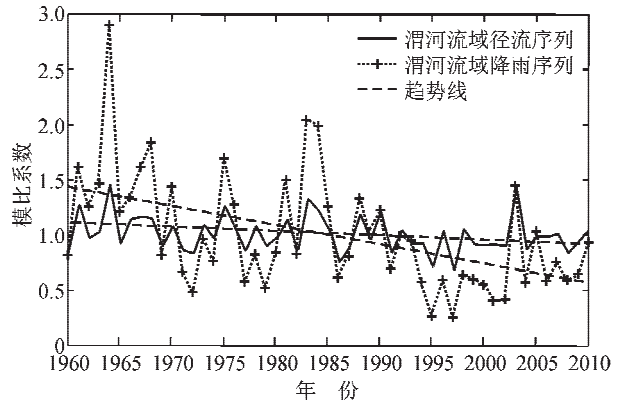


图 2 渭河流域水文序列模比系数图

Fig. 2 Figure of modulus coefficient of hydrological series in Weihe River basin

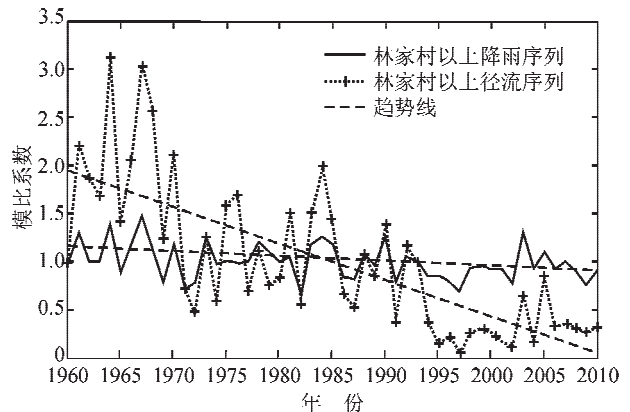


图 3 渭河中上游水文序列模比系数图

Fig. 3 Figure of modulus coefficient of hydrological series in the middle and upper reaches of the Weihe River basin

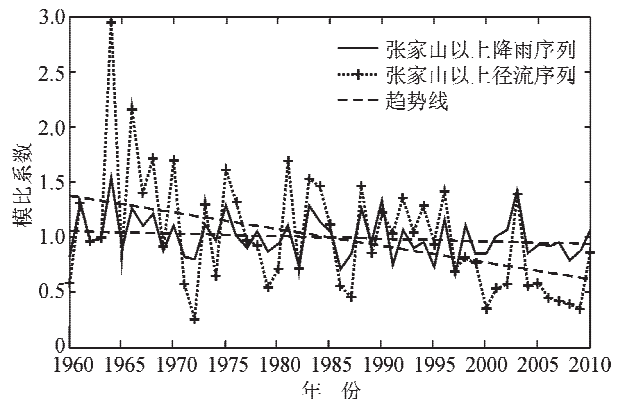


图 4 泾河水文序列模比系数图

Fig. 4 Figure of modulus coefficient of hydrological series in the Jinghe

综合表 2 及图 2~4 可以发现,当水文序列无变异时,用水平线表示,随着 Hurst 系数值由 0.5 趋近于 1,水平线和其对应的模比系数过程线的线性趋势线之间的夹角逐渐加大,这说明相应线性趋势线的斜率在增加,该现象即表明了序列的变异程度不断随之增强,这一结论与基于 Hurst 系数和相关函数法判定序列的变异程度相吻合。

4 结 论

为了从整体上识别与判断水文序列变异及其变异程度,本文基于分数布朗运动与 R/S 分析理论,将 Hurst 系数与相关函数值划分为若干区间,不同区间值对应于不同的变异程度,这一方法可以有效地判断出某一序列是否变异及其变异程度。将该法应用于渭河流域水文变异诊断分析,得出以下结论。

1) 根据显著水平以及水文相关分析理论,将变异程度细化为无变异、弱变异、中变异、强变异和巨变异 5 个等级,能够准确地反映出水文序列的变异程度;

2) 计算结果表明:泾河流域降雨与径流序列变异不明显,变异程度为无变异,渭河中上游及整个渭河流域的降雨序列均为弱变异,渭河流域径流序列为中变异,渭河中上游径流序列变异最为明显,为强变异;

3) 泾河流域降雨与径流序列的变异程度比较一致,由于人类活动的影响,渭河中上游及整个渭河流域径流序列的变异程度均大于降雨序列的变异程度;

4) 时间序列的 Hurst 系数值与其模比系数过程线的斜率为正相关的关系。

参 考 文 献:

[1] 李艳玲, 畅建霞. 基于谐波小波的径流序列变异检测[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(5): 208-212.
Li yanling, Chang jianxia. Detection of the abrupt changes in runoff based on harmonic wavelet [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.), 2013, 41(5): 208-212.

[2] 宋策, 李靖, 周孝德. 基于水生态分区的太子河流域水生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 7-12.
Song Ce, Li Jin, Zhou Xiaode. Research on water eco-

logical carrying capacity in taizi river basin based on water ecological district[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1): 7-12.

- [3] 李靖, 周孝德. 叶尔羌河流域水生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 249-255.
Li Jin, Zhou Xiaode. Research on water ecological carrying capacity of yarkant river basin[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3): 249-255.
- [4] 邓建伟, 宋松柏, 卢书超. 石羊河流域年径流量序列的变异诊断[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(4): 121-124.
Deng Jianwei, Song Songbai, Lu Shuchao. Diagnosing aberrance point of hydrological sequence in shiyang river basin using R/ S method[J]. Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.), 2006, 34(4): 121-124.
- [5] 拜存有. 基于差异信息理论的渭河年径流变异点诊断[J]. 人民黄河, 2009, 31(7): 29-30.
Bai Cunyou. The diagnosis of change point in wei river based on differences in information theory[J]. Yellow River, 2009, 31(7): 29-30.
- [6] Qiang Zhang, Chong-Yu Xu, Yongqin David Chen, Jianmin Jiang. Abrupt behaviors of the streamflow of the Pearl River basin and implications for hydrological alterations across the pearl river delta, China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377, 274-283.
- [7] Yonghui Yang, Fei Tian, 2009. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2009 374, 373-383.
- [8] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 32-38.
Xie Ping, Chen Guangcai, Lei Hongfu. Hydrological alteration analysis method based on hurst coefficient [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 32-38.
- [9] 张宏利, 陈豫, 任广鑫, 等. 近 50 年来渭河流域降水变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 236-241.
Zhang Hongli, Chen Yu, Ren Guangxin, et al. The characteristics of precipitation variation of weihe River basin in shaanxi province during recent 50 years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 236-241.

(下转第 186 页)