

文章编号: 1006-4710(2012)03-0322-04

基于 Morlet 小波的径流突变检测

李艳玲^{1,2}, 畅建霞¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 将小波理论引入径流序列的变异检测, 从理论上证明了 Morlet 小波系数的过零点有可能是时间序列的突变点, 对过零点进行统计检验, 确定真实的突变点。分析渭河华县站 1961—2006 年径流尺度变化特征, 形成各种尺度正负相间的震荡中心, 其 3 个明显的周期变化规律分别为: 1972 年以前华县站的年均径流量基本以 10 年为周期产生振荡; 1982—2001 年基本以 7~8 年为周期振荡; 在 14~16 年周期非常显著, 且具有全域性。找到 15 年尺度下可能的突变点, 应用 Yamamoto 检验法进行进一步的诊断, 识别出 1972 年、1982 年、1994 年为径流突变点。

关键词: Morlet 小波; Yamamoto 检验; 突变; 渭河

中图分类号: F830. 5 **文献标志码:** A

Detection of the Abrupt Changes in Runoff Based on the Morlet Wavelet

LI Yanling^{1,2}, CHANG Jianxia¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. North China Institute of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Wavelet theory is introduced into the runoff sequence abrupt change detection in this paper. It has been proved theoretically that the Morlet wavelet coefficients of zero can be abrupt change point, and that a statistical test is carried out to determine the true point. This paper analyzes the runoff-scale variation behaviors from 1961 to 2006 in the Wei River of Huaxian station, forming the center of various scales alternated with positive and negative shocks. There are three obvious changing patterns, before 1972, the average annual runoff in the Huaxian station produced the oscillation based on a 10-year cycle; from 1982 to 2001, the oscillation occurred on the basis of 7~8 year cycle. The runoff series in the 14 to 16 years cycle is very significant, with a domain-wide in Huaxian station. To identify possible mutations in the 15-year scale, Yamamoto inspection method is used to carry out the further diagnosis, and to identify the abrupt changes in 1972, 1982 and 1994.

Key words: Morlet wavelet; Yamamoto inspection; abrupt change; Wei River

近年来, 全球气候变化和人类活动导致的下垫面变化, 造成了水文系统循环时空分布范围与尺度的改变, 也造成了径流的时空变异, 并带来了一系列诸如水文极值事件、洪涝灾害、严重干旱频繁发生等新的问题, 破坏了水文序列的一致性。因此, 研究变化环境下的径流序列变异规律对于水资源兴利减

灾、高效持续利用等具有重要的现实意义。目前对变异规律的研究主要是采用线性回归法^[1]、两阶段线性回归^[2]、Mann-Kendall 法^[3,4]、Pettitt 检验^[5]、贝叶斯变点分析模型^[6-7]以及 R/S(重新标度极差分析方法)^[8]等。

传统变异检测法通常是数理统计法中用以进行

收稿日期: 2012-05-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2011CB403306); 国家公益性行业科研专项基金资助项目(201001012、201101049-01); 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX07212-002-003-004)。

作者简介: 李艳玲(1978-), 女, 河南尉氏人, 副教授, 博士生, 研究方向为水资源系统工程研究。E-mail: liyanling@ncwu.edu.cn。畅建霞(1974-), 女, 山西祁县人, 教授, 博导, 研究方向为水资源系统工程研究。E-mail: chxiang@xaut.edu.cn。

趋势变异的诊断,而单一统计法对于小数据集辨识和诊断检测的能力不足,加之单一法难以对引起径流序列变异成因进行定性解释,难以辨别突变前后系统的非线性特征,因此在实际应用中受到了一定的限制。本研究首先从理论上证明了 Morlet 小波系数的过零点是拐点即可能的变异点,找出渭河华县站 1951-2006 年所有可能的变异点,然后采用 Yamamoto 检验法进行进一步的诊断,从而判断出真实的变异点。

1 变异点的确定

1.1 Morlet 小波

小波分析是上世纪 80 年代中后期发展起来的一门新兴的数学分支。所谓小波变换是将一个时间序列分解为具有时域和频域局部特征的小波。对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义见式(1),即:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Morlet 小波是常用的非正交小波,在时域和频域都具有很好的局部性。它的一般数学表达式为:

$$\psi(t') = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{icr} e^{-\frac{1}{2}t'^2} \quad (2)$$

其中, $t' = \frac{t-b}{a}$, $a > 0$ 是尺度参数; b 为位置参数; C 为常数。

容易证明^[9-10]:

$$\frac{d^2 g}{dt^2} = \psi(t) \quad (3)$$

$$g(t) = e^{iat} \left[e^{-\frac{t^2}{2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} t \operatorname{Erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (4)$$

其中, $\operatorname{Erf}(t)$ 是高斯分布的积分,即:

$$\operatorname{Erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-t^2} dt$$

1.2 褶积与突变点的确定

褶积的定义为:

$$f(t) * \psi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \psi(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

其中, “*” 表示褶积。对褶积进行求导,得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [f(t) * \psi(t)] &= \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \psi(t-\tau) d\tau = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \frac{d\psi(t-\tau)}{dt} d\tau = f(t) * \frac{d\psi(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

同理,可以证明:

$$\frac{d^2}{dt^2} (f * g) = f * \frac{d^2 g}{dt^2} \quad (7)$$

综合(1)、(5)、(7)式,有:

$$W(a, b) = f * \psi \quad (8)$$

小波变换就是函数 $g(t)$ 与 $f(t)$ 褶积后的二阶导数,由导数理论知 $W(a, b) = f * \psi$ 的拐点就是 $\frac{d^2}{dt^2} (f * g)$ 的过零点,对应 $f(t)$ 可能的突变点。由于函数的单调性和凸性,过零点有可能是虚假突变点。

1.3 Yamamoto 检验

在 Yamamoto 检验法中,对于长度为 n 的时间序列 x ,均值为 \bar{x} ,方差为 S 。设置某一刻为基准点,基准点前后样本量分别为 n_1 和 n_2 ,两段子序列的平均值为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ,方差为 S_1 和 S_2 ,定义信噪比为:

$$SBN = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{S_1 + S_2} \quad (9)$$

在(9)式中两子序列均值差的绝对值为序列变化信号,其变率 $(S_1 + S_2)$ 被视为噪声。

对同一时间序列 x ,设 $\tau = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}}{S}$,定义统计量为:

$$t = \sqrt{\frac{n_1(n-2)}{n-n_1(1+\tau)}} \cdot \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}}{S} \quad (10)$$

当子序列容量 $n_1 = n_2 = M_H$ 时,由 t 检验公式(10),可以得到(11)式,即:

$$t > SBN \sqrt{M_H} \quad (11)$$

若 $M_H = 10$, $SBN = 1$,则 $|t| > 3.162$,给定显著水平 $\alpha = 0.01$,得到 $t_{0.01} = 2.878$,当 $|t| > t_\alpha$ 时,超过给定显著水平,两段子序列的均值存在显著差异,在所选的基准点上发生了突变。即 $SBN > 1.0$ 时认为在该时刻有突变发生, $SBN < 1.0$ 时则认为在该时刻是虚假突变。

2 研究区域概况

渭河是黄河第一大支流,发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧,全长 818 公里,流域面积 13.43 万平方公里,流域范围主要在陕西省中部,东至陕西省渭南市,于潼关县汇入黄河。渭河流域属大陆性气候,受全球变暖、蒸发、降水丰枯变化等影响,流域内降水明显减少。同时由于近 50 年来流域内修建各种蓄水、引水工程对水资源进行调控,使得径流的天然状态发生了改变。在气候变化和人类活动的双重驱动下,流域水文情势发生了显著变化,造成原有水文资料的一致性和代表性被破坏,动摇了工程水

文分析计算的基础。因此,迫切需要研究现阶段流域水文的变异情势。

本研究选取渭河流域具有代表性的华县观测站 1961—2006 年共 46 年的径流序列分析,样本序列见图 1。

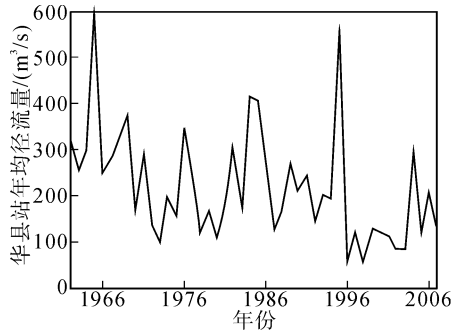


图 1 华县年均径流序列图
Fig. 1 The chart of annual runoff time series (1961 to 2006) in Huaxian station

3 突变分析

3.1 诊断结果

应用 Morlet 小波对华县站 46 年径流序列进行连续小波变换,小波变换系数的实部等值线图如图 3 所示,图 3 中等值线为正值则表示径流量较大;等值线为负值则表示径流量偏小。小波变换后得到的小波系数过零点可能是水文时间序列上的突变点。

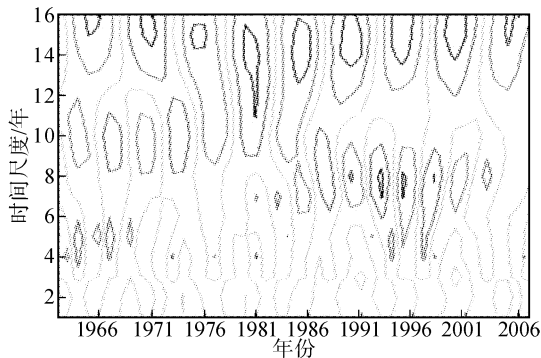


图 2 华县站径流序列 Morlet 小波系数等值线
Fig. 2 Morlet wavelet coefficient contour of runoff in Huaxian station

由图 2 可以看出,渭河华县段近 46 年的径流序列包含了多个不同尺度的周期变化,形成各种尺度正负相间的振荡中心,存在明显的年代和年际变化。主要存在 3 个明显的周期变化规律,1972 年以前华县站的年均径流量基本以 10 年为周期产生振荡;1986—2001 年以 7~8 年为周期产生振荡。而该径流序列在 14~16 年周期非常显著,且具有全域性,共经历了 9 次循环交替,见图 3。

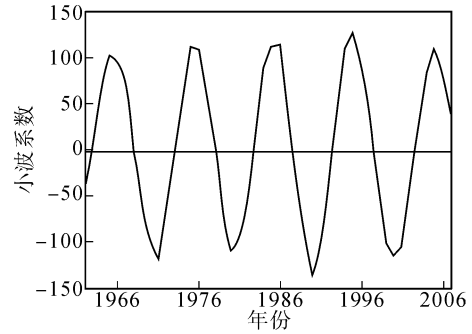


图 3 Morlet 小波系数的曲线图
Fig. 3 The curve of Morlet wavelet coefficients

图 3 中有 9 个过零点,分别是 1962 年、1967 年、1972 年、1977 年、1982 年、1986 年、1992 年、1994 年、2002 年。利用 Yamamoto 检验法可求出对应的信噪比和突变的真假性,如表 1 所示。由于 Yamamoto 法需要除去突变点两端的 7 个时期的平均值,且选取的是某一时间段,故对 1962 年第一个过零点和 2002 年最后一个过零点不予考虑。

表 1 华县站径流序列变点

年份	SBN	Yamamoto 检验
1967	0.967 9	假
1972	1.121 1	真
1977	0.771 8	假
1982	1.711 2	真
1986	0.176 2	假
1991	1.286 0	假
1994	0.762 4	真

由表 1 可知,1972 年、1982 年、1994 年是渭河华县站径流时间序列的真实突变点。而 1967 年、1977 年、1986 年、1996 年虽然是小波系数的零点,但并不具备水文突变的特征。

相对于传统的突变检测方法,由于突变在小波系数为零的时间上发生,因此可以有效地识别出突变点。另外,本研究从均值的变化揭示突变的发生,见图 4。

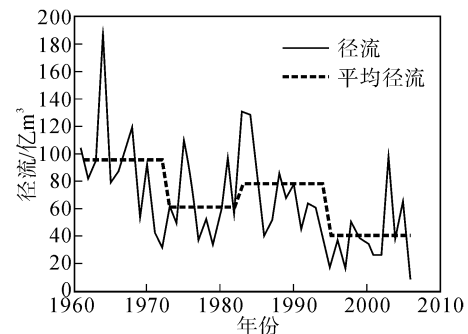


图 4 年径流与均值变化图
Fig. 4 The chart of annual runoff and average runoff change

从图 4 可以看出在径流突变年份的前后, 均值差别也比较大, 从而说明了本研究方法的有效性。

3.2 成因分析

径流的突变受气候因素和人类活动的双重驱动, 分析可知渭河华县站径流存在 3 个突变点。渭河流域属大陆性季风气候, 使其形成了渭河流域径流突变的副热带环流背景, 加之新的 ENSO (即: EL NIÑO/SOUTHERN OSCILLATION) 事件的形成和发展造成了北半球大气环流和我国气候异常, 因而渭河流域降水急剧减少, 1972 年西太平洋副热带高压降水大幅度下降, 形成了径流突变的气候条件。1982 年爆发典型厄尔尼诺事件, 对我国夏季气候产生重要影响, 渭河流域降水发生了重大转折。1994 再次发生了新的 ENSO 事件, 西太平洋热带高压呈现出偏强、偏西、偏北的特点, 渭河流域性季风气候区饱受西太平洋副热带高压影响。

从上世纪 70 年代开始大规模修建灌溉工程和水库, 1970 年建成东方红抽渭灌溉工程, 1971 年建成宝鸡峡塬上干渠, 如此一系列的水利水土保持措施造成流域源区径流减小, 产流效率降低, 形成了渭河流域径流在 1972 年发生突变的人类活动。1982 年关中最大的蓄水工程冯家山水库的竣工, 形成了 1982 年径流了突变的人工条件。90 年代以来, 由于众多人类活动的不断增强, 工农业用水量持续增加与气候变化共同作用, 最终导致 1994 年径流的突变。

4 结 论

1) 将 Morlet 小波分析方法运用于对径流时间序列突变的分析, 对渭河华县站 1961—2006 年的年径流序列进行了突变辨识和分析, 得出 1972 年、1982 年、1994 年为径流突变点。

2) 通过对渭河华县站近 46 年径流时间序列进行 Morlet 小波分析, 发现华县站年径流量具有明显的多时间尺度特征, 以 7~8 年, 10 年, 15 年为主作用周期呈现枯竭期和丰水期的交替变化, 1982 年之后径流序列的振荡较 1982 之前剧烈, 主要原因是 20 世纪 70 年代以来, 渭河流域各种水利工程建成并开始投入使用, 人类活动对径流的影响逐渐积累加强, 加之气候变化导致降水减少, 因而径流发生突变。

气候变化和人类活动是变异的两个重要因素, 还需进一步研究各种因素对变异的贡献率, 为环境变化下水文的重构奠定一定基础。

参考文献:

- [1] 叶柏生, 李翀, 杨大庆, 等. 我国过去 50 年来降水变化趋势及其对水资源的影响 (I): 年系列 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 587-594.
Ye Baisheng, Li Chong, Yang Daqing, et al. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years (I): annual variation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5): 587-594.
- [2] Zhang Y, Shao Q, Xia J, et al. Changes of flow regimes and precipitation in Huai river basin in the last half century [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(2): 246-257.
- [3] 陈广才, 谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法 [J]. 水文, 2006, 26(5): 57-60.
Chen Guangcai, Xie Ping. Slide F test of change-point analysis [J]. Hydrology, 2006, 26(5): 57-60.
- [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.
Xie Ping, Chen Guangcai, Li De, et al. Comprehensive diagnosis method of hydrologic time series change-point analysis [J]. Hydroelectric Energy, 2005, 23(2): 11-14.
- [5] Zuo D, Xu Z, Yang H, et al. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei river basin, China [J]. Hydrological, 2011, 10: 820-826.
- [6] Perreault L, Bernier J, Bobbe B, et al. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series, the normal model revisited [J]. Journal of Hydrology, 2000, 235: 221-241.
- [7] 熊立华, 周芬, 肖义, 等. 水文时间序列变点分析的贝叶斯方法 [J]. 水电能源科学, 2003, 21(4): 39-41.
Xiong Lihua, Zhou Fen, Xiao Yi, et al. Bayesian method for detecting change-points of hydrological time series [J]. Hydroelectric Energy, 2003, 21(4): 39-41.
- [8] 燕爱玲, 黄强, 刘招, 等. R/S 法的径流时序复杂特性研究 [J]. 应用科学学报, 2007, 25(2): 214-217.
Yan Ailing, Huang Qiang, Liu Zhao, et al. Complicated property of runoff time series studied with R/S method [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2): 214-217.
- [9] 魏凤英, 谢宇. 近百年长江中下游梅雨的年际及年代际振荡 [J]. 应用气象学报, 2005, 16(4): 492-499.
Wei Fengying, Xie Yu. Interannual and interdecadal oscillations of Meiyu over the middle-lower reaches of the Changjiang river for 1885-2000 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2005, 16(4): 492-499.
- [10] 刘太中, 荣平平, 刘式达, 等. 气候突变的子波分析 [J]. 地球物理学报, 1995, 38(2): 158-162.
Liu Taizhong, Rong Pingping, Liu Shida, et al. Wavelet analysis of climate jump [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(2): 158-162.