

网络出版时间:2013-05-02 10:55

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130502.1055.024.html>

基于谐波小波的径流序列变异检测

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 数学与信息科学系, 河南 郑州 450011)

[摘要] **【目的】**用谐波小波分析非一致性径流时间序列变异点的数量及变异发生的时间。**【方法】**针对径流变异点检测方法复杂、难于识别全部变异点等问题,引入一种新的时频分析技术,利用谐波小波分析进行径流时间序列的变异点诊断。**【结果】**对实测的渭河华县站 1961—2004 年的径流序列进行谐波小波分析,视频图中的网格图和等高线图显示,1972 年、1982 年和 1994 年是径流的变异年。**【结论】**相对于传统的突变检测方法,谐波小波分析方法在分析非线性时间序列时具有方法简便、可行、有效、分辨率高、对突变点敏感等特点,能够有效地诊断出高度复杂、非线性序列的变异点。

[关键词] 谐波小波;径流序列;径流变异;渭河

[中图分类号] P333.6

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)05-0207-06

Detection of the abrupt changes in runoff based on Harmonic Wavelet

LI Yan-ling^{1,2}, CHANG Jian-xia¹

(1 Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology,

Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Department of Mathematics & Information Science, North China Institute

of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450011, China)

Abstract: **【Objective】** This paper focused on the number and time of abrupt changes in non-consistency runoff time series using the harmonic wavelet analysis. **【Method】** The traditional detection methods of runoff abrupt changes are complex and difficult to identify the total variance point. Therefore, a new time-frequency analysis techniques is proposed to diagnose abrupt change points using harmonic wavelet analysis. **【Result】** Harmonic wavelet transformation was used to analyze monthly runoff at the Huaxian station in Wei river from 1961 to 2004. The grid graph and contour map showed that there were abrupt changes of runoff in 1972, 1982 and 1994. **【Conclusion】** Compared to traditional detection methods, harmonic wavelet analysis presents simple, feasible, effective, high-resolution and sensitive features to abrupt changes in the analysis of nonlinear time series, and it can effectively diagnose abrupt changes in highly complex and non-linear sequence.

Key words: harmonic wavelet; runoff series; runoff abrupt changes; Wei River

河川径流作为水文循环的一个重要环节,受全球气候变化和人类活动的双重影响,呈现出高度复

杂、非线性特征,若时空发生变异,则水文分析计算的一致性被破坏。因此,研究变化环境下的径流序

[收稿日期] 2012-08-16

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403306);国家公益性行业科研专项(201101049-01);国家科技重大专项(2009ZX07212-002-003-004)

[作者简介] 李艳玲(1978—),女,河南开封人,副教授,在读博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: liyanling@ncwu.edu.cn

[通信作者] 畅建霞(1974—),女,山西祁县人,教授,博士生导师,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: chxiang@xaut.edu.cn

列突变规律,是当前水文研究的一个热点前沿问题,这对于水资源的兴利减灾、高效持续利用和经济社会的稳定发展具有重要的现实意义。目前,对径流序列变异规律的检测方法主要有两阶段线性回归^[1]、Pettitt 检验^[2]、Mann-Kendall 法^[3]、重新标度极差分析方法(R/S)^[4]、贝叶斯变点分析^[5-6]、遗传算法^[7]、滑动 F 检验^[8]等,虽然这些方法各具优点,但对于变化环境下高度复杂的非线性、小数据量集的径流变异,其检测能力均不足。近似熵方法能解决非平稳和非线性序列的变异诊断问题,但窗口大小会对检测结果造成不利的影响。实小波可以有效检测变异点,但其有效性受小波函数影响,可能出现虚假的变异点,需借助其他的诊断工具协助检测^[9]。

谐波小波(Harmonic wavelet, HW)是 Newland^[10]在 1993 年从小波的频谱出发,构造出的具有明确简单解析表达式和严格“盒形”谱特性的小波,其除继承了通常意义下小波函数的优点外,还具备一些特有的优点:具有明确的函数表达式,分解过程中信息量不变,时频分解灵活,算法快速简单,频域盒形紧支,相位定位能力良好等^[11]。HW 的众多优良特性虽然使其在图形识别、生物医学信号处理、非线性偏微分方程的动力学模型、振动分析等领域受到了广泛关注^[12],但还鲜见将其应用于时间序列变异检测的研究报道。为此,本研究尝试将 HW 用于时间序列突变检测,并以渭河华县站径流为例进行实证分析,以期在水文序列的突变检测提供一种新途径。

1 谐波小波

1.1 HW 的构造

设时间函数 $w(t)$ 对应的傅里叶变换为 $W(\omega)$, $W(\omega)$ 偶函数部分 $W_e(\omega)$ 和奇函数部分 $W_o(\omega)$ 如(1)、(2)式所示:

$$W_e(\omega) = \begin{cases} 1/4\pi, & 2\pi \leq |\omega| < 4\pi; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (1)$$

$$W_o(\omega) = \begin{cases} i/4\pi, & -4\pi \leq \omega < -2\pi; \\ -i/4\pi, & 2\pi \leq \omega < 4\pi; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 e 和 o 表示偶函数和奇函数; t 表示时间; ω 表示频率; i 是虚数单位, $i = \sqrt{-1}$ 。

$$W(\omega) = W_e(\omega) + iW_o(\omega) = \begin{cases} 1/2\pi, & 2\pi \leq \omega < 4\pi; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (3)$$

$W(\omega)$ 对应的时间函数 $w(t) = w_e(t) + iw_o(t)$, 由 $W(\omega)$ 的傅里叶逆变换得:

$$w(t) = w_e(t) + iw_o(t) = [\exp(i4\pi t) - \exp(i2\pi t)]/i2\pi t. \quad (4)$$

式中: t 表示时间。称(4)式定义的函数为 HW。(3)式中的频谱在频率为 $[2\pi, 4\pi]$ 时为常数,频率为其余值时频谱为零,为具有完全“盒形”的频谱^[13],在频域上具有良好的紧支撑特性。对(4)式进行伸缩、平移生成谐波小波函数族,有:

$$w(2^j t - k) = \{\exp(i4\pi(2^j t - k)) - \exp(i2\pi(2^j t - k))\}/i2\pi(2^j t - k). \quad (5)$$

式(5)中 j, k 取整数。显然, j, k 取任意整数时, (5)式 HW 的形状基本保持不变,在方向上伸缩了 2^j 单位,在位置上平移了 k 单位。 j 值决定了小波的层或尺度,其频谱位于 $[2^{j+1}\pi, 2^{j+2}\pi]$ 。随着 j 的增大,频谱带宽逐渐增大。

1.2 谐波小波变换

$f(t)$ 为一时间信号(序列),其谐波小波分解可表示为:

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [a_{j,k} w(2^j t - k) + \bar{a}_{j,k} \bar{w}(2^j t - k)]. \quad (6)$$

式中: $w(2^j t - k)$ 是谐波小波函数族, $\bar{w}(2^j t - k)$ 是 $w(2^j t - k)$ 的共轭,系数 $a_{j,k}$ 由广义积分 $a_{j,k} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{w}(2^j t - k) dt$ 确定, $\bar{a}_{j,k}$ 是 $a_{j,k}$ 的共轭。可以证明,谐波小波函数组 $\{w(2^j t - k)\}$ 是 Hilbert 空间的一个紧凑框架,它构成 $L^2(R)$ 的一组完备的基函数,可以对任意信号 $f(t) \in L^2(R)$ 进行正交分解。

1.3 小波时频图

小波复系数可以用小波时频图直观表示,小波时频图可分为网格图和等高线图。网格图是信号能量分布的三维图形反映,每点距离基准面的高度 $H_{j,k}$ (表示能量)为: $H_{j,k} = 2|a_{2^j+k}|^2$ 。在实际应用中,经常将 $H_{j,k}$ 取为对数,这样做可以使网格图不那么突兀,有利于观察其中能量较小的波峰,即: $H_{j,k} = \lg(2|a_{2^j+k}|^2)$ 。等高线图则反映了信号经过谐波小波变换后,能量在各尺度上随时间的变化情况。

1.4 谐波小波的变异检测

1.4.1 周期变异检测 考虑正弦信号 $f(t) = \sin(2\pi \times 12 \times t)$, 以 $f_s = 256$ Hz 进行采样,得到采样点数为 512 点的离散信号 f_r (r 为采样序列值的

标号)。每 2 个信号周期设置 1 个突变点,在 f_{16+64k} 处设置突变,令 $f_{16+64k} = f_{16+64k} + 0.01(k=0,1,\cdots,7)$,共有 8 处突变。对其进行谐波小波分解,结果如图 1、图 2 所示。由图 1 中的小波时频网格图和等高线图可以看出,信号的能量聚集在第 5 层。图 2

显示,曲面在 0 层翘起,即零层小波系数非零, a_0 为一较小的非零实数,并通过取对数形式被放大;第 4 层小波的上方存在 8 处能量变异,这与原始序列中设置的变异位置一致。小波时频等高线图也显示,信号中存在周期性的突变。

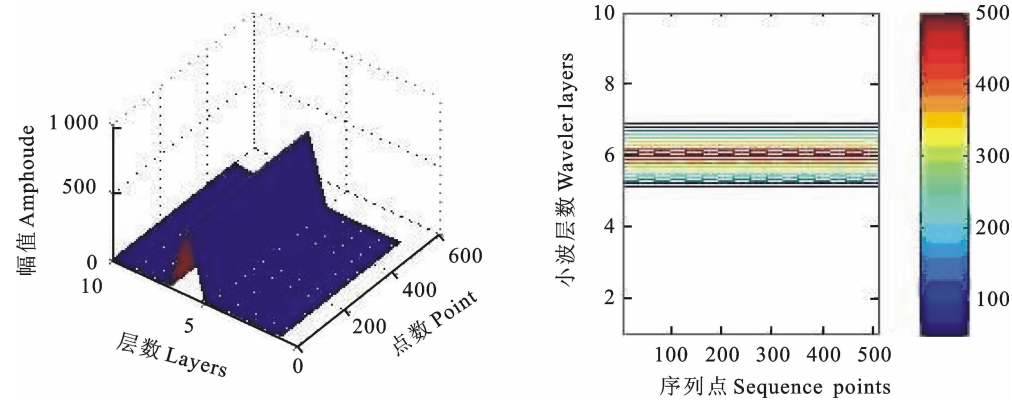


图 1 谐波小波的时域网格图和时域等高线图
Fig. 1 Time-frequency grid graph and contour map of harmonic wavelet

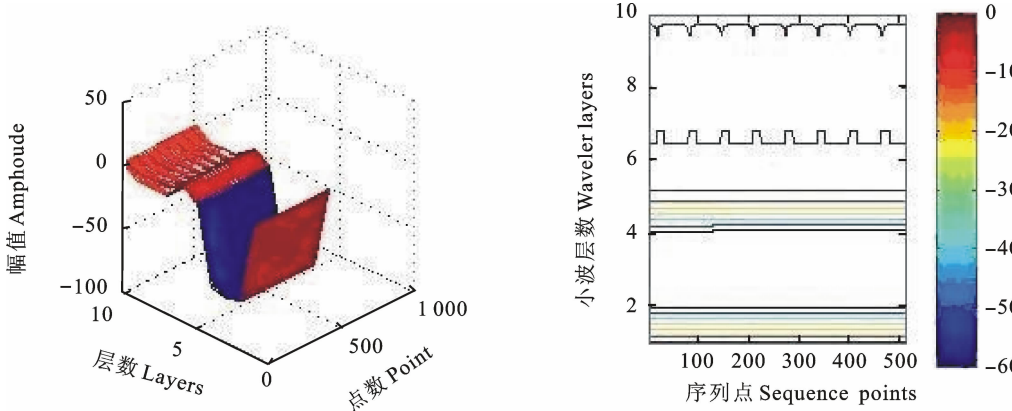


图 2 加入周期突变后谐波小波的时域网格图和等高线图
Fig. 2 Grid graph and contour map with periodic abrupt changes

1.4.2 局部变异检测 对于局部突变信号,仍采用正弦信号 $f(t) = \sin(2\pi \times 12 \times t)$, $f(t)$ 的采样信号 f_r (仍以 $f_s = 256$ Hz 进行采样,取 1 个采样周期),在序列点为 120 处的位置加上 0.000 1,即把 f_{120} 改为 $f_{120} + 0.000 1$,对其进行谐波小波分解,结果如图 3 所示。由图 3 可见,信号的小波网格图和等高线出现了极大的异常。在图 3 的等高线图(右图)中,信号中的主要能量集中在小波的第 5 层上,而在其上面却出现了一些能量突变,这意味着信号中存在着一处局部突变。由图 3 等高线图还可以看出,存在异常变化的序列点位置和信号突变点(120 点)的位置大体相同。值得注意的是,信号中存在的周期性或局部性异常突变只有在对数形式中才能明显

显现出来。除此之外,谐波小波具有的时频定位功能通过小波时频图得到了充分体现。
1.4.3 谐波小波的时频剖面图 用一组垂直于基平面、平行于时间轴的平面截取时频网格图,平面与谐波小波时频图的交线称时频剖面图。该剖面图将三维的时频网格图分离为一组平面图形,有利于细致地研究小波分解的每一层。时频剖面图反映了谐波小波分解同一层内小波的幅值(能量)大小。这样,既可以将一组时频图综合考虑,研究整个信号的性质,又可以分频段研究信号,并考虑信号的细节。同时,剖面图将分解结果变成一组一维信号,可用研究一维信号的方法更充分地研究信号的突变。

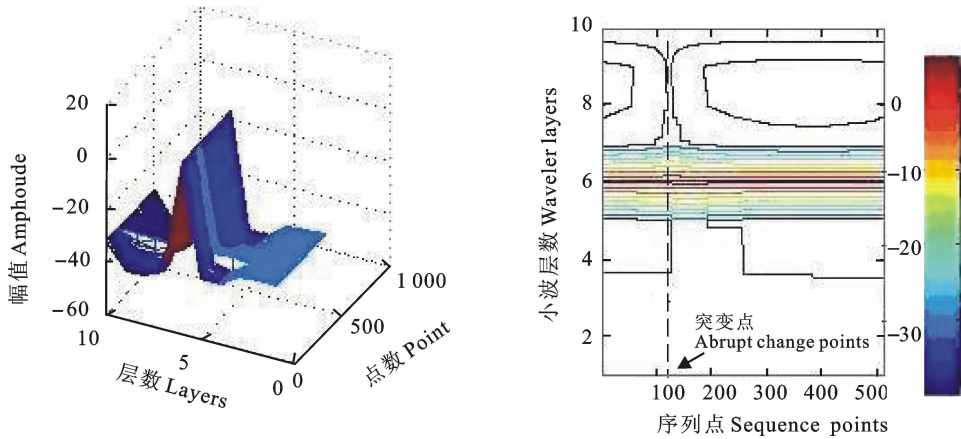


图 3 加入局部突变后谐波小波的时域网格图和等高线图
Fig. 3 The grid graph and contour map with local abrupt changes

2 渭河华县站径流变异检测

2.1 径流变异分析

选取渭河流域华县观测站的实测径流数据,取 1961—2004 年的月均径流时间序列为样本进行分析与计算,样本序列如图 4 所示。

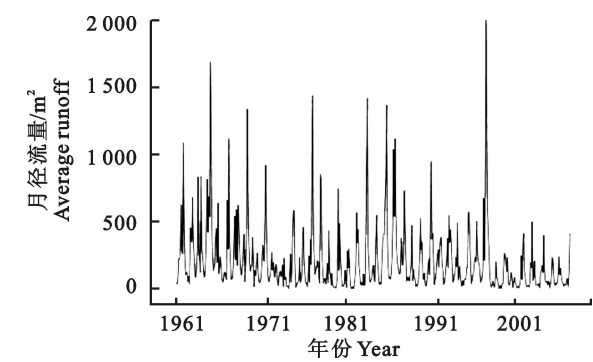


图 4 渭河华县站 1961—2004 月均径流量序列
Fig. 4 Monthly runoff time series(1961—2004) at Huaxian station

对渭河华县站月均径流时间序列进行谐波小波分解,其时频网格图和等高线图如图 5、6 所示。从图 5、6 可以看到,径流信号的能量主要集中在 1~3 层,而第 4~8 层上出现的能量突变较多。为了弥补小波时频网格图和时频等高线图的不足,截取最高层的时频剖面图如图 7 所示。

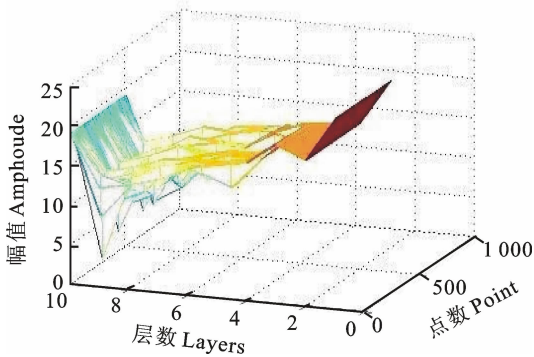


图 5 渭河华县站月径流时间序列的时频网格图
Fig. 5 Grid graph of monthly runoff series at Huaxian station

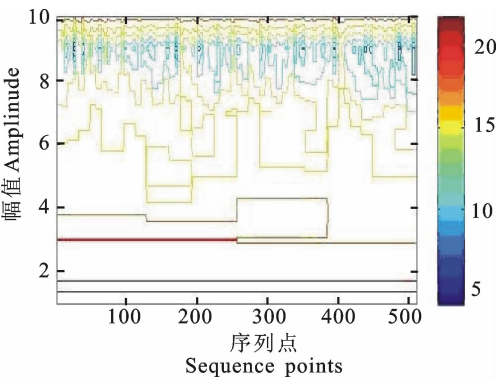


图 6 渭河华县站月径流时间序列的时频等高线图
Fig. 6 Contour plot of monthly runoff series at Huaxian station

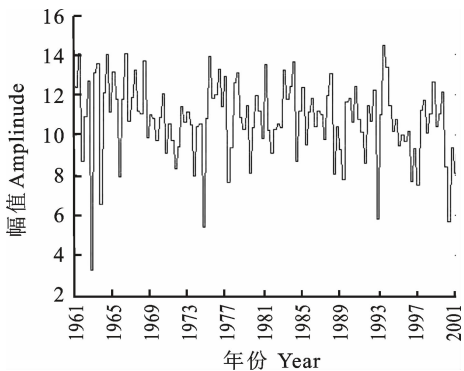


图 7 渭河华县站月径流时间序列的时频剖面图($j=7$)
Fig. 7 Profile plot of monthly runoff series at Huaxian station($j=7$)

从图 7 可以看出,信号时频剖面图中幅值(能量)较大处对应着信号中的突变点。为更清楚地看出变异年份,将图 7 的月径流时间序列通过求平均值转化为年平均径流序列。年径流序列时频剖面图的幅值见表 1。由图 7 及表 1 可以看出,1961、1972、1982、1994 和 2004 年华县站年径流序列时频

剖面图的幅值较一般年份大,由于 1961 和 2004 年分别处于径流序列的首位和末位,不考虑其突变的可能性,因此 1972、1982 和 1994 年为渭河华县站径流的突变点。谐波小波的检测结果与文献[7-9]的结果一致,但检测方法既简单实用,又不存在漏检的情况。

表 1 渭河华县站年径流时间序列时频剖面图的幅度值

Table 1 The amplitude of profile map for runoff series at Huaxian station of Wei River

年份 Year	幅值 Data	年份 Year	幅值 Data	年份 Year	幅值 Data	年份 Year	幅值 Data
1961	12.993	1972	12.385	1983	11.386	1994	12.947
1962	10.775	1973	10.766	1984	11.605	1995	10.818
1963	9.972	1974	9.649	1985	10.753	1996	9.714
1964	10.881	1975	10.056	1986	10.823	1997	9.063
1965	11.971	1976	9.868	1987	10.866	1998	10.156
1966	11.256	1977	10.664	1988	11.596	1999	11.279
1967	11.938	1978	11.688	1989	9.229	2000	11.198
1968	9.718	1979	10.876	1990	10.412	2001	7.818
1969	10.578	1980	10.141	1991	11.289	2002	8.557
1970	10.873	1981	11.506	1992	10.076	2003	9.223
1971	9.790	1982	12.388	1993	9.577	2004	12.886

2.2 突变成因分析

由谐波小波分析可知,渭河华县站年径流存在 3 个突变点,径流的突变受气候因素和人类活动的双重影响。影响突变的因素在气候方面表现为:渭河流域具有副热带环流背景,厄尔尼诺事件的形成和发展造成北半球大气环流和我国气候异常,形成了渭河流域径流突变的气候条件。其中,1972 年西太平洋副热带高压降水大幅度下降;1982 年爆发了一次新的典型的厄尔尼诺事件,渭河流域降水发生了重大转折^[14];1994 再次发生 ENSO 事件,西太平洋热带高压呈现出偏强、偏西、偏北的特点。在人类活动方面,渭河从 20 世纪 70 年代开始大规模修建灌溉工程和水库,如 1970 年建成东方红灌溉工程和 1971 建成的宝鸡峡塬上干渠,这一系列水利工程的竣工形成了渭河流域径流在 1972 年发生突变的人为因素^[15];1982 年关中最大的蓄水工程冯家山水库的竣工,形成了 1982 年径流突变的人工条件。自 20 世纪 90 年代以来,众多人类活动不断增强^[16],工农业用水量持续增加,加之气候变化,最终导致 1994 年的径流突变。

3 结 论

本研究尝试将谐波小波分析方法应用于径流序列突变分析中,序列的时频网格图和时频等高线图

显示,谐波小波具有很强的频域识别能力,对突变点均比较敏感,能精确有效地将信号中的突变信息从频域提取出来,为水文序列的突变检测提供了一种有效途径。利用谐波小波分析方法,对渭河华县站径流序列的突变进行实例分析,得出 1972、1982 和 1994 年为渭河华县站径流序列的突变点,且 3 个突变点的突变频率呈现出明显的上升趋势,这一现象与近 50 年来全球的气候变化和人类活动加剧紧密相关。

[参考文献]

[1] 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.

[2] 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 Processes,2011,35(5):28-37.

[3] 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 P,Chen G C,Li D,et al. Comprehensive diagnosis method of hydrologic time series change-point analysis [J]. Hydroelectric Energy,2005,23(2):11-14. (in Chinese)

[4] 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 A L,Huang Q,Liu Z et al. . Complicated property of run-

- off time series studied with R/S method [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2): 214-217. (in Chinese)
- [5] Perreault L, Bernier J, Bobbe B, et al. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series: I. The normal model revisited [J]. Journal of Hydrology, 2000, 235: 221-241.
- [6] 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 L H, Zhou F, Xiao Y, et al. Bayesian method for detecting change-points of hydrological time series [J]. Hydroelectric Energy, 2003, 21(4): 39-41. (in Chinese)
- [7] 金菊良, 魏一鸣, 丁 晶. 基于遗传算法的水文时间序列变点分析方法 [J]. 地理科学, 2005, 25(6): 720-723.
Jin J L, Wei Y M, Ding J. Genetic algorithm based change-point analysis method for hydrological time series [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(6): 720-723. (in Chinese)
- [8] 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 G C, Xie P. Slide F test of change-point analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(5): 57-60. (in Chinese)
- [9] 李艳玲, 畅建霞. 基于 Morlet 小波的径流突变检测 [J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(3): 322-325.
Li Y L, Chang J X. Detection of the abrupt changes in runoff based on the Morlet wavelet [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 322-325. (in Chinese)
- [10] Newland D E. Harmonic wavelet analysis [J]. Proceedings of the Royal Society London(A), 1993, 44(3): 203-225.
- [11] 刘 潮, 李政杰, 童宁宁. 基于谐波小波变换的雷达辐射源识别 [J]. 航天电子对抗, 2012, 28(1): 35-38.
Liu C, Li Z J, Tong N N. Radar emitter identification based on harmonic wavelet transform [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2012, 28(1): 35-38. (in Chinese)
- [12] 李舜酩, 许庆余. 微弱振动信号的谐波小波频域提取 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(1): 51-55.
Li S M, Xu Q Y. Harmonic wavelet extraction for weak vibration signal in frequency domain [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(1): 51-55. (in Chinese)
- [13] Newland D E. Wavelet analysis of vibration; Part1, 2 [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116(4): 409-425.
- [14] 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 H L, Chen Y, Ren G X, 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. (in Chinese)
- [15] 邢大韦, 王耀荣, 张玉芳. 渭河径流变化的影响原因分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(2): 1-4.
Xing D W, Wang Y R, Zhang Y F. Influence and cause analysis for the runoff change in Weihe river [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007, 18(2): 1-4. (in Chinese)
- [16] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 人类活动对泾河流域径流时空变化的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 66-72.
Zhang S L, Wang Y H, Yu P T, et al. Impact of human activities on the spatial and temporal variation of runoff of Jinghe basin, Northwest China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(6): 66-72. (in Chinese)