

# 灞河出山径流序列变化的小波分析

张学真, 刘 燕

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要** :以西安地区年降水序列为参照,利用小波分析方法对灞河出山径流序列的周期性变化进行分析。结果表明,西安地区平均年降水序列和灞河出山径流序列存在着多时间尺度周期,并且基本具有同步变化的规律性,反映了人类活动对灞河出山径流序列的周期性影响不大。其中,变化较明显的周期是 10 a、15 a 左右时间尺度,水文序列变化的高能量主要集中在较小的时间尺度上。用秩次相关分析法检验得出灞河出山径流序列均存趋势性,用有序聚类分析法分析得出灞河出山径流序列的突变年份是 1948 年。

**关键词** :灞河;径流;周期性;小波分析

**中图分类号** :TV121+.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2006)03-0012-04

## Wavelet analysis on runoff sequences from mountainous watershed of Bahe River

ZHANG Xue-zhen, LIU Yan

(Faculty of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract** :Taking precipitation sequence in Xi'an as reference, the periodic variation of runoff from mountainous watershed of Bahe River was analyzed. Results show that both of the reference data and examination data has periodicity of multi-scale of time, and the change rules are almost synchronous, which means that the human activity has little impact on the periodicity of the runoff sequence. The obvious periodic variation appears in the time scale of 10-year, 15-year or so. The high energy of the variation of hydrologic sequence mostly appears at small time scale. Rank correlation analyses show that all of the runoff sequence change with tendency, and the sudden change appeared in 1948, as concluded by order cluster analysis method.

**Key words** :Bahe River; runoff; periodicity; wavelet analysis

### 1 问题的提出

灞河发源于秦岭北麓,是“八水绕长安”的主要水系,在西安城市东北交汇后,流入渭河。总流域面积 2563.7 km<sup>2</sup>,河长 107 km,年径流量 5.463 亿 m<sup>3</sup>,径流平均深为 341.2 mm,是西安地区重要的水源和生态依托。灞河上游(马渡王水文站以上)地区主要是农业生产活动对河流水量水质产生了一定的影响。不久的将来,灞河上游修建李家河水库以解决西安市东城区供水问题,兼顾农业灌溉生态用水。然而,近 60 a 来,灞河上游人类活动加剧,引水量大增,大量污染物进入河源区,对灞河的水文情势产生了一

定的影响。因此,开展对灞河出山水文过程的变化研究,对于西安的农业、城镇用水,河流水环境保护及水资源的保护性开发利用具有重要意义。

### 2 研究方法

水文过程(如流量过程、水位变化过程等)一般属于不平稳过程,从物理意义上可以将水文过程分成周期项、趋势项、突变项等。人类活动对河流水文过程的强烈干扰反映在水文序列的分布上,其周期项、趋势项、突变项等发生不同程度的变化<sup>[1-3]</sup>。本文以西安地区平均年降水序列(1941~2000 年)为参照,利用小波分析方法对灞河出山径流序列的周期

性变化进行分析,并用秩次分析法对灞河出山径流序列的趋势给予检验,用有序模糊聚类法判断灞河出山径流序列的突变项,从而判定灞河上游人类活动对灞河水文过程的影响。

### 2.1 小波分析

小波分析(wavelet)是20世纪80年代初发展起来的一种信号时-频局部化分析新方法<sup>[4-6]</sup>。小波分析允许把一个信号分解为对时间和频率(空间和尺度)的贡献,特别适合于分析函数的局部可缩性,并发现它的奇异性和刻画奇异性的可能特征。小波时-频分析是一种窗口大小固定不变,时域和频域不断变化的局部优化方法,其优于传统的频谱分析方法之处就在于具有良好的局部化性质,在于借助时频局部化功能剖析时间序列内部精细结构,这十分有利于分析研究系统的多时间尺度变化。本文利用Morlet小波变换法探讨水文时间序列的多时间尺度演变特性。小波分析涉及小波函数和小波变换。

#### a. 小波函数

小波函数指的是具有震荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \tag{1}$$

$\Psi(t)$ 也称基小波,其伸缩和平移构成一族函数：

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{2}$$

$$b \in R \quad a \in R \quad a \neq 0$$

式中： $\Psi_{a,b}(t)$ 为子小波； $a$ 为尺度因子,反映了小波的周期长度； $b$ 为时间因子,反映了在时间上的平移。不失一般性,小波分析将选用Morlet函数。对高斯函数

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \tag{3}$$

加以调制,得Morlet小波函数：

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{j\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \tag{4}$$

#### b. 小波变换

若 $\Psi_{a,b}(t)$ 是式(2)给出的子小波,对于信号 $f(t) \in L_2(R)$ ,其连续小波变换为

$$\Psi_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{5}$$

式中： $\bar{\Psi}(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的复共轭函数； $\Psi_f(a,b)$ 为小波系数。

实际工作中,信号常常是离散的,如 $f(k\Delta t)$  ( $k=1,2,\dots,N$ ;  $\Delta t$ 为取样时间间隔),则式(5)的离散形式

$$\Psi_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\Psi}\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right) dt \tag{6}$$

小波系数 $\Psi_f(a,b)$ 是时间序列 $f(t)$ 或 $f(k\Delta t)$ 通过单位脉冲响应的滤波器的输出,能同时反映时域参数 $b$ 和频域参数 $a$ 的特性。当 $a$ 较小时,对频域的分辨率低,对时域的分辨率高;当 $a$ 增大时,对频域的分辨率高,对时域的分辨率低。因此,小波变换实现了窗口的大小固定、形状可变的时频局部化。

### 2.2 秩次相关分析法

采用Kendall秩次相关检验法。此检验的统计量为

$$U = \tau \frac{\tau}{[\text{var}(\tau)]^{0.5}}$$

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$$

$$\text{var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$$

式中： $p$ 为 $X_i$ 系列中对偶值( $X_i, X_j, j > i$ )的 $X_i < X_j$ 出现的个数； $n$ 为样本容量。

检验分别采用显著水平 $\alpha=0.1, 0.05$ ,在正态分布表中查出临界值 $U_{0.025}=2.58, U_{0.05}=1.96$ 。当 $|U| < U_{0.05}$ 时,无下降趋势;当 $U_{0.025} > |U| > U_{0.05}$ 时,有下降趋势;当 $|U| > U_{0.025}$ ,下降趋势显著。

对存在趋势的水文序列可以进一步利用有序聚类分析法推算水文序列的可能显著干扰点 $\tau_0$ ,使同类之间的离差平方和最小,而类与类之间的离差平方和相对较大。最优点分割方法：

$$V_r = \sum_{i=1}^r (a_i - a_{\tau})^2$$

$$V_{n-r} = \sum_{i=r+1}^n (a_i - a_{n-r})^2$$

$$S_n(\tau) = V_{\tau} + V_{n-r} S_n(\tau)$$

式中： $a_{\tau}$ 为突变点 $\tau$ 前的水文径流序列均值； $a_{n-r}$ 为突变点 $\tau$ 后的水文径流序列均值； $S_n(\tau)$ 为离差平方和。于是,存在最优分割点使 $S_n(\tau) = \min[S_n(\tau)]$ 成立,满足该条件的 $\tau$ 为最优分割点。

## 3 计算结果分析

### 3.1 周期性的小波分析

小波系数 $\Psi_f(a,b)$ 随参数 $a$ 和 $b$ 变化,可作出以 $b$ 为横坐标, $a$ 为纵坐标的关于 $\Psi_f(a,b)$ 的二维等值线图。通过此图可得到关于时间序列变化的小波特征。每一种周期小波随时间变化通过水平截取来考察。不同时间尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度(周期)下变化特征:正负小波系数的转折点对应着突变点;小波系数绝对值越大,表明该时间尺度变化越显著。

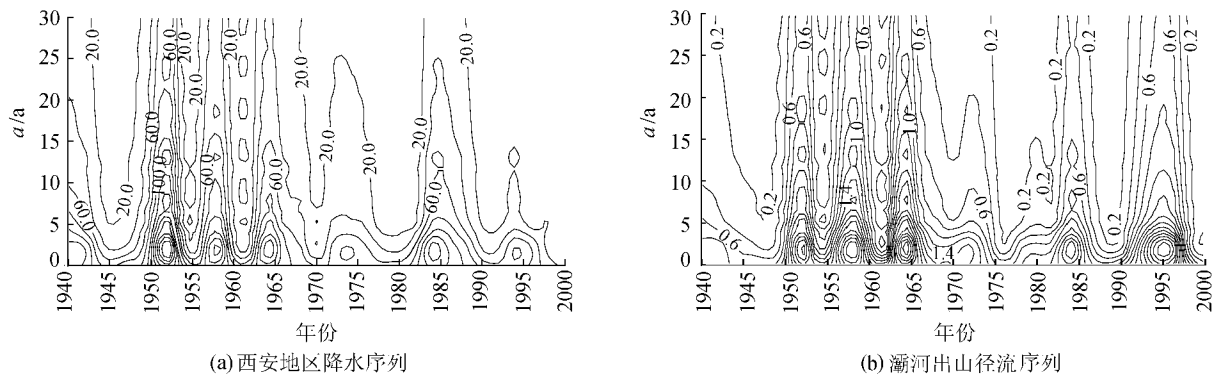


图1 小波变换的模时-频分布

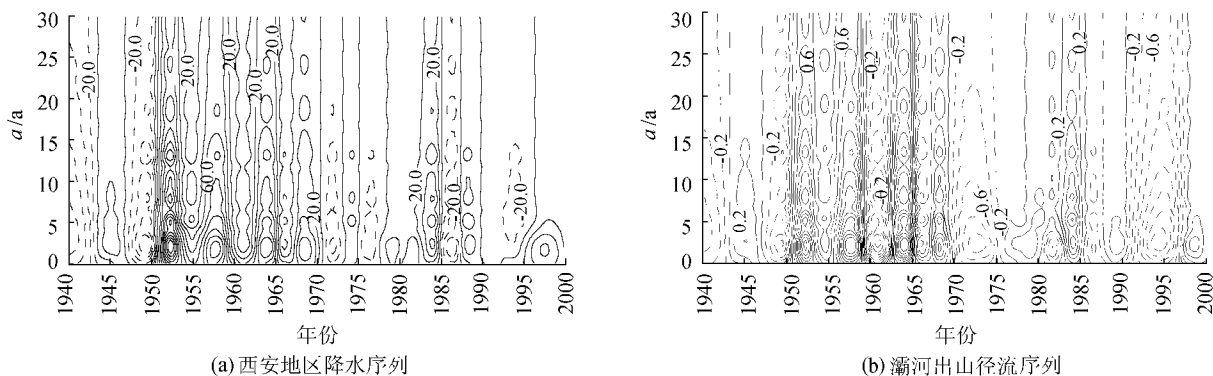


图2 小波变换的实部时-频分布

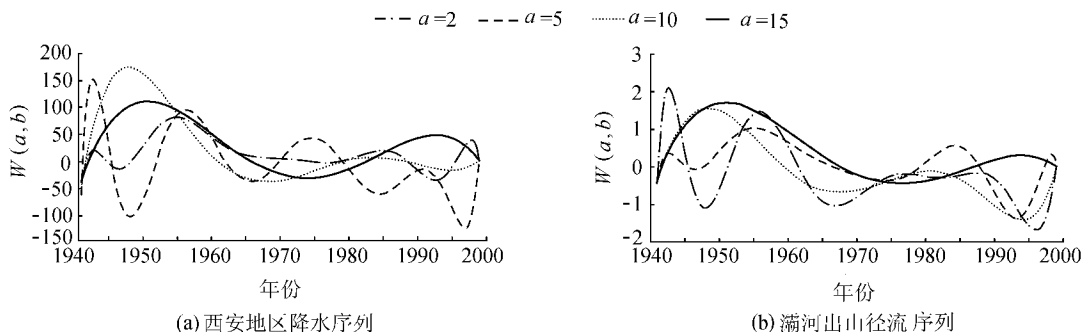


图3 各时间尺度 Morlet 小波变换实部变化过程

从图1可以看出年际尺度(小于10a)和年代际尺度(大于10a)特征十分明显。

从图2中可看到5a、10a、15a左右强周期对应的位相结构。在1943~1947年、1950~1959年、1962~1970年、1976~1981年、1983~1986年、1988~1992年为正位相,表示降水量、河流径流量偏多;而在1947~1950年、1959~1962年、1970~1976年、1981~1983年、1986~1988年、1992~1997年各时段为负位相,表示降水量、河流径流量偏少。

图3中 $W(a, b)$ 大于0的时段为正位相,小于0的时段为负位相。两个水文时间序列不同周期的小波变换实部变化过程分布基本一致。主要的差异表现为降水序列和径流序列5a周期的 $W(a, b)$ 历时过程存在一定差异,但整体上均呈衰减趋势。

从西安地区降水过程和河流年平均流量过程的Morlet小波变换所获得的成果看,水文时间序列存

在着多时间尺度,且大时间尺度包含着小时间尺度,不同时间尺度都隐含着水文过程的变化规律。其中,变化较明显的周期变化是10a左右和15a左右时间尺度的多少交替,水文序列变化的能量主要集中在较小的时间尺度上。

### 3.2 趋势性分析

利用Kendall秩次相关系数法计算出西安地区年降水序列、灞河出山年径流序列的秩次相关系数 $U$ 分别为0.059和2.340。检验分别采用显著水平 $\alpha$ 为0.1和0.05,在正态分布表中查出临界值 $U_{0.025} = 2.58$ ,  $U_{0.05} = 1.96$ 。比较易知,西安地区降水序列下降趋势不显著,灞河出山径流序列有下降趋势。

根据以上计算结果,以灞河出山年径流序列为样本,利用有序聚类分析法分别计算出与 $\tau$ 对应的 $S_n(\tau)$ 点绘 $S_n(\tau)$ 的时程变化如图4所示。图4说

明灞河出山年径流序列的突变年份出现在 1948 年。

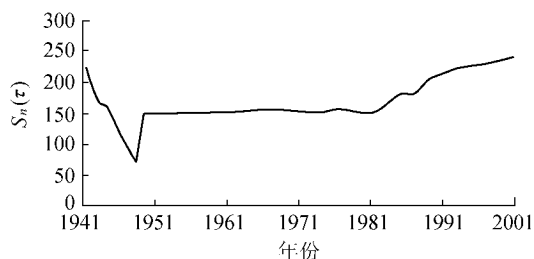


图 4 灞河出山径流序列  $S_n(\tau)$  历时过程

## 4 结 论

河流水文序列的多周期性、趋势性和突变性特征反映了人类活动对河流天然状态的水文序列产生了显著的影响。小波方法分析法结果表明,西安地区年降水序列和灞河出山径流序列存在着多时间尺度,且大时间尺度包含着小时间尺度,变化较明显的周期是 10 a 左右和 15 a 左右时间尺度的交替,两个序列周期性变化基本具有同步性,说明人类活动对河流的周期性影响不大。秩次相关分析检验结果表

(上接第 11 页)节水技术有机地结合起来,相互配合和补充,形成从输水、配水、灌水到作物吸收利用转化为最终产量的水分利用过程,发挥综合节水之作用,走节水农业之路。

### 3.4 加强灌溉工程的管理

在我国,50% 的节水潜力在于管理<sup>[9]</sup>。在灌溉时,常由于管理的原因,造成灌溉水的极大浪费。管理损失在灌溉用水从水源到田间的各个环节中都有可能发生。包括输配水环节管理损失和田间灌水管理损失。输配水环节管理损失主要是由于灌溉用水在输送、调配过程中因为用水调度不当或工程管理不善而造成。根据产生的具体原因,这部分管理损失又可分为调、配水损失(主要有退水、决口、漫溢以及灌水延时等)和工程管理损失(渠道、建筑物、闸门漏水)两部分。田间灌水管理损失可分为:田间工程管理损失、地面径流损失和田间深层渗漏损失。在各种管理损失中,退水是导致灌区灌溉用水管理损失的一个主要因素。此外,渠道(尤其是骨干输水渠道)决口在直接造成水量损失的同时,还会伴随着调节性退水,甚至导致灌溉中断,由此诱发的灌溉用水损失也很大。因此搞好计划用水调度和工程管理,减少退水,杜绝渠道决口事故的发生是减少灌区灌溉用水损失的关键。在减少田间灌水管理损失方面,要搞好农田水利基本建设,加强田间灌水环节的用水管理,完善田间工程,健全群众用水管理组织,加大田间灌水的管理和协调力度,规范用水秩序,避

明,近 60 a 来,人类活动对灞河山口以上径流序列的趋势性影响显著。有序聚类分析法得出,灞河出山年径流序列突变年份是 1948 年。

## 参考文献:

- [1] GOEL N K. 随机水文学[M]. 王志毅,周钢炎,译. 郑州:黄河水利出版社,2001:72-86.
- [2] 王国庆,贾西安,陈江南,等. 人类活动对水文序列的显著影响干扰点分析[J]. 西北水资源与水工程,2001,12(3):13-14.
- [3] 刘小花,袁宏源,洪林,等. 水资源利用随机预测模型研究[J]. 中国农村水利水电,2002(12):70-72.
- [4] 崔锦泰,程正兴. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995:2-28.
- [5] 王西琴,周孝德,李怀恩. 渭河流域工业发展与水环境质量趋势分析[J]. 水资源保护,2001(1):18-20.
- [6] 原彪,白云鹏. 张家口市入出境水资源量变化及水质趋势与对策[J]. 水资源保护,2000(2):36-39.

(收稿日期 2005-03-19 编辑 舒建)

免昼灌夜排和昼灌夜停现象,在管理体制改革的和水费水价政策调整上做文章,加快灌区管理体制改革的步伐。

## 参考文献:

- [1] 王法宏,徐会连,王旭清. 现代农业的负面效应及解决对策[J]. 山东农业科学,2003(5):53-56.
- [2] 郭元裕. 农田水利学[M]. 2版. 北京:水利电力出版社,1986:6-46.
- [3] 高占义. 中国的灌溉发展与作用[EB/OL]. 2004-10-19. <http://www.hwcc.com.cn>.
- [4] ZHOU Wei-bo, WANG Yu-bao. Impacts of water resources use on ecological environment of irrigation districts in arid region of Northwest China[C]//KANG Shao-zhong, DAVIES Bill, SHAN lun. Water-saving Agriculture and Sustainable Use of Water and Land Resources. Qishan: Shaanxi Science and Technology Press, 2003: 887-892.
- [5] 潘家铮,宁远,吴以鳌. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究——重大工程卷[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [6] 杨继富. 污水灌溉农业问题与对策[J]. 水资源保护,2000,16(2):4-8.
- [7] 董哲仁. 水利工程对生态系统的胁迫[J]. 水利水电技术,2003,34(1):1-5.
- [8] 中华人民共和国水利部. 2003 年水利统计公报[EB/OL]. 2004-12-10. <http://www.mwr.gov.cn>.
- [9] 汪志农,冯浩. 节水灌溉管理决策专家系统[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001:1-18.

(收稿日期 2005-03-16 编辑 舒建)