

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.002

黄河下游利津站入海水沙通量时序变化特征识别

范明元^{1 2} 李福林^{1 2} 仕玉治^{1 2} 陈华伟^{1 2}

(1. 山东省水利科学研究院 , 山东 济南 250013 ; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室 , 山东 济南 250013)

摘要 : 以黄河下游利津站 1950—2009 年水沙通量月时间序列资料为研究对象 , 运用多种识别方法分别对黄河入海口水沙通量的全年、汛期及非汛期多尺度的趋势、变点及周期等综合特征进行识别。依据 Mann-Kendall 及 Spearman 方法分析水沙通量的趋势变化特征 ; 采用小波分解与重构和有序聚类法进行水沙通量变点识别 ; 利用小波变换进行水沙通量序列周期识别。结果表明 : 利津站黄河入海水沙通量不同尺度均呈现显著减少变化趋势 , 且存在 1985、2002 年显著变点 , 不同尺度的变化周期不同 , 不同水文要素周期识别结果不同。

关键词 : 黄河 ; 利津水文站 ; 水沙通量 ; Mann-Kendall 方法 ; 小波分析 ; 变化特征
中图分类号 : TV14 文献标识码 : A 文章编号 : 1004-6933(2012)01-0005-04

Identification of characteristics of time series changes of water and sand flux at Lijin Hydrological Station in lower Yellow River

FAN Ming-yuan^{1 2} , LI Fu-lin^{1 2} , SHI Yu-zhi^{1 2} , CHEN Hua-wei^{1 2}

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province , Jinan 250013 , China ;
2. Shangdong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Water Environment , Jinan 250013 , China)

Abstract : Based on monthly water and sand flux data from Lijin Hydrological Station on the lower Yellow River from 1950 to 2009 , a variety of methods were used to identify the trends , change points , and cycles of water and sand flux in multi-scale time series of a year , the flood season , and the non-flood season. The Mann-Kendall and Spearman methods were used to analyze the characteristics of the trend of water and sand flux. The wavelet decomposition and reconstruction and orderly clustering methods were used for identification of the change points of water and sand flux. The wavelet transform method was used to identify the cycle of water and sand flux. The results show that the water and sand flux into the sea decreased significantly at multiple scales at Lijin Hydrological Station , there were two significant change points , in 1985 and 2002 , and the results of cycle identification were different at multiple scales as well as with different hydrological factors.

Key words : Yellow River ; Lijin Hydrological Station ; water and sand flux ; Mann-Kendall method ; wavelet analysis ; variation characteristics

黄河是中国第二大河流 , 也是世界上最著名的水少沙多河流。受到气候变化和人类活动双重影响下 , 河道径流、泥沙等水文要素俨然发生变化 , 尤其近几十年入海水沙通量呈现锐减趋势 , 甚至发生断流 , 对黄河入海口生态环境产生了巨大影响 , 由此引起国内许多学者的广泛关注。对黄河入海口水沙通量要素的变化特征识别 , 可为认知水沙动态、变化驱动力以及演变规律等方面提供数据支持 , 同时 , 对实

现黄河入海口生态环境可持续发展具有重要的意义。对于黄河入海口水沙通量的变化特征分析 , 已有许多成果 , 比较已有研究成果发现 : ①所应用的研究时间序列长度不同^[1-3] ; ②特征分析的侧重点不同且不全面 , 仅分析水文要素的变化趋势、变点或者周期中的一个方面或者两方面 , 如侯志军等^[2]根据 1950—2003 年利津站水沙月序列资料 , 运用统计分析方法研究了黄河入海口区水沙通量的季节性变

化、年际变化以及水沙通量之间的关系[3]。基于1950—2007年利津站实测水沙年序列资料,采用Mann-Kendall方法分析黄河入海水沙通量的变化规律。③部分研究仅对径流或者输沙量单一水文要素研究,且研究的尺度不同,如丁艳峰等[1]以黄河利津站1950—2004年的实测、天然月径流序列为基础资料,采用回归分析、相关分析和随机水文学的方法,仅对黄河入海径流量的变化特征进行了分析。此外,2002年以来,小浪底水库先后实施了9次调水、调沙,这为径流、输沙量时间序列的变化规律识别,提供新的数据资料和人类活动响应。因此,笔者以1950—2009年水沙月时间序列为研究对象,采用应用较为广泛的小波分析方法及Mann-Kendall等多种方法,对时间序列的变化趋势、变点及周期等多方面综合识别水沙通量的变化特征。

1 黄河入海水沙变化特征识别方法

国内外对水文序列趋势分析方面的研究很多,目前进行水文序列趋势分析的方法主要有Mann-Kendall秩次相关检验法(简称MK)、Spearman秩次相关检验法(简称SP)、线性趋势回归检验法等[4-7]。通过模型的比较分析,可以定性识别水文变量的趋势变化。本文采用较为常用且经检验较为有效的MK方法、SP方法、有序聚类方法和小波分析方法,其中采用小波分解与重构技术方法识别时间序列的变点,通过小波方差法识别时间序列周期。限于篇幅,仅给出MK方法和小波分析方法计算原理,其他方法可参考文献[5]。MK方法是用来识别序列变化趋势应用广泛的方法,而小波分析法是时、频分析的有效方法,可通过小波分解与重构进行序列变点分析,也通过小波变换进行序列周期变化特征识别。

1.1 MK方法

与参数统计检验法相比,非参数MK检验法更适用于非正态分布的资料。MK检验是提取序列变化趋势的有效工具,被广泛应用于气候参数和水文序列的分析。

对于时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,构造非参数MK统计量 S 为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,其正态分布均值 $E(S)$ 和方差 $V_{\text{an}}(S)$ 分别为

$$E(S) = 0 \quad V_{\text{an}}(S) = n(n+1)(2n+5)/18 \quad (2)$$

正态分布检验统计量 Z 为

$$Z(S) = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{V_{\text{an}}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{V_{\text{an}}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

假设原序列为无趋势,当给定显著水平 α 后,若 $|Z| < Z_{\alpha/2}$,则接受原假设,即趋势不显著;反之则拒绝原假设,趋势显著。在 α 计算结果满足上述两条件情况下,如果 Z 为正,则表明被检验序列具有上升趋势;若 Z 为负时,说明被检验序列趋势是下降的;当 Z 为零时,表明无明显趋势。

1.2 小波分析法

1.2.1 小波方差法

小波分析(wavelet analysis,简称WA)是一种时、频多分辨率分析方法,即时间域和频率域均可改变的分析方法,是傅立叶分析思想的延伸与拓展,其核心是小波变换[8]。

令 $L^2(R)$ 表示定义在实轴上、可测的平方可积函数空间,则对于时间序列 $f(t) \in L^2(R)$,其连续小波变换(continues wavelet transform,简称CWT)公式为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为经CWT之后得到的小波系数; $\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波函数 $\psi(t)$ 经过伸缩和平移后取得共轭得到的一簇函数; a 为尺度伸缩因子; b 为时间平移因子。通常在实际分析时间序列连续小波变换过程中,常选用“Morlet”小波母函数[8]。

通过连续小波变换,可获得不同尺度下的小波变换系数 $W_f(a, b)$ 。 $W_f(a, b)$ 能够同时反映时、域参数 b 和频域参数 a 的特性。通过小波系数分布图可以清楚地看出时间序列的周期变化情况,若是要准确的判断序列的周期,需利用小波方差进行判断。

对于长度为 n 的离散时间序列,小波方差的计算公式为

$$V(a) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W^2(a, x_j) \quad (5)$$

式中: $V(a)$ 为尺度伸缩因子 a 、时间 x_j 处的小波系数平方 $W^2(a, x_j)$ 的均值,对于复小波函数 $W^2(a, x_j)$ 则为系数模的平方,小波方差的各个峰值分别对应显著周期。当小波系数达到最大值时,小波函数的尺度与序列周期吻合最好。

1.2.2 小波重构与分解法

通常时间序列是趋势项、周期项和随机项三者的线性叠加,其中趋势项对应于小波分解后最大尺度的低频重构序列,而随机项对应高频部分,除去趋势项与随机项的影响后所得到的就是时间序列的周期部分,而通过小波分解与重构,随机成分就会被分

离出去,分解后的低频系数重构序列即可代表时间序列的变化趋势,通过重构序列折点可识别时间序列的变点。通常根据样本容量,最多可以把序列分解成 $\log_2 N$ 个频率级,一般情况下, $N > 2$ 对黄河入海水沙时间序列 x 采用 db3 小波函数进行分辨率为 5 的快速小波分解,可分别获得近似系数 CA_1 和详细系数 $CD_1, CD_2, \dots, CD_5$, 然后对其低频系数进行单支重构。小波分解的结构示意图如图 1 所示。

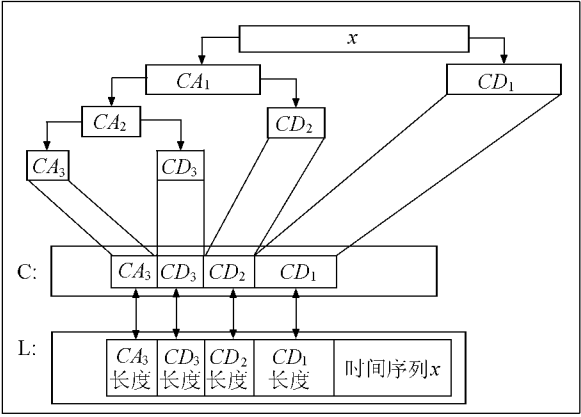


图 1 小波分解示意图

本文采用 Matlab 中小波分析方法软件包,应用 CWT 进行小波变换,用 wavedec 进行小波分解, wrcoef 进行单支重构,提取低频信号系数,通过 Matlab 应用函数的调用,可方便实现相应功能运算。

2 黄河下游水沙通量的趋势变化识别

近些年来,受到气候变化和人类活动的影响,黄河入海口水沙通量发生了较大变化,据 1950—2009 年水沙通量序列数据全年、汛期、非汛期的不同年代统计分析(表 1),自 20 世纪 60 年代以来,不同年代均值呈现减少变化,尤其 80 年代以后,其水沙通量年代均值均小于多年平均值,说明黄河入海口水沙通量呈现减少变化趋势。但 2002 年以来,随着小浪底水库调水调沙的运行,黄河口径流量有所回升,输沙量变化较小。年均值、汛期及非汛期水沙通量时间序列过程如图 2、3 所示。

表 1 1950—2009 年利津站水沙通量统计

时期	径流量/亿 m ³			输沙量/亿 t		
	全年	非汛期	汛期	全年	非汛期	汛期
1950—1959 年	480.59	181.87	298.72	13.19	1.81	11.37
1960—1969 年	497.20	205.94	291.25	10.94	2.26	8.68
1970—1979 年	313.23	125.87	187.36	8.98	1.41	7.57
1980—1989 年	285.81	96.12	189.69	6.39	0.62	5.77
1990—1999 年	142.18	55.59	86.60	3.90	0.53	3.37
2000—2009 年	140.91	64.31	76.60	1.63	0.40	1.23
平均值	309.99	121.62	188.37	7.50	1.17	6.33

为进一步检验黄河入海口水沙通量变化趋势,采用 MK 和 SP 方法两种方法对利津站 1950—2009

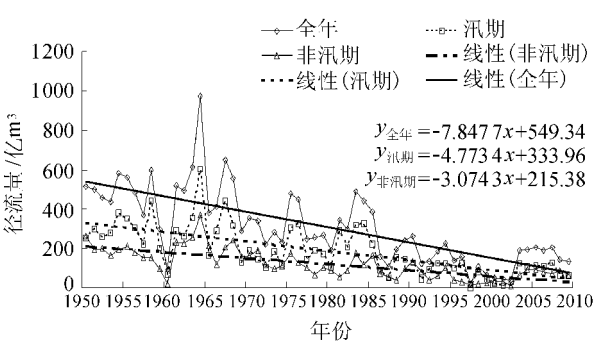


图 2 利津站 1950—2009 年径流变化趋势

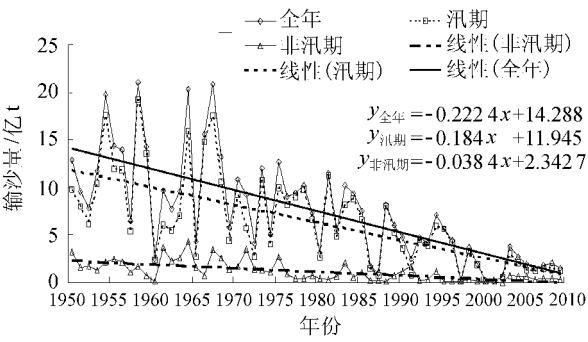


图 3 利津站 1950—2009 年输沙量变化

年全年、汛期、非汛期水沙通量序列趋势进行检验,检验结果见表 2。由表 2 可知,全年、汛期、非汛期水沙通量均通过两种方法 99.5% 置信检验,呈现显著下降变化趋势。

表 2 利津站 1950—2009 年 MK 和 SP 方法趋势识别结果

水文要素	水期	MK			SP			线性 变幅
		Z	Z _{α/2}	趋势	t	T _{α/2}	趋势	
径流量/ 亿 m ³	全年	6.3791	2.5758	显著 下降	9.2628	2.6633	显著 下降	-7.8477
	汛期	5.67	2.5758	显著 下降	7.7108	2.6633	显著 下降	-4.7734
	非汛期	6.1547	2.5758	显著 下降	8.2834	2.6633	显著 下降	-3.0743
输沙量/ 亿 t	全年	6.2823	2.5758	显著 下降	8.7579	2.6633	显著 下降	-0.2224
	汛期	5.7593	2.5758	显著 下降	7.5926	2.6633	显著 下降	-0.1840
	非汛期	5.4149	2.5758	显著 下降	6.9657	2.6633	显著 下降	-0.0384

3 黄河下游水沙通量的变点识别

采用小波分解与重构方法和有序聚类方法对利津站 1950—2009 年不同尺度水沙通量进行变点识别,结果见表 3。由表 3 知:①对于不同尺度的径流量,小波分解与重构方法识别结果显示不同尺度下较为明显的变点为 1985 年和 2002 年,而有序聚类法识别结果显示全年和汛期一致,最有可能的变点为 1985 年,非汛期有所不同,为 1971 年;②对于不同尺度的输沙量,小波分解与重构方法识别结果显

示年均值和汛期的变点为 1969、1985、2002 年 ,非汛期
期为 1985、2002 年 ,而有序聚类方法识别结果显示
年均值和汛期最有可能变点为 1985 年。

表 3 利津站 1950—2009 年水沙通量不同
尺度变点识别结果

水文要素	水期	变点年份	
		小波分解与重构法	有序聚类法
径流量	全年	1985、2002	1985
	汛期	1985、2002	1985
	非汛期	1985、2002	1971
输沙量	全年	1969、1985、2002	1985
	汛期	1969、1985、2002	1985
	非汛期	1985、2002	1975

图 4 为两种方法识别年径流量的变点过程图 ,
图 5 为两种方法识别年均输沙通量的变点过程图。

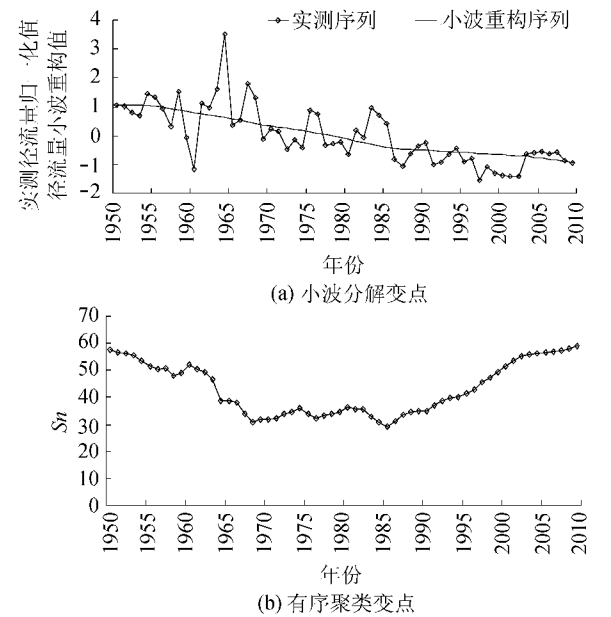


图 4 两种方法识别年径流量的变点

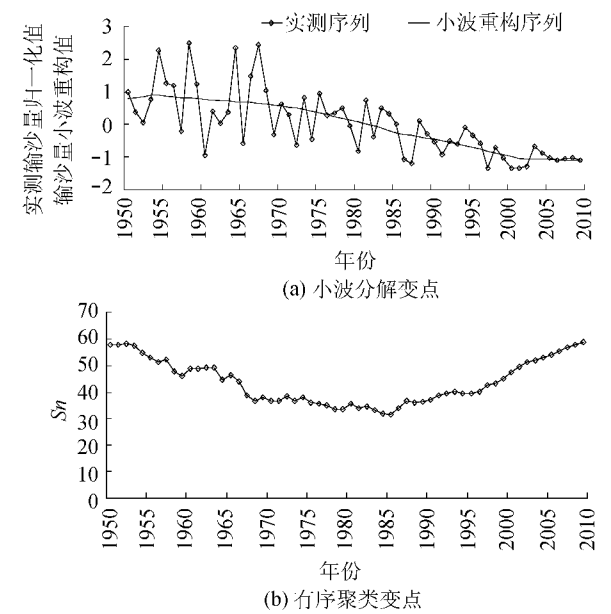


图 5 两种方法识别年均输沙通量变点

对比两种方法识别结果 ,以 20 世纪 80 年代为
分界线 ,前后水沙通量变化较为明显 ,1985 年为水
沙通量的主要变化转折点 ,其次为 2002 年。原因是
龙羊峡水库 1986—1989 年连续 4 年蓄水导致黄河
入海水沙通量在 1985 年出现明显转折 ,2002 年为小
浪底水库初运行起始点 ,2002 年以来利用小浪底水
库调蓄功能实行 9 次调水调沙后 ,使全年、非汛期入
海径流量有所抬升 ,呈现较为明显径流变点 ,此外 ,
水库汛期调节洪峰时可致使河流输沙能力降低 ,大
量泥沙滞留导致入海泥沙通量减少 ,出现变点。

4 黄河下游水沙通量的周期识别

采用小波分析法对利津站 1950—2009 年不同
尺度的水沙通量进行周期识别 ,结果见表 4。对两
种不同水文要素 ,其年均、汛期第一、第二主周期基
本相同 ,对于不同时间尺度的 ,其非汛期水沙通量的
第一、第二主周期不同于全年和汛期的周期变化特
征。图 6 为年均径流量的小波周期分析图和小波方
差过程图 ;图 7 为年均输沙量的小波周期分析图
和小波方差过程图。

表 4 利津站 1950—2009 年水沙通量不同
尺度周期识别结果

水文要素	水期	第一主周期/a	第二主周期/a
径流量	全年	8	22
	汛期	8	22
	非汛期	6	17
输沙量	全年	3、9	24
	汛期	3、9	25
	非汛期	8	18

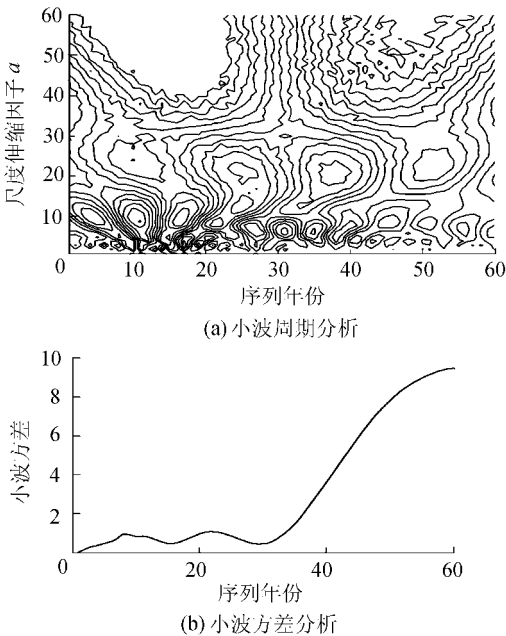


图 6 年均径流量的周期分析和小波方差过程

(下转第 28 页)

中心气候资料室、国家气候中心姜彤研究员、苏布达副研究员的帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 百度百科. 黄河三角洲[EB/OL].[2011-08-16]. <http://baike.baidu.com/view/145124.htm>.

[2] 袁瑞强, 刘贵群, 宋献方. 现代黄河三角洲浅层地下水对降水的响应[J]. 资源科学, 2009, 31(9):1514-1521.

[3] 盖世民, 徐启春, 许乃猷. 黄河三角洲近四十年的气候变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 1998(2):1-5.

[4] 刘晋秀, 江崇波, 范学炜. 黄河三角洲近40年来气候变化特征及异常特征[J]. 海洋预报, 2002, 19(2):31-35.

[5] 宋春英, 延军平, 刘路花. 黄河三角洲地区气候变化特征及其对气候生产力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7):106-111.

[6] 徐宗学, 和宛琳. 黄河流域近40年蒸发皿蒸发量变化趋势研究[J]. 水文, 2005, 25(6):6-11.

[7] BUI SHAND T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records[J]. Journal of Hydrology, 1982, 58:11-27.

[8] MANIAK U. Hydrologie und wasserwirtschaft[M]. Berlin:

Springer(in German), 1997.

[9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版, 北京:气象出版社, 2007.

[10] 刘健, 曹升乐, 翟建青, 等. 近50年山东省蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因素分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2010, 40(6):129-133.

[11] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2006, 42(4):503-509.

[12] 陈志悦, 陈皓锐, 熊孟琴. 沧州南部地区1970年以来气候变化特征分析[J]. 水资源保护, 2011, 27(4):42-47.

[13] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

[14] 刘俊萍, 田峰巍, 黄强, 等. 基于小波分析的黄河河川径流律研究[J]. 自然科学进展, 2003, 13(4):383-387.

[15] 李海娟, 夏自强, 章洁, 等. 额尔齐斯河流域年降水量时间序列分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(5):29-32.

[16] BRADSHAW G A, SPIES T A. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis[J]. Journal of Ecology, 1992, 80:205-215.

(收稿日期:2011-10-17 编辑:彭桃英)

(上接第8页)

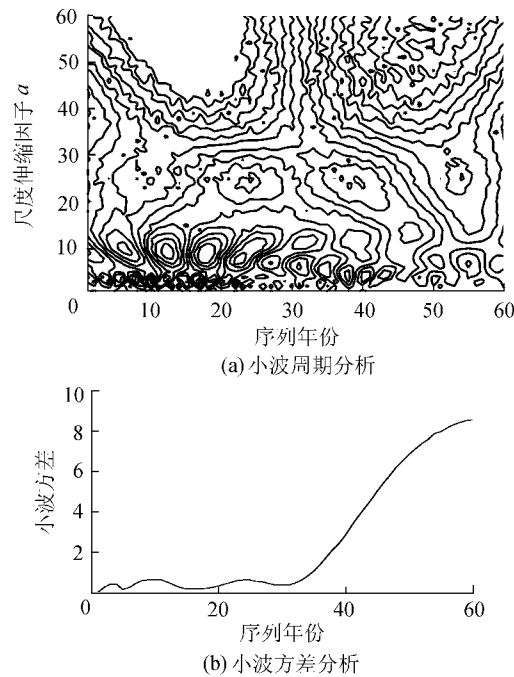


图7 年均输沙量的小波周期分析和小波方差过程

5 结论

通过多种方法综合分析1950—2009年黄河入海水沙通量的不同尺度的变化趋势、变点及周期等三方面的变化特征,并对黄河入海通量水沙通量变化特征形成原因进行了分析,不同方法识别结果显示:①采用MK、SP两种方法识别的黄河入海水沙通量的不同时间尺度的变化趋势均呈现显著下降;

②采用小波重构与分解法和有序聚类方法识别水沙通量的主要变点为1985年,次变点为2002年;不同时间尺度变点识别结果有所不同,但差别不大,两种方法识别结果有所不同,同样差别不大;③采用小波分析法(小波方差法)识别水沙通量的不同时间尺度的变化周期,年均、汛期径流量的第一主周期为8a,第二主周期为22a,非汛期径流周期有所不同,第一主周期为6a,第二主周期为17a,年均、汛期输沙量的第一主周期为3a或者9a,第二主周期为24a或者25a,非汛期输沙量第一主周期为8a,第二主周期为18a。

参考文献:

[1] 丁艳峰, 潘少明. 近50年黄河入海径流变化特征及影响因素分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5):709-716.

[2] 侯志军, 由宝宏, 茹玉英. 黄河入海口水沙通量变化规律[J]. 泥沙研究, 2007(5):60-67.

[3] 樊辉, 刘艳霞, 黄海军. 1950-2007年黄河入海水沙通量变化趋势及突变特征[J]. 泥沙研究, 2009(5):9-16.

[4] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13:245-259.

[5] 仕玉治. 气候变化及人类活动对流域水资源的影响及实例研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.

[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.

[7] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28(2):126-135.

[8] 桑燕芳, 王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3):295-306.

(收稿日期:2011-11-10 编辑:高渭文)