

近 70 年黄河入海水沙通量演变特征

王俊杰, 拾兵, 巴彦斌

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 基于黄河入海水沙控制站利津站 1950—2018 年实测水沙数据, 采用 5 a 滑动平均法等方法对水沙通量的趋势性进行了研究, 以滑动 T 检验、Mann-Kendall 检验法等对水沙时间序列的变异性进行了分析, 以小波变换、经验模态分解等方法对水沙通量的周期性进行了研究, 同时以交叉小波变换和小波相干谱分析了径流和输沙的共振周期与相干性。结果表明: 在最近 70 年内, 黄河入海水沙通量呈现显著下降趋势, 径流量和输沙量分别在 1985 年和 1996 年发生突变, 入海径流量存在 3~5 a、9~11 a、19~21 a 的尺度周期, 输沙量存在 3~6 a、9~11 a、19~21 a 的尺度周期。输沙和径流之间具有显著的正相位关系, 在 1960—1972 年存在 1~6 a 的共振周期, 并且两者低能量区关系远大于高能量区关系。研究成果可为黄河下游水资源管理、河口三角洲的生态治理以及侵蚀保护提供理论基础。

关键词: 水沙通量; 经验模态分解; 交叉小波变换; 周期性; 突变性; 趋势性; 黄河口

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)03-0057-06

Evolution Characteristics of Runoff and Sediment Fluxes of Yellow River into Bohai Sea in Recent 70 Years

WANG Junjie, SHI Bing, BA Yanbin

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

Abstract: Based on the runoff and sediment data of Lijin hydrologic station from 1950 to 2018, which is a river sediment control station of Yellow River flowing into the Bohai Sea. We used the methods of 5-year moving average method to study the trend of runoff and sediment fluxes employed the means of more methods such as sliding T test, Mann-Kendall method to test the variability of runoff and sediment time series, and used the wavelet transform and empirical mode decomposition method to investigate the periodicity of water and sediment fluxes. The results show that the runoff and sediment fluxes of Yellow River into the sea have presented the significant decline in the last 70 years, the runoff and sediment discharge mutated in 1985 and 1996, respectively, the runoff flowing into the sea existed a cycle time around 3~5 years, 9~11-years and 19~21 years, the sediment transport had scale periods of 3~6 years, 9~11-years and 19~21 years; a significant positive phase relationship between sediment transport and runoff, and a resonance period of 1~6 years around 1960—1972 have been found, the significant correlation between sediment transport and runoff in low energy areas was much greater than that in the high energy areas. These results can provide theoretical basis for the water resources management of the lower reaches of the Yellow River, the ecological management of the estuary delta and erosion protection.

Keywords: runoff and sediment flux; empirical mode decomposition; cross wavelet transform; periodicity; mutagenicity; trend; Yellow River estuary

河流入海水沙通量对河口地貌塑造、岸滩侵蚀以及近海岸泥沙输移有着重要作用^[1]; 同时, 在河流动力的作用下会使得泥沙颗粒携带大量污染物迁移到河口及近海岸, 严重影响河口生态环境^[2]; 再者, 河口及近海岸区域存在的悬浮泥沙颗粒会与水体微生

物以及其他有机物相互作用形成悬浮物, 悬浮物的大量存在会影响水体透明度, 进一步影响水体生物的光合作用和初级生产力^[3]。因而关于入海水沙通量的研究是陆海相互作用研究的重要科学问题之一。

目前, 关于黄河水沙过程的研究已引起了广泛关

收稿日期: 2019-07-03

修回日期: 2019-08-16

资助项目: 国家自然科学基金(51279189)

第一作者: 王俊杰(1994—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事水沙过程非线性研究。E-mail: junjiawang0907@163.com

通信作者: 拾兵(1961—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事河流、河口与海岸动力学研究。E-mail: sediment@ouc.edu.cn

注,但研究区域多集中在中上游段,并且对水沙过程的特征分析不够全面。如张金萍等^[4]仅研究了黄河潼关站水沙过程的趋势性、周期性,并未对其变异性进行讨论,且方法较为单一。欧阳潮波等^[5]对黄河河龙区间的水沙长期趋势、年际变异、以及水沙过程对人类活动的响应进行了讨论,对水沙的周期性并未涉及。姚文艺等^[6]利用“水文法”和“水保法”对黄河上中游水沙演变的驱动成因和未来趋势进行了研究,认为未来黄河水沙量仍处于下降趋势。另外,其他众多研究成果^[7-10]表明黄河入海水沙通量呈显著下降的趋势,且人类活动(水库建设、引水引沙和水土保持措施等)的加剧以及气候变化的影响是水沙通量减少的主要因素。那么,在多种耦合因素的影响下,最近 70 a 黄河入海水沙呈现怎样的多尺度特征?径流和输沙是否存在相似的演变规律?以及水沙之间是否具有协同影响和共振周期?为了明晰以上问题,本文以黄河利津站 1950—2018 年水沙资料为基础,应用滑动平均法对水沙趋势性进行讨论,以 Mann-Kendall 突变检验法、滑动 T 检验等对水沙序列进行年际变异性分析,同时利用经验模态分解和 Morlet 小波分析对水沙过程的多尺度周期进行探讨,另外利用交叉小波分析和小波相干性对径流和输沙的共振周期进行研究。旨在为进一步加强黄河口及其邻近海域的生态治理、三角洲的侵蚀保护等提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

黄河流域处于东亚海陆季风区的北部,是中国的第二大河,以水少沙多而闻名于世,具有“水沙异源”的显著特点^[11]。利津站是黄河流域的入海控制站,在利津水文站至入海口之间的泥沙淤积量无法确定时,可将利津站实测悬移质输沙量近似视为黄河入海泥沙通量^[12]。本文所探讨的黄河入海水沙通量数据为 1950—2018 年利津水文站实测资料,其主要来源分为三部分:一是《全国主要河流水文特征统计》,时间跨度为 1950—1979 年;二是黄河利津水文站,时间跨度为 1980—1999 年;三是《中国河流泥沙公报》,时间跨度为 2000—2018 年。资料均通过水文的“三性”审查,研究区利津水文站地理位置如图 1 所示。

2 研究方法

趋势性、周期性和突变性是水文时间序列的重要特征^[13],本文采用 5 a 滑动平均法、Mann-Kendall 突变检验法、滑动 T 检验等方法对水沙序列的趋势性

和变异点进行分析,并通过小波变换、经验模态分解等方法对水沙通量的周期性进行研究,利用交叉小波分析和小波相干谱对径流量和输沙量的共振周期与相干性进行研究,其中 Mann-Kendall 突变检验法、滑动 T 检验、小波分析等方法为水文分析常用方法,因此不再赘述,经验模态分解方法和交叉小波分析方法如下:

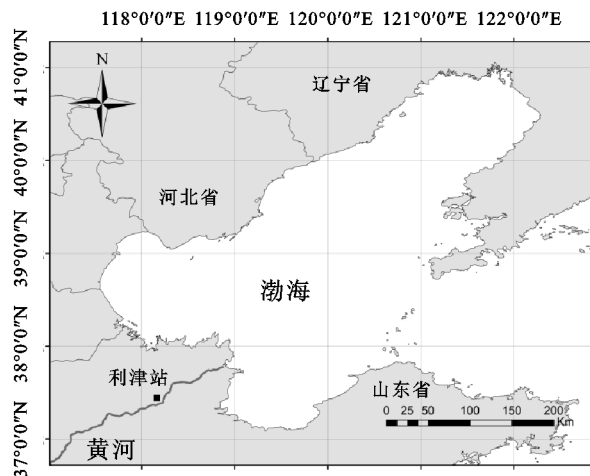


图 1 研究区及水文站位置

(1) EMD 方法。经验模态分解是 Huang 等人^[14]在 1998 年提出的一种自适应信号的分解方法,它利用信号内部的特征尺度变化作频率与能量的解析,将非平稳、非线性信号分解为若干本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)和一个残余分量。对于给定的原始信号 $X(t)$,其分解过程为:

① 找出信号 $X(t)$ 的所有极大值与极小值,然后利用三次样条插值函数将极大值与极小值拟合为信号的上包络线 $u_1(t)$ 和下包络线 $u_2(t)$,并求出上下包络线的均值 $m_1(t)$, $m_1(t) = \frac{1}{2}[u_1(t) + u_2(t)]$ (1)

② 计算 $h_1(t) = X(t) - m_1(t)$ (2)

③ 判断 h_1 是否是 IMF,若不是,则继续重复①、②过程,直到均值包络线趋于零,此时,记 h_1 为 c_1 , c_1 即为筛选出的第一个 IMF,它表示原始信号的最高频分量。

④ 将 c_1 从原始信号中分离,得到去除一个高频分量的新信号 $r_1(t)$,即:

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (3)$$

$r_1(t)$ 也称为残余信号,再对新信号重复以上步骤,直到第 n 个残余信号变为单调函数,即可终止分解,最终得到一组 IMF 和一个残差信号 $r_n(t)$ 。原始信号 $X(t)$ 可以重构为:

$$X(t) = \sum_{j=1}^{n-1} c_j(t) + r_n(t) \quad (4)$$

式中: $r_n(t)$ 为残差项, 代表信号的平均走势。

(2) 交叉小波分析。交叉小波分析(cross wavelet transform, XWT)是将交叉谱分析和小波变换相结合的信号分析方法^[15], 能够从多时间尺度分析两个具有一定物理关系的时间序列在时频域中的内在联系。给定两个时间序列 X_n 和 Y_n , 其交叉小波谱定义为: $W_n^{XY} = W_n^X W_n^{Y*}$, W_n^{Y*} 为 Y_n 序列小波变换系数的复共轭, 交叉小波功率 $|W_n^{XY}|$ 值越大, 两者在不同时频域上的相关性越显著。

小波相干性(wavelet coherence, WTC)用来反映两个时间序列在时频空间的相干程度, 其定义为:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2}{S \cdot (s^{-1} |W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1} |W_n^Y(s)|^2)} \quad (5)$$

式中: S 被称为平滑算子, $|S(s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2$ 为两时间序列在某一频率下波振幅的交叉积; $S(s^{-1} |W_n^X(s)|^2)$ 为振动波的振幅。

小波相干性显著性检验采用以红噪声为标准谱的 Monte Carlo 方法。

3 结果与分析

3.1 水沙通量趋势及变异分析

为分析黄河入海水沙通量的趋势, 分别对1950—2018年利津站水沙时间序列做趋势分析和五年滑动平均处理。近70a黄河入海年径流量呈现波动下降的趋势见图2A。在1950—1970年, 径流量平

均值较高, 处在波动的偏高期, 1970年之后整体下降较快; 近70a下降的趋向率为64.3亿 $\text{m}^3/10\text{a}$, 年均径流量为293.7亿 m^3 。输沙量在近70a也呈现出与径流量相似的趋势特征见图2B。近70a泥沙下降的趋向率为2.14亿 $\text{t}/10\text{a}$, 年输沙量平均值为6.62亿 t , 两者的相关性表明, 在 $\alpha=0.01$ 的置信度水平上呈显著正相关, Pearson相关系数为0.853。

近70a, 在人类活动(水库修建、水土保持措施、干流引水等)和气候变化双重因素的作用下^[16], 黄河入海水沙通量发生了深刻变化。1970年之前, 黄河流域大型水利枢纽工程较少, 河流连通性顺畅, 且流域降雨充沛, 入海水沙量主要受气候变化影响; 70年代以后, 黄河干支流陆续修建了刘家峡、龙羊峡、青铜峡、小浪底等水利枢纽, 黄河流域的径流逐渐被干支流的水库控制, 其中, 黄河干流中、上游水库除三门峡外共有7座, 总库容高达314.12亿 m^3 ^[11], 改变了黄河天然的径流状态, 河流挟沙能力下降, 1986年之后的年平均入海泥沙仅为1986年之前的23.2%。

在分析1950—2018年黄河入海水沙趋势的基础上, 通过M-K非参数检验法、滑动T检验、累积距平法对径流和输沙的突变年份进行确定。在入海径流量M-K统计量曲线中, 在0.05置信度水平内, UF和UB曲线在1985年出现交点见图3A; 入海泥沙量则在1995年, 1996年两个年份出现交点见图3B。因此, 对应的时间节点可能为水沙时间序列的突变年份。

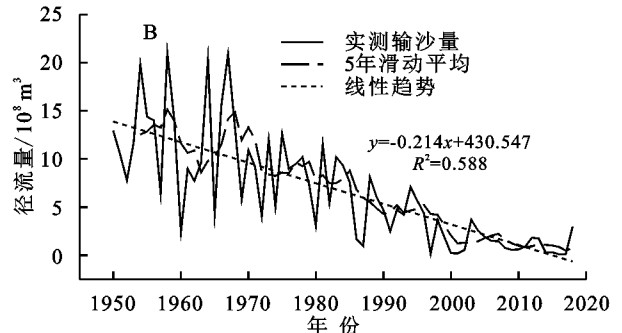
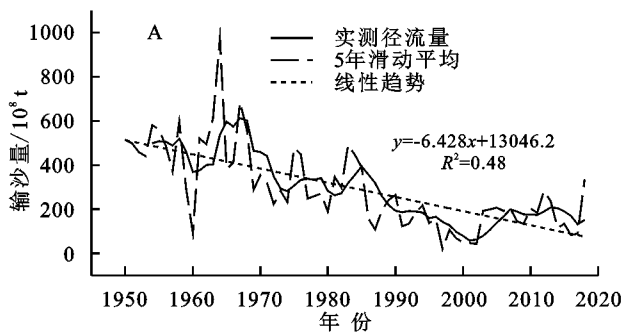


图2 黄河入海径流量、输沙量变化趋势

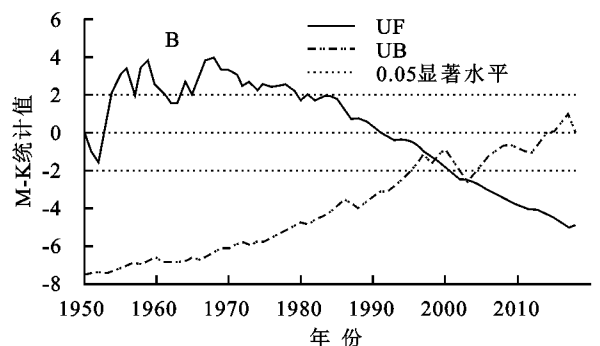
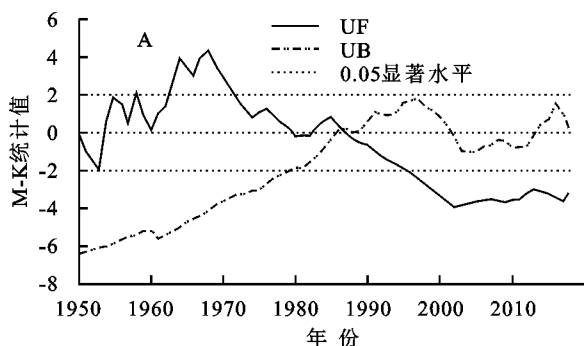


图3 黄河入海径流量、输沙量 M-K 检验

为了进一步阐明近 70 a 入海输沙量和径流量的突变情况,结合水沙序列的累积距平曲线(图 4),发现 1950—2018 年水沙时间序列的累积距平曲线大致呈倒“V”型,同时其拐点出现在 1985 年,说明在 1950—1985 年,入海水沙量呈现增长的趋势,在 1985 年之后开始出现下降,整体上经历了由“丰”到“枯”的变化;再进一步结合滑动 T 检验发现,在步长为 3, 0.01 显著水平下,径流量 UF 和 UB 曲线相交的 1985 年通过滑动 T 检验;对于输沙量,只有 1996 年通过了步长为 4,显著水平为 0.01 的滑动 T 检验,因此,在结合多种方法的基础上,认为入海径流量在 1985 年发生变异,入海输沙量在 1996 年发生变异,尽管径流量和输沙量的时间序列具有较强的相关性(相关系数为 0.853),但两者的变异年份仍有一定时差,这与黄河流域“水沙异源”特性以及人类活动干扰等因素有关^[12]。

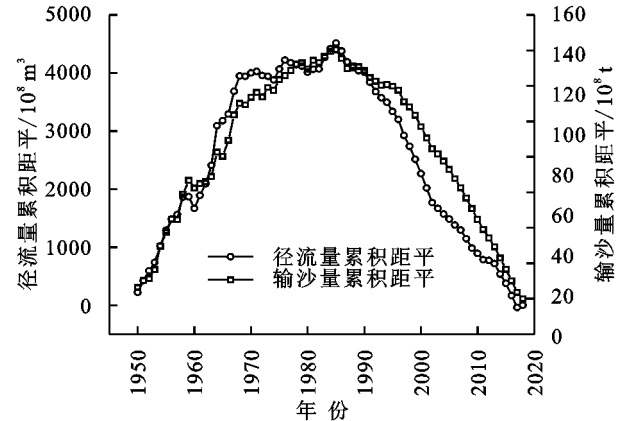


图 4 径流和输沙的累积距平曲线

3.2 水沙通量多时间尺度特征

本文采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)与 Morlet 小波分析的方法对 1950—2018 年黄河入海水沙时间序列进行多时间尺度特征分析。经验模态分解是一种数据驱动算法,具有较好的灵活性和自适应性,能够根据数据固有特征进行分解^[17],图 5—6 分别为径流量和输沙量的经验模态分解结果,可以看出 1950—2018 年黄河入海径流量分成了 3 个本征模态函数(IMF)和 1 个趋势项(Res),输沙量被分解成了 4 个 IMF 和 1 个趋势项,分别对径流量和输沙量的 IMF 和趋势项进行重构,发现与原始序列完全重合。可以认定 EMD 方法分解结果正确可靠,同时通过对径流量和输沙量的趋势项(Res)的大致走向分析,发现径流量在 1950—2000 年处于减少的趋势,在 2000 年左右以后,出现了小幅度上升态势,而输沙量一直处于减少的趋势,这与上文的发展趋势分析中的结果基本一致。

为了分析径流和输沙的不同时间尺度特征,对径流和输沙经过经验模态分解的各个分量利用 FFT 求周期的方法进行分析^[18],结果见表 1。

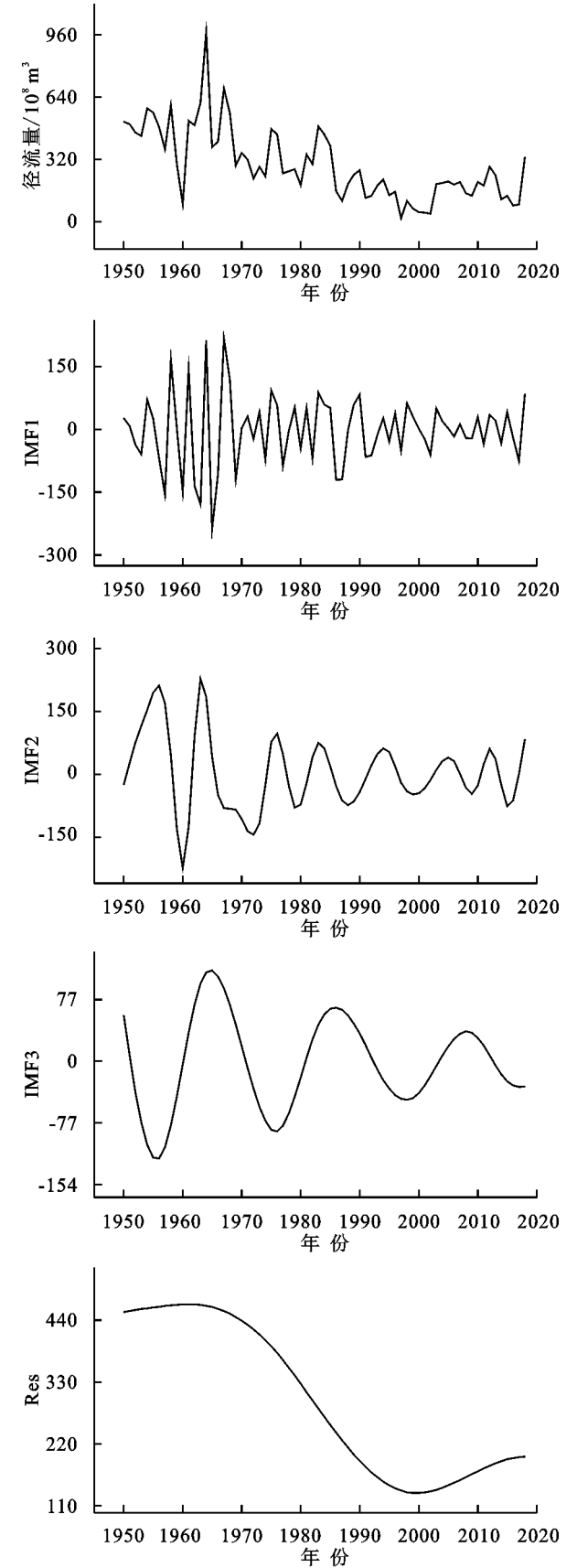


图 5 径流量 EMD 分解

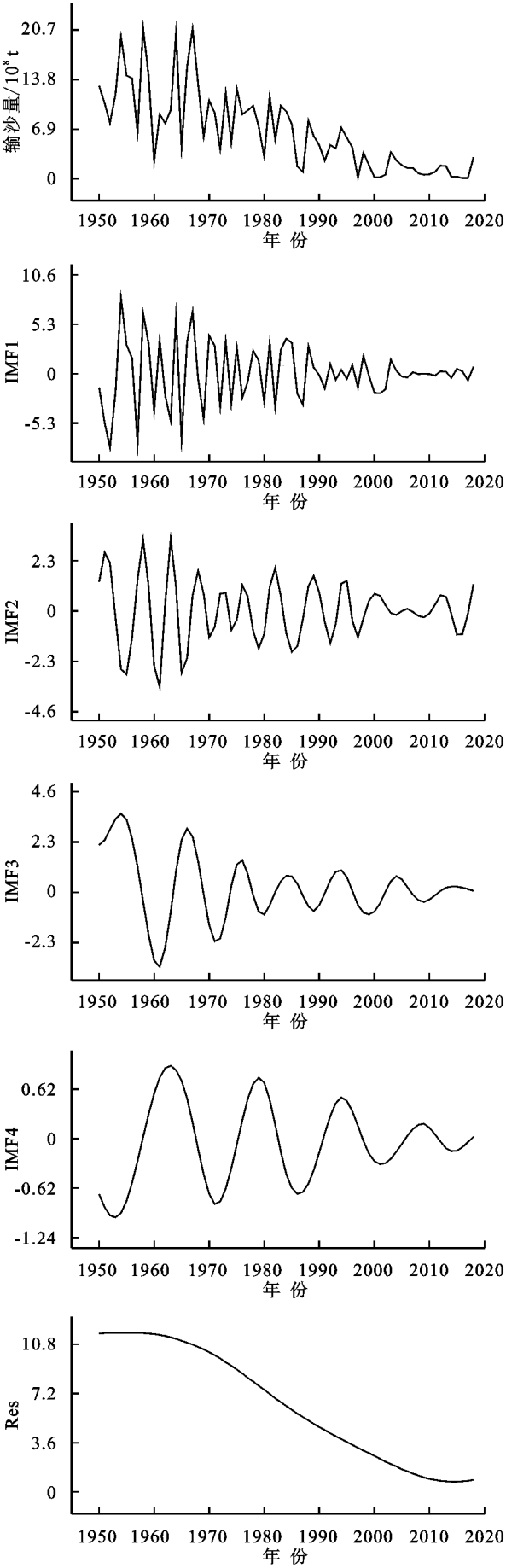


图 6 输沙量 EMD 分解

表 1 周期识别结果

| 项目 | IMF1 | IMF2 | IMF3 | IMF4 |
|----|------|------|-------|-------|
| 径流 | 3~5 | 9~11 | 19~21 | — |
| 输沙 | 3~4 | 5~6 | 9~11 | 19~21 |

由表 1 可知,径流和输沙在不同时间尺度上的周期基本一致,其中输沙量的 IMF1 和 IMF2 的周期尺度相近,这可能由经验模态分解的局部筛选性质制约而造成“模态混叠”现象有关^[19],但不影响对水沙时间序列周期的识别。黄河入海径流量具有 3 个模态,第一阶模态 IMF1 频率最高,周期最小,IMF1 和 IMF2 的分别具有 3~5 a,9~11 a 的尺度周期,反映了径流量的年际尺度振荡,而 IMF3 的周期为 19~21 a,是入海径流量年代际尺度周期;黄河入海泥沙具有 4 个模态,其中,IMF1 是频率最高,周期最小的模态,与径流的 IMF1 对应,具有 3~4 a 的尺度周期,IMF2,IMF3 周期分别为 5~6 a,9~11 a,以上 3 个模态均为输沙量的年际尺度周期,IMF4 周期为 19~21 a,是入海输沙量的年代际周期,黄河入海水沙呈现出的多尺度特征,表明黄河流域受到人类活动、气候、下垫面变化等因素的综合作用,具有复杂的演变过程。

在采用经验模态分解对黄河入海水沙进行多尺度特征分析的基础上,亦利用 Morlet 小波分析进行对比,图 7 分别为 1950—2018 年黄河径流量和输沙量的小波系数等值线图,可以反映不同时间段下的周期振荡强弱程度,以及水沙时间序列的丰、枯交替的变化现象,其中,实线为丰水丰沙阶段,虚线为枯水枯沙阶段。黄河入海径流量分别存在 3~5 a,9~11 a 以及 20~22 a 的尺度周期,与经验模态分解的结果较为吻合,并且入海径流量在年代际尺度周期上大致经历了“丰—枯—丰—枯—丰”5 个阶段,未来一段时间内仍为丰水阶段,且 20~22 a 的尺度周期具有全局性,存在径流的整个阶段,3~5 a,9~11 a 的年际尺度周期在 1985 年之前振荡较强,在 1985 年之后逐渐减弱,这与上文 M-K 检验、滑动 T 检验认为径流在 1985 年发生变异的结论具有一致性;同时,通过分析黄河入海泥沙量的小波系数等值线图发现,1950—2018 年入海泥沙量大致存在 3 个不同的时间尺度周期,分别为 2~5 a,9~11 a,22~24 a,输沙量小波分析的结论与经验模态分解的结果具有一致性,输沙量在 22~24 a 的年代际尺度周期上大致经历了“丰—枯—丰—枯”4 个阶段,并且未来几年仍为枯沙阶段,输沙量的年代际周期在 1970 年之后振荡逐渐减弱,9~11 a 尺度周期在整个时间段内较为稳定,具有全局性。

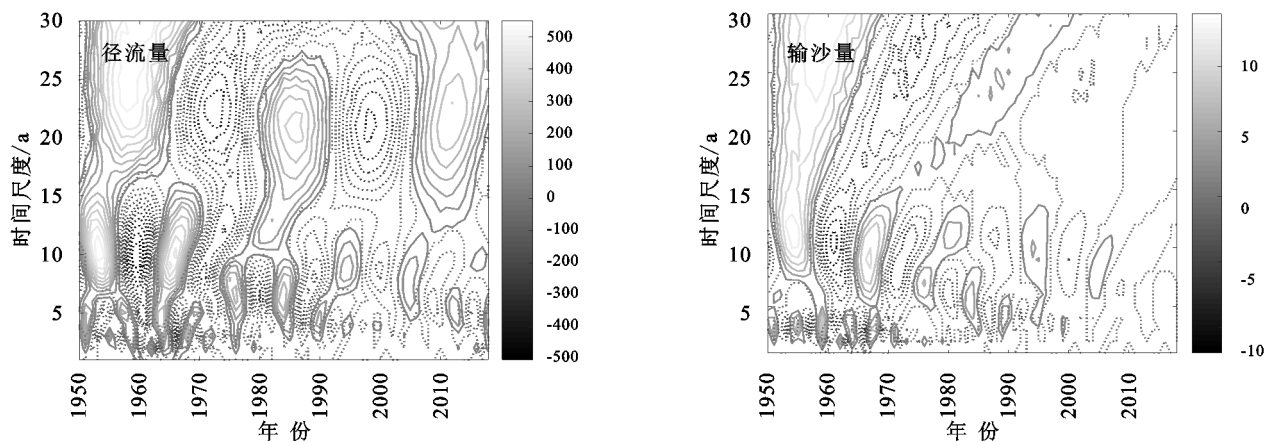


图 7 径流量、输沙量小波系数等值线

综合经验模态分解与小波分析,发现黄河入海水沙的长期演变过程具有显著的年际以及年代际尺度周期变化特征,同时,入海径流量和输沙量的趋势性以及周期尺度特征基本吻合。并且,在 1985 年以后,黄河入海水沙的各种尺度周期振荡强度逐渐减弱,这与黄河流域大规模人类活动有关,黄河入海水沙进入了新的阶段。

3.3 水沙通量的共振周期

对 1950—2018 年黄河入海水沙序列进行交叉小波分析,图 8 径流量和输沙量的交叉小波谱和小波相干谱;其中,箭头方向表示两者之间的相位关系,由左向右表示为同相位关系,由右向左表示反相位,黑色粗实线表示两者之间达到了 95% 的红噪声检验,黑

色的细实线为小波影响锥线(COI),该曲线以外区域由于受到边缘效应而不予考虑^[20]。由径流和输沙的交叉小波谱可以发现,径流和输沙共同的高能量周期为 1~6 a,6~15 a,并且在 1960—1972 年 1~6 a 的周期尺度通过了 95% 显著性检验,且二者呈正相位关系;由径流和输沙的小波相干谱可知,黄河入海径流和输沙在整个时频空间低能量区内存在显著的共振周期,且低能量区的显著相关性远大于高能量区,其中,8~16 a 的时间尺度在整个时间段内均通过 95% 的显著性检验(两端时间受边界影响),且二者以正相位为主,说明黄河入海径流和输沙演变特征具有极强的一致性。

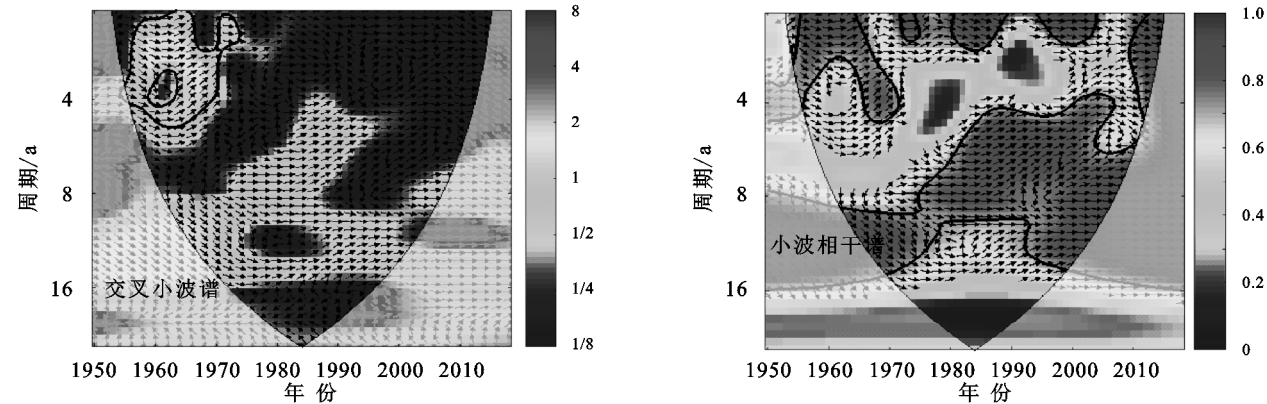


图 8 径流和输沙的交叉小波谱与小波相干谱

4 结论

- (1) 近 70 a 黄河入海水沙呈显著下降趋势,黄河入海径流量在 1985 年发生变异,输沙量在 1996 年发生变异,且在 1970 年之后,黄河入海水沙通量的各种尺度信号出现逐渐减弱的特征。
- (2) 1950—2018 年黄河入海水沙具有显著的周期变化规律,其中,径流量具有 3~5 a,9~11 a,19~21 a 年的显著周期,输沙量具有 3~4 a,5~6 a,9~11 a,19~21 a 的显著周期变化规律。

(3) 交叉小波分析表明 1950—2018 年黄河入海水沙在 1~6 a 的时间尺度上具有共同的振荡周期,显著性区域集中在 1960—1972 年,表明黄河入海水沙之间的相关性在该时频空间下最为显著。小波相干谱分析表明,输沙和径流以正相位关系为主,且黄河入海水沙之间的低能量区的显著性远大于高能量区,反映出黄河入海径流和输沙的演变特征具有一致性。

参考文献:

[1] 张伯虎,吴修广,谢东风.近 50 年来浙江入海河流水沙通量变化过程[J].泥沙研究,2015(6):24-29.

- [10] 陆绍娟,王占礼,王栋栋.喷施 Jag C162 对黄土坡面水流切应力影响研究[J].水土保持研究,2017,24(2):31-35,42.
- [11] 穆兴民,王万忠,高鹏,等.黄河泥沙变化研究现状与问题[J].人民黄河,2014,36(12):1-7.
- [12] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- [13] 刘芳,熊伟,王彦辉,等.基于 LUCC 的泾河流域景观格局与径流的响应关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):137-142.
- [14] 刘纪根,任洪玉,牛俊,等.紫色土区小流域侵蚀产沙对水土保持措施的响应[J].水土保持研究,2018,25(2):29-33.
- [15] 张富,赵守德.黄丘五副区土地利用方式与土壤侵蚀关系研究[J].中国水土保持,1993(1):17-20.
- [16] 张富,姚进忠,雷升文,等.甘肃省水土保持综合治理效益研究[M].郑州:黄河水利出版社,2014:131.
- [17] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245-259.
- [18] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London:Charles Griffin, 1975.
- [19] 夏露,宋孝玉,李怀有,等.硃瓦川流域水沙演变特征及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2016,30(1):89-95.
- [20] 秦瑞杰,李桂芳,李平.降水和土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):32-37,43.
- [21] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降水对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30.
- [22] 何杨洋,王晓燕,段淑怀,等.密云水库上游流域次降水坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2015,31(24):134-141.
- [23] 陈杰,刘文兆,张勋昌,等.黄土丘陵沟壑区林地水文生态效应[J].生态学报,2008,28(7):2954-2963.
- [24] Zhang F, Xing Z S, Zhao C Y, et al. Characterizing long-term soil and water erosion and their interactions with various conservation practices in the semi-arid Zulihe basin, Dingxi, Gansu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2017,106:458-470.

(上接第 62 页)

- [2] Lai H J, Fang H W, Huang L, et al. Reible Danny. A review on sediment bioflocculation: Dynamics, influencing factors and modeling[J]. *the Science of the Total Environment*, 2018,642:1184-1200.
- [3] 栾虹,付东洋,李明杰,等.基于 Landsat 8 珠江口悬浮泥沙四季遥感反演与分析[J].海洋环境科学,2017,36(6):892-897.
- [4] 张金萍,张鑫,肖宏林.潼关水文站 1919—2015 年水沙演化特征研究[J].水电能源科学,2018,36(11):112-115.
- [5] 欧阳潮波,王文龙,田勇,等.60 年来黄河河龙区间水沙变化特征及人类活动影响评价[J].泥沙研究,2016(4):55-61.
- [6] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [7] 李万志,刘玮,张调风,等.气候和人类活动对黄河源区径流量变化的贡献率研究[J].冰川冻土,2018,40(5):985-992.
- [8] 许炯心.黄河上游内蒙古河段平滩流量对人类活动和气候变化的响应[J].地理科学,2016,36(6):837-845.
- [9] Zhao C S, Liu C M, Dai X Q, et al. Separation of the impacts of climate change and human activity on runoff variations[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015,60(2):234-246.
- [10] 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.
- [11] 贺莉,王光谦,李铁键.黄河流域水产沙系统的划分及中游重点区的编码[J].泥沙研究,2009(2):41-47.
- [12] 许炯心.流域降水和人类活动对黄河入海泥沙通量的影响[J].海洋学报,2003,25(5):125-135.
- [13] 杨志峰,李春晖.黄河流域天然径流量突变性与周期性特征[J].山地学报,2004,22(2):140-146.
- [14] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998,454(1971):903-995.
- [15] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1998,79(1):61-78.
- [16] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.
- [17] 叶松,李源壮,孙永丰,等.基于经验模态分解与回归分析的空间外差光谱目标提取[J].红外与激光工程,2018,47(12):357-363.
- [18] 李强,吴健,许正文,等.利用 EMD 方法提取太阳活动周期成分[J].空间科学学报,2007,27(1):1-6.
- [19] 姜锋,丁志宏,赵焱.基于 CEEMDAN 的黑河莺落峡年径流量多时间尺度变化特征研究[J].中国农村水利水电,2018(2):64-67.
- [20] 刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6):1137-1146.