

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.010.

陈宏涛, 牟献友, 罗红春, 等. 1958—2022 年黄河头道拐水文站水沙特征分析及预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 10-21.

Chen Hongtao, Mu Xianyou, Luo Hongchun, et al. Analysis and Prediction of Runoff and Sediment Flux Characteristics at the Toudaoguai Hydrological Station of the Yellow River from 1958 to 2022[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 10-21.

# 1958—2022 年黄河头道拐水文站 水沙特征分析及预测

陈宏涛<sup>1</sup>, 牟献友<sup>1</sup>, 罗红春<sup>1</sup>, 冀鸿兰<sup>1,2</sup>, 刘晓民<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 黄河流域内蒙古段水资源与水环境综合治理协同创新中心, 呼和浩特 010018)

**摘要:** [目的] 探究黄河头道拐水文站径流量与输沙量演变特征, 为区域水资源合理规划提供理论依据。[方法] 基于 1958—2022 年径流输沙数据, 采用非参数检验方法与 CEEMDAN 法研究了头道拐水文站水沙趋势、突变及周期变化特征, 并通过水沙月值数据构建 Informer 预测模型。[结果] (1) 年径流量与年输沙量的 M-K 统计量分别为  $-3.380$ ,  $-5.067$ 。年径流量和年输沙量分别于 1986 年、1968 年和 1986 年发生突变, 下降率分别为 36%, 44.38% 和 61.32%。(2) 使用 CEEMDAN 法对径流量与输沙量年值序列进行分解后均得到 3 个 IMF 分量与 1 个 RES 分量, 水沙序列的 3 个 IMF 分量平均周期分别为 3.69 a, 7.67 a, 30 a 和 3.41 a, 7.5 a, 26 a; 水沙月值序列经过分解后得到 7 个 IMF 分量, 短周期为 3.46 月与 3.61 月, 长周期为 226.33 月与 184.50 月, 主导周期为 7.25 月和 8.09 月。(3) 模型构建后发现径流的预测精度高于输沙, 原因是输沙量受影响因素众多, 变动幅度更大, 较径流量预测难度大。[结论] 黄河头道拐水文站水沙存在显著下降趋势, 主要归因于降水影响, 且序列突变节点与上游水库建成密切相关。

**关键词:** 水沙演变; 非参数检验; CEEMDAN; 水沙模型; 头道拐水文站

中图分类号: S157.1; P338

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0011-11

## Analysis and Prediction of Runoff and Sediment Flux Characteristics at the Toudaoguai Hydrological Station of the Yellow River from 1958 to 2022

Chen Hongtao<sup>1</sup>, Mu Xianyou<sup>1</sup>, Luo Hongchun<sup>1</sup>, Ji Honglan<sup>1,2</sup>, Liu Xiaomin<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Collaborative Innovation Center for Comprehensive Management of Water Resources and Water Environment in Inner Mongolia of the Yellow River Basin, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the evolution characteristics of runoff and sediment flux at the Toudaoguai hydrology station of the Yellow River, and to provide theoretical basis for rational planning of regional water resources. [Methods] Based on the runoff and sediment flux data from 1958 to 2022, non-parametric testing methods and the CEEMDAN method were adopted to study the trends, abrupt changes, and periodic variations in runoff and sediment flux at the Toudaoguai hydrological station. Furthermore, an Informer prediction model was constructed by using monthly runoff and sediment flux data. [Results] (1) The M-K statistics for annual runoff and annual sediment flux are  $-3.380$  and  $-5.067$ , respectively. The annual runoff and sediment flux experienced abrupt changes in 1986, 1968 and 1986, with decline rates of 36%, 44.38% and 61.32%, respectively. (2) After decomposing the annual runoff and

收稿日期: 2023-12-05

修回日期: 2024-02-23

资助项目: 国家自然科学基金联合资助项目(U23A2012); 国家自然科学基金(52379014); 内蒙古自然科学基金重点项目(2022ZD08); 内蒙古自然科学基金青年资助项目(2023QN05026)

第一作者: 陈宏涛(2000—), 男, 甘肃永靖人, 硕士生, 研究方向为水文序列非一致性研究。E-mail: Gtemeng@163.com

通信作者: 冀鸿兰(1970—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 主要从事河冰过程及水文序列非一致性研究。E-mail: honglanji@imau.edu.cn

http://stbcyj.paperonce.org

sediment flux sequences using the CEEMDAN method, three IMF components and one RES component were obtained for both sequences. The average periods of the three IMF components in the runoff and sediment flux sequences were 3.69 years, 7.67 years, 30 years and 3.41 years, 7.5 years, 26 years, respectively. The decomposition of the monthly runoff and sediment flux yielded 7 IMF components, with short periods of 3.46 months and 3.61 months, long periods of 226.33 months and 184.50 months, and dominant periods of 7.25 months and 8.09 months. (3) After constructing the model, it was found that the prediction accuracy for runoff was higher than that for sediment flux. This is because that sediment flux is influenced by numerous factors and exhibits a more extensive range of variation, making it more challenging to predict than runoff. [Conclusion] There is a significant downward trend in runoff and sediment flux at the Yellow River Toudaoguai hydrological station, which is mainly attributed to the influence of precipitation, and the abrupt change points in the sequences closely related to the construction of upstream reservoirs.

**Keywords:** runoff and sediment flux evolution; non-parametric test; CEEMDAN; runoff and sediment flux model; Toudaoguai hydrological station

近年来,由于全球气候变暖及人类活动影响,黄河流域水文时间序列发生显著改变。头道拐水文站位于黄河上中游分界点河口镇上游 10 km 处,其上游十大孔兑为季节性河流,区域植被稀少,水土流失问题严重,下游流经峡谷地段,由于其独特的地理位置,头道拐水文站水沙演变过程十分复杂。因此,探究头道拐水文站水沙演变趋势及特征具有重要意义。

河流水沙演变规律一直是水文领域的研究热点之一<sup>[1]</sup>,主要以趋势性、突变性和周期性分析为主<sup>[2]</sup>。目前水沙趋势变化的分析方法主要有 Mann-Kendall 趋势检验法<sup>[3]</sup>、滑动平均法等<sup>[4]</sup>;水沙序列突变的检验方法有 Mann-Kendall 突变检验法<sup>[1,3]</sup>、Pettitt 检验法<sup>[5]</sup>、有序聚类法等<sup>[6]</sup>;序列周期的分析方法有功率谱分析法<sup>[7]</sup>、小波分析法<sup>[8]</sup>、经验模态分解法等<sup>[9]</sup>。国内很多学者使用上述方法对全国各流域水沙时间序列开展了大量的研究工作,王未等<sup>[10]</sup>采用 Mann-Kendall 法对 1960—2015 年黄河源头及干流重点控制站的径流序列进行趋势检验,发现除黄河沿站外其余站点均为下降趋势;隆院男等<sup>[11]</sup>利用 Pettitt 检验法与 Mann-Kendall 突变检验法得出湘江干支流在 1953—2014 年中,干流站点的径流量与输沙量突变于 1990 年和 1986 年,支流站点的径流量突变于 1990 年,输沙量突变于 1980 年;田鹏等<sup>[9]</sup>基于经验模态分解法分析得出黄河天然径流变化具有明显的随机特征;郭彦等<sup>[12]</sup>将小波分析法应用于黄河内蒙古段水沙序列,发现序列具有多尺度振荡的特点,存在着年际及年代际的周期性变化规律。这些工作为水文序列方面的研究提供了良好的借鉴经验,但上述方法本身具有一定的限制条件:Mann-Kendall 法要求序列具有独立性,而水文时间序列具有自相关性、Pettitt 检验法只适用于单点检验、EMD 算法本身具有模态混叠等缺

点,故上述研究结论具有一定的局限性。而通过去趋势预置白法可降低时间序列自相关性,BS-Pettitt 突变检验模型适用于多变异点识别,自适应噪声完备经验模态分解(CEEMDAN)较好地解决了 EMD 算法模态混叠的缺点。本研究通过数据预处理及其余方法在一定程度上提高检验精度,对头道拐水文站水沙序列进行更加精确、全面的分析及预测。

本文选取黄河主要控制站头道拐水文站为研究对象,基于 1958—2022 年径流量及输沙量数据,利用 Mann-Kendall 趋势检验与 BS-Pettitt 突变检验模型分析头道拐水文站水沙趋势变化与突变特征;采用 CEEMDAN 法探究该水文站水沙序列周期特征;并通过 CEEMDAN 分解得到的各分量构建 Informer 预测模型,为该区域水资源合理规划、防洪防汛防凌工作提供理论依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

头道拐水文站位于呼和浩特市托克托县(111°04'E, 40°16'N),黄河上中游分界点河口镇上游约 10 km 处,是黄河重要控制站。头道拐水文站地处干旱半干旱区,为典型的大陆性季风气候,多年平均气温 4~8℃,年降水量 150~450 mm,年蒸发量 1 200~2 000 mm,区域降水量小而蒸发量大,降雨主要集中于汛期,气温和降水呈现明显的季节性变化<sup>[13]</sup>。年均径流量为 211.74 亿 m<sup>3</sup>,输沙量为 0.91 亿 t,流域控制面积 36.79 万 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源

本文选取头道拐水文站 1958—2022 年径流量和输沙量年值及月值数据,数据来源于《1919—1970 年黄河流域水文特征值统计第二册》和《1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统

计》及历年黄河流域水文年鉴、黄河泥沙公报等资料。

## 2 研究方法

### 2.1 累积距平法

累积距平法<sup>[14]</sup>是用来判断数据点离散程度与趋势变化的一种非线性统计方法。距平值为时间序列各数值与序列平均值的差值,累积距平曲线上升(下降)表示该时间节点的距平值为正(负),可根据曲线的起伏判断序列趋势变化及突变时间节点。

### 2.2 去趋势预置白法(Trend-free Pre-whiting, TFPW)

M-K 检验法与 Pettitt 检验法对待检序列有一定的限制条件,即要求序列具有独立性,而时间序列通常具有自相关性,若直接对序列进行检验会导致检验结果不精确,TFPW 是 Yue 等<sup>[15]</sup>针对这一问题提出的方法,其在不影响时间序列趋势的前提下可剔除序列自相关性。TFPW 在本次研究中用于 M-K 检验和 BS-Pettitt 检验之前,借助去趋势与预置白法来提高检验的精度。

### 2.3 Mann-Kendall 趋势检验

M-K 法是一种非参数统计检验方法,M-K 法凭借不需要待检验序列遵从一定分布的特点,受到很多学者欢迎,已成为世界气象组织(WMO)推荐使用的方法<sup>[16]</sup>。对序列进行 M-K 检验之后得到统计量  $Z$ ,当  $Z$  值大于 0 时序列为上升趋势,小于 0 时为下降趋势, $Z$  绝对值越大代表上升(下降)趋势越显著。

### 2.4 BS-Pettitt 突变检验法

Pettitt 检验法是由 Pettitt<sup>[17]</sup>于 1979 年提出的一种突变检验方法,Pettitt 法在单点检验上具有良好的准确性,但是在多点检验中表现欠佳。因此本文采用张洪波等<sup>[18]</sup>于 2017 年提出的 BS-Pettitt 耦合模型,使用二元分割(Binary Segmentation, BS)算法的迭代功能,通过将序列进行检验—分割—再检验的方法,达到多突变点识别的目的。

### 2.5 自适应噪声完备经验模态分解(CEEMDAN)

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是 Huang 等<sup>[19]</sup>提出的一种新型信号处理方法,适用于非线性非平稳信号的处理分析。EMD 法可根据数据本身的时间尺度进行信号分解,得到不同幅度的本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)与残余项(Residual, RES),且不需要事先预定基函数,但是分解时会存在模态混叠现象。针对这一问题 Torres 等<sup>[20]</sup>于 2011 年提出自适应噪声完备经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)算法,该算法通过在分解阶段自适应地添加白噪声较好地解决了

EMD 存在模态混叠的问题。

### 2.6 双累积曲线

双累积曲线是一种能够量化气候变化及人类活动对流域水沙变化贡献程度的方法,该方法能够直观地判断水文气象要素的一致性,被广泛地应用于水文气象研究中<sup>[21]</sup>。根据累积序列的累积值在直角坐标系中各个对应点绘制关系曲线。绘制出曲线之后,若曲线基本为一条直线,则曲线上各点斜率基本保持不变,此时认为人类活动对河川径流量与输沙量无显著影响;若曲线上点的斜率发生偏移,认为人类活动对径流量或输沙量产生影响,向上偏离表示人类活动对径流量或输沙量的影响增加,向下偏离表示人类活动对径流量或输沙量的影响减小,斜率变化越大表示影响越显著,发生变化的点代表对应点处的年份。

### 2.7 Informer 模型

Transformer 模型在长时间序列预测中展现出强大的能力<sup>[22]</sup>,但由于其内部多层编码器和解码器的结构,在进行时序预测时造成时间复杂度与内存占用高。Zhou 等<sup>[23]</sup>于 2021 年在 Transformer 的基础上提出 Informer 模型,该模型有 3 个特点:使用 ProbSparse 自注意力机制替换了 Transformer 模型传统的自注意力机制,可以有效处理长时间序列输入;通过自注意力提炼减少了网络层数,提高了层堆叠部分的鲁棒性;生成式解码器有效避免了误差的累积,通过这 3 个特点显著提升了模型在长时间序列预测方面的能力。本文使用 CEEMDAN 法对原数据进行分解得到多个分量,将每一个分量为一个单独的数据集,对每一个分量进行单独的训练验证与预测。

### 2.8 模型精度评价方法

本文采用纳什效率系数(NSE)、均方根误差(RMSE)及均方误差(MSE)作为评价指标,反映模型的预测精度。NSE 取值范围为 $(-\infty, 1)$ ,越接近 1 代表模型预测精度越高, RMSE 与 MSE 取值范围为 $(0, +\infty)$ ,越接近 0 代表模型预测精度越好。

## 3 水沙特征分析

### 3.1 阶段特征分析

利用累积距平法分析头道拐水文站年径流量及年输沙量变化,如图 1 所示。图 1A 中年径流量序列累积距平曲线第一阶段自 1958 年基本呈上升趋势,在 1968 年出现拐点进入第二阶段后持续下降至 1974 年又转为上升趋势,直至 1985 年出现全时段最高点进入第三阶段,此后年径流量距平值基本为负,至 2017 年后进入第四阶段,转为上升态势。如图 1B 所示,年输沙量序列的距平曲线也与年径流相同,



1958—1985 年为上升期,1985—2017 年为下降期,2017 年后转为上升。综上所述,年径流量与年输沙量序列整

体呈先上升后下降趋势,可将其划分为枯水期—丰水期,显著拐点均出现在 1968 年、1985 年。

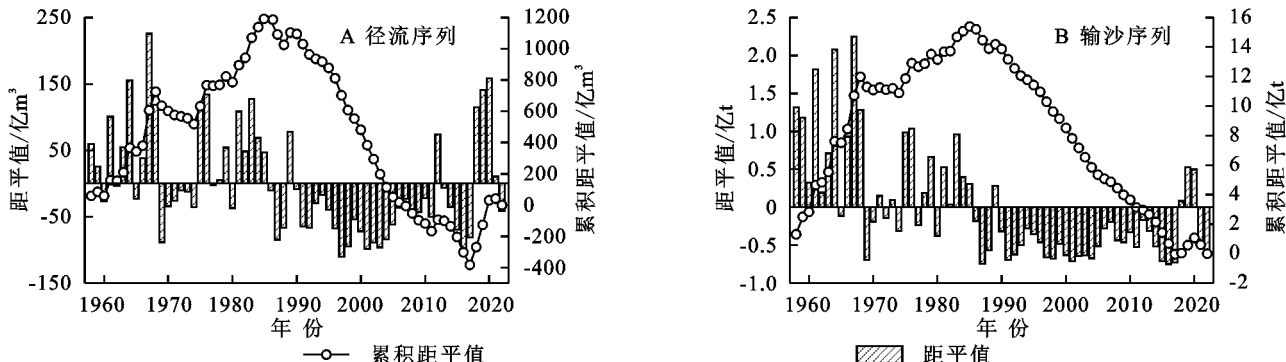


图 1 头道拐水文站水沙累积距平曲线

Fig. 1 Runoff and sediment flux accumulation anomaly curve at Toudaoguai hydrological station

3.2 趋势与突变特征分析

为提高检验的精准性,对头道拐水文站年径流量和年输沙量序列进行去自相关处理(TFPW),之后使用 M-K 法与 BS-Pettitt 耦合模型进行检验分析。M-K 检验结果见表 1,年径流量与年输沙量序列在置信水平为 0.05 时均通过显著性检验,呈显著下降趋势,年径流序列统计量 Z 的绝对值明显小于年输沙量序列,说明头道拐水文站年输沙量较年径流量下降趋势更加显著。使用 BS-Pettitt 耦合模型对头道拐水文站年径流量与年输沙量序列进行突变检验,序列突变

点的 Pettitt 统计量变化过程如图 2 所示,发现年径流量序列中突变年份为 1986 年,年输沙量序列中突变年份为 1968 年与 1986 年。

表 1 头道拐水文站水沙 M-K 趋势检验

Table 1 M-K Trend test of runoff and sediment flux at Toudaoguai hydrological station

序列	趋势检验		
	统计量 Z	趋势	显著结果
年径流量	-3.380	减少	*
年输沙量	-5.067	减少	*

注: \* 代表显著性  $p<0.05$ 。

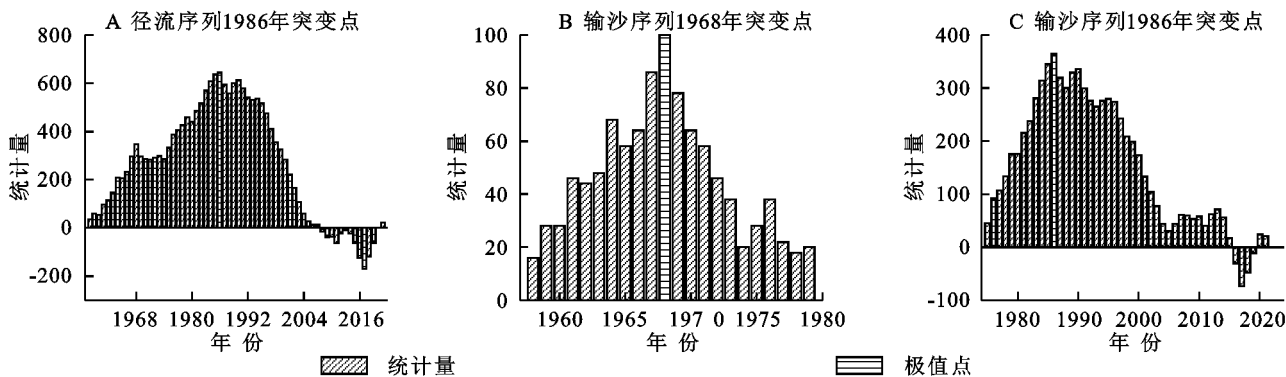


图 2 头道拐水文站水沙 BS-Pettitt 检验统计量变化

Fig. 2 Changes in BS-Pettitt test statistics for runoff and sediment flux in Toudaoguai hydrological station

根据突变检验结果得到头道拐水文站年径流量与年输沙量分段均值过程,如图 3 所示,序列分段均值变化与序列突变情况匹配良好,能较好地反映序列的突变过程,年径流序列在 1986 年之前均值约为 252.29 亿  $m^3$ ,1986 年之后均值约为 161.46 亿  $m^3$ ,下降幅度为 36%;年输沙序列在 1968 年之前均值约为 2.00 亿 t,1968—1986 年均值为 1.11 亿 t,1986 年之后均值为 0.43 亿 t,下降幅度分别为 44.38%,61.32%。结合累积距平法与 BS-Pettitt 耦合模型综合判断,可得到年径流量与年输沙量序列于 1968 年和 1986 年发生突变。

3.3 周期特征分析

采用 CEEMDAN 法对 1958—2022 年头道拐水文站年径流量与年输沙量序列进行分析,分解结果如图 4 所示,分量周期规律见表 2。由图可知,IMF 分量在零刻度线附近震荡,局部变化关于零刻度线对称,两种序列 IMF 分量变化趋势基本一致。随着分解次数增加,各 IMF 分量振幅逐渐减小,波长逐渐增长,表明从高频至低频的转变。趋势项没有表现出明显的周期特征,不排除其在更长时间尺度下存在周期性规律的可能性。年径流量序列中,IMF<sub>1</sub> 平均周期最短为 3.69 a,IMF<sub>3</sub> 周期最长为 30 a。年输沙量序列的分量与年径流量序列具

有相似的周期规律,  $IMF_1$  分量具有最短平均周期为

3.41 a;  $IMF_3$  分量具有最长平均周期为 26 a。

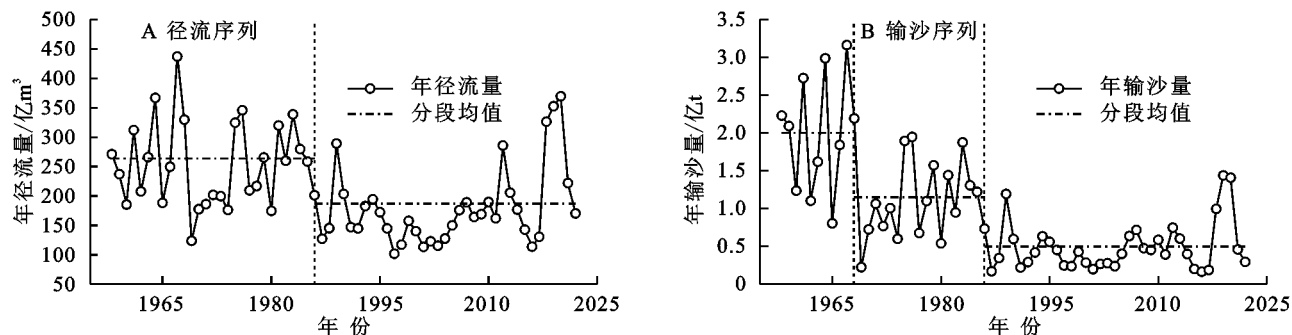


图 3 头道拐水文站水沙均值变异

Fig. 3 Variation of runoff and sediment flux mean at Toudaoguai hydrological station

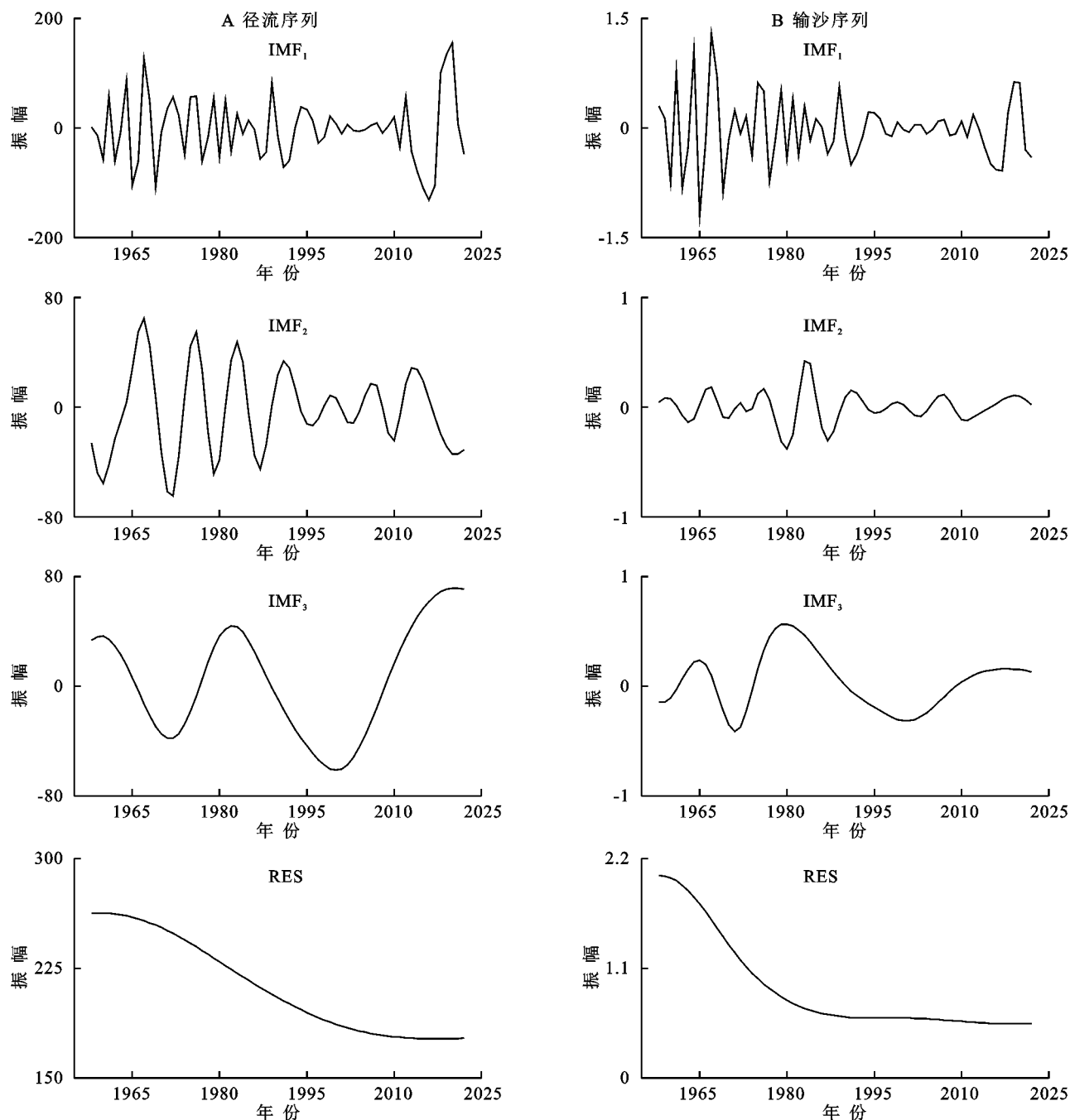


图 4 头道拐水文站水沙年值 CEEMDAN 分解

Fig. 4 CEEMDAN decomposition of annual runoff and sediment flux values at Toudaoguai hydrological station

表 2 头道拐水文站水沙年值分解各分量周期规律  
Table 2 Periodic patterns of each component in the decomposition of annual runoff and sediment flux values at Toudaoguai hydrological station

序列	周期	分量		
		IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>
年径流量	波动周期	2~8	7~9	22~38
	平均周期	3.69	7.67	30
年输沙量	波动周期	2~7	4~12	15~37
	平均周期	3.41	7.5	26

3.4 年内特征分析

通过进一步分析头道拐水文站月径流量与月输沙量,发现其具有明显的不均匀性。图 5 为月径流量与月输沙量的年内指标,统计结果见表 3。头道拐水文站月径流量序列不均匀系数为 0.59,多年月均值为 17.21 亿 m<sup>3</sup>,最大极值比为 34.94。汛期(7—10

月)占比全年高达 51.14%,全局峰值出现在 9 月,非汛期径流量分配较均匀(各月占全年的 4.20%~9.01%),比例曲线于 9 月出现全局峰值,而 3 月出现局部峰值是由于 3 月为黄河内蒙段由稳封期转为开河期,河冰解冻,大量冰块融化造成流量剧增。月输沙量不均匀系数为 1.18 亿 t,多年月均值为 0.08 亿 t,最大极值比高达 1 064.35。输沙与径流趋势相似,都呈现双峰型,即汛期(7—10 月)出现全局峰值,开河期出现局部峰值。汛期输沙量占比 74.40%,非汛期各月占比为 0.39%~6.08%,从图中可以看出,1 月、2 月、12 月输沙量占比非常低,此时为黄河封冻期,具有小流量高水位的特点,造成挟沙量明显低于汛期,故输沙量表现为全年最低。整体上月径流量与月输沙量趋势大致相同,但分配比例相差较大,月输沙量相比于月径流量变动幅度更大。

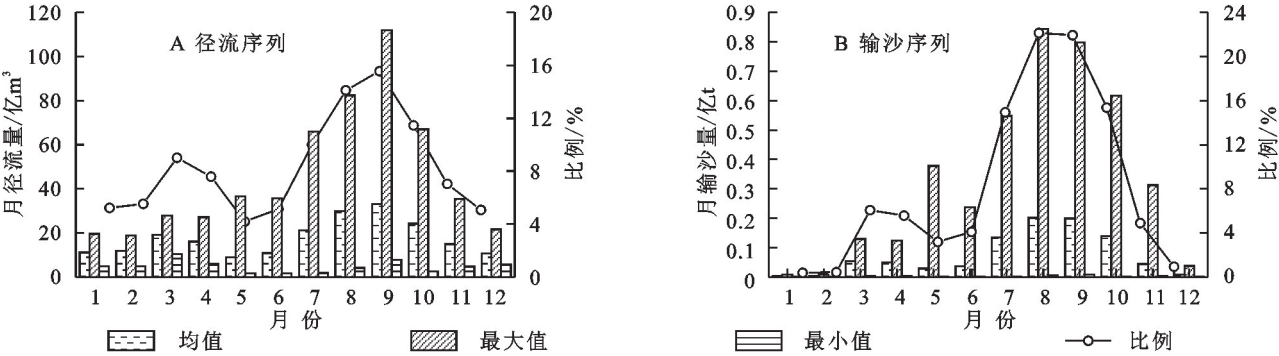


图 5 头道拐水文站水沙年内分配

Fig. 5 Annual distribution of runoff and sediment flux at Toudaoguai hydrological station

表 3 头道拐水文站水沙年内特征值  
Table 3 Annual characteristic values of runoff and sediment flux at Toudaoguai hydrological station

序列	不均匀系数	均值
月径流量	0.59	17.69 亿 m <sup>3</sup>
月输沙量	1.18	0.08 亿 t

径流与输沙的月值序列同样存在周期性规律,使用 CEEMDAN 法对头道拐水文站 1958—2022 年月径流量与月输沙量序列进行分析,CEEMDAN 分解结果如图 6 所示。从图中可以看出,两种序列的 IMF<sub>1</sub> 分量在 1958—1986 年跌宕起伏,而在 1986 年开始持近似平稳态势,尤其是年输沙序列的 IMF<sub>1</sub> 分量起伏更缓。自 1986 年后月径流序列的 IMF<sub>1</sub> 分量仅有 1989 年、2012 年与 2018—2021 年前后产生较大的波动,年输沙序列的 IMF<sub>1</sub> 分量在 1989 年与 2018—2021 年前后有较大波动,其余分量也呈现类似的变化。

月值序列分量的特征统计见表 4。各分量的方差贡献率代表该分量在原序列中的占比大小,相关系数代表该分量与原序列的相关程度。由表可知,月径流与月输沙序列也存在相似的周期规律,IMF<sub>1</sub> 中周

期最短为 3.36 月与 3.61 月,IMF<sub>6</sub> 中周期最长为 226.33 月与 184.50 月,分别占整个研究时期长度的 29.01%和 23.65%。IMF<sub>7</sub> 呈下降趋势,其与年值序列的 RES 分量相同,可能是受时间序列长度限制的原因没有表现出明显的周期规律。两种序列中 IMF<sub>2</sub> 的方差贡献率在所有分量中是最大的,相关系数也是最高的,说明 IMF<sub>2</sub> 分量的 7.25 月与 8.09 月周期变化主导整体序列的周期规律,即头道拐水文站月径流量与月输沙量序列主周期为 7.25 月与 8.09 月。

4 预测模型

为增强研究完整性,在前文对头道拐水文站水沙序列进行全面分析之后,利用水沙序列建立 Informer 预测模型。考虑到径流量与输沙量的年值数据量较少会导致预测精度不高,故采用径流量与输沙量的月值作为模型数据集。月径流量与月输沙量序列经过 CEEMDAN 法分解后得到每组 7 个不同频率的 IMF 分量,本文将每一个 IMF 分量作为一个独立数据集,对其进行单独的训练与测试。

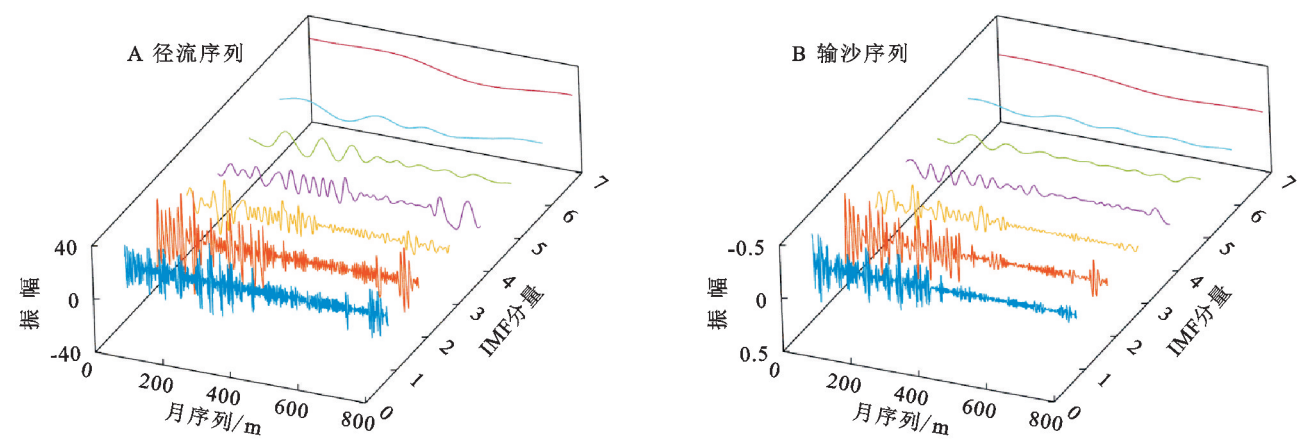


图 6 头道拐水文站水沙月值 CEEMDAN 分解

Fig. 6 CEEMDAN decomposition of monthly runoff and sediment flux values at Toudaoguai hydrological station

表 4 头道拐水文站水沙月值分解各分量特征值

Table 4 Characteristic values of each component in the monthly value decomposition of runoff and sediment flux at Toudaoguai hydrological station		分量						
序列	特征	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>
月径流量	平均周期/m	3.46	7.25	15.34	36.95	83.12	226.33	—
	相关系数	0.44	0.57	0.32	0.30	0.13	0.13	0.25
	方差贡献率/%	27.88	50.84	13.44	12.06	6.57	4.86	9.52
	贡献率排名	2	1	3	4	6	7	5
月输沙量	平均周期/m	3.61	8.09	16.63	36.00	82.12	184.50	—
	相关系数	0.36	0.62	0.30	0.29	0.14	0.09	0.32
	方差贡献率/%	34.65	65.85	12.88	7.66	3.94	1.67	9.05
	贡献率排名	2	1	3	5	6	7	4

注：“—”代表未发现。

对训练完成的 Informer 模型进行预测精度评价,结果见表 5。头道拐水文站月径流序列的各 IMF 分量预测精度从左至右基本呈现依次下降趋势,其中 IMF<sub>1</sub> 分量的预测精度最低,NSE 仅有 0.287 2, RMSE 为 6.521 9, MSE 达到 42.535 3, IMF<sub>7</sub> 分量的预测精度最高, NSE 为 0.959 1, RMSE 为 0.067 3, MSE 仅有 0.004 5。IMF<sub>1</sub> 与 IMF<sub>7</sub> 的 NSE 在数值上相比为 0.299 4, RMSE 为 96.907 9, MSE 为 9 452.288 9,可见两者预测精度差别之大,造成这种现象的原因是高频分量 (IMF<sub>1</sub>)

类似噪声,规律性弱,模型难以捕捉序列内在特征,而 IMF<sub>7</sub> 是分解后最后的分量,反映序列长期趋势,可预测性强。月输沙序列与月径流规律相似,各分量预测精度也呈一定趋势下降,IMF<sub>1</sub> 分量误差最大, IMF<sub>7</sub> 误差最小。之后将预测出的各 IMF 分量进行叠加,得到最终的预测序列,将其与真实值比较,结果如图 7 所示。月径流序列中 NSE 为 0.744 3,月输沙序列 NSE 为 0.623 9,发现输沙序列的预测误差较径流序列大。

表 5 头道拐水文站水沙月值各 IMF 分量预测结果

Table 5 Prediction results of IMF components for monthly values of runoff and sediment flux in Toudaoguai hydrological station		分量						
序列	评价指标	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>
月径流	NSE	0.2872	0.8225	0.9055	0.8410	0.7584	0.8068	0.9591
	RMSE	6.5219	4.2252	0.7131	3.1802	0.2439	0.0681	0.0673
	MSE	42.5353	17.8521	0.5084	10.1138	0.0595	0.0046	0.0045
月输沙	NSE	0.1525	0.6635	0.8748	0.9659	0.9875	0.9599	0.9998
	RMSE	0.0302	0.0381	0.0066	0.0076	0.0029	0.0013	0
	MSE	0.0009	0.0015	0.0000	0.0001	0	0	0



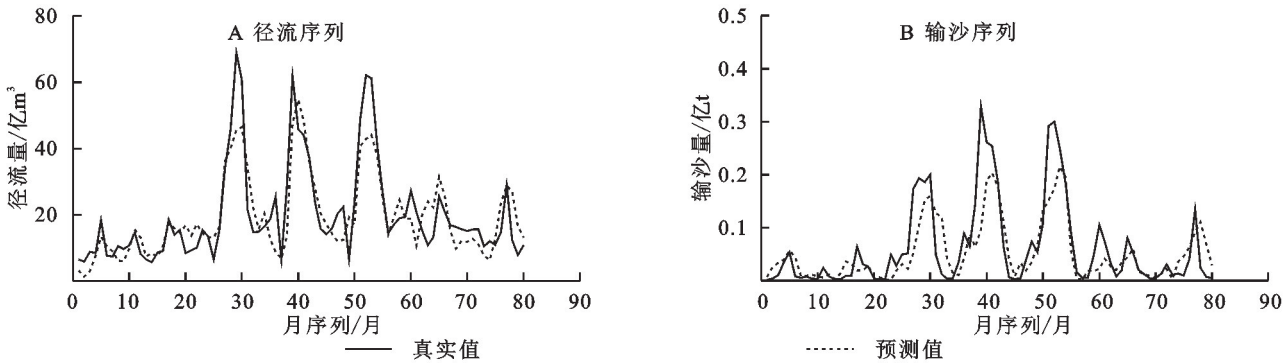


图 7 头道拐水文站水沙月序列预测结果

Fig. 7 Prediction results of runoff and sediment flux monthly sequence at Toudaoguai hydrological station

5 讨论

黄河干流受全球气候变暖及人类活动影响,水沙序列演变规律发生变化。有学者指出降水是气候变化的主要因素,水库调节是人类活动影响的主要因素<sup>[24]</sup>。黄河头道拐水文站水沙序列检验结果表明,径流量和输沙量均呈显著下降趋势,且输沙量下降幅度更大,两者分别于 1986 年和 1968 年及 1986 年发生突变,序列突变节点与上游龙羊峡与刘家峡水库蓄水时间对应<sup>[25]</sup>,为此将头道拐水文站年径流量与年

输沙量序列分为基准期(1958—1967 年)、研究期 I (1968—1985 年)和研究期 II (1986—2022 年)3 段时期。根据头道拐水文站 1958—2022 年降水数据,使用双累积曲线法量化气候变化与人类活动对头道拐水文站水沙变化的贡献率,结果见表 6。基准期—研究期 I 中,水沙变化受降水影响较大,占比分别为 87%,69%,人类活动影响在此时仅占 13%,31%,研究期 I—II 中,径流量受降水影响较大占 64%,输沙量受人类活动影响较大占 54%,从侧面印证黄河上游水库的拦沙作用显著。

表 6 头道拐水文站水沙变化归因分析

Table 6 Attribution analysis of runoff and sediment flux at Toudaoguai hydrological station

序列	时期	年份	实测 年均值	计算 年均值	减少量	减少率/ %	降水影响		人类活动影响	
							减少量	减少率%	减少量	减少率%
径流量/亿 m <sup>3</sup>	基准期	1958—1967	272.35	267.73						
	研究期 I	1968—1985	243.97	247.56	28.38	0.11	24.79	0.87	3.59	0.13
	研究期 II	1986—2022	179.69	203.06	64.28	0.26	40.91	0.64	23.38	0.36
输沙量/亿 t	基准期	1958—1967	1.98	1.97						
	研究期 I	1968—1985	1.17	1.42	0.81	0.41	0.56	0.69	0.25	0.31
	研究期 II	1986—2022	0.50	0.86	0.68	0.58	0.31	0.46	0.37	0.54

使用累积距平法对头道拐水文站 1958—2022 年降水数据进行分析,结果如图 8 所示。降水序列累积距平曲线大致可分为上升—下降趋势。结合图 1 及表 6 分析得出,在 1958—1985 年中径流量受降水影响较大,降水序列累积距平曲线在此时为上升趋势,所以径流量的累积距平曲线在此时期为上升趋势,1986—2022 年中,径流量仍受降水影响较大,降水序列累积距平曲线在此阶段逐渐转为下降态势,故径流量累积距平曲线也转为下降趋势;输沙量在 1958—1985 年中受降水影响较大,同理可知输沙量累积距平曲线在此阶段为上升,1986—2022 年中输沙量累积距平曲线为下降趋势,此时期输沙量受人类活动影响较大,上游兴建水利枢纽及 20 世纪 70—80 年代大规模水土保持的措施<sup>[26]</sup>是重要原因,加之降水影响,故输沙量的累积距平曲线在此时也转为下降趋势。

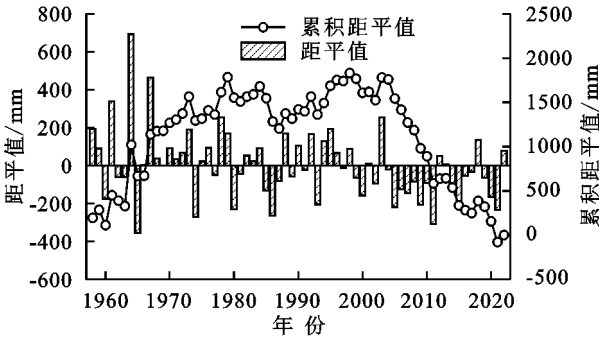


图 8 头道拐水文站降水累积距平曲线

Fig. 8 Accumulated anomaly curve of precipitation at Toudaoguai hydrological station

各时段内水沙特征值见表 7。头道拐水文站年径流量均值总体减少了 34.02%,在 3 段时期内依次减少了 10.42%,26.35%。年输沙量均值总体减少了 74.75%,较年径流量减小幅度更大,与 M-K 法中年



输沙的  $Z$  绝对值大于年径流序列相互印证。3 段时期内依次减少了 40.91%,57.26%。

龙羊峡水库总库容为 247 亿  $\text{m}^3$ ,且为多年调节水库,对径流调节作用大,位于黄河主要产区,上游无支流汇入,河段泥沙含量较小,拦沙影响相对较弱;刘家峡水库总库容为 57 亿  $\text{m}^3$ ,且刘家峡水库为不完全年调节水库,对径流的调节作用较小,而挟带大量泥沙的洮河在刘家峡库区汇入黄河,大量泥沙淤积在刘家峡水库,拦沙作用显著<sup>[27]</sup>。

水沙序列在研究期 I—II 的过程中变化相对来说更为剧烈,因为龙羊峡水库蓄水时间为 1986 年 10 月,刘家峡水库蓄水时间为 1968 年 10 月<sup>[28]</sup>,在 1986 年之前两座水库仅有刘家峡水库运行,而在 1986 年开始两座大型水库开始共同运行。除此之外,头道拐水文站上游建成多座水利枢纽,年径流量序列的

极值比与变差系数变动幅度不大,说明龙、刘水库运行虽然降低了径流的量级,但年际分配过程基本保持不变,而泥沙淤积在各库区<sup>[29]</sup>,表明水利枢纽对输沙量的影响幅度更大。近年来生态环境问题受到社会各界广泛重视,水土保持工作成果显著,水土流失问题得到明显改善<sup>[29]</sup>。年输沙量序列的极值比呈现增—减趋势,也从侧面印证水土保持工作成效显著。变差系数呈现增加的趋势,由于黄河自刘家峡水库至头道拐段不仅存在多座水利枢纽,也流经腾格里、乌兰布和与库布奇等沙漠,以及众多支流在该河段汇入黄河,沿途泥沙补给量大,输沙量受影响因素众多,造成变化更为剧烈。年输沙量序列极值比与变差系数在数值上明显大于年径流量,说明年输沙量序列相比于年径流序列变化程度更大,变动幅度更大。

表 7 头道拐水文站年径流量与年输沙量各时段特征值  
Table 7 Characteristics values of annual runoff and annual runoff and sediment flux at Toudaoguai Hydrological Station at different time periods

时段	年径流量			年输沙量		
	均值/亿 $\text{m}^3$	极值比	变差系数	均值/亿 t	极值比	变差系数
基准期	272.35	2.36	0.28	1.98	3.94	0.39
研究期 I	243.97	2.80	0.27	1.17	9.80	0.46
研究期 II	179.69	3.63	0.36	0.50	8.83	0.64

为探究头道拐水文站水沙关系的变化,对 3 段时期内头道拐水文站年径流量与年输沙量进行相关性分析(图 9)。当年径流值相同时,3 条拟合线对应的年输沙量值依次减少了 36.43%,27.53%。点群自基准期至两段研究期由分散变为集中,表明水库的运用对水沙的影响是显著的。3 段时期的相关系数呈增—减变化,因为刘家峡水库在运行期大量泥沙淤积在库区,而在运行数十年后,库区淤积问题严重,对泥沙的拦截能力减弱。有研究表明,刘家峡水库自 1968 年开始运行至 1986 年,库区泥沙已淤积 10 亿  $\text{t}$ <sup>[25]</sup>,占总库容约 17.55%。说明水库对泥沙的拦截作用具有不持续性。

在构建预测模型的过程中,发现径流序列的预测精度明显高于输沙序列,是因为输沙量受影响因素众多,变动幅度更大,较径流量预测难度大,而两种序列中尤以  $\text{IMF}_1$  分量预测精度低。

6 结论与展望

(1) 头道拐水文站水沙序列在年际尺度中存在先上升后下降趋势,而在整个研究期尺度下呈显著下降趋势,输沙量较径流量下降更为显著。年径流量与年输沙量序列分别于 1986 年与 1968 年、1986 年发生突变,序列突变时间节点与上游水库(龙、刘水库)修建密切相关,龙羊峡水库对径流调节作用强,刘家峡水库对泥沙调节作用强。

(2) 头道拐水文站水沙序列年值与月值均存在周期性规律,年序列中各分量平均周期分别为 3.69 a, 7.67 a,30 a 与 3.41 a,7.5 a,26 a,月序列中分别存在 3.46 月与 3.61 月的短周期和 226.33 月与 184.50 月的长周期,主导周期为 7.25 月和 8.09 月。

(3) 头道拐水文站水沙年内分配不均,汛期占比高达 50.89%,74.87%,峰值出现于 8 月与 9 月,不均匀系数分别为 0.59,1.18,最大极值比分别为 34.94 与 1 064.35,月输沙量相比于月径流量变动幅度更大。

(4) 基于 CEEMDAN 分解出的各分量构建了

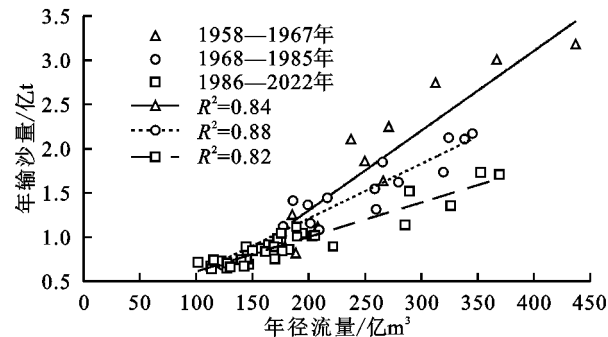


图 9 头道拐水文站水沙分析  
Fig. 9 Analysis of runoff and sediment flux at Toudaoguai hydrological station

Informer 预测模型,分量进行重构之后月径流量序列 NSE 为 0.744 3,月输沙量序列 NSE 为 0.623 9,发现月径流量相比于月输沙量预测精度更高。

本文简单考虑了降水与水库调节对水沙序列的影响,但未深入探究气温、取水用水及土地利用等影响因素对水沙序列的影响,后续研究可更加全面地考虑这些影响因素。在构建预测模型过程中,可在重构序列时根据分量对原序列的方差贡献率及相关系数进行加权重构,减小预测误差。

#### 参考文献(References):

- [1] Wu C, Ji C, Shi B, et al. The impact of climate change and human activities on streamflow and sediment load in the Pearl River basin[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019,34(4):307-321.
- [2] 刘茜,王延贵.江河水沙变化突变性与周期性分析及比较[J].*水利水电科技进展*,2015,35(2):17-23.  
Liu X, Wang Y G. Comparison of analytical methods of runoff and sediment load mutation and periodical variation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015,35(2):17-23.
- [3] 谢剑,高鹏,穆兴民,等.近 80 年来北洛河流域径流变化特征及其归因分析[J].*水土保持研究*,2023,30(2):122-128.  
Xie J, Gao P, Mu X M, et al. Variation characteristics of runoff in Beiluo River Basin over the past 80 years and its attribution analysis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):122-128.
- [4] 李东琴,仇亚琴,刘增进,等.莆田市 1956—2012 年降水量及径流变化分析[J].*水电能源科学*,2015,33(12):14-18,31.  
Li D Q, Qiu Y Q, Liu Z J, et al. Study on precipitation and runoff's variation of Putian city from 1956 to 2012[J]. *Water Resources and Power*, 2015,33(12):14-18,31.
- [5] 王永红,彭锦,黄畅,等.珠江流域下游 1960—2019 水沙异变诊断及其控制因素[J].*水土保持研究*,2022,29(5):21-31.  
Wang Y H, Peng J, Huang C, et al. Abnormal changes diagnosis and its control factors of water and sediment discharge in the lower reaches of Pearl River Basin from 1960 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):21-31.
- [6] 王晓颖,宋培兵,廖卫红,等.气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(4):50-56.  
Wang X Y, Song P B, Liao W H, et al. Quantitative analysis of the influences of climate change and human activities on runoff variations of Baihe River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020,31(4):50-56.
- [7] 范福新.漓江水库群生态调度研究及应用[D].武汉:华中科技大学,2018.  
Fan F X. Research and Application of the Ecological Scheduling of the Lijiang Reservoir Group[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [8] 谢智博,穆兴民,高鹏,等.基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征[J].*水土保持研究*,2022,29(2):139-144.  
Xie Z B, Mu X M, Gao P, et al. Variation characteristics of runoff in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and morlet wavelet analysis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(2):139-144.
- [9] 田鹏,穆兴民,赵广举,等.近 549 年来黄河天然径流量时间变化特征研究[J].*水土保持学报*,2020,34(6):65-69.  
Tian P, Mu X M, Zhao G J, et al. Variations of natural runoff in the Yellow River since 1470[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(6):65-69.
- [10] 王未,张永勇.黄河流域径流情势区域变化特征分析[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(3):59-65.  
Wang W, Zhang Y Y. Analysis on regional variation characteristics of flow regimes in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020,31(3):59-65.
- [11] 隆院男,唐蓉,蒋昌波,等.近 60 年湘江流域水沙特性及其对人类活动的响应[J].*农业工程学报*,2018,34(24):132-143.  
Long Y N, Tang R, Jiang C B, et al. Variability characteristics of runoff-sediment discharge and their response to human activities in Xiang River Basin in recent 60 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018,34(24):132-143.
- [12] 郭彦,侯素珍,夏润亮,等.1955—2014 年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(4):70-77.  
Guo Y, Hou S Z, Xia R L, et al. Characteristics of runoff-sediment variation in Inner Mongolia Reach of Yellow River from 1955 to 2014[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020,31(4):70-77.
- [13] 许磊,温雅琴,全栋.黄河干流头道拐水文站水沙关系季节性特征分析[J].*泥沙研究*,2023,48(5):48-53.  
Xu L, Wen Y Q, Quan D. Seasonal characteristics analysis of flow-sediment interaction at Toudaoguai Hydrological Station in the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023,48(5):48-53.
- [14] 董世杰,李英海,吴江,等.近 60 年洞庭湖水位演变态势研究[J].*湖泊科学*,2024,36(2):575-586.  
Dong S J, Li Y H, Wu J, et al. Water level changes of Lake Dongting in recent 60 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024,36(2):575-586.

- [15] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9):1807-1829.
- [16] 张洪波,李哲浩,席秋义,等.基于改进过白化的 Mann-Kendall 趋势检验法[J].*水力发电学报*, 2018, 37(6): 34-46.  
Zhang H B, Li Z H, Xi Q Y, et al. Modified over-whitening process and its application in Mann-Kendall trend tests[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(6):34-46.
- [17] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 1979, 28(2):126-135.
- [18] 张洪波,余炎皓,南政年,等.基于 TFPW-BS-Pettitt 法的水文序列多点均值跳跃变异识别[J].*水力发电学报*, 2017, 36(7):14-22.  
Zhang H B, Yu Y H, Nan Z N, et al. TFPW-BS-Pettitt method for detection of multiple change-points in the mean of hydrological series[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(7):14-22.
- [19] 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 of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971):903-995.
- [20] Torres M E, Colominas M A, Schlotthauer G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]// 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2011.
- [21] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].*水文*, 2010, 30(4):47-51.  
Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4):47-51.
- [22] Amanambu A C, Mossa J, Chen Y H. Hydrological drought forecasting using a deep transformer model[J]. *Water*, 2022, 14(22):3611.
- [23] Zhou H, Zhang S, Peng J, et al. Informer: Beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting[C]// *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021.
- [24] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].*泥沙研究*, 2018, 43(6):40-46.  
Lu J, An C H, Wu X Y. Study on processes of water and sediment in the Ning-Meng Reach of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(6): 40-46.
- [25] 范俊健,赵广举,穆兴民,等.1956—2017年黄河上游水沙变化及其驱动因素[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(3):1-9.  
Fan J J, Zhao G J, Mu X M, et al. Variation of runoff and sediment load and their driving factors on the upper stream of the Yellow River from 1956 to 2017[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3):1-9.
- [26] 李勃,穆兴民,高鹏,等.1956—2017年黄河干流径流量时空变化新特征[J].*水土保持研究*, 2019, 26(6):120-126, 132.  
Li B, Mu X M, Gao P, et al. New characteristics of temporal and spatial changes of runoff in the mainstream of Yellow River from 1956 to 2017[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6):120-126, 132.
- [27] 张曦泽,杨丽虎,宋献方.黄河上游近60年水沙变化特征及其影响因素[J].*湖泊科学*, 2024, 36(2):602-621.  
Zhang X Z, Yang L H, Song X F. Runoff and sediment load changes in the upper Yellow River and their influencing factors in recent 60 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2):602-621.
- [28] 孔岩,王红,任立良.黄河入海径流变化及影响因素[J].*地理研究*, 2012, 31(11):1981-1990.  
Kong Y, Wang H, Ren L L. Analysis of the runoff variation of the Yellow River to the sea and its influencing factors[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(11): 1981-1990.
- [29] 邓安军,陈建国,胡海华,等.我国水库淤损情势分析[J].*水利学报*, 2022, 53(3):325-332.  
Deng A J, Chen J G, Hu H H, et al. Analysis of reservoir siltation in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(3):325-332.