

基于气候影响因子的黄河下游泥沙输移量动态变化过程研究

叶 繁, 刘凤睿

黄河水利委员会山东水文水资源局, 山东 济南

收稿日期: 2024年11月2日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月3日

摘 要

黄河是我国的第二大河, 也是世界上含沙量最高的河流, 其丰富的水资源和水能资源为黄河流域社会经济发展提供了重要保障, 近几十年来, 由于受到人类活动和气候变化的影响, 黄河流域水沙特性在一定程度上发生了变化, 黄河下游河段演变的机理复杂, 水沙变化程度在空间上分布不均, 影响水沙数据变化的因素众多。本文利用淤口水文站70年的输沙量资料, 应用数理统计方法分析输沙量的多年变化趋势, 并引入气候影响因子, 对输沙量进行多尺度的变化特性研究。分析结果表明, 黄河山东段输沙量变化呈现明显的趋势性和周期性, 近70年来的输沙量出现由下降到缓慢上升的过程, 输沙量受到宏观调控影响较为明显, 并且月输沙量的中高频模态与ENSO相关性较高, 说明极端气候与淤口站的输沙量整体变化波动趋势具有一定的联系。

关键词

输沙量, 黄河下游, 气候变化, 经验模态分解

Study on the Dynamic Change Process of Sediment Transport in the Lower Reaches of the Yellow River Based on Climate Influence Factors

Fan Ye, Surui Liu

Shandong Hydrology and Water Resources Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Jinan Shandong

Received: Nov. 2nd, 2024; accepted: Nov. 28th, 2024; published: Dec. 3rd, 2024

文章引用: 叶繁, 刘凤睿. 基于气候影响因子的黄河下游泥沙输移量动态变化过程研究[J]. 统计学与应用, 2024, 13(6): 2162-2169. DOI: 10.12677/sa.2024.136209

Abstract

The Yellow River is the second largest river in China and the river with the highest sand content in the world, and its rich water resources and hydroelectric resources provide an important guarantee for the socio-economic development of the Yellow River Basin. In recent decades, due to the influence of human activities and climate change, the water-sand characteristics of the Yellow River Basin have changed to a certain extent. The mechanism of the evolution of the downstream section of the Yellow River is complicated, and the degree of water-sand change is unevenly distributed in space, and there are many factors affecting the change of water and sand data. In this paper, we use 70 years of sand transport data from the Luokou Hydrological Station, apply mathematical and statistical methods to analyze the multi-year trend of sand transport, and introduce the climate influence factor to study the multi-scale change characteristics of sand transport. The analysis results show that the change of sand transport in the Shandong section of the Yellow River shows obvious trend and periodicity, the sand transport in the past 70 years shows a process from decreasing to slowly increasing, the sand transport is more obviously affected by macro-control, and the medium and high frequency modes of monthly sand transport have high correlation with ENSO, which indicates that the extreme climate is related to the overall fluctuation trend of sand transport in the Luokou Station to a certain extent.

Keywords

Sand Transport, Lower Yellow River, Climate Change, EMD

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受全球气候变化和人类活动的影响,近年来中国洪水、暴雨、干旱等极端天气事件频发,给社会经济发展和人们的日常生活造成了严重的不利影响[1][2]。分析极端气候事件变化的影响因素,对揭示极端气候事件形成发展和自然灾害的预报和减灾具有重要意义,由于气候系统是一个复杂的耗散系统,系统各区域之间存在复杂水汽、能量和热量的交换[3]。黄河下游因其特殊地理位置,受气候变化影响较大。因此,基于气候影响因子来分析黄河流域径流的演变规律有着极其重要的意义。

黄河全长 5464 km,流域面积 79.5 万 km²。砾口水文站是黄河流域下游的一个具有长期观测资料的水文站,距河口 278 km,控制着 99%的流域面积。砾口水文站位于中纬度暖温带季风气候,雨热同季,年平均径流量为 308.2 亿 m³,年最大径流量为 948.0 亿 m³ (1964 年),年最小径流量为 44.16 亿 m³ (1997 年),年平均输沙量为 6.46 亿 t,年最大径流量为 21.5 亿 t(1967 年),年最小输沙量为 0.434 亿 t(1997 年),水沙变化明显。

国际气象学界与海洋学界的学者们普遍认为当赤道东太平洋区域(0°S~10°S, 180°W~90°W 之间)平均海表水温 SST 持续出现较大的正距平时,持续时间在半年以上则称发生 El Nino 事件。当赤道东太平洋区域 SST 持续出现较强的负距平时则称发生了反 El Nino 事件,又称为 La Nina 事件。与 El Nino 一起同时出现南方涛动(El Niño-southern Oscillation, ENSO)是指南太平洋和东太平洋的海平面气压存在着高低交互出现的事件[4],被认为是气候系统中最显著的年际振荡信号,是海洋与大气相互作用和耦合的结果。

多年来, 很多学者对 ENSO 事件与长时间水沙序列的影响也做了大量的研究工作。邵骏等研究发现长江源区近 40 年的径流量与 ENSO 既存在同位相、也有反位相变化态势[5]; 张瑞等通过 EMD 分解分析发现长江入海月均径流量与大平洋气候变率存在显著的影响[6]; 目前, 关于径流对 ENSO 事件的响应研究已有一定基础, 但鲜有研究关注气候变异对黄河下游输沙量的影响及其响应机理。本文利用多种数理分析手段, 研究砾口水文站多年输沙量特征, 并探讨黄河下游输沙量对 ENSO 的响应特征, 旨在为黄河流域的水文工作提供科学指导。

2. 数据来源及处理方法

2.1. 数据来源

黄河输沙量数据采用黄河砾口水文站 1952~2021 年共计 70 年的输沙量资料, 资料精度较高, 具有很好的代表性, 能够客观反应黄河下游泥沙输移特征, 数据来源于黄河水利委员会山东水文水资源局。由于表征 ENSO 的指标较多, 本文选取海洋尼诺指数(Oceanic Niño Index, ONI)作为研究指标, ONI 是中东太平洋 Niño 3.4 区(5°N~5°S, 120°W~170°W)的海表温度距平的 3 个月滑动平均值。研究数据来源为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)气候预测中心。

2.2. 研究方法

本研究主要采用 Mann-Kendall 趋势和突变分析, EMD 分解和 Pearson 线性相关。

2.2.1. Mann-Kendall 趋势检验法

设一平稳序列为 X_t , ($t = 1, 2, \dots, n$, n 为序列长度), 定义统计量 S 为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中: $\text{sign}(\theta)$ 为符号函数。

$$\text{Sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $n \geq 10$ 时, 统计量 S 近似服从正态分布, 其正态分布的检验统计量 Z 用下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Z 为正值表示增加趋势, Z 为负值表示减少趋势, 当 Z 的绝对值大于等于 1.28、1.64、2.32 时, 表示分别通过了信度 90%、95%、99% 的显著性检验[7]。

2.2.2. EMD 分解

经验模态分解(EMD)算法的过程实质上是对非平稳序列进行平稳化处理的过程, 其按频率从高到低将原始时间序列逐级分解为具有不同时间尺度的本征模函数(IMF), 通过 EMD 可以展示多时间尺度下信

号序列的演化, 通过信号分析其未来的演化并能进行统计学上的动力预测。

具体计算步骤设计如下:

(1) 设输沙率数据时间序列为 $x(t)$, 首先找到该序列的局部极大值及局部极小值, 利用三次样条曲线插值得到极大值的上包络线 $x_{\max}(t)$, 并求出上下包络线的平均包络线 $m_1(t)$ 。

$$m_1(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2} \quad (4)$$

(2) 用原始序列 $x(t)$ 减去平均包络线 $m_1(t)$, 得到 $h_1(t)$ 。

(3) 根据 IMF 的定义, 对 $h_1(t)$ 进行检验, 若不符合, 则返回步骤(1)并将 $h_1(t)$ 作为原始时间序列, 重复以上筛选步骤。重复筛选 k 次, 有:

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t) \quad (5)$$

(4) 用原始序列 $x(t)$ 减去 $c_1(t)$, 得到余项 $r_1(t)$ 。

(5) 把 $r_1(t)$ 视作原始时间序列, 重复步骤(1)到步骤(5), 得到新的 IMF 分量 $c_2(t)$ 和余项 $r_2(t)$, 循环步骤(5), 得到:

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - c_2(t) \\ r_3(t) &= r_2(t) - c_3(t) \\ &\dots\dots \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - c_n(t) \end{aligned} \quad (6)$$

当 $r_n(t)$ 成为单调函数时循环终止, 此时已经无法从余项中再提取 IMF 分量, 代表 EMD 过程结束。

2.2.3. Pearson 线性相关系数

Person 线性相关系数是描述同一物理量纲下的相关性的主要方法, 系数介于 $[-1, 1]$ 之间, 若系数为负数, 则呈负相关, 若系数为正数, 则呈正相关。

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

3. 结果与分析

3.1. 径流量的 M-K 检验结果与分析

采用 M-K 趋势分析法对冻口站 1952~2021 年共 70 年的径流要素进行显著性检验, 对年尺度时间序列进行分析。通过计算可知, 冻口水文站的年输沙量检验值为 -7.41, 故整体的趋势的减少的, 且绝对值超过 2.32, 通过 99% 显著性的置信度检验; 因此年输沙量呈现显著的下降趋势。

3.2. 输沙量的 EMD 结果与分析

对冻口站 1952~2021 年月输沙量序列进行分析, 通过经验模态分解(EMD), 得到月输沙序列的 7 个 IMF 分量和残余趋势项(记作 R), 各 IMF 分量和趋势项的变化见图 1。通过对分解得到的 IMF 分量和 R 分量进行分析, 得到结果如表 1 所示。从表中可以看出, 年输沙 IMF2 分量占主导地位, 方差贡献率为 52.9%, 其次为 IMF1 分量, 方差贡献率为 28.8%。年输沙 IMF1 分量具有平均周期 1 a 的波动, 平均周期随着 IMF 分量的增加而增加。R 分量反映出冻口站的输沙量的总体变化过程, 从 1952 年开始整体呈下降趋势, 至 2002 年呈上升趋势。

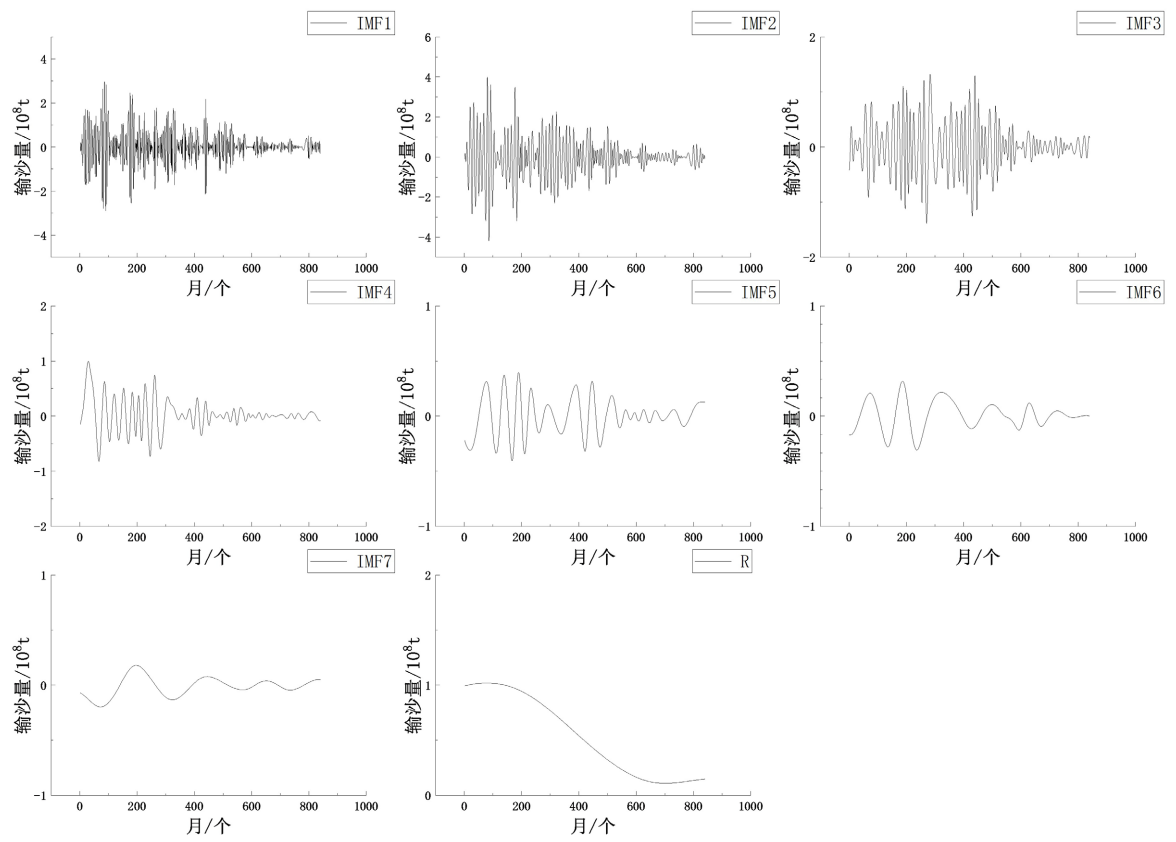


Figure 1. EMD decomposition of the annual sand transport sequence at the Luokou Station
图 1. 冻口站年输沙量序列 EMD 分解

Table 1. Statistical characteristics of decomposed components of the annual sand transport series at the Luokou Station
表 1. 冻口站年输沙序列分解后分量的统计特征

模态	年输沙量	
	方差贡献率(%)	平均周期(a)
IMF1	28.8	1
IMF2	52.9	2
IMF3	11	2
IMF4	4.4	5
IMF5	1.6	6
IMF6	0.9	14
IMF7	0.4	23
趋势项	-	-

3.3. ENSO 的 EMD 结果与分析

对 ENSO 指数序列进行 EMD 分解得到 8 个 IMF 分量和残余趋势项(记作 R), 见图 2。其中 IMF1~IMF3 的平均周期分别为 0.7a, 1.2a 和 2.2a, 方差贡献率占比分别为 8.4%, 23.9%, 26.7%, 贡献率最高的是 IMF4, 为 26.9%, 平均周期是 4.7a, 见表 2。

R 分量反映出 ENSO 指数的总体变化过程, 从 1952 年一直呈现上升状态。

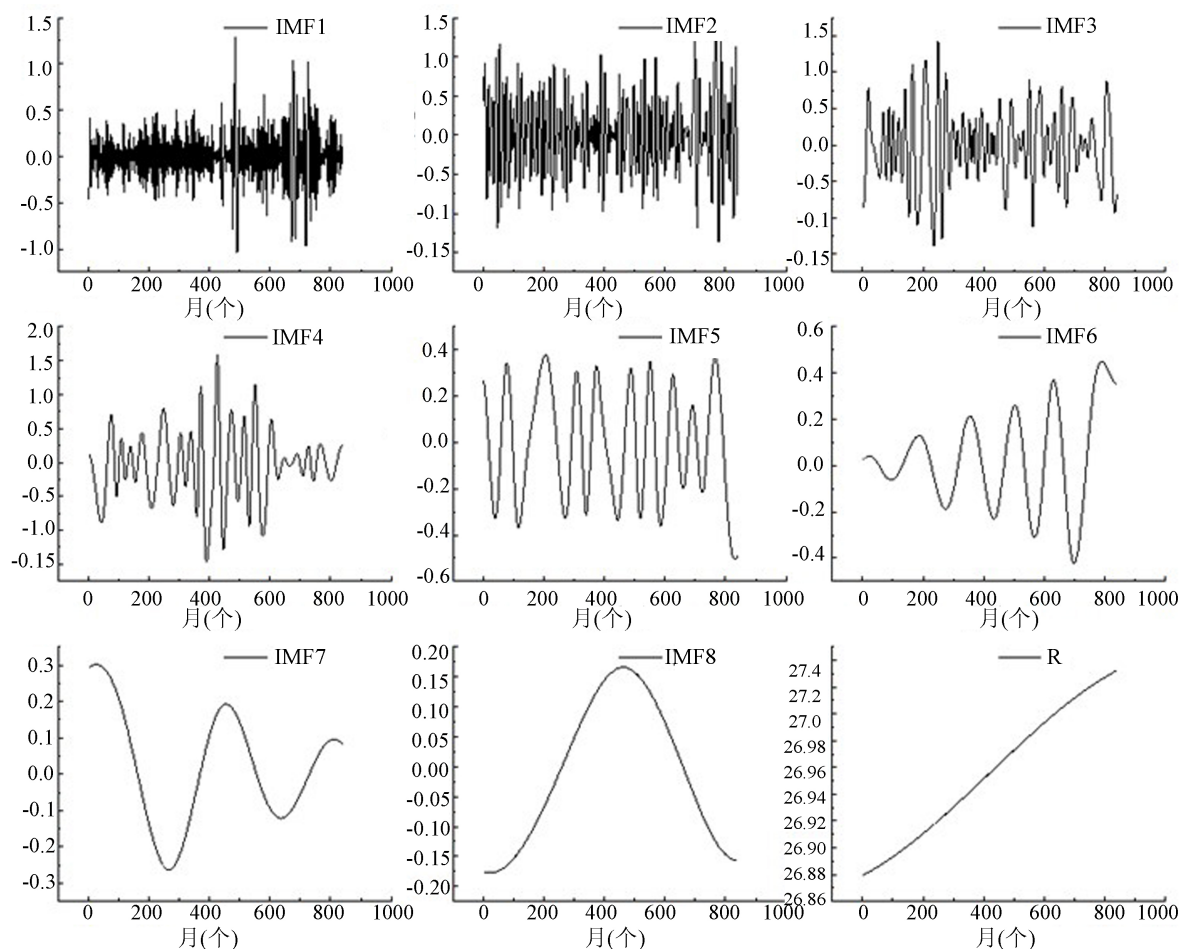


Figure 2. EMD decomposition of ENSO exponential series
图 2. ENSO 指数序列 EMD 分解

Table 2. Statistical characteristics of the decomposed components of the ENSO index series
表 2. ENSO 指数序列分解后分量的统计特征

模态	年输沙量	
	方差贡献率(%)	平均周期(a)
IMF1	8.4	0.7
IMF2	23.9	1.2
IMF3	26.7	2.2
IMF4	26.9	4.7
IMF5	5.8	7.8
IMF6	4.4	14.0
IMF7	2.5	35.0
IMF8	1.4	-
趋势项	-	-

3.4. 径流量与 ENSO 指数的相关性

为了深入探讨二者的相关关系, 对经过经验模态分解后的 ENSO 分量和冻口站月输沙量分量进行相关性分析。

Table 3. Correlation coefficients between sand transport and each IMF component of the ENSO index
表 3. 输沙量与 ENSO 指数各 IMF 分量相关系数

月输沙	ENSO 指数								
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	R
IMF1	-0.071	0.088	0.059	-0.010	0.026	-0.005	0.008	0.002	-0.011
IMF2	-0.012	<u>-0.167**</u>	-0.047	0.020	-0.028	-0.019	-0.001	0.010	0.025
IMF3	-0.050	-0.080	<u>-0.093**</u>	-0.054	-0.005	0.009	-0.004	-0.018	-0.009
IMF4	-0.019	-0.008	<u>-0.170**</u>	<u>-0.212**</u>	-0.067	0.021	<u>0.142**</u>	<u>-0.106**</u>	<u>-0.125**</u>
IMF5	-0.017	-0.021	<u>-0.170**</u>	<u>-0.125**</u>	0.034	0.033	-0.057	0.046	<u>0.107**</u>
IMF6	0.031	-0.038	0.003	-0.028	<u>0.329**</u>	<u>0.254**</u>	-0.023	<u>0.094**</u>	-0.012
IMF7	-0.003	0.002	-0.035	0.045	<u>0.115**</u>	<u>0.148**</u>	<u>-0.321**</u>	<u>0.217**</u>	<u>0.253**</u>
R	-0.014	-0.019	-0.030	-0.050	<u>0.096**</u>	<u>-0.135**</u>	<u>0.126**</u>	<u>-0.328**</u>	<u>-0.980**</u>

注: **表示 $P < 0.01$, 相关性显著。

从表 3 可知, 除月输沙的 IMF1 分量与 ENSO 分量没有明显的相关关系, 其余各分量均呈现相关性。各分量间相关系数最高的是趋势项分量, 相关系数值为-0.980, 表现为明显的负相关关系; 其次是 ENSO 的 IMF5 分量与年输沙的 IMF6 分量, 相关性为 0.329, 呈现明显的正相关, 月输沙的 IMF5、IMF6 分量与 ENSO 指数分量分别存在 4 个明显相关关系, 短周期的分量与长周期分量相比有较强的相关性, 根据上表也可说明厄尔尼诺 - 南方涛动 ENSO 指数与冻口站的输沙量整体变化波动趋势具有一定的联系。

4. 结语

本文利用 Mann-Kendall 检验和经验模态分解方法, 对黄河下游的冻口水文站 70 年的月输沙量数据进行了分析。根据分析可知, 冻口站输沙量从 1952 年起呈下降趋势, 至 2002 年缓慢上升, 这与调水调沙的时间节点一致, 表明小浪底水库建成以后的调水调沙对冻口站的输沙量序列影响明显。从贡献率上看, 输沙量和厄尔尼诺 - 南方涛动 ENSO 指数低频模态的贡献率占比超过 50%, 低频模态的分量主导了时间序列的变化。从相关关系上来看, 冻口站月输沙量与厄尔尼诺 - 南方涛动 ENSO 指数存在明显的相关性, 其中月输沙量的中低频模态与厄尔尼诺 - 南方涛动 ENSO 的低频模态相关性较高, 大多呈现负相关, 说明厄尔尼诺 - 南方涛动 ENSO 指数与冻口站的输沙量整体变化波动趋势具有一定的联系。

参考文献

[1] 王旖旎, 杜鹃, 毛睿. 近 40 年大尺度气候因子对中国洪涝灾害的可能影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 825-833.

[2] 方国华, 涂玉虹, 闻昕, 等. 1961~2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 598-611.

[3] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.

[4] 张知彬. El Nino 与大尺度、超长期生物灾害预警[J]. 科学, 1999, 46(2): 34-36.

[5] 邵骏, 钱晓燕, 谢珊, 等. ENSO 事件对长江源区径流演变的影响[J]. 长江科学院报, 2023, 40(10): 173-179, 185.

- [6] 张瑞, 汪亚平, 潘少明. 近 50 年来长江入海径流量对太平洋年代际震荡变化的响应[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 572-277.
- [7] 刘志伟. 上砂河流域降水特征及变化趋势分析[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(11): 160-162.