

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.022

许焱涛, 李鹏, 马方铭, 等. 涪江流域日输沙率的时间尺度变化效应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 83-94.

XU Yaotao, LI Peng, MA Fangming, et al. Temporal scale effects on daily sediment yield in the Fu River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 83-94.

涪江流域日输沙率的时间尺度变化效应

许焱涛¹, 李鹏^{1,2}, 马方铭¹, 赵宾华¹, 马文涛³, 苏利平³, 王立明³

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048; 2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048; 3. 宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750002)

摘要: [目的] 解析日输沙率与关键环境因子之间的尺度依赖关系, 探索有效的预测方法, 以应对由于泥沙运输机制的复杂性和水文过程的非线性所带来的预测挑战。[方法] 采用集合经验模态分解与自适应噪声(CEEMDAN)方法, 分析了西南地区涪江流域 4 个水文站点控制区域 2013—2018 年的日输沙率与 5 个潜在影响变量(流量、降水量、平均气温、潜在蒸散发量和 NDVI)间多时间尺度变异特征, 识别不同时间尺度下日输沙率与相关变量相互作用关系, 在此基础上, 对日输沙率作出预测。[结果] CEEMDAN 方法成功将日输沙率及其潜在影响变量分解为 10—11 本征模态函数(IMF)和残余项, 揭示出日输沙率在 3~730 天不同时间尺度上的显著变化。分解后的日输沙率与流量、降水量在各个时间尺度上均显示出显著的相关性增强, 而气温、潜在蒸散发量和 NDVI 主要与长时间尺度的日输沙率显著相关。通过逐步多元线性回归预测日输沙率, 模型的预测性能显著, R^2 值在所有站点均超过 0.55。[结论] CEEMDAN 方法能够有效揭示输沙率及其影响变量之间的尺度依赖性, 为理解河流输沙动态提供了新的视角。

关键词: 水文过程; 日输沙率; CEEMDAN; 尺度变化; 涪江流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0083-12

Temporal Scale Effects on Daily Sediment Yield in the Fu River Basin

XU Yaotao¹, LI Peng^{1,2}, MA Fangming¹, ZHAO Binhua¹, MA Wentao³, SU Liping³, WANG Liming³

(1. Xi'an University of Technology, State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China; 3. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, China)

Abstract: [Objective] To analyze the scale-dependent relationships between daily sediment yield and key environmental factors and to explore effective prediction method to cope with the prediction challenges caused by the complexity of sediment transport mechanisms and the nonlinearity of hydrological processes. [Methods] Employing the Composite Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise (CEEMDAN) approach, we analyzed the multi-temporal scale variability characteristics between daily sediment yield and five potential influencing variables (flow rate, precipitation, average temperature, potential evapotranspiration, and NDVI) in the controled regions of four hydrological stations in the Fu River basin of Southwest China from 2013 to 2018. Interactions between daily sediment yield and related variables at different temporal scales were identified, upon which predictions of daily sediment yield were predicted. [Results] The CEEMDAN method successfully decomposed the daily sediment yield and its potential influencing variables into 10—11 intrinsic mode functions (IMFs) and residual item, revealing the significant changes of the daily sediment yield at different temporal scales ranging from 3 to 730 days. After decomposition, daily sediment yield showed significantly enhanced correlation with howrate and precipitation across all temporal scales, whereas temperature, potential evapotranspiration, and NDVI were primarily significantly correlated with long-term scale sediment yields. By using stepwise multiple linear regression to

收稿日期: 2024-02-08

修回日期: 2024-03-21

录用日期: 2024-04-08

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2040208, U2243201); 陕西省 2023 年重点研发计划项目(2023-ZDLSF-65)

第一作者: 许焱涛(1995—), 男, 博士, 主要从事水沙过程模拟与水土保持研究。E-mail: xuyaotao@163.com

通信作者: 李鹏(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事旱区水文过程与生态响应关系研究。E-mail: lipeng74@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

predict the daily sediment yield, the prediction performance of the model is significant, and the R^2 values exceeds 0.55 at all stations. [Conclusion] The CEEMDAN method effectively revealed the scale dependency between sediment yield and its influencing variables, offering a new perspective for understanding the dynamics of river sediment transport.

Keywords: hydrological processes; daily sediment yield; CEEDMAN; scale changes; Fu River Basin

Received: 2024-02-08

Revised: 2024-03-21

Accepted: 2024-04-08

Online(www.cnki.net): 2024-06-18

河流输沙过程在河流系统和流域管理中发挥着至关重要的作用,它与水文循环过程紧密相关^[1]。河流输沙不仅影响河床形态和水流特性,还对水质和生态系统健康产生重要影响。因此,输沙率的研究对于了解地表径流动态、土壤侵蚀及流域生态系统的稳定性具有重要意义^[2-3]。流域输沙率的变化不仅直接影响着水资源的管理和土地利用规划,同时对于预测洪涝、维护河道健康等方面都有着深远的影响。在当前气候变化加剧的背景下,深入探究输沙率及其时间尺度变化效应,对于河道维护及河流生态系统健康的保护具有重要的实际意义^[4-5]。

河流泥沙输运是由流域内多种动态交织的因素共同影响的复杂非线性过程^[6]。其中,径流作为主要的动力因素,不仅由降雨或融雪触发,还通过携带和搬运土壤颗粒来形成河流中的泥沙负载^[7]。在这个过程中,持续的高强度降雨事件加剧土壤侵蚀,并显著增加径流中的泥沙含量。而降雨模式的时空分布直接影响土壤湿度和地表径流的生成,决定土壤的抗侵蚀能力和最终的输沙率^[8]。同样,区域的气温和潜在蒸散发通过影响水循环,间接作用于输沙过程^[9]。高温和增加的潜在蒸散发共同作用于土壤水分,既加速水分的蒸发过程,也通过减少地表可用水量,增加土壤干燥度和水流对土壤的冲刷潜力;另一方面,植被通过其根系的固土作用和对流速的调节作用,有效降低土壤侵蚀和输沙率^[10]。然而,这些因素在不同的时间尺度上影响输沙率的程度是变化的,某些在短期内显著的因素,在长期趋势中可能变得不那么突出^[11]。这种时间变化的特性导致无法简单地将输沙过程的复杂性简化为固定的模型或规律。因此,需要综合分析不同时间尺度上输沙率与潜在变量之间的关系,以揭示与输沙率相关的关键环境因子及其相互关系的动态性。

目前,频谱分析^[12]、时间一致性分析^[13]、小波分析^[14]等尺度研究方法已被用于研究产沙量与影响因素间的尺度依赖关系。尽管这些方法为涉及不同时间尺度的输沙率研究提供了有价值的见解,但它们在处理输沙过程中的非线性特征和非平稳性时仍存在一定局限。这些方法可能无法准确捕捉到日输沙率的动态变化及其与环境因子之间的细微关系^[15-16]。

此外,现有研究多聚焦于长期时间尺度的分析,而对于日尺度及其变化特征的探讨相对较少,这限制了对河流输沙动态性的全面理解。因此,有必要探索新的方法论,以更好地揭示日输沙率与关键环境因子之间在不同时间尺度上的相互作用。集合经验模态分解与自适应噪声(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)是对传统多元经验模态分解(empirical mode decomposition, EEMD)的改进,引入自适应噪声的概念,提高分解的鲁棒性,以更好地处理非平稳数据^[17]。目前,CEEMDAN已在多个水文领域(干旱评估、径流预测、土壤水分)得到了应用^[18-20]。然而,在量化输沙率及其潜在影响因子尺度依赖关系方面应用较少。基于此,本研究利用涪江流域 4 个水文站点控制区域 2013—2018 年日尺度输沙和流量数据,气象水文站点的逐日降水量、气温、潜在蒸散发量,以及基于谷歌地球引擎云计算平台(google earth engine, GEE)计算得到的日尺度归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据,采用 CEEMDAN 分解方法探讨涪江流域 4 个水文站点控制区域日输沙率及其潜在影响变量多时间尺度变异特征,识别不同时间尺度下日输沙率与相关变量相互作用关系,在此基础上,对日输沙率作出预测。

1 研究区概况

涪江是长江支流嘉陵江右岸的最大支流。发源于四川省松潘县与平武县之间的岷山主峰雪宝顶。涪江全长 670 km,向南流经四川省和重庆市潼南区、铜梁区等区域,在重庆市合川区汇入嘉陵江。流域边界 29°18'00"—33°03'00"N, 103°43'48"—106°16'12"E。流域总面积约 3.64 万 km²,多年平均径流量 572 m³/s。涪江流域江油控制断面以上为上游,射洪控制断面至江油为中游,流域出口站射洪至小河坝为下游(图 1)。整个流域地势自西北向东南倾斜,海拔落差较大,达到 5 300 m,其中上游地处川西高山区,地形起伏较大,中游和下游多以丘陵和河谷平原为主,地形起伏较小。流域属亚热带湿润性气候,年平均气温在 14.7~18.2℃,雨量丰沛,年平均降水量 900 mm 左右,但时空差异较大,主要集中在 6—8 月,占到全年的 50%以上^[21]。涪江泥沙含量较多,出口站

小河坝含沙量平均达到 1.23 kg/m^3 , 是嘉陵江泥沙的主要来源之一。

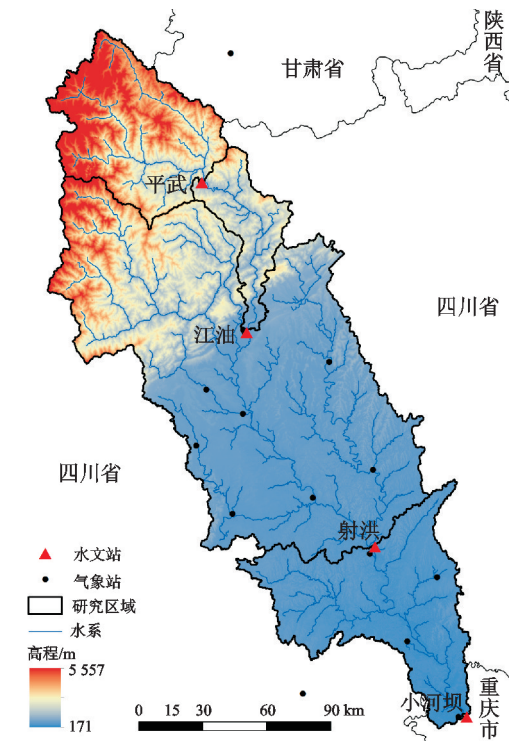


图1 涪江流域概况

Fig. 1 Location of the Fu River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究气象数据均来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>), 剔除部分有数据缺失的站点后, 选择涪江流域内部及周边 62 个气象站点 2013—2018 年日气象数据, 主要包括逐日平均气温、平均风速、相对湿度和日照时间、降水量等, 同时根据彭曼公式计算逐日潜在蒸散发量。逐日 NDVI 数据通过全球尺度遥感云计算平台 (google earth engine, GEE) 进行计算处理, 流域数字高程模型 (DEM) 分辨率为 30 m, 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。涪江流域平武站、江油站、射洪站和小河坝站控制区域径流和含沙量数据来源于长江流域嘉陵江区水文年鉴^[22], 时间序列为 2013—2018 年, 尺度为逐日数据。

2.2 研究方法

2.2.1 集合经验模态分解与自适应噪声 CEEMDAN

经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 和其改进方法集合经验模态分解与自适应噪声 (complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN) 是一组信号处理技术, 用于分解非平稳和非线性信号^[23]。其中 CEEMDAN 结合 EEMD 和自适应噪声调整, 可用于更稳健的信号分解。

CEEMDAN 旨在处理非线性和非平稳信号的分解, 特别适用于复杂的地球科学、气象学和水文学数据, 如流域输沙率日数据。该方法通过将原始信号分解成多个本征模态函数 (intrinsic mode functions, IMF) 来实现。每个 IMF 代表信号中的一种局部特征, 使得 IMF 总和可以近似还原原始信号。其主要步骤为:

对于每个实现 i , 引入随机噪声 $N_i(t)$:

$$x_i(t) = x(t) + N_i(t) \quad (1)$$

进行 EMD 分解得到:

$$x_i(t) \rightarrow \text{IMFS}_i \quad (2)$$

重复上述步骤 N 次, 得到多组 IMFS。对于每个 IMF 的标准差 σ_i , 引入自适应噪声:

$$N_i(t) = \alpha \cdot \sigma_i \cdot \text{random_noise}(t) \quad (3)$$

式中: α 为自适应参数, 用于控制噪声的幅度。对于每个模态函数的相应 IMFS 进行平均, 得到最终结果:

$$\text{Final_IMFS}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{IMFS}_i(t) \quad (4)$$

式中: $x(t)$ 为原始观测的时间序列数据; $N_i(t)$ 为加入到原始序列中的噪声序列; $x_i(t)$ 为在原始序列中加入第 i 个噪声序列后得到的新时间序列; IMFS_i 为从加噪数据 $x_i(t)$ 中分解得到的内在模态函数 (IMFS) 的集合; α 为自适应参数, 用于控制噪声的幅度; σ 为原始时间序列数据的标准差; $\text{random_noise}(t)$ 为在时间 t 生成的随机噪声序列; $\text{Final_IMFS}(t)$ 为通过对所有加噪序列分解得到的 IMFS 取平均值后获得的最终 IMFS。

通过引入集合思想和自适应噪声处理, CEEMDAN 试图提高信号分解的准确性和稳定性。参数 α 的选择可以根据信号特性进行调整, 以达到最佳的噪声抑制效果。

2.2.2 统计分析 采用 Pearson 相关系数, 对日输沙率的分解 IMF 与 5 个相关变量之间的关系进行分析。通过逐步多元线性回归, 从流量、降水量、气温、潜在蒸散发量和 NDVI 中提取分解后的 IMFS 和残差, 用以估算不同 IMF 的日尺度输沙率。最后, 将每个 IMF 的预测值相加, 用于对每日输沙率进行预测。

日输沙率模拟结果通过 RMSE (均方根误差)、AIC (赤池信息量准则法) 和 R^2 (决定系数) 进行筛选。计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{M,i} - y_{O,i})^2} \quad (5)$$

$$\text{AIC} = \ln \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right] + \frac{2h}{n} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{M,i} - y_{O,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{M,i} - \bar{y}_{M,i})^2} \quad (7)$$

式中： $y_{M,i}$ 、 $y_{O,i}$ 分别为日输沙率的实测值和预测值； i 为第 1 年的观测值； N 为总的观测值个数。

3 结果与分析

3.1 变量时间变化特征及相关性

图 2 为涪江流域平武、江油、射洪和小河坝 4 个站点控制区域日尺度流量、输沙率、降水量、潜在蒸散发量、平均气温和 NDVI 的时间变化。在研究期间，4 个水文站点控制区域的日尺度输沙率通常保持在

较低水平，但会出现突增的尖峰，反映出输沙率具有明显的日尺度变异性。降水量和流量的分布夏季高，冬季低，呈现出明显的季节性模式。潜在蒸散发量、平均气温和 NDVI 3 个变量年内整体呈现抛物线变化，日尺度变化则显示出相似的季节性模式，其中潜在蒸散发量和平均气温在夏季达到峰值，而在冬季降至最低。NDVI 的变化显示出植被覆盖度的季节性变化，这也与降水量模式相协调。进一步对数据进行统计分析(表 1)，4 个站点控制区域日尺度输沙率的变异系数均表现出较强的变异性(5.74~14.67)，远大于其他变量，进一步证实了日尺度输沙率数据表现出较高的非平稳性和非线性。

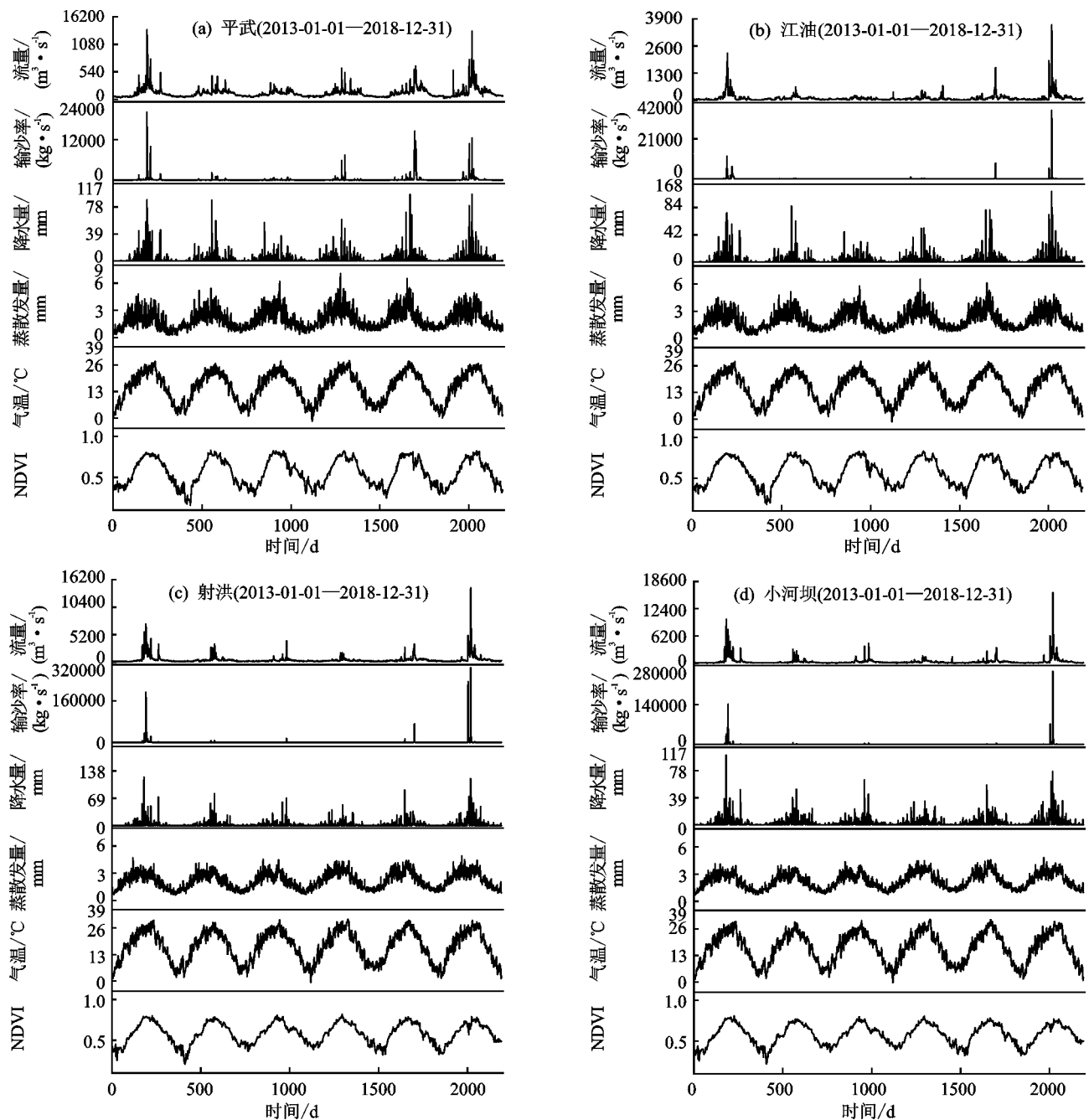


图 2 不同站点流量、输沙率、降水量、潜在蒸散发量、平均气温和 NDVI 序列时间变化趋势

Fig. 2 Temporal trends in flow rate, sediment yield, precipitation, potential evapotranspiration, average temperature and NDVI

表 1 变异系数			
Table 1 Coefficient of variation			
站点	变异系数		
	流量	输沙率	降雨量
平武	0.826	5.736	3.178
江油	1.534	12.677	3.048
射洪	1.726	11.970	3.096
小河坝	1.984	14.666	2.564

在进行 CEEMDAN 分解前,对 4 个站点日尺度输沙率与选取的因素间的相关性进行分析(图 3)。



注: * 表示在显著性水平为 0.05 下显著相关($p < 0.05$); ** 表示在显著性水平为 0.01 下显著相关($p < 0.01$); *** 表示在显著性水平为 0.001 下显著相关($p < 0.001$)。下同。

图 3 日输沙率与降水量、流量、平均气温、潜在蒸散发量和 NDVI 的相关性

Fig. 3 Correlation between daily sediment yield and precipitation, flow rate, average temperature, potential evapotranspiration and NDVI

3.2 CEEMDAN 分解结果

为识别不同尺度下日输沙率及相关因素的变化特征,采用改进的集合经验模态分解与自适应噪声方法,将 4 个站点控制区域日输沙率及相关变量分解为 10 个或 11 个 IMF 和 1 个残余项(图 4 和图 5)。日输沙率与流量、降水量、潜在蒸散发量、平均气温和 NDVI 的 IMF1 频率最高,随着 IMF 阶数的增加,频率逐渐减小,周期则逐渐增大。残差分量能够反映变量日时间序列随时间变化的趋势,其中平武和江油站控制区域日流量、潜在蒸散发量、平均气温和 NDVI 总体呈上升趋势,日输沙率和降水量总体变化不大。射洪和小河坝站控制区域日径流量、输沙率和降水量总体上先下降后上升,潜在蒸散发、平均气温、NDVI 总体上小幅上升。

IMF 能够反映特定时间尺度下变量的周期性变化,利用希尔伯特变换进一步得到不同站点相关变量

径流、降水和气温均显著影响 4 个站点控制区域的日输沙率,呈极显著正相关($p < 0.01$),其中日输沙率与径流的相关系数最大,达到 0.7 以上,与降水的相关性达到 0.2 以上,与气温间的相关性最低。射洪和小河坝控制区域潜在蒸散发与日输沙呈显著正相关,而在其他 2 个站点控制区域相关性不显著。NDVI 则仅在平武与日输沙率呈显著正相关关系,在其他 3 个站点控制区域与日输沙率间无统计学意义。

的具体周期(表 2)。4 个站点的 IMF1、IMF2、IMF3、IMF4、IMF5、IMF6 和 IMF7 的周期尺度较为接近,表明 4 个站点的日输沙率和其他因素在相对较短的时间间隔内表现出相似的动态特征。从 IMF8 到 IMF11 较长的时间周期上,4 个站点的平均 IMF 变化较大。平武站点的 IMF8 平均周期为 223 天,而小河坝站点为 242 天。这一结果表明,涪江流域日输沙率及相关因素在较为长的时间间隔上存在差异。同时,就不同站点相同变量来看,随着模态指数的增加,变量的周期差异越来越大。

3.3 输沙率分解量和时间序列的相关性分析

由图 6 可知,除平武站点的 IMF1 和残余项外,其他各 IMF 分量与流量或降水量显著相关($p < 0.05$)。同时,江油、射洪和小河坝站点的所有 IMF 分量和残差都与流量或降水量呈显著相关,尤其是射洪站,IMF 分量和残差与降水量和流量都显著相关。

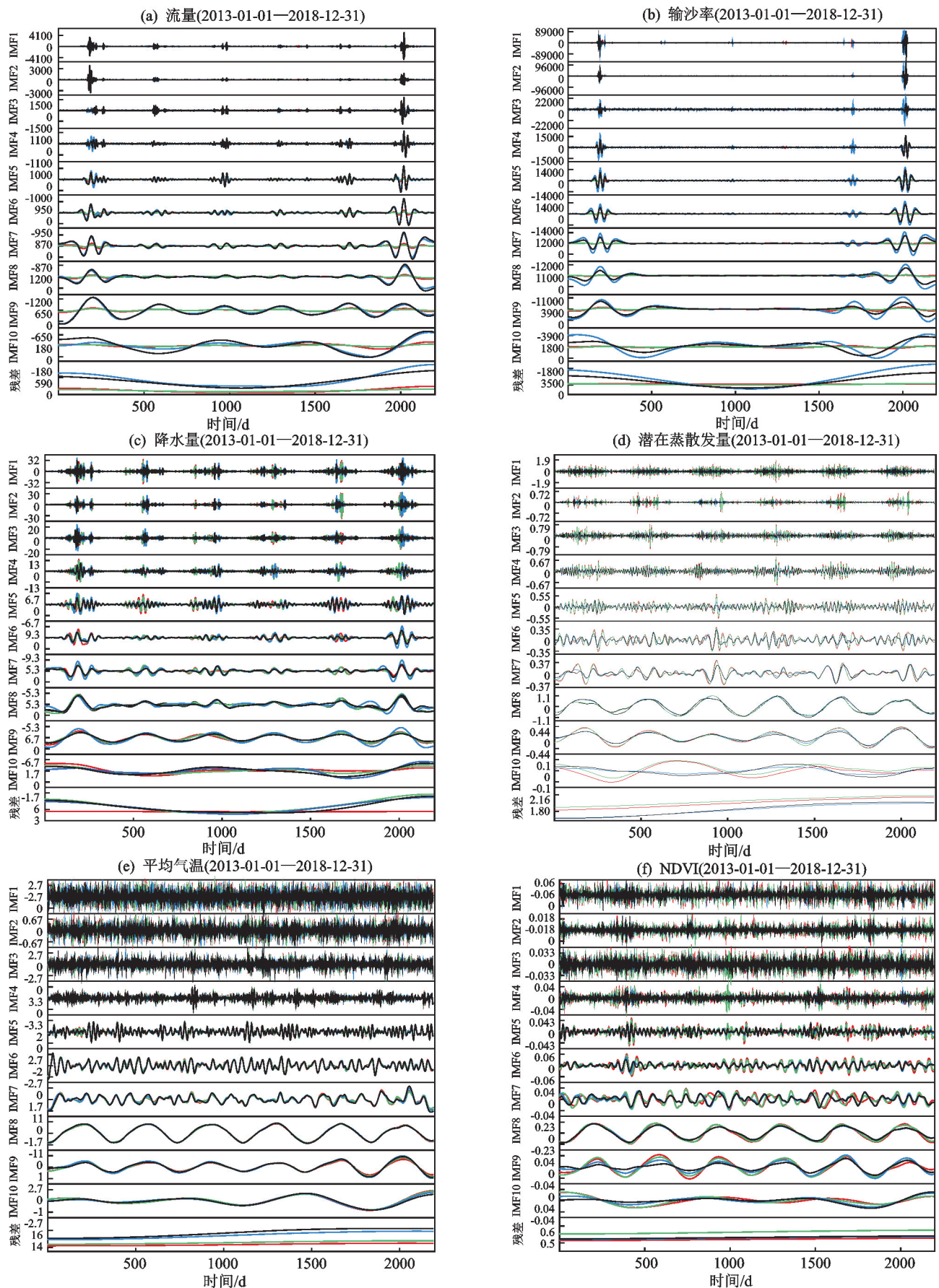


图 4 日流量、输沙率、降水量、潜在蒸散发量、平均气温、NDVI IMF1~10 和残差项模式分解

Fig. 4 Daily decomposition of flow rate, sediment yield, precipitation, potential evapotranspiration, average temperature and NDVI

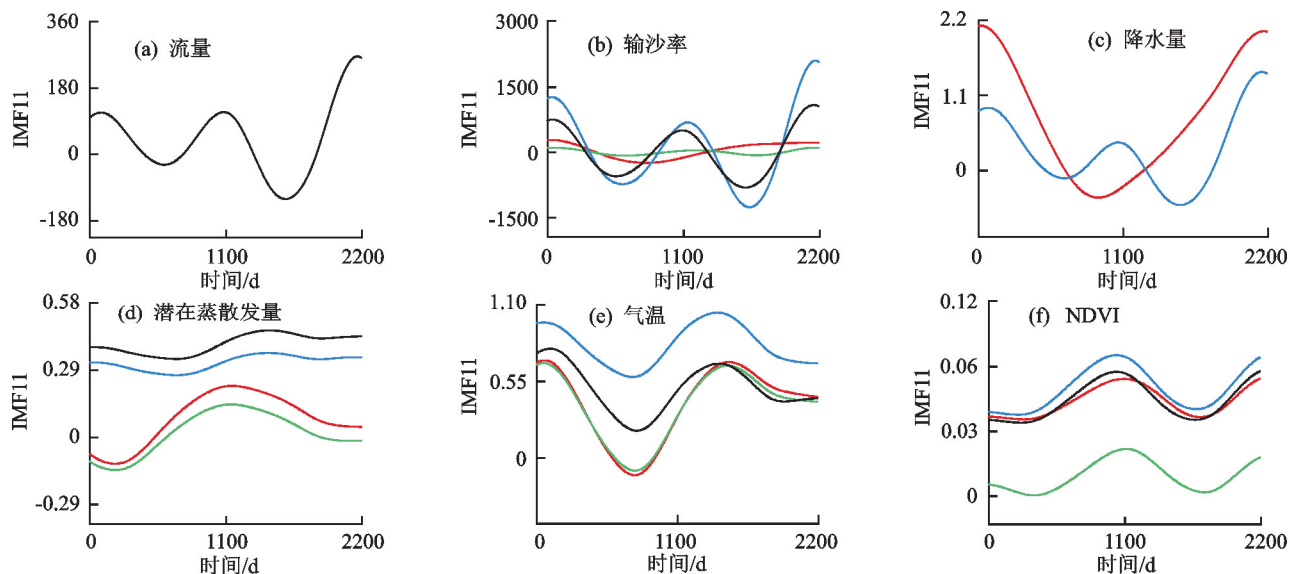


图5 日流量、输沙率、降水量、潜在蒸散发量、平均气温、NDVI IMF11 模态分解

Fig. 5 Daily IMF11 decomposition of flow rate, sediment yield, precipitation, potential evapotranspiration, average temperature and NDVI

在分解前原始数据观测尺度上(图3),潜在蒸散发量只在射洪和小河坝站与日输沙率显著相关,然而,平武和江油站点日输沙率经过分解后,多个IMF分量与潜在蒸散发量显著相关。同理,NDVI与日输沙率在观测尺度上仅在平武站表现出显著相关($p < 0.05$),但经过对日输沙率的分解,江油、射洪和小河坝站的日输沙率至少存在2个IMF分量与NDVI显著相关($p < 0.05$)。平均气温与4个站点日输沙率的IMF分量关系较为复杂。在平武和江油站,平均气温与日输沙率不同尺度的IMF显著相关,而在射洪和小河坝站则与中长尺度的日输沙率IMF分量显著相关。

总体来看,流量和降水量在大多数尺度上与日输沙率有显著相关性,表明流量和降水量是影响日输沙率的关键变量。而平均气温、潜在蒸散发量和NDVI则主要在中长尺度上对日输沙率有显著影响。值得注意的是,即使部分站点日输沙率在观测尺度与潜在变量之间没有显著相关关系,但日输沙率不同尺度的IMFs都至少存在1个IMF与所选取的5个潜在变量之间显著相关。同时,对于不同尺度日输沙率的IMF分量与同一潜在影响变量之间的相关性可能为负也可能为正。

3.4 输沙率逐步多元回归预测分析

采用逐步多元线性回归方法,在同一尺度下,利用尺度特定的控制因素,预测每个IMF和残差项的输沙率(表3),即利用日输沙率和5个潜在影响变量分解后每个尺度的IMF和残差项分别建立逐步多元线性回归方程。在所有的站点,调整后的 R^2 一般都随着IMF尺度的增大而增大,预测因子的数量也随

着时间的尺度的增加而增加。在IMF11和残差的逐步多元线性回归中,调整后的 R^2 接近1,在这些时间尺度上,几乎所有的日输沙率都可以用相关影响因素进行解释,意味着输沙率在长时间尺度上具有确定性。同时,5个潜在影响变量对日输沙率的相对重要性随着时间尺度的变化而不同。但是,4个站点每个逐步多元回归方程中都出现了流量,这意味着流量在短期和长期时间尺度上都能够对日输沙率产生强烈影响。

通过多元逐步线性回归将所有IMFs和残差项结果相加,预测每个站点观测尺度上的日输沙率。采用RMSE、AIC和 R^2 ,对基于CEEMDAN分解前后预测日输沙率的模型性能进行评估(表4)发现,CEEMDAN分解后得到的 R^2 值显著大于未分解数据序列得到的 R^2 值,分解后的RMSE和AIC均低于基于观测尺度原始数据相应的RMSE和AIC值。因此,与基于原始数据的产沙预测相比,采用CEEMDAN的方法,将日输沙率分解为不同尺度,增强日输沙率的可预测性。

4 讨论

涪江流域与北方高侵蚀性流域相比,河流输沙率通常较低,日输沙率表现出更高的变异性(表1),与潜在影响变量的变异系数相比,其值也更高,达到5.74~14.67。同时,相较于输沙率的月际和年际变化,日输沙率的变异系数也要大的多^[24]。因此,日输沙率的时间变化表现出更强的非平稳和非线性。得益于CEEMDAN在处理非平稳数据和具有抗强噪声干扰方面的优势,将其应用至日输沙率及其相关变量尺度特征分析中。

表 2 变量模态分解尺度变化
Table 2 Scale changes in variable modal decomposition

站点	分解变量	输沙率	流量	降水量	潜在蒸散发量	平均气温	NDVI	平均值
平武	IMF1	3	3	3	3	3	3	3
	IMF2	4	4	4	5	4	4	4
	IMF3	4	4	5	6	5	4	5
	IMF4	7	8	9	10	9	8	9
	IMF5	14	17	16	21	17	16	17
	IMF6	26	34	33	39	32	34	33
	IMF7	61	68	61	76	61	66	66
	IMF8	129	157	129	313	365	243	223
	IMF9	313	365	365	365	365	365	356
	IMF10	548	548	438	548	730	1 096	651
	IMF11	730	—	—	2 191	2 191	1 096	1 552
江油	IMF1	3	3	3	3	3	3	3
	IMF2	3	4	4	5	4	4	4
	IMF3	3	4	5	6	5	4	5
	IMF4	6	8	9	10	9	8	8
	IMF5	12	17	17	20	16	16	16
	IMF6	23	35	33	39	32	35	33
	IMF7	53	84	64	76	61	68	68
	IMF8	110	146	146	313	365	365	241
	IMF9	243	365	365	365	365	365	345
	IMF10	438	438	548	730	730	548	572
	IMF11	730	—	—	2 191	2 191	2 191	1 826
射洪	IMF1	3	3	3	3	3	3	3
	IMF2	4	4	4	5	4	4	4
	IMF3	3	4	5	5	5	4	4
	IMF4	6	7	9	10	9	8	8
	IMF5	13	15	16	18	16	15	16
	IMF6	23	30	30	33	33	33	30
	IMF7	51	71	66	78	56	61	64
	IMF8	115	157	137	243	365	365	230
	IMF9	243	365	365	365	365	313	336
	IMF10	438	548	548	548	730	548	560
	IMF11	730	—	730	—	2 191	2 191	1 461
小河坝	IMF1	3	3	3	3	3	3	3
	IMF2	3	4	4	4	4	4	4
	IMF3	3	4	5	5	5	4	4
	IMF4	6	7	10	10	9	8	8
	IMF5	12	14	18	18	17	15	16
	IMF6	23	27	33	34	33	34	31
	IMF7	52	68	71	68	61	66	64
	IMF8	110	169	169	274	365	365	242
	IMF9	243	365	365	365	365	313	336
	IMF10	548	730	548	1 096	730	2 191	974
	IMF11	730	730	—	2 191	2 191	2 191	1 607

经过 CEEMDAN 分解后,本研究得到日输沙率 和潜在影响变量 10~11 个的 IMF_s 和残差,明显高于以往的研究(3 个或 4 个)^[24-25]。造成这种差异的原因一方面是本研究数据为日尺度,另一方面则是本

研究的样本数量较多,达到 2 191 个,而以往的研究样本数量不足 100,需要更多的 IMFs 来全面获取变量不同尺度的信息。分解后具有较低数值的 IMFs 通常表现出更高频率的振荡,而较大尺度则产生较低频率的振荡(图 4)。尽管在分解前原始观测尺度上日输沙率与潜在蒸散发量和 NDVI 相关性不显著,但通过分解后的相关性显著。因此,进一步证实了在单一尺度上不足以全面获得日输沙率和相关变量之间的尺度依赖关系。与此同时,分解后的日输沙率不同 IMFs 与同一相关变量之间的相关性既有显著正相关,也有显著负相关,这使得一个尺度上的正效应或负效应可以被其他尺度上的相反效应抵消^[26]。最后,采用多元线性逐步回归对多尺度输沙率进行预测,随着 IMF 尺度的增大,5 个潜在影响变量对日输

沙率的相对重要性随着时间尺度的变化而不同。在短时间尺度上,输沙率反映快速的土壤侵蚀和沉积事件,这些事件往往与短期强降雨或地表径流急剧变化有关,中时间尺度可能与季节性变化有关,例如,季节交替导致的植被覆盖和土壤湿度的周期性波动,而长时间尺度则可能表示流域长期的环境变化趋势。基于多元线性逐步回归将所有 IMFs 和残差项结果相加,预测涪江流域每个站点观测尺度上的日输沙率, R^2 随着时间尺度的增加而增加,结果显著优于分解前的模型性能。表明日输沙率及相关变量经过 CEEMDAN 分解到不同的时间尺度,能够提供影响输沙率变化的额外因素。总体来看,CEEMDAN 能够阐明非线性和非平稳性系统中日输沙率及其相关变量间的尺度依赖关系,提升输沙率的预测效果。

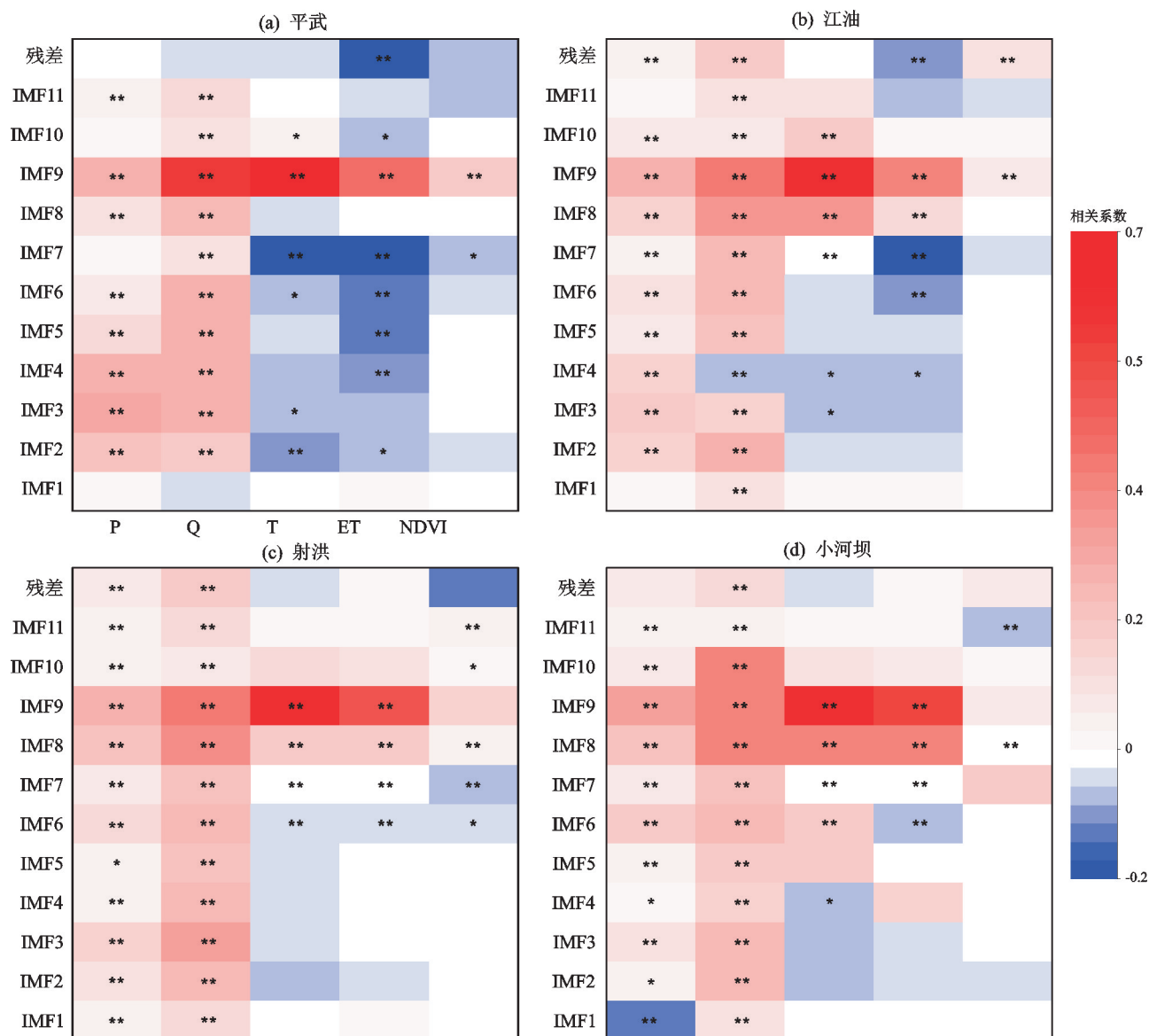


图 6 输沙率 IMF、残差项与降水量、流量、平均气温、潜在蒸散发量、NDVI 的相关性

Fig. 6 Correlation between sediment yield IMF, residuals and precipitation, flow rate, average temperature, potential evapotranspiration and NDVI

表 3 集合经验模态分解后的日输沙率与潜在变量之间的逐步多元线性回归

Table 3 Stepwise multiple linear regression between daily sediment yield after ensemble empirical mode decomposition and potential variables

站点	IMF	线性回归方程	R^2	F
平武	IMF1	$S_1 = 1.994 + 11.214 Q_1 + 11.287 P_1$	0.347	583.156
	IMF2	$S_2 = -13.096 + 8.435 Q_2$	0.136	346.296
	IMF3	$S_3 = 2.102 + 10.874 Q_3 + 11.094 P_3 + 28.189 T_3 + 82.033 ET_3 - 1\ 623.671\ NDVI_3$	0.577	598.547
	IMF4	$S_4 = 0.295 + 5.201 Q_4 + 5.151 P_4 - 47.075 ET_4 + 2\ 139.131\ NDVI_4$	0.466	478.190
	IMF5	$S_5 = 4.467 + 10.437 Q_5 - 34.765 P_5 + 33.456 T_5 - 100.188 ET_5$	0.550	668.956
	IMF6	$S_6 = 4.417 + 9.240 Q_6 - 51.905 P_6 - 19.566 T_6 - 188.085 ET_6$	0.674	1135.395
	IMF7	$S_7 = 17.081 + 8.270 Q_7 + 17.560 T_7 - 128.422 ET_7 - 564.896 NDVI_7$	0.541	645.469
	IMF8	$S_8 = 68.496 + 3.349 Q_8 + 76.821 P_8 - 18.950 T_8 + 133.871 ET_8 - 775.513 NDVI_8$	0.618	708.204
	IMF9	$S_9 = -23.995 + 7.070 Q_9 + 61.397 P_9 + 257.515 T_9 - 441.913 ET_9 - 10\ 812.250 NDVI_9$	0.885	3\ 380.238
	IMF10	$S_{10} = -49.251 + 15.267 Q_{10} - 239.899 P_{10} - 195.720 T_{10} + 5\ 120.991 NDVI_{10}$	0.845	2\ 996.509
	IMF11	$S_{11} = -40.342 + 184.152 P_{11} + 230.331 T_{11} + 650.642 ET_{11} - 4\ 505.316 NDVI_{11}$	0.998	299\ 818.290
江油	残差	$S_{12} = 5\ 940.663 + 0.395 Q_{12} + 243.927 P_{12} - 111.419 T_{12} + 300.726 ET_{12} - 10\ 485.877 NDVI_{12}$	0.998	222\ 983.190
	IMF1	$y = 20.724 + 7.426 Q_1$	0.406	1\ 497.477
	IMF2	$y = -10.770 + 11.189 Q_2 - 11.732 P_2$	0.440	857.910
	IMF3	$y = -1.080 + 1.423 Q_3 + 13.779 P_3 + 1\ 333.385 NDVI_3$	0.273	273.075
	IMF4	$y = -0.232 + 3.330 Q_4 + 25.071 P_4$	0.407	751.874
	IMF5	$y = 2.954 + 4.629 Q_5 - 22.446 T_5 + 1\ 121.567 NDVI_5$	0.511	761.533
	IMF6	$y = 9.477 + 3.320 Q_6 + 20.094 P_6 + 50.560 T_6 - 205.750 ET_6 - 1\ 692.804 NDVI_6$	0.545	523.589
	IMF7	$y = 12.925 + 3.385 Q_7 - 73.126 T_7 + 392.665 ET_7 - 990.187 NDVI_7$	0.537	633.626
	IMF8	$y = 21.826 + 3.357 Q_8 - 31.393 P_8 - 7.198 T_8 + 88.242 ET_8 - 130.526 NDVI_8$	0.758	1\ 367.811
	IMF9	$y = -1.925 + 2.925 Q_9 + 113.719 T_9 - 88.768 ET_9 - 5\ 841.312 NDVI_9$	0.865	3\ 511.662
	IMF10	$y = 17.016 + 0.868 Q_{10} - 58.306 P_{10} + 76.743 T_{10} - 874.110 ET_{10} + 949.979 NDVI_{10}$	0.659	844.110
射洪	IMF11	$y = -131.353 + 139.537 T_{11} - 717.504 ET_{11} + 10\ 801.491 NDVI_{11}$	0.990	75\ 318.378
	残差	$y = 28\ 898.439 - 2.651 Q_{12} + 274.180 P_{12} - 3\ 297.620 T_{12} + 3\ 324.150 ET_{12} + 21\ 092.306 NDVI_{12}$	0.999	691\ 637.310
	IMF1	$y = 219.736 + 11.712 Q_1 + 54.622 P_1 + 1\ 185.254 ET_1$	0.216	200.362
	IMF2	$y = -188.289 + 24.138 Q_2$	0.172	455.510
	IMF3	$y = 20.161 + 10.817 Q_3 + 68.263 P_3 + 192.961 T_3$	0.553	901.127
	IMF4	$y = -10.834 + 7.506 Q_4 - 306.928 P_4$	0.412	767.491
	IMF5	$y = 51.510 + 14.575 Q_5 - 529.978 P_5 - 9\ 259.354 NDVI_5$	0.644	1\ 317.307
	IMF6	$y = 83.967 + 11.747 Q_6 - 3\ 043.931 ET_6 - 14\ 687.943 NDVI_6$	0.567	955.093
	IMF7	$y = 74.314 + 15.621 Q_7 - 516.311 P_7 - 2\ 937.177 ET_7 + 13\ 278.936 NDVI_7$	0.825	2\ 584.614
	IMF8	$y = 179.340 + 10.217 Q_8 + 185.377 P_8 - 578.777 T_8 + 2\ 720.295 ET_8 + 19\ 327.133 NDVI_8$	0.904	4\ 106.391
	IMF9	$y = 43.846 + 1.727 Q_9 + 423.477 P_9 + 1\ 063.272 T_9 - 2\ 834.364 ET_9 - 59\ 666.960 NDVI_9$	0.760	1\ 387.351
小河坝	IMF10	$y = 92.326 + 8.153 Q_{10} - 1\ 139.100 P_{10} - 2\ 433.672 T_{10} + 9\ 006.315 ET_{10} + 132\ 037.134 NDVI_{10}$	0.962	11\ 071.197
	IMF11	$y = -2\ 769.652 + 1634.194 P_{11} + 2\ 524.395 T_{11} - 3\ 463.788 ET_{11} + 29\ 595.140 NDVI_{11}$	0.984	33\ 036.897
	残差	$y = 273\ 852.133 + 1.406 Q_{12} + 1\ 750.810 P_{12} - 17\ 880.354 T_{12} + 68\ 890.767 ET_{12} - 245\ 068.679 NDVI_{12}$	1.000	5\ 714\ 111.500
	IMF1	$y = 150.772 + 7.653 Q_1$	0.236	675.257
	IMF2	$y = -170.755 + 10.088 Q_2$	0.163	427.826
	IMF3	$y = -2.459 + 2.591 Q_3 + 96.295 P_3 + 117.978 T_3 + 8\ 696.366 NDVI_3$	0.259	190.989
	IMF4	$y = -19.987 + 6.410 Q_4 - 166.566 P_4$	0.311	494.188
	IMF5	$y = 50.896 + 8.617 Q_5 - 131.643 P_5 - 8\ 453.060 NDVI_5$	0.575	986.826
	IMF6	$y = 86.366 + 7.928 Q_6 + 450.601 T_6 - 3\ 853.894 ET_6 - 10\ 091.662 NDVI_6$	0.690	1\ 216.970
	IMF7	$y = 39.291 + 8.210 Q_7 - 250.232 P_7 - 1\ 874.551 ET_7 + 7\ 097.334 NDVI_7$	0.872	3\ 732.427
	IMF8	$y = 168.421 + 5.433 Q_8 + 179.936 P_8 - 241.295 T_8 + 817.147 ET_8 + 7\ 510.648 NDVI_8$	0.947	7\ 747.628
小河坝	IMF9	$y = -100.633 + 5.056 Q_9 - 679.190 P_9 + 942.040 T_9 + 2\ 074.782 ET_9 - 63\ 456.579 NDVI_9$	0.850	2\ 474.236
	IMF10	$y = 177.874 - 1.166 Q_{10} + 1\ 442.746 P_{10} + 1\ 404.262 T_{10} + 957.074 ET_{10} - 20\ 216.814 NDVI_{10}$	0.945	7\ 449.976
	IMF11	$y = -840.011 + 5.153 Q_{11} + 805.761 T_{11} - 400.805 ET_{11} + 9\ 301.347 NDVI_{11}$	0.971	18\ 338.474
	残差	$y = 56\ 723.978 + 6.542 Q_{12} - 100.541 P_{12} - 474.519 T_{12} + 5\ 521.267 ET_{12} - 115\ 389.499 NDVI_{12}$	1.000	916\ 093.260

表 4 分解前后 4 个站点控制区域日输沙预测结果统计对比

Table 4 Statistical comparison of daily sediment yield prediction results before and after decomposition in the watershed

站点	分解前后	均方根误差 (RMSE)	赤池信息准则 (AIC)	决定系数 (R ²)
平武	分解前	608.154	12.825	0.561
	分解后	565.997	12.551	0.603
江油	分解前	662.530	12.997	0.529
	分解后	610.821	12.667	0.598
射洪	分解前	7 875.199	17.948	0.538
	分解后	7 601.735	17.729	0.617
小河坝	分解前	4 894.006	16.996	0.558
	分解后	4 794.548	16.796	0.589

5 结 论

本文采用 CEEMDAN 方法量化了中国西南地区涪江流域 4 个水文站控制区域的日输沙率与日流量、降水量、平均气温、潜在蒸散发量和 NDVI 的尺度依赖关系。经过 CEEMDAN 分解后,可以得到日输沙率和潜在影响变量 10~11 个的 IMF_s 和残差,从 IMF₁ 到 IMF₁₀(IMF₁₁),变量的尺度逐渐增大。CEEMDAN 分解前,在原始数据观测尺度上,潜在蒸散发只与射洪和小河坝站控制区域的日输沙率显著相关,NDVI 与日输沙率在观测尺度上仅在平武站控制区域表现出显著相关,但经过 CEEMDAN 分解后,日输沙率与潜在影响变量至少在 1 个尺度上与所有变量呈现显著相关。经过分解后,降水量和流量几乎与日输沙率所有尺度的 IMF_s 相关,平均气温、潜在蒸散发量和 NDVI 则主要与输沙率的中长尺度 IMF_s 相关。在日输沙率预测模型中,流量和降水量的相对重要性最大。基于 CEEMDAN 分解后的潜在变量 IMF_s 和残差对日输沙率的预测优于使用原始数据的建模结果。CEEMDAN 作为一种获取非平稳和非线性数据序列的有效方法,对于预测不同下垫面日输沙率具有一定的优势。

参考文献:

[1] 储开凤,汪静萍.中国水文循环与水体研究进展[J].水科学进展,2007,18(3):468-474.

CHU K F, WANG J P. Advances in the research on hydrological cycle and water in the China[J].Advances in Water Science,2007,18(3):468-474.

[2] 胡春宏,张治昊,张晓明.维持黄河流域水沙平衡的调控指标阈值体系研究[J].水科学进展,2023,34(5):647-659.

HU C H, ZHANG Z H, ZHANG X M. Threshold system of regulation indicators for maintaining the runoff and sediment balance of the Yellow River Basin[J].Advances in Water Science,2023,34(5):647-659.

[3] 穆兴民.未来 30~50 年新水沙情势下黄河流域生态保护策略研究:评《黄河流域水沙变化机理与趋势预测》一书[J].水土保持通报,2023,43(5):e2.

MU X M. Study on ecological protection strategy of the Yellow River Basin under the new water and sediment situation in the next 30 ~ 50 years: Comment on the book “Change Mechanism and Trend Prediction of Water and Sediment in the Yellow River Basin”[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(5):e2.

[4] DI D Y, WU Z N, WANG H L, et al. Optimal water distribution system based on water rights transaction with administrative management, marketization, and quantification of sediment transport value: A case study of the Yellow River Basin, China[J].Science of the Total Environment,2020,722:e137801.

[5] 戴红梅,孙维红.气候变化与人类活动双重驱动下小河流域水沙变化特征研究[J].水利水电快报,2023,44(9):20-28.

DAI H M, SUN W H. Runoff and sediment evolution characteristics driven by climate change and human activities in Xiaohu Basin[J].Express Water Resources and Hydropower Information,2023,44(9):20-28.

[6] 景昭伟,何洪鸣,SOKSAMNANG K,等.全球河流输沙量分布格局及其影响因素[J].水土保持学报,2017,31(3):1-9.

JING Z W, HE H M, SOKSAMNANG K, et al. The distributional patterns of sediment loads of global rivers and influencing factors[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(3):1-9.

[7] 赵利祥,郭忠录,聂小飞,等.极端降雨事件对南方红壤区径流和输沙的影响:基于赣江支流濂江上游流域的长序列分析(1984—2020 年)[J].湖泊科学,2023,35(6):2133-2143.

ZHAO L X, GUO Z L, NIE X F, et al. Effects of extreme rainfall events on runoff and sediment in the southern red soil area: A long series analysis based on the Upper Lianjiang River of Ganjiang River (1984—2020)[J]. Journal of Lake Sciences,2023,35(6):2133-2143.

[8] 尚海鑫,胡春宏,夏军强,等.降雨量和水土保持对皇甫川输沙量变化的贡献率分析[J].水土保持学报,2023,37(2):199-207.

SHANG H X, HU C H, XIA J Q, et al. Contributions of rainfall and soil and water conservation to the variation in sediment discharge of the Huangfuchuan river basin[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2):199-207.

[9] 张婷,刘士余,盛菲,等.章水流域输沙变化对水文气象因素的响应[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(4):60-68.

- ZHANG T, LIU S Y, SHENG F, et al. Response of sediment variation to hydrological and meteorological factors in Zhangshui watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(4): 60-68.
- [10] 高海东, 吴翌. 黄河头道拐—潼关区间植被恢复及其对水沙过程影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1206-1217.
- GAO H D, WU Z. Vegetation restoration and its effect on runoff and sediment processes in the Toudaoguai-Tongguan section of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1206-1217.
- [11] 卢哈, 王昱, 李小宁, 等. 黑河流域水沙通量多尺度变化特征及影响因素[J]. *泥沙研究*, 2023, 48(2): 59-66.
- LU H, WANG Y, LI X N, et al. Multi-scale variation characteristics and influence factors of water and sediment fluxes in the Heihe River Watershed[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(2): 59-66.
- [12] 李超, 全栋, 张岩, 等. 黄河(内蒙古段)水沙运动过程特征及演变趋势[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 41-46, 53.
- LI C, QUAN D, ZHANG Y, et al. Runoff and sediment transport process characteristics and evolution trend of the Yellow River Inner Mongolia reach[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 41-46, 53.
- [13] 陈凯, 吴彦昭, 王巧娟. 非一致性条件下输沙对降水与径流的响应变化研究[J]. *水资源开发与管理*, 2022, 8(8): 30-35, 47.
- CHEN K, WU Y Z, WANG Q J. Response of sediment transport to precipitation and runoff under inconsistent conditions[J]. *Water Resources Development and Management*, 2022, 8(8): 30-35, 47.
- [14] 郭彦, 侯素珍, 王平, 等. 基于小波分析的黄河上游水沙多时间尺度特征[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(6): 1047-1054.
- GUO Y, HOU S Z, WANG P, et al. Multi-time scale characteristics of runoff and sediment series based on wavelet analysis in the upper reaches of Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(6): 1047-1054.
- [15] YANG Y, JIA X X, WENDROTH O, et al. Noise-assisted multivariate empirical mode decomposition of saturated hydraulic conductivity along a south-north transect across the Loess Plateau of China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83(2): 311-323.
- [16] YANG Y, WU X T, HE T, et al. Factors controlling saturated hydraulic conductivity along a typical black soil slope[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: e105391.
- [17] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2014, 14: 19-29.
- [18] 王天, 涂新军, 周宗林, 等. 基于 CMIP6 的珠江流域未来干旱时空变化[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 81-90.
- WANG T, TU X J, ZHOU Z L, et al. Spatiotemporal variation of future droughts in the Pearl River Basin using CMIP6[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(11): 81-90.
- [19] 王文川, 杜玉瑾, 和吉, 等. 基于 CEEMDAN-VMD-BP 模型的月径流量预测研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(1): 32-40, 48.
- WANG W C, DU Y J, HE J, et al. Research on monthly runoff prediction based on CEEMDAN-VMD-BP model[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 32-40, 48.
- [20] 刘原华, 杨成, 牛新亮. 一种顾及噪声和天气突变的土壤湿度反演方法[J]. *测绘科学*, 2023, 48(9): 191-201.
- LIU Y H, YANG C, NIU X L. A soil moisture inversion method combining CEEMDAN and Elman neural network[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(9): 191-201.
- [21] 郝佳欣, 张会兰, 王云琦, 等. 涪江流域径流对气候与土地利用的响应[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(1): 15-24.
- HAO J X, ZHANG H L, WANG Y Q, et al. Responses of streamflow to climate and land use changes in Fu River Watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(1): 15-24.
- [22] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水文年鉴: 嘉陵江流域水文资料[Z]. 2013-2018.
- Bureau of Water Resources, Ministry of Water Resources, People's Republic of China. Hydrological yearbook of the People's Republic of China: Hydrological data of the Yangtze river basin[Z]. 2013-2018.
- [23] ZHANG J P, XIAO H L, FANG H Y. Component-based reconstruction prediction of runoff at multi-time scales in the source area of the Yellow River based on the ARMA model[J]. *Water Resources Management*, 2022, 36(1): 433-448.
- [24] LI Z W, XU X L, ZHU J X, et al. Scale-specific controls of sediment yield in Karst watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: e124301.
- [25] 王赫, 朱秀端, 林敬兰, 等. 汀江流域长汀段水沙变化特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 122-129, 137.
- WANG H, ZHU X D, LIN J L, et al. Variation characteristics and impacting factors of runoff and sediment in Changting section of Tingjiang River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 122-129, 137.
- [26] LI Z W, XU X L, WANG K L. Scale-specific variation in daily suspended sediment load in Karst Catchments[J]. *Catena*, 2023, 221: e106745.