

洪水序列变异组分对平陆运河洪水频率分析的影响及其潜在成因机制

雷兴碧^{1,2}, 莫崇勋², 陆彦婕², 黄莹娜¹, 阮俞理³

(1. 北部湾大学钦州市港口航道与近海工程重点实验室, 广西 钦州 535011; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要:为探究洪水序列变异组分对平陆运河洪水频率分析的影响,以平陆运河工程钦江水文控制断面为例,引入经验模态分解模型提取洪水序列变异组分信息,通过序列重构、时频域信息对比等方法评估洪水序列变异组分对洪水频率分析的影响,并进一步通过小波相干分析、物理成因探讨等手段探究其潜在的成因机制。结果表明:钦江年最大 1d 洪水流量呈减小趋势,周期为 3~21 a,周期变异组分与厄尔尼诺现象、拉尼娜现象和太阳黑子活动规律存在相似性,而减小趋势可能是由于变化环境的影响;变异组分使洪水序列均值、峰度和偏度特征发生改变,是设计频率下不同序列洪峰流量估计值产生差异的统计学成因,而厄尔尼诺和拉尼娜现象等潜在影响源本身的特性是造成该差异的潜在物理原因;趋势变异组分对频率分析的影响较其他组分大,0.1‰~50‰设计频率下重构序列的设计洪峰流量较原始序列偏移 0.16%~18.81%,洪水频率分析中应着重关注趋势组分及其变化环境影响源的作用。

关键词:洪水序列;变异组分;经验模态分解;序列重构;频率分析;平陆运河工程

中图分类号:TV122;P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0158-09

Effects of variation components in flood series on flood frequency analysis of the Pinglu Canal and underlying causes//LEI Xingbi^{1,2}, MO Chongxun², LU Yanjie², HUANG Yingna¹, RUAN Yuli³ (1. Key Laboratory of Harbor Channel and Offshore Engineering of Qinzhou City, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: To investigate the effect of variation components in flood series on flood frequency analysis of the Pinglu Canal, taking the hydrological control section of the Qinjiang River of the Pinglu Canal Project as an example, the empirical mode decomposition model was applied to extract variation components from the flood series. The effects of these components on flood frequency analysis were assessed through flood serial reconstruction and time-frequency domain analysis. Wavelet coherence analysis and physical cause exploration were further employed to investigate underlying causes. The results indicate that the annual maximum 1-d flood discharge of the Qinjiang River shows a decreasing trend, with a period of 3 to 21 a. The periodic variation components exhibit similarities with the patterns of El Niño, La Niña, and sunspot activities, while the decreasing trend may be attributed to environmental changes. The variation components alter the mean, kurtosis, and skewness characteristics of the flood series, serving as the statistical cause for differences in flood peak estimates under different design frequencies, and the inherent characteristics of El Niño and La Niña were identified as potential causes. The trend variation component has a greater influence on flood frequency analysis compared to other components, causing deviations of 0.16% to 18.81% in design flood peaks under the design frequency ranging from 0.1‰ to 50‰. Therefore, attention should be placed on the trend variation component and its influencing factor of environmental changes in flood frequency analysis.

Key words: flood series; variation components; empirical mode decomposition; serial reconstruction; frequency analysis; the Pinglu Canal Project

基金项目:广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2025KY0480);国家自然科学基金项目(52269002);广西重点研发计划项目(桂科AB24010047);北部湾大学高层次人才科研启动项目(02050149);广西青年科技人才青托工程项目(GXYESS2025214)

作者简介:雷兴碧(1995—),男,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:leixingbi@bbgu.edu.cn

通信作者:莫崇勋(1974—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:mochongxun@gxu.edu.cn

洪水频率分析是确定涉水工程建设规模及运维策略的重要依据,其核心假设是年最大洪水事件满足一致性与随机性^[1-2]。然而,受大气环流和变化环境等因素的叠加作用,水文事件呈现出周期性与趋势性变异。徐宗学等^[3]发现厄尔尼诺现象使得西南河流源区径流产生年际尺度的丰枯变化;Merz等^[4]则发现亚洲部分区域的极端洪灾显现出增长的态势。这些变异组分的存在为现有频率分析方法的可靠性带来挑战,并对工程防洪安全产生影响。

变异组分提取是揭示这些组分对洪水频率影响规律的关键,常用的水文组分提取方法包括水文模型和信号分解模型两大类。水文模型通常用于洪水事件或者连续径流过程的组分提取。例如,张珂等^[5]利用水文模型分割径流组分,并通过分析这些组分的合理性判断水文模型的适用性。然而,受降水驱动数据及模型结构本身误差的影响,水文模型在过程性事件模拟上性能较好,而在非连续性峰值事件上的适用性往往不佳^[6]。此外,受参数率定过程的影响,水文模型需要抛弃部分观测数据中的低频信息。水文模型通常基于时不变结构与参数,使其难以捕捉变化环境对径流的影响^[7]。这些因素综合导致了水文模型难以应用于年际洪水序列变异组分的提取。信号分解模型则较好地保留了观测序列的原始信息,且对数据的自适应性较好。此类方法通过将水文序列从时域转换到频域,进而分解信息组分以探究水文序列规律。常用的方法包括经验小波分解、经验模态分解和变分模态分解。这些方法由于在信息组分提取上的可靠性,已被广泛应用于水文序列重构和事件预报中^[8-9]。经验模态分解模型不需要对信号进行周期性或平稳性的假设,使其更适用于处理规律复杂的水文时间序列信息^[10]。如谢平等^[11]引入经验模态分解模型提取洪水序列趋势变异组分,并关注了该组分对洪水频率分析的影响。洪水序列包括趋势及周期变异组分,各组分对频率分析的影响仍不明确,这些变异组分的潜在成因及其对频率分析的影响机制有待深入探究。

平陆运河是中华人民共和国成立以来的首个连通江海的运河工程,兼具航运、供水、灌溉、防洪等功能^[12],运河工程主干道基于钦江干流河道,连通钦江和郁江两个独立水系。科学评估钦江洪水频率对于充分挖掘平陆运河工程综合效益具有重要意义。本文以平陆运河工程钦江水文控制断面洪水频率分析为例,采用经验模态分解模型与洪水序列重构相结合的方法定量评估洪水序列不同变异组分对平陆运河洪水频率分析的影响,并通过分析洪水序列与其影响源的关系探究潜在的水文机制及区域防洪风

险管理措施,以期为平陆运河工程运维管理以及区域洪水频率分析研究提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

平陆运河工程位于广西境内,全长约 134 km,静态总投资为 704.4 亿元^[12]。运河工程连通水系见图 1,该运河直接腹地主要为钦州、南宁等 8 地市,间接腹地辐射广西全区以及贵州和云南等省部分地区。区域气候类型主要为亚热带季风气候和热带季风气候,年降水量为 1 200~2 000 mm。作为纳入我国《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》《西部陆海新通道总体规划》的重大工程^[13],平陆运河工程有望为区域经济一体化和可持续发展提供关键支撑。受热带风暴及台风的影响,平陆运河上游郁江区域内暴雨时有发生,且郁江中下游城市集聚效应明显,多次发生洪水。探明区域洪水频率规律可为平陆运河工程建设及运维决策提供重要支撑。

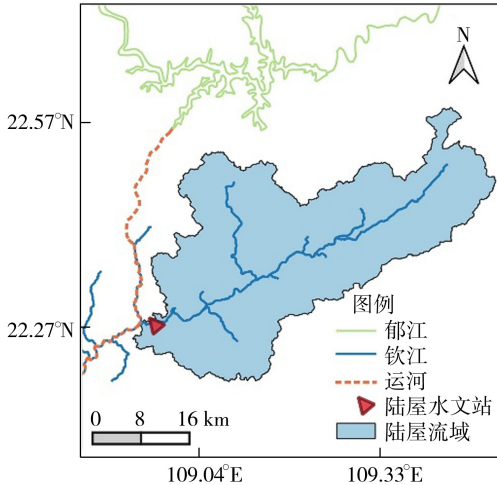


图 1 平陆运河工程连通水系

Fig. 1 Connected river system of the Pinglu Canal Project

1.2 数据来源

选取平陆运河工程陆屋水文站作为代表站点(图 1),该水文站位于钦江中游,控制流域面积为 1 400 km²。陆屋水文站是钦江流域唯一具备长序列实测数据的控制性径流站,控制河长 98.0 km,平均径流深约 1 000 mm。本文基于陆屋水文站 1954—2021 年年最大 1d 洪峰流量数据开展洪水频率分析,该数据是平陆运河工程钦江干流段设计洪水频率分析的基础资料,原始数据精度为 1 m³/s。为探究洪水规律的成因机制,收集了降水、厄尔尼诺现象、拉尼娜现象以及太阳黑子活动数据,厄尔尼诺和拉尼娜现象的强度分别以连续 6 月最大和最小海洋厄尔尼诺指数表征(表示为 ONI_{max} 和 ONI_{min}),数据来源于美国大气海洋局气候预测中心(origin. cpc.

ncep.noaa.gov); 太阳黑子指数来源于比利时皇家天文台(www.sidc.be/SILSO); 降水数据来源于全国基本气象站点钦江站, 数据精度为 1mm, 时间尺度为 1 d。

2 研究方法

2.1 经验模态分解模型

经验模态分解模型^[14]是一种基于时间序列局部特征的信息分解方法, 其吸取了小波变换具有多分辨率的优势, 克服了小波变换中需选取小波基与确定分解尺度的问题, 更适用于水文序列这类非线性非平稳时间信息分析。经验模态分解模型假设时序信息由简单的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)组成, 且每一个 IMF 相互独立。该模型可以将洪水序列中不同尺度信息和趋势分量逐级分解出来, 产生一系列具有相似特征尺度的数据序列, 分解后的序列与原始洪水序列相比具有更强的规律性^[15]。其中, 不同尺度的分量可以更好地展示周期性规律, 而趋势分量可以更好地展示时序信息中的变化趋势。经验模态分解模型用于提取洪水时间序列变异组分的主要步骤^[14]包括:

步骤 1 识别洪水序列 x_t 中所有极大值和极小值点, 分别拟合其包络线 $e_{u,t}$ 和 $e_{l,t}$, 计算上下包络线的平均值 $m_{1,t}$ 。

步骤 2 计算 $c_{1,t} = x_t - m_{1,t}$, 将 $c_{1,t}$ 视为新的序列, 重复步骤 1。经过 k 次筛选, 直到 $c_{1,t}$ 满足 IMF 条件, 则 $c_{1,t}$ 为洪水序列的第 1 个 IMF 分量, 该分量包含原始序列中波长最短的周期变异组分。从原始序列中分离出 IMF 分量 $c_{1,t}$ 后得到剩余分量 $r_{1,t}$ 。

步骤 3 将剩余分量 $r_{1,t}$ 作为新的原始数据, 重复上述步骤可得到其余 IMF 分量和剩余分量 $r_{i,t}$, $r_{i,t} = r_{i-1,t} - c_{i,t}$ ($i = 2, 3, \dots, N$), N 为分解次数。最后一次分解得到的剩余分量 $r_{N,t}$ 需要满足单调规律^[16], 代表了原始数据中的长期趋势或平均值。

原始序列 x_t 可表示为

$$x_t = \sum_{i=1}^N c_{i,t} + r_{N,t} \quad (1)$$

2.2 频率分析方法

综合利用序列重构策略和现行规范指定的 P-Ⅲ型分布函数^[17-18]开展洪水频率分析。洪水序列重构过程中, 针对某一周期变异组分, 重构时对该周期变异组分外的其他组分求和; 而针对趋势变异组分, 由于趋势项起始值和终止值分别代表洪水序列未受到和受到影响的状态值, 重构时分别将起始值和终止值与除该趋势变异组分外的所有组分求和, 分别得到去除趋势序列和趋势还原序列。随后,

采用 SciPy 算法库提供的 P-Ⅲ型分布函数进行洪水序列拟合与统计分析, 该算法库以负对数似然函数最小为目标确定洪水序列的统计分布参数, 因可靠性高已被广泛应用^[19-21]。

3 结果与分析

3.1 洪水序列变异组分特征

采用经验模态分解模型提取洪水序列变异组分, 结果见图 2。由图 2 可知, 研究区洪水年最大值序列包含 3 个周期变异组分(IMF1、IMF2、IMF3)和 1 个趋势变异组分。变异组分 IMF1 波动频率最高, 随后为 IMF2 和 IMF3 组分。整体上看, 变异组分 IMF1 的波动周期约为 3~4 a。IMF1 组分第 1、2 和 3 个峰值分别出现在 1957 年、1961 年和 1964 年, 对应的峰值分别为 76、449、199 m³/s; IMF1 组分第 4、5 和 6 个峰值分别出现在 1967 年、1971 年和 1974 年, 对应的峰值分别为 430、1 477、706 m³/s。变异组分 IMF2 和 IMF3 的波动周期则分别为 5~9 a 和 15~21 a。此外, 从趋势变异组分看, 研究区洪水序列值整体上呈现出减小趋势。

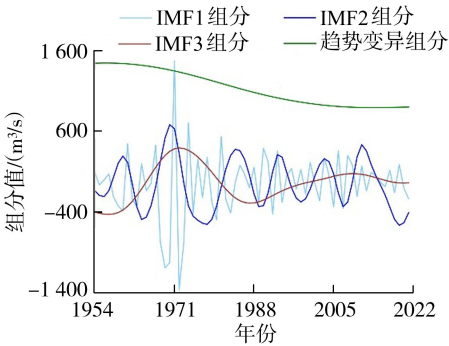


图 2 钦江水文控制断面洪水序列变异组分

Fig. 2 Variation components of flood series at hydrological control section of the Qinjiang River

采用 IMF 周期与能量关系分布特征显著性检验判别周期变异组分的显著性^[22], 结果见图 3, 图中 T 为平均周期; E 为平均标准化能量。由图 3 可知, 所有组分的置信水平为 85% 以上, 其中 IMF2 组分为 95% 以上, 表明这些变异组分都具备一定可信度。考虑到年洪水序列较短, 使得长周期组分的重复覆盖程度低, 进一步采用分段验证方法探究周期的稳定性。将 1954—2021 年划分为 1954—1987 年、1970—2003 年和 1988—2021 年 3 个重叠时段, 每段为 34 a, 至少包含 1.6 个完整周期 ($34/21 \approx 1.6$), 以平衡周期覆盖程度和样本独立性。在此基础上, 再次采用经验模态分解模型提取洪水序列变异组分, 结果见表 1。由表 1 可知, 尽管采用了只有 1 次完整周期覆盖的子序列, 经验模态分解模型得到的

IMF3 组分周期仍主要位于原始序列的周期范围内。因此,原始序列得到的 IMF 周期具备一定的稳定性。需要指出,子序列得到的 IMF 模态混叠现象较原始序列明显。因此,基于完整洪水序列的变异组分综合可靠性更高。

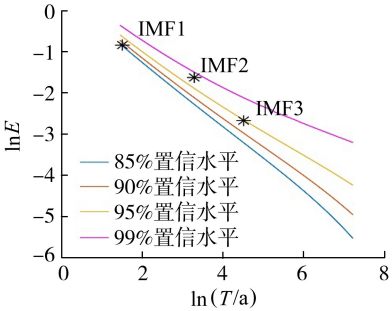


图 3 周期变异组分的显著性检验

Fig. 3 Significance test of periodic variation components

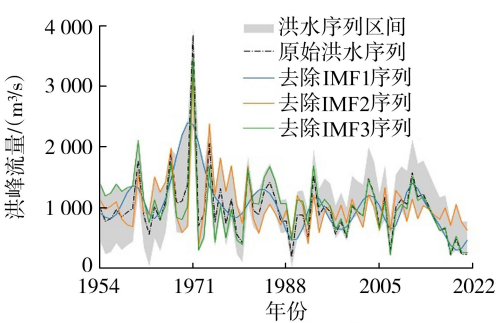
表 1 完整序列与分段序列 IMF 的主要周期规律

时段	周期/a		
	IMF1	IMF2	IMF3
1954—1987 年	2~4	5~7	13
1970—2003 年	2~4	4~8	16
1988—2021 年	2~3	4~8	15
完整序列	3~4	5~9	15~21

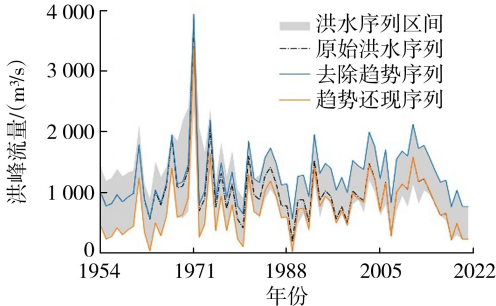
3.2 典型设计情景下洪峰流量对变异组分的响应

通过对洪水序列重构分析不同变异组分对洪水序列演变的影响,结果见图 4。由图 4 可知,变异组分对洪水序列的时域值及演变趋势影响较大,但不同变异组分影响规律不同。IMF1 组分对洪水序列的洪峰流量影响大,将洪峰流量值由 3 850 m³/s 减小至 2 373 m³/s;而 IMF3 组分影响则较小,仅使得洪峰流量值减小至 3 464 m³/s。不同变异组分对洪水序列的影响方式存在差异。以 2012 年不同序列值情况为例,去除 IMF1 和去除 IMF2 组分的序列值分别为 1 317 m³/s 和 820 m³/s,较原始序列值(1 180 m³/s)分别增大 137 m³/s 和减小 360 m³/s。从洪水序列区间来看,变异组分在不同时期对洪水流量的影响也存在差异。去除趋势序列和趋势还原序列在较长时间范围内分别位于洪水序列区间的上边界和下边界,表明趋势变异组分对洪水序列的影响较其他组分更大。

洪水频率分析的一大工程意义在于量化洪水事件的风险,并为工程设计和区域防洪规划提供参考。采用 P-Ⅲ型分布函数进一步对典型设计频率下不同序列洪峰流量进行对比,结果见表 2。由表 2 可知,不同变异组分对量化洪峰流量的影响程度不同。在 0.1%洪水设计频率下,去除 IMF1 序列的设计洪



(a) 考虑周期变异组分影响



(b) 考虑趋势变异组分影响

图 4 原始与重构洪水序列演变情况

Fig. 4 Evolution of original and reconstructed flood series

表 2 典型设计频率下不同序列洪峰流量

设计频率/%	洪峰流量/(m ³ /s)					
	原始序列	去除 IMF1 序列	去除 IMF2 序列	去除 IMF3 序列	去除趋势序列	趋势还原序列
0.1	3 697	3 392	3 529	3 767	4 376	3 833
1	3 065	2 852	2 924	3 136	3 613	3 070
2	2 867	2 683	2 736	2 938	3 378	2 834
5	2 599	2 452	2 483	2 669	3 061	2 518
10	2 389	2 272	2 286	2 458	2 816	2 273
20	2 172	2 085	2 085	2 239	2 565	2 022
50	1 870	1 823	1 807	1 934	2 222	1 679

峰流量为 3 392 m³/s,较原始序列低 305 m³/s;同样设计频率下去除 IMF2 和去除 IMF3 序列的设计洪峰流量较原始序列分别降低 168 m³/s 和增加 70 m³/s。类似的规律在其他设计频率情景下也存在,但同一变异组分对不同设计频率下的洪峰流量影响规律是一致的,如去除 IMF1 和去除 IMF2 序列在所有典型设计频率下的洪峰流量均比原始序列低,而去除 IMF3 序列的设计洪峰流量增大。这种现象表明不同变异组分对设计洪峰流量计算结果的影响不同。整体上看,去除 IMF1、去除 IMF2 和去除 IMF3 序列的设计洪峰流量与原始序列的差异幅度分别为 2.51%~8.26%、3.39%~4.61%和 1.89%~3.42%,而去除趋势和趋势还原序列的设计洪峰流量与原始序列的差异幅度分别为 17.78%~18.81%和 0.16%~10.23%。本文根据规范指定的 P-Ⅲ型分布函数开展频率分析,受该函数适用性的局限,计算

结果仍具有一定的不确定性。整体上看,所有序列中去除趋势序列得到的设计洪峰流量较原始序列偏移量最大,因此趋势变异组分对洪水频率分析的影响程度更大,且去除趋势和趋势还现序列的设计洪峰流量也存在明显差异。而不同变异组分对设计洪峰流量的影响规律仍不清晰,需要进一步探究变异组分对频率分析的影响机制。

3.3 变异组分对频率分析的影响机制

为了进一步识别变异组分对频率分析的影响机制,对不同序列的时域值、累积概率分布和概率密度分布进行分析。不同变异组分重构序列与原始序列的时域值对比结果见图 5,图中与拟合线同一颜色的散点代表相应序列的序列值。由图 5 可知,重构后的洪水序列倾向于低估高量级洪峰并高估低量级洪峰事件。这一规律与图 4 中重构洪水序列的演变规律一致。然而,根据表 2,0.1%设计频率下,仅去除 IMF1 和 IMF2 序列比原始序列的洪峰流量小,这与图 4 中的规律相悖。造成这一现象的原因可能是,洪水序列频率分析需要进行分布曲线拟合,使得低频率事件信息丢失。因此,需要进一步结合累积概率分布和概率密度分布信息分析变异组分对频率分析的影响机制。

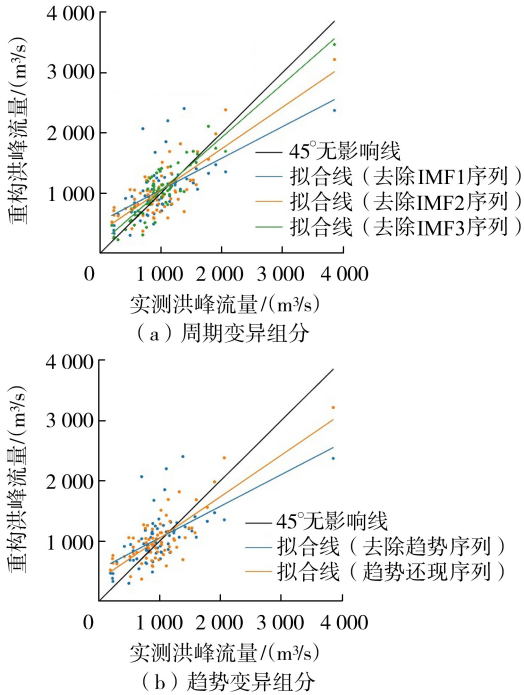


图 5 不同变异组分对洪水序列时域值的影响
Fig. 5 Effect of different variation components on time domain values of flood series

绘制不同洪水序列的概率密度分布和累积概率分布以展示高维信息,结果见图 6。由图 6(a)可知,除趋势还现序列外的其他序列洪峰流量均值皆比原始序列均值大,表明这些变异组分整体上会导

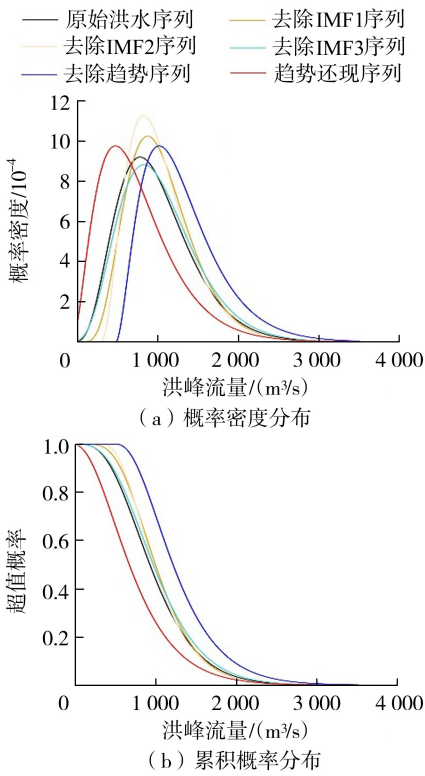


图 6 不同变异组分对洪水序列统计概率分布特征的影响
Fig. 6 Effect of different variation components on statistical probability distribution characteristics of flood series

致统计分布曲线产生右移,进而对洪水频率分析产生影响。去除 IMF1 和 IMF2 序列的分布曲线峰度较原始序列大,进而对高频事件的频率分析产生影响。周期变异组分 IMF3 对洪水序列的峰度影响较小,这主要与 IMF3 组分的长波低频特征有关。去除周期变异组分序列由于对洪峰流量均值影响小,概率密度分布线型与原始序列差异也较小。因此,周期变异组分只能对设计洪峰流量产生较小的影响,这与典型情景下的频率分析结果类似。而趋势变异组分对洪峰流量均值影响大,并在一定程度上对统计分布的峰度和偏度特征产生影响,去除趋势和趋势还现序列通过对统计分布形状产生较大影响,进而使得洪水频率分析结果与原始序列产生明显差异。综上,变异组分通过对洪水序列洪峰流量统计均值、峰度和偏度特征产生影响,进而对频率分析产生影响。

4 讨论

4.1 洪水序列变异组分的潜在成因机制

从物理成因上探讨,洪水主要受极端暴雨事件驱动^[23],而极端暴雨又与大气环流相关。因此,洪水与大气环流现象间存在遥相关性。已有资料显示,厄尔尼诺现象最明显的回归周期为 4 a,这与

IMF1 组分的周期规律较为一致;拉尼娜现象的频次低于厄尔尼诺现象,与 IMF2 组分的周期规律存在相似性;变异组分 IMF3 的振幅最小,频率低、波长长,该变异组分的周期规律与太阳黑子活动周期^[24]较为一致。因此,厄尔尼诺现象、拉尼娜现象和太阳黑子活动是洪水变异组分的潜在影响源。基于此,进一步引入小波分析方法分析洪水序列与这 3 个潜在影响源之间的相关性。洪水序列与潜在影响源的交叉小波变化和小波相关关系分别见图 7 和图 8。图中“V”形黑色线以上(内)的区域表示有效波谱值;粗黑色线包围的区域表示振荡时间尺度通过 0.05 显著性检验;箭头表示 2 个时间序列的位相关系^[25]。

由图 7 可知,洪水序列与厄尔尼诺现象存在 3 个共振周期,而与拉尼娜现象和太阳黑子活动则分别存在 2 个和 1 个周期。洪水序列与潜在影响源普遍存在相位差,这可能与洪水事件滞后效应有关。综合图 7 和图 8 可知,洪水序列与潜在影响源之间的高能功率谱规律更为明显,而在低能功率谱中共振周期成分复杂。洪水序列与拉尼娜现象的共振周期相比其与厄尔尼诺现象的共振周期更长,这与拉尼娜现象发生频率低于厄尔尼诺现象的情况^[26]一致;洪水序列与太阳黑子活动之间的共振周期最长,亦与太阳黑子活动频率低的现象^[27]一致。此外,厄尔尼诺现象频率高且年际间强度差异大^[26],这与 IMF1 组分高能、高频的特征契合,进一步表明厄尔

尼诺现象是 IMF1 组分形成的潜在原因。需要指出,厄尔尼诺现象、拉尼娜现象和太阳黑子活动并不一定导致超标洪水事件,但这些事件能够改变大气环流中的能量梯度与大气环流模式。这种作用机制可能会改变降雨的形成和分布,进而向洪水序列中嵌入年际变异信息。

进一步结合区域水文气象特征探究共振周期的合理性。物理上,洪水事件对其潜在影响源的滞后关系可以分为:①洪水事件对降雨事件的滞后;②降雨事件对潜在影响源的滞后。陆屋水文站控制流域面积仅为 1 400 km²,根据《广西暴雨径流查算图表》,研究区属于第 7 雨型,洪水事件中洪峰对暴雨事件的滞后时间为 20 h。钦江流域干、支流均为低山丘陵地区,洪水暴涨暴落,一场洪水一般持续 1~3 d。因此,洪水事件对降雨事件的滞后时间在年际洪水序列分析中可以忽略。研究区属于低纬度地区,靠近太平洋南海海域,厄尔尼诺现象持续时间通常为 1~2 a^[26],而暴雨事件对厄尔尼诺现象的滞后时间通常为数月至 2 a^[28]。因此,洪水事件对厄尔尼诺现象的滞后时间可能为 1~4 a,对应相位为 $\pi/4\sim\pi$,这与图 7(a)和图 9(a)中的结果存在相似性。拉尼娜现象容易造成干旱事件,而干旱事件并不一定导致年际洪水序列值发生波动。因此,拉尼娜现象对年降水量序列和年际洪水序列的影响模式相似度低。此外,洪水序列和降水量序列与潜在影响源厄尔尼诺现象(图 7(a)和图 9(a))以及太阳黑

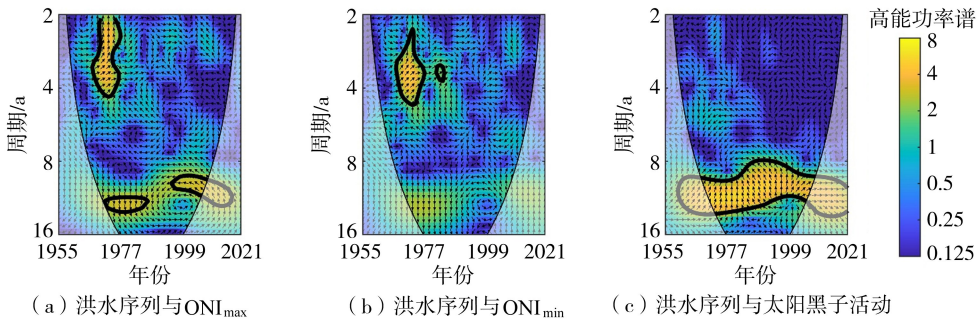


图 7 洪水序列与潜在影响源的交叉小波变化

Fig. 7 Cross-wavelet variation of flood series with potential influence sources

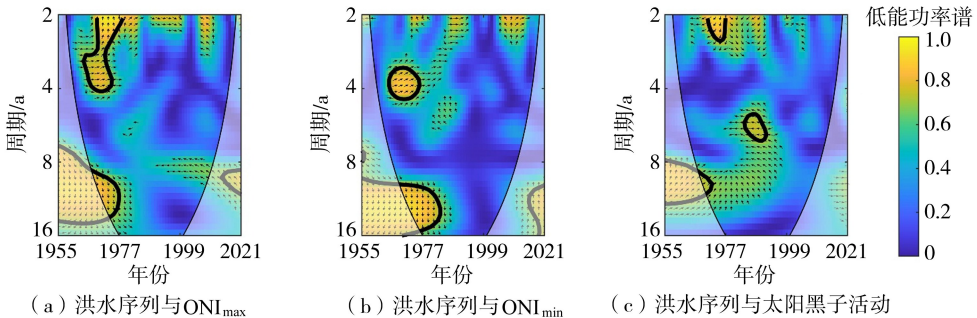


图 8 洪水序列与潜在影响源的小波相关关系

Fig. 8 Wavelet coherence of flood series with potential influence sources

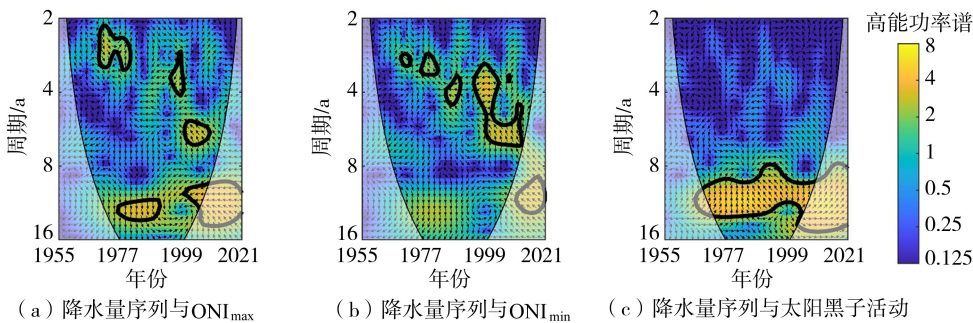


图9 降水量序列与潜在影响源的交叉小波变化

Fig. 9 Cross-wavelet variation of rainfall series with potential influence sources

子活动(图7(c)和图9(c))的交叉小波规律高度类似。该现象可以进一步验证洪水事件对降雨事件的滞后时间在年际洪水序列分析中可以忽略,同时可以侧面佐证共振周期的物理可靠性。因此,基于交叉小波分析的共振周期结果具备物理合理性。

通常认为洪水事件的长期趋势是变化环境因素(即气候变化和人类活动)叠加作用造成的^[4],气候变化通过改变大气水汽含量及后续降水模式等对洪水事件产生影响,而人类活动则通过水资源开发与管理措施对洪水事件产生影响。现有归因分析方法中,由于水文模型在峰值模拟上的局限性^[6],基于控制变量的情景模拟方法难以应用于年洪水序列归因分析中;而基于水量平衡和能量平衡的气候弹性系数、Budyko 框架等方法,由于水文现象的时间尺度问题^[29],也难以拓展至年洪水序列归因研究中。因此,目前无法对年洪水序列的影响因子完全认知,只能视其为不确定性现象^[30]。本文在此背景下探究洪水序列变异组分的成因机制,未来仍需进一步探究气候变化和人类活动对年洪水序列演变趋势的贡献。综上,周期变异组分可能与厄尔尼诺现象、拉尼娜现象和太阳黑子活动规律相关,而趋势变异组分则可能是受变化环境的影响。

4.2 潜在影响源对频率分析的影响程度

潜在影响源对不同设计频率下洪峰流量估计的影响见图10,图中条带宽度表示不同潜在影响源对洪峰流量的影响,条带越宽表示影响程度越大。由图10(a)可知,潜在影响源对低频率事件洪峰流量影响大,而对高频率事件影响小;不同潜在影响源对典型设计频率下洪峰流量的影响差异明显,变化环境对所有频段洪峰流量的影响均为最大。采用方差分析法进一步量化不同影响源的贡献,由图10(b)可知,变化环境对结果不确定性的贡献率最大,最小值在78%以上,而其他影响源对频率分析的影响则相对较小,厄尔尼诺现象、拉尼娜现象和太阳黑子活动的最大贡献率分别约为16%、5%和3%。这一结果再次表明频率分析中应着重关注变化环境的影响。

响。方差分析法基于离差平方和^[31-32]进行计算,使其对影响程度大的因子更为敏感。该方法仅适用于对主要影响源的识别,其结果不宜作为特定防洪标准下影响源对设计洪水的定量影响。整体上看,低频率洪峰流量估计中应同时关注厄尔尼诺现象和变化环境影响源的作用;在全频段洪峰流量估计中,变化环境影响源的影响程度显著大于其他潜在影响源,应优先引起重视。

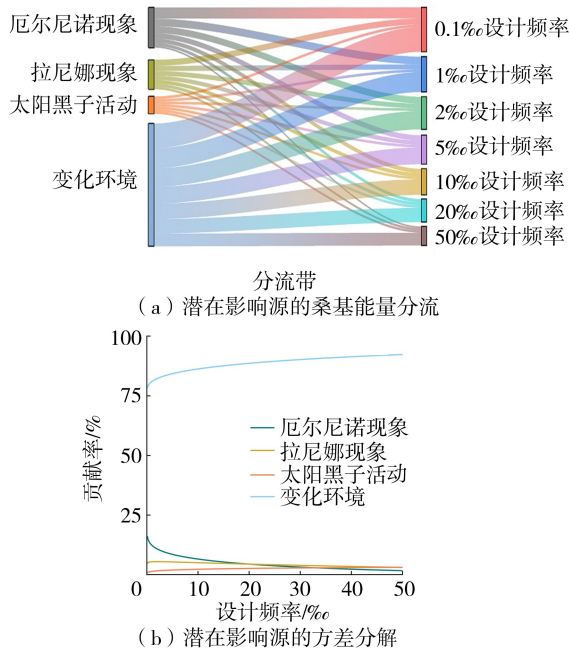


图10 潜在影响源对不同设计频率下洪峰流量估计的影响
Fig. 10 Effect of potential influence sources on flood peak estimation at different design frequencies

5 结 论

a. 研究区洪水年最大值序列包含1个趋势变异组分和3个周期变异组分,周期变异组分与厄尔尼诺现象、拉尼娜现象、太阳黑子活动规律存在相似性,而趋势变异组分与变化环境有关。变异组分的存在使得洪水序列均值、峰度和偏度特征发生变化,是设计洪峰流量产生差异的统计学成因,而潜在影响源本身的特性是造成该差异的潜在物理原因。

b. 趋势变异组分对频率分析的影响较其他组分大,0.1%~50%设计频率下重构序列的设计洪峰流量较原始序列偏移 0.16%~18.81%,频率分析中应着重关注趋势变异组分及变化环境影响源的作用。

参考文献:

[1] 莫崇勋,刘方贵. 水库土坝漫坝风险度评价方法及应用研究 [J]. 水利学报, 2010, 41 (3): 319-324. (MO Chongxun, LIU Fanggui. Study on evaluation method for overtopping risk degree of reservoir earth dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (3): 319-324. (in Chinese))

[2] 江聪,熊立华,黄俊哲,等. 融合降雨随机变量的洪水频率分布估计方法研究 [J]. 水利学报, 2023, 54 (1): 45-53. (JIANG Cong, XIONG Lihua, HUANG Junzhe, et al. A derivation method of flood frequency distribution incorporating rainfall stochastic variable [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (1): 45-53. (in Chinese))

[3] 徐宗学,周祖昊,姜瑶,等. 西南河流源区径流量变化规律及其未来演变趋势 [J]. 水科学进展, 2022, 33 (3): 360-374. (XU Zongxue, ZHOU Zuhao, JIANG Yao, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of southwestern rivers [J]. Advances in Water Science, 2022, 33 (3): 360-374. (in Chinese))

[4] MERZ B, BLÖSCHL G, VOROGUSHYN S, et al. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2 (9): 592-609.

[5] 张珂,周佳奇,张企诺,等. 栅格岩溶分布式水文模型 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 43-51. (ZHANG Ke, ZHOU Jiaqi, ZHANG Qinnuo, et al. Grid-based karst distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 43-51. (in Chinese))

[6] BÁRDOSSY A, ANWAR F. Why do our rainfall-runoff models keep underestimating the peak flows? [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27 (10): 1987-2000.

[7] DUETHMANN D, BLÖSCHL G, PARAJKA J. Why does a conceptual hydrological model fail to correctly predict discharge changes in response to climate change? [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (7): 3493-3511.

[8] 王秀杰,乔鸿飞,曾勇红,等. 基于 TVF-EMD、GRA 和 LightGBM 的日径流预测组合模型 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 135-142. (WANG Xiujie, QIAO Hongfei, ZENG Yonghong, et al. TVF-EMD, GRA, and LightGBM combined daily runoff prediction model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 135-142. (in Chinese))

[9] ZUO Ganggang, LUO Jungang, WANG Ni, et al. Two-stage variational mode decomposition and support vector regression for streamflow forecasting [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (11): 5491-5518.

[10] WU Junhao, WANG Zhaocai, DONG Jinghan, et al. Robust runoff prediction with explainable artificial intelligence and meteorological variables from deep learning ensemble model [J]. Water Resources Research, 2023, 59 (9): e2023WR035676.

[11] 谢平,李析男,许斌,等. 基于希尔伯特-黄变换的非一致性洪水频率计算方法:以西江大湟江口站为例 [J]. 自然灾害学报, 2013, 22 (1): 85-93. (XIE Ping, LI Xinan, XU Bin, et al. Hydrological frequency calculation method of inconsistent flood series based on Hilbert-Huang: a case study of Dahuangjiangkou station of Xijiang River [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22 (1): 85-93. (in Chinese))

[12] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考 [J]. 水运工程, 2024 (6): 1-11. (LIU Ning. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project [J]. Port & Waterway Engineering, 2024 (6): 1-11. (in Chinese))

[13] 刘宁. 以平陆运河为牵引的西部陆海新通道水运体系和联运模式研究 [J]. 水利水运工程学报, 2025 (1): 1-15. (LIU Ning. Research on the waterway system and intermodal transport model of the New Western Land-Sea Corridor driven by the Pinglu Canal [J]. Hydro-Science and Engineering, 2025 (1): 1-15. (in Chinese))

[14] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear 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.

[15] 李福兴,陈伏龙,蔡文静,等. 基于 EMD 组合模型的径流多尺度预测 [J]. 地学前缘, 2021, 28 (1): 428-437. (LI Fuxing, CHEN Fulong, CAI Wenjing, et al. Multiscale runoff prediction based on the EMD combined model [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28 (1): 428-437. (in Chinese))

[16] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比 [J]. 水利学报, 2020, 51 (7): 845-857. (JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (7): 845-857. (in Chinese))

[17] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (2): 157-163. (ZHAO Lingling, ZHANG Xinhui, LIU Changming, et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood

- in a small and medium-sized basin of South China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 157-163. (in Chinese)
- [18] 胡义明,杨晨曦,梁忠民,等. 非平稳性条件下设计洪水地区组成分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (3): 19-24. (HU Yiming, YANG Chenxi, LIANG Zhongmin, et al. Analysis of regional composition of design flood under non-stationary conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (3): 19-24. (in Chinese))
- [19] HU Yiming, LIANG Zhongmin, HUANG Yixin, et al. Assessment of first-order-moment-based sample reconstruction method for design flood estimation in changing environment [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16 (3): 226-233.
- [20] 邓超,孙培源,尹鑫,等. 基于概念性水文模型与长短时记忆模型耦合的汉江上游流域径流模拟[J]. 湖泊科学, 2025, 37 (1): 279-292. (DENG Chao, SUN Peiyuan, YIN Xin, et al. Runoff simulation in the upper Han River Basin using physics-informed machine learning model[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37 (1): 279-292. (in Chinese))
- [21] 杨永民,顾涛,吴迪,等. 基于光学和雷达遥感信息的灌溉信号分析及灌溉面积提取方法研究:以华北平原灵寿县磁右灌区为例[J]. 水利学报, 2022, 53 (9): 1039-1048. (YANG Yongmin, GU Tao, WU Di, et al. Irrigation signal analysis and irrigated area extraction based on optical and radar remote sensing: a case study of Ciyou irrigation area, Lingshou County, North China Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (9): 1039-1048. (in Chinese))
- [22] MA Wen, DING Jianli, JIN Xiaoye. Spatial heterogeneity and driving factors of aerosol in Western China: analysis on multiangle implementation of atmospheric correction-aerosol optical depth in Xinjiang over 2001-2019 [J]. International Journal of Climatology, 2023, 43 (4): 1993-2011.
- [23] 吴娟,林荷娟,姜桂花,等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (2): 164-170. (WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 164-170. (in Chinese))
- [24] 赵新华,冯学尚. 太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性[J]. 科学通报, 2014, 59 (14): 1284-1292. (ZHAO Xinhua, FENG Xueshang. Periodicities of solar activity and the surface temperature variation of the earth and their correlations [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (14): 1284-1292. (in Chinese))
- [25] 周宁,王芳,李铮,等. 1957—2017 年中国不同流域土石坝溃坝事件时空演化规律[J]. 水科学进展, 2024, 35 (5): 689-699. (ZHOU Ning, WANG Fang, LI Zheng, et al. Temporal and spatial evolution of earth-rock dam failure events in different basins of China from 1957 to 2017 [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (5): 689-699. (in Chinese))
- [26] 张晓琳,马永星. 厄尔尼诺-南方涛动研究进展[J]. 科学通报, 2024, 69 (8): 1047-1057. (ZHANG Xiaolin, MA Yongxing. Progresses of El Niño and southern oscillation research [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69 (8): 1047-1057. (in Chinese))
- [27] 李文龙,李鸿雁,郭希海,等. 太阳黑子活动周期规律分析及趋势预测[J]. 水利水电技术, 2019, 50 (5): 53-62. (LI Wenlong, LI Hongyan, GUO Xihai, et al. Analysis and trend prediction of sunspot activity cycle [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (5): 53-62. (in Chinese))
- [28] LYU A, JIA S, ZHU W, et al. El Niño-southern oscillation and water resources in the headwaters region of the Yellow River: links and potential for forecasting [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15 (4): 1273-1281.
- [29] MO Chongxun, HUANG Keke, RUAN Yuli, et al. Quantifying uncertainty sources in runoff change attribution based on the Budyko framework [J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: 130790.
- [30] 芮孝芳,张超. 论设计洪水计算[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (1): 20-26. (RUI Xiaofang, ZHANG Chao. Research on design flood calculation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (1): 20-26. (in Chinese))
- [31] 隆院男,黄春福,莫军成,等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 14-22. (LONG Yuannan, HUANG Chunfu, MO Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4): 14-22. (in Chinese))
- [32] 阮俞理,张建云,王乐扬,等. 长江和黄河流域降水丰枯遭遇及不确定性分析[J]. 水科学进展, 2024, 35 (6): 865-876. (RUAN Yuli, ZHANG Jianyun, WANG Yueyang, et al. Analysis of precipitation wetness-dryness encountering and its uncertainty in the Yangtze River and Yellow River basins [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (6): 865-876. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 02 - 04 编辑: 施业)