

湘江流域干流水沙变化特征分析

冯畅, 曾佳圆, 杨柳, 周薇, 刘子怡

(衡阳师范学院地理与旅游学院, 湖南 衡阳 421002)

摘要:运用 Mann-Kendall 趋势与突变检验、Sen 斜率估计和 Morlet 小波分析等方法, 基于湘江湘潭站 1960–2015 年的水沙实测数据, 分析湘江干流年径流量、水位和输沙量变化的趋势性和周期性规律以及突变特征, 为湘江泥沙治理、防汛抗旱以及水资源开发与利用提供科学参考。结果表明: (1) 湘江干流年径流量和水位平均每 10 a 增加 1.54%、0.04%, 增长趋势不显著; 年输沙量平均每 10 a 减少 16.49%, 呈现出显著的下降趋势。湘江中上游长期水土保持工程以及河道采砂活动是输沙量减少的主要原因。(2) 在研究期内, 湘江干流年径流量和水位没有十分显著的突变点, 年输沙量在 1998 年存在一个显著的突变点。对比 1998 年前后, 水位与径流量、水位与输沙量的决定系数 R^2 分别由 0.66、0.31 骤减至小于 0.01, 解释关系变为极差; 径流量与输沙量的解释关系反而增强, 决定系数从 0.53 增加至 0.69。这些变化或与 1998 年湘江中下游特大洪水灾害事件及其后续高标准修筑防洪堤坝, 加速推进水库闸坝和蓄滞洪区等水利工程建设相关。(3) 湘江流域年径流量、水位和输沙量在长时间尺度上存在相似且稳定的 27~28 a 主周期, 气候变化及降水周期性是主要影响因素; 而在短时间尺度上, 水沙要素的次周期性不显著且周期规律各异, 流域内逐渐增强的高强度人类活动干扰是主要影响因素。

关键词: 水沙变化; 突变性; 周期性; 湘江流域

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)01-0056-09

河流是区域社会经济发达的“血脉”, 受到自然条件变化和复杂人类活动的影响, 其水文和泥沙特征会发生相应变化, 这些变化往往又反馈影响着人类的生产生活。探明河流的水沙特征, 从更深层次揭示河流的水沙变化规律对于江河开发治理和区域社会发展具有重要意义。河流的水沙变化特征是流域水文水循环和河流水文研究的重要内容之一, 对此, 国内外学者开展了许多相关研究。20 世纪 70、80 年代, 国际水文学界(如国际水文科学协会等)便已着手研究河流的水沙特征, 以及气候变化和人类活动与河流水沙之间的关系。进入 21 世纪, 国内外相关研究逐渐从定性转向定量化。在定量研究初期, 主要采用传统的数理统计分析方法(彭涛等, 2018), 随着科技的发展, 越来越多的技术方法被应

用于河流水沙变化研究。例如在国外, 学者们运用 GIS 空间分析技术、Mann-Kendall 检验、水文模型模拟等研究方法, 分析了全球尺度(Gudmundsson et al, 2021)、区域尺度(如马来西亚 Langat 流域、喜马拉雅 Kaneri 流域)(Juahir et al, 2010; Swami et al, 2016)径流量或输沙量的变化特征与趋势, 并揭示了气候变化、土地利用及水土管理效应对水沙变量的影响。国内多以黄河、长江及其支流为研究对象。我国学者利用 Mann-Kendall 检验、Pettitt 变点检测方法、小波分析法、距平累积法、均值差异 T 检验等方法, 以长江干流(彭涛等, 2018)、黄河下游(Zhao et al, 2019)、湘江流域(胡光伟等, 2014; 隆院男等, 2018; 张晓艳和刘梅先, 2018)、丹江流域(徐金鑫等, 2019)为研究对象, 分析了近几十年河流的水沙变化特征。其中, 针对湘江流域, 主要探讨分析了径流量和输沙量的变化趋势和突变特征, 定量区分了气候变化和人类活动对湘江水沙变化的影响贡献率(胡光伟等, 2014; 隆院男等, 2018; 张晓艳和刘梅先, 2018)。

但是以往湘江流域的水沙研究主要针对径流量和输沙量进行分析, 缺乏对于水位-径流量、水位-输沙量之间关系的深入探讨; 且主要从单一时间尺度进行分析, 缺乏对于长时间尺度(如大于 25 a)和短时间尺度(如小于 15 a)的区分研究。不同时间尺度的区分研究很有必要, 因为在不同时段上河流水沙的

收稿日期: 2021-06-27 修回日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(42001024, 41901026); 湖南省自然科学基金(2021JJ40011, 2022JJ40015); 湖南省教育厅科学研究项目(21B0625, 21B0646); 教育部大学生创新创业训练计划项目(S202010546025)。

作者简介: 冯畅, 1988 年生, 男, 博士, 副教授, 研究方向为水文水资源。E-mail: fengchang126@qq.com

通信作者: 杨柳, 1986 年生, 女, 博士, 副教授, 研究方向为水文水资源环境。E-mail: palapalayl2006@126.com

趋势性、突变性和周期性及其影响因素可能不相同。因此,该研究运用 Mann-Kendall 趋势与突变检验、Sen 斜率估计,以及 Morlet 小波分析等方法,以不同时间尺度对年径流量、水位和输沙量进行分析,进而揭示湘江干流 1960–2015 年水沙过程的趋势性、突变性和周期性,以及水沙过程在不同时间尺度上的变化特征。从不同时间尺度、水位-径流-输沙、趋势性-突变性-周期性的复合视角,可以更加全面地分析湘江干流的水沙变化规律,在此基础上,进一步深入探讨水沙发生变化的特征及原因,以期为湘江干流的泥沙治理、防汛抗旱、水资源开发利用和水生态环境管理提供科学参考依据。

1 区域概况

湘江是湖南省最大的河流(全长 856 km,流域面积 94 660 km²),也是长江中游洞庭湖水系的重要组成部分,自南向北流经广西省东北部,湖南省永州市、衡阳市、株洲市、湘潭市、长沙市,至岳阳市汇入洞庭湖(胡光伟等,2014),见图 1。湘江流域三面环山,北面接壤洞庭湖平原,整体地形西南高东北低,起伏较大,地貌以低山丘陵为主,具有丘陵缓坡山溪河流特性;主要地层岩性为灰岩和砂页岩,主要土壤类型为红壤和黄壤,抗蚀能力差,易受降雨、流水侵蚀致使水土流失问题加剧;流域属亚热带季风性湿润气候,雨量充沛,水系发达,多年平均降水量 1 200~1 700 mm,多年平均径流量约 700×10⁸ m³,年际变化较大,年内分配不均,洪枯水位变化较大。湘江流域集中了湖南省大部分人口,经济相对发达,人类活动频繁。湘江不仅是支撑湖南省社会发展的重要河流,同时也对洞庭湖流域的水资源安全及水沙过程有着重要影响。

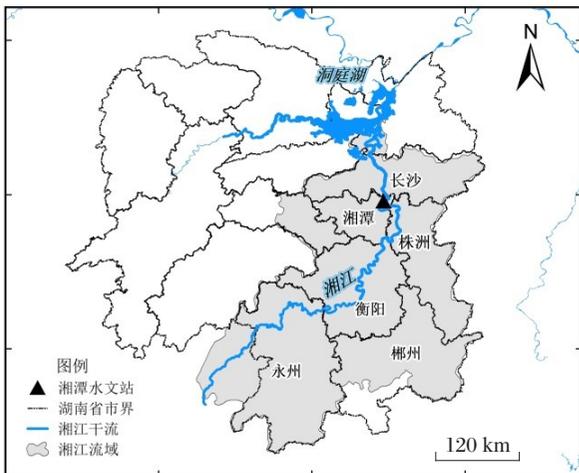


图 1 湘江流域区位

Fig.1 Location of the Xiangjiang River basin

该研究以湘江干流作为研究对象,采用湘江湘潭站的水沙数据资料。湘潭水文站是湘江干流的水文控制站(集水面积 81 638 km²,约占湘江流域总面积的 86.2%),也是国家级重要水文站,其水沙实测数据基本代表了湘江干流总体的水文和泥沙特征,具有典型性和代表性。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

该研究主要采用 Mann-Kendall 检验法、Sen 斜率估计法和 Morlet 小波分析等研究方法(王文圣等,2003;胡光伟等,2014;郭世兴等,2015;阿如早和车敏,2017;隆院男等,2018;张晓艳和刘梅先,2018)。Mann-Kendall 非参数统计检验方法又分为 M-K 趋势检验和 M-K 突变检验,主要用于对长时序数据的趋势性和突变性进行检验分析。其中,M-K 趋势检验通常与用于计算趋势值的 Sen 斜率估计法结合应用。首先计算 Sen 趋势的 β 值,若 β 大于 0 表示时间序列呈现上升趋势,反之时间序列逐渐降低。运用 M-K 方法检验趋势显著性,根据 Z 值查阅标准正态分布表(郭世兴等,2015),得到置信度 α 与 $Z_{\alpha/2}$,如果 $|Z|$ 大于 $|Z_{\alpha/2}|$,那么年径流量、水位和输沙量存在趋势变化,反之则不存在。M-K 突变检验可以判别分析突变的起始点和时间区域(胡光伟等,2014)。假设有一个时间序列 x (如本研究 1960–2015 年),给定显著性水平 α 为 0.05,那么此时临界值 $U_{\alpha=0.05}$ 为 ± 1.96 。通过构造秩序列等运算,将统计量序列 UF_k 及逆序列 UB_k 以及 U_α 绘制成一幅 M-K 突变统计图,如果 UF_k 的值大于零,则表示该序列呈现上升趋势,反之亦反。当 $|UF_k|$ 超出临界值 U_α 时,表示上升或下降的变化趋势非常显著,超过临界值的区域为出现突变的时间范围(阿如早和车敏,2017)。如果 UF_k 、 UB_k 出现交点,且交点在临界值范围以内,那么该交点即突变点。

Morlet 小波分析是指用一簇小波函数系来表示或逼近某一函数或信号,可以同时从时域和频域 2 个维度揭示时间序列的局部特征(王文圣等,2003;桑燕芳等,2013)。其中小波函数表示具有震荡性、能够迅速衰减到 0 的一类函数(李红燕等,2021)。通过小波变换等运算可以得到小波系数,将小波系数的平方值在 b 域上积分就可以得到小波方差(桑燕芳等,2013)。据此,对湘江湘潭站 1960–2015 年年均径流量、水位和输沙率数据进行了以下数据处理:数据格式的转化→边界效应的消除或减小→计

算小波系数→计算复小波系数的实部和方差→基于Surfer14绘制小波系数实部等值线图→绘制小波方差图。

2.2 数据来源

研究所采用的湘江湘潭水文站1960–2015年径流量、水位和输沙量等实测数据资料主要来源于湖南省水文水资源勘测局。其中,年径流量(m^3)和年输沙量(kg)由原始数据流量(m^3/s)和输沙率(kg/s)统一转换而得。因为相对于过程参数流量(m^3/s)和输沙率(kg/s),年径流量(m^3)和年输沙量(kg)更具统计分析意义。

3 结果与分析

3.1 湘江干流水沙特征

通过计算分析湘江湘潭站年径流量、水位和输沙量数据,得到了M-K趋势检验的Z值和Sen斜率估计的 β 值数据,以及水沙序列的变化趋势及其显著性,见表1。1960–2015年湘江湘潭站年径流量、水位和输沙量的Z值分别为0.954、0.466、-4.304。当置信度 α 为0.1,即90%显著性水平时,依据标准正态分布表(候英,2014)可知 $Z_{\alpha/2}$ 的值为1.645,此时年平均径流量和水位的 $|Z|$ 小于 $|Z_{\alpha/2}|$,均未通过90%显著性水平检验,所以径流量和水位序列的增加趋势不显著,可以认为没有明显的趋势性变化。当置信度 α 为0.02,即99%显著性水平时, $Z_{\alpha/2}$ 的值为2.575,这时年输沙量的 $|Z|$ 明显大于 $|Z_{\alpha/2}|$,超过了99%的显著性水平,由此可见输沙量序列的趋势性变化显著,呈现出明显的减少趋势。

表1 湘江湘潭站水沙序列的趋势检验结果

Tab.1 Trend test results of water and sediment data series at Xiangtan station of Xiangjiang River

控制变量	Z	β	趋势	显著性
径流量	0.954	4.656	增加	ns
水位	0.466	0.002	增加	ns
输沙量	-4.304	-4.458	减少	**

注:**表示的显著性水平分别为99%;ns表示变化趋势不显著,未通过90%显著性水平检验。

Note: ** indicates a significance level of 99%; NS indicates that the trend of change is not significant, not passing the 90% significance level test.

结合分析湘江湘潭站年径流量和水位变化过程(图2、图3),1960–2015年,年径流量平均每10 a增加 $10.07 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于平均每10 a仅增加1.54%;水位平均每10 a增加0.013 m,相当于平均每10 a仅增加0.04%。由此可见,年径流量和水位仅微弱增加,

如果考虑测量误差和自然波动等其他影响因素,径流量和水位的微弱增幅在统计学上不具有很好的解释意义。这也证实了在长时间尺度上湘江干流径流量、水位的整体变化趋势并不显著。

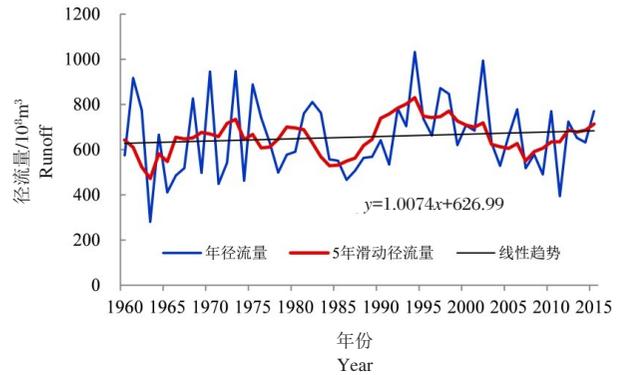


图2 1960–2015年湘江湘潭站年径流量变化过程

Fig.2 Variation of annual runoff at Xiangtan station from 1960 to 2015

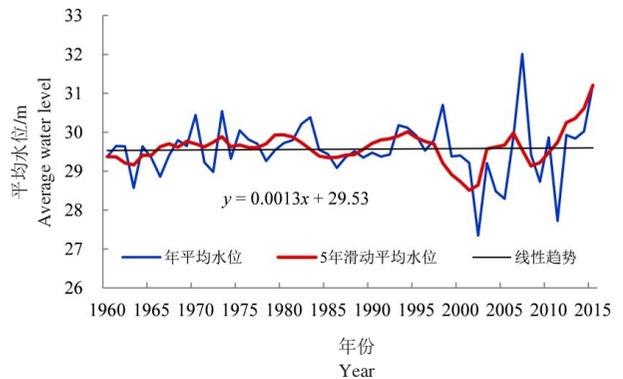


图3 1960–2015年湘江湘潭站年平均水位变化过程

Fig.3 Variation of annual average water level at Xiangtan station from 1960 to 2015

由图4及其趋势线可知,1960–2015年湘江湘潭站的输沙量平均每10 a减少了 $14.12 \times 10^8 \text{ kg}$,相当于平均每10 a减少16.49%,输沙量呈现出显著的下降趋势。依据径流-输沙的相关关系,假设其他水沙影响因素相同,河流水量大则输沙量可能更大,河流水量小则输沙量可能较小,即“大水大沙,小水小沙”。因为当流域降水及河道径流量较大时(如洪水时期),河流能够裹挟更多泥沙,使河流含沙量和输沙量增大,而流域降水及河道径流较小时(如枯水时期),河流裹挟泥沙的能力下降,输沙率和输沙量则会降低。但比较表1、图2和图4可知,在研究期内湘江湘潭站的径流量变化不明显,未通过90%显著性水平检验,而年输沙量变化显著且整体呈现出下降趋势。因此,分析结果表明径流量和输沙量的变化趋势与变化过程并不一致。

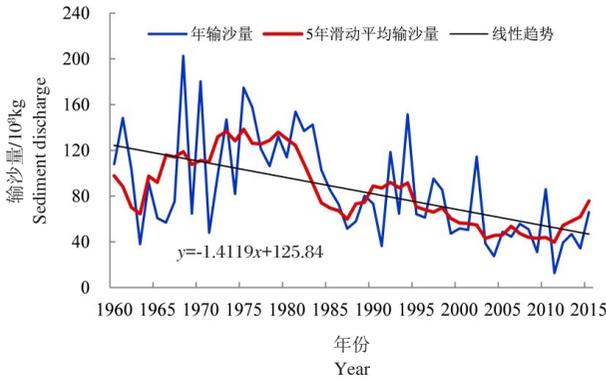


图4 1960—2015年湘江湘潭站年输沙量变化过程
Fig.4 Variation of annual sediment discharge at Xiangtan station from 1960 to 2015

3.2 湘江干流水沙特征的突变

分析M-K统计图5可知,年径流量的 UF_k 曲线在1960—1962年、1973—2015年大于0,说明在这2个时期径流量呈现了上升趋势,但均未超出临界值 ± 1.96 ,没有突破95%的置信水平,指示上升的趋势不显著。另外,年径流量的 UF_k 和 UB_k 曲线在临界值范围内存在多个交点年份,如1970、1974、1977、1979、2011和2014年,这些交点年份实际未发生突变,为波动型交点。因此1970—1979年、2011—2014年属于径流量的波动性振荡。进一步分析可知(图5),交点年份1961、1986年是径流量的可能突变点,但 UF_k 和 UB_k 两条曲线相交后并未超过95%置信水平,这表明在1961、1986年发生的突变现象不具显著性。结合分析相关统计资料,这是因为湘江流域在1959—1961年连续3 a干旱及其滞后效应使得径流量在1961年突然下降,一直到1963年的相对低值。此外,湘江上游的大型水库东江水库(总库容约 91.5亿 m^3)于1986年8月下旬蓄水,蓄水后的东江水库对径流产生了一定影响,例如对汛期洪峰的削减作用在一定程度上改变了下游的洪水特征,这使得湘江干流径流量在1986年前后发生变化但并不显著。

由图6可知,在1960—1962、1968—2003、2014—2015年,年平均水位M-K统计量 UF_k 大于0,但没有突破95%的置信水平,说明在此期间湘江水位的上升趋势并不显著。此外,通过分析水位 UF_k 和 UB_k 曲线在临界值范围内的5个交点,其中1960、1967和2014年属于波动型交点,而1962、1998年则属于可能的突变点但不具显著性,因为 UF_k 和 UB_k 曲线仍未达到0.05的显著性水平。从理论上讲,径流量与水位密切相关,但图5、图6径流量和水位的M-K分析结果表明,湘江径流量与水位的波动比较频繁且不稳定,其变化原因相对复杂,可能与不稳定的气候因素和高强度人类活动相关。综上,在短时间尺度上极端气候事件和

水利工程建设对湘江径流和水位变化产生了一定波动性影响,而在长时间尺度上湘江径流和水位的变化趋势仍不显著。其中,气候变化、水利工程建设与城市不透水面增长(要志鑫等,2020)的正负抵消效应可能起到了一定作用,具体机理还需要进一步揭示。

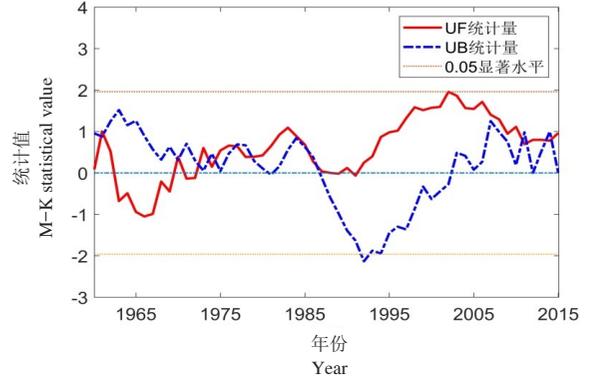


图5 1960—2015年湘江湘潭站年径流量M-K统计
Fig.5 M-K statistical chart of annual runoff at Xiangtan station from 1960 to 2015

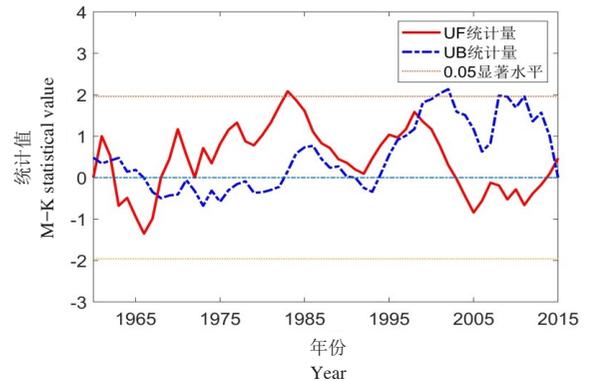


图6 1960—2015年湘江湘潭站年平均水位M-K统计
Fig.6 M-K statistical chart of annual average water level at Xiangtan station from 1960 to 2015

年输沙量M-K统计如图7。1960—1962、1973—1987年 UF_k 大于0,且没有超出临界值,未突破95%的置信水平,说明在此期间湘江输沙量呈现上升趋势但不明显。而后在1988—2015年,输沙量的 UF_k 值小于0,并且在2004年超出 UF_k 临界值 ± 1.96 及95%置信水平区间,指示1988年后输沙量呈现出显著的下降趋势。进一步分析输沙量的突变特征,在整个研究期内的 UF_k 和 UB_k 曲线在临界值 $U_{\alpha=0.05}$ 内只有一个交点相交于1998年,且之后曲线 UF_k 、 UB_k 均超过了95%置信水平,表明1998年是湘江干流输沙量的显著突变点。结合分析突变前后2个时期,由图8—3可知,相同径流量条件下,1960—1998年输沙量的线性趋势斜率明显高于1999—2015年,年平均输沙量由1960—1998年的 $101.21 \times 10^8 \text{ kg}$ 下降至1999—2015年的 $49.80 \times 10^8 \text{ kg}$,降幅达50.8%。

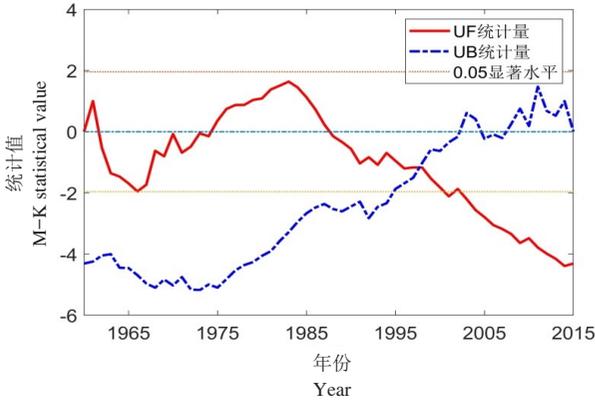


图7 1960-2015年湘江湘潭站年输沙量M-K统计
Fig.7 M-K statistical chart of annual sediment discharge at Xiangtan station from 1960 to 2015

进一步探讨水位-径流量、水位-输沙量、径流量-输沙量之间的相关关系。如果以1998年突变前后为界划分两段时期，结合分析图8-1、8-2的散点分布，1960-1998年水位-径流量、水位-输沙量的决定系数 R^2 分别为0.66、0.31，1999-2015年骤降为0.0005、0.0004。这表明1998年以前水位66%的变化可以由径流量来解释，水位31%的变化可以由输沙量来解释，水位与径流、输沙量具有一定程度的相关性，但1998年之后水位与径流量、输沙量的关系发生了根本转变。另一方面，对比分析1998年突变前后径流量与输沙量的关联性(图8-3)，其决定系数 R^2 从1960-1998年的0.53增加至1999-2015年的0.69，即表示1998年以前53%的输沙量变化可以被径流量解释，而1998年以后这一数值增加至69%，径流量与输沙量的正相关性反而增强。

3.3 湘江干流水沙特征的周期性

运用Morlet小波分析，通过小波系统实部等值线图内正负系数的判别和图像分析，得到了近半个多世纪以来湘江湘潭站年径流量、水位和输沙量的周期性分析结果(图9、图11、图13)。结合分析小波方差(图10、图12、图14)，图像中最大峰值为河流水沙变化的主周期，其余的小波峰可能为水沙变化的次周期。湘江湘潭站1960-2015年径流量在这56年间主要存在25~32 a、15~20 a的周期变化规律(图9)。其中在前者时间尺度上，出现了准3次振荡，表现为“枯-丰交替”变化的特点；在后者时间尺度上出现了4次“枯-丰交替”振荡，并且这2种周期时间尺度覆盖了整个56 a的研究期，具备全域性并呈现出相对稳定的周期变化规律。结合分析小波方差(图10)，湘江年径流量存在6、18和28 a的周期性，其中以6 a和18 a为次周期，28 a为主周期。

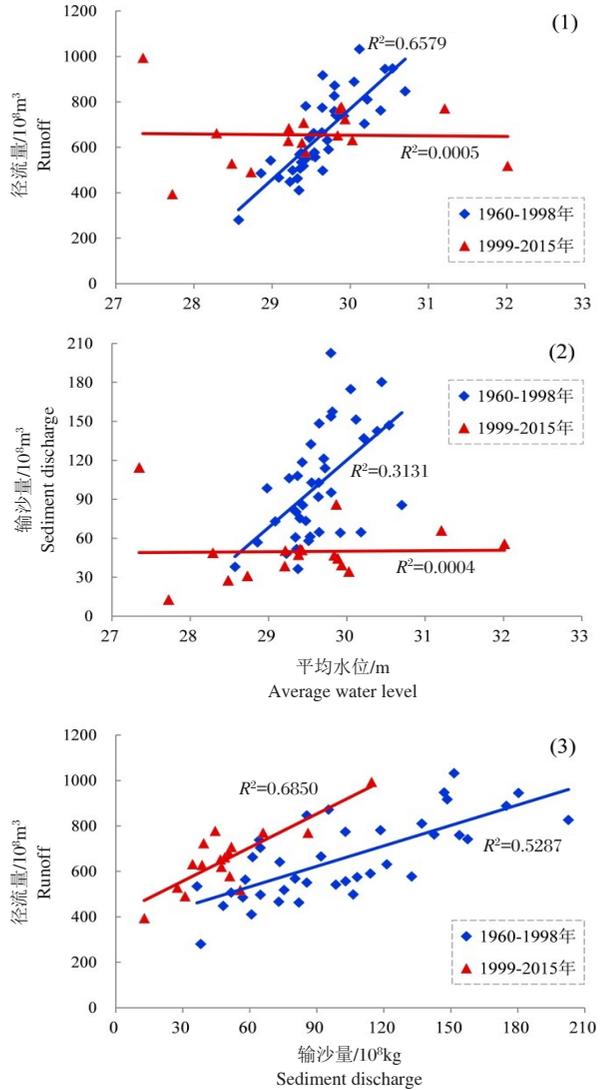


图8 湘江湘潭站1960-2015年(1)水位-径流量、(2)水位-输沙量、(3)径流量-输沙量散点分布

Fig.8 Scatter plots of the water level and runoff, water level and sediment discharge, runoff and sediment discharge at Xiangtan station from 1960 to 2015

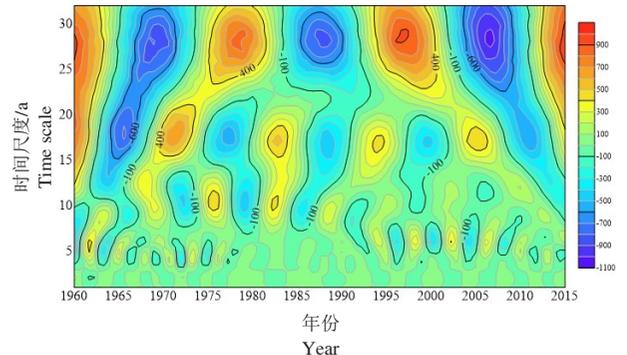


图9 1960-2015年湘江湘潭站年径流量小波等值线图
Fig.9 Wavelet transform contour map of annual runoff at Xiangtan station from 1960 to 2015

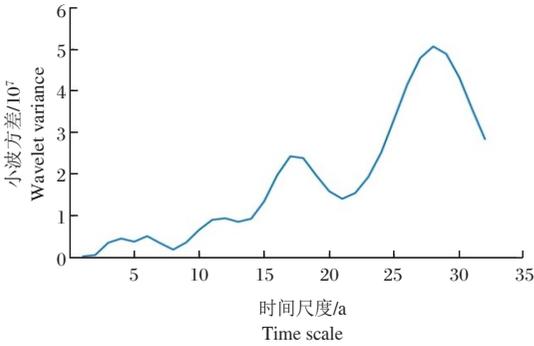


图10 1960—2015年湘江湘潭站年径流量小波方差
Fig.10 Wavelet variance map of annual runoff at Xiangtan station from 1960 to 2015

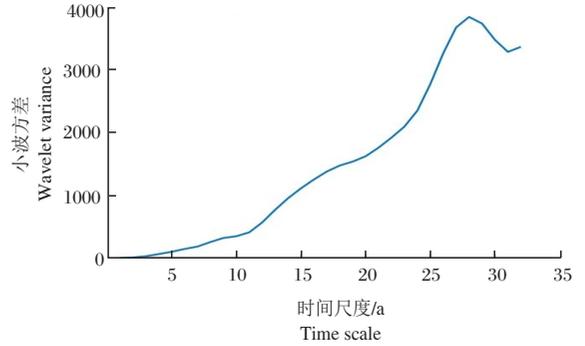


图12 1960—2015年湘江湘潭站年平均水位小波方差
Fig.12 Wavelet variance map of annual average water level at Xiangtan station from 1960 to 2015

由湘江湘潭站年平均水位的周期性分析(图11)可知,在研究期内年平均水位存在25~32 a的周期特征。在该时间尺度上,实测水位出现准3次振荡,表现为“枯-丰交替”变化且交替变化相对稳定。结合实测水位小波方差(图12)可知,湘江年平均水位“低值期-高值期”的周期变化比较单一,仅存在27 a的主周期。因此,在长时间尺度上水位的主周期27 a与径流量的主周期28 a相近,但在短时间尺度上水位的周期性并不明显。这与径流-水位密切相关的常规认知不相符,可能是由于流域水位在短时间尺度上更容易受到高强度复杂人类活动(如修筑防洪堤坝、水利工程建设与运行调度等)的干扰。结合分析相关统计资料(水利部长江水利委员会,2015)可知,至2010年湘江流域共建成各类蓄、引、提水工程39.15万(座)处,其中水库工程6 251座,总库容185.7亿 m^3 ,兴利库容156.6亿 m^3 ;引水工程1.43万处,现状供水能力8.47亿 m^3 ;提水工程1.45万处,现状供水能力9.01亿 m^3 ;塘坝堰35.64万座,总容量24.35亿 m^3 。

研究期内,湘江湘潭站年输沙量主要存在23~32 a的变化规律(图13),且出现了“沙少-沙多”的3次相间振荡,变化周期相对稳定。而在15~21 a、8~13 a、3~5 a这3种时间尺度中,“沙少-沙多”的周期序列并未覆盖整个研究期。其中在后两种短时间周期尺度上,输沙量的周期性波动强烈,特别是在1985年后周期性明显减弱。结合输沙量的小波方差(图14)可知,湘江年输沙量存在4、11、18和28 a的周期性,其中28 a为主周期。

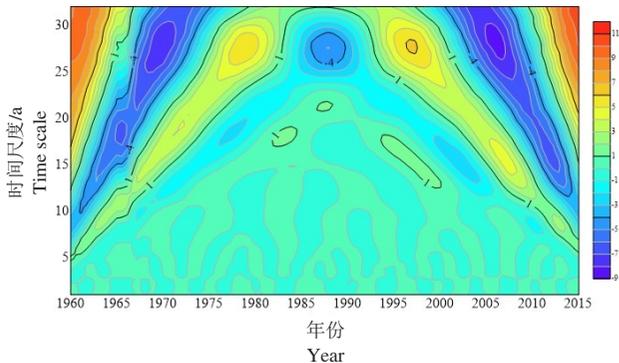


图11 1960—2015年湘江湘潭站年平均水位小波等值线
Fig.11 Wavelet transform contour map of annual average water level at Xiangtan station from 1960 to 2015

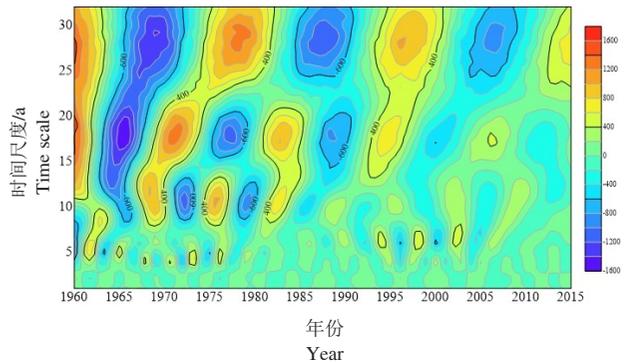


图13 1960—2015年湘江湘潭站年输沙量小波等值线
Fig.13 Wavelet transform contour map of annual sediment discharge at Xiangtan station from 1960 to 2015

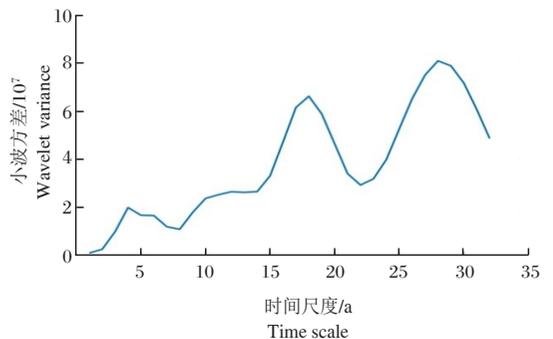


图14 1960—2015年湘江湘潭站年输沙量小波方差
Fig.14 Wavelet variance map of annual sediment discharge at Xiangtan station from 1960 to 2015

4 讨论

4.1 湘江干流水沙趋势变化的影响因素

研究期内,径流量和水位平均每10 a仅增加1.54%、0.04%。从长序列时间尺度上看,径流量和 zwar 虽有变化但趋势性并不显著,该结论与湘江流域内大气降水的变化规律(即降水变化趋势不显著的分析结果)相一致(肖义等,2013;罗梅芳等,2020)。湘江流域地处亚热带季风性湿润气候区,该区域大气降水呈现出一定的规律性:降水的年内变幅较大,绝大部分地区降水集中在夏季5、6、7月,该时期是湘江的丰水期,径流量较大;但从年际上看近几十年湘江流域平均降水量总体变化趋势不显著。可见,湘江流域具有典型的季风性气候特征,大气降水是径流水源补给的主要来源。一般而言,在不考虑其他影响因素的情况下,降水补给型河流的径流量与水位变化具有较好的相关性,并与该流域范围内的降水量密切相关。因此,在长时间尺度上,当湘江流域降水量无显著增减变化时,径流量和水位的总体趋势变化也不明显。

另一方面,输沙量平均每10 a减少16.49%,输沙量呈现出显著的下降趋势,河流泥沙量明显削减。由此可见,输沙量、径流量与水位在长时间尺度上的变化趋势并不一致。这主要是因为:(1)湘江流域上游的水土保持工程带来的减沙作用。20世纪90年代以来,湖南省政府部门加大了湘江流域水土流失综合治理力度,至2010年湘江流域共治理水土流失面积约7 834 km²,完成坡改梯27.35万 hm²(水利部长江水利委员会,2015),有效削减了流域内水土流失、入河泥沙量以及河流泥沙的输移量。(2)20世纪90年代及之后,“芙蓉杯”水利建设竞赛掀起了水利工程修复、水库除险保安、河道清障、灌区配套挖潜等水利建设高潮。例如1992年湘江流域最大的东江水库(总库容约91.5亿 m³)全面竣工,水库在蓄水同时拦蓄了大量泥沙。(3)随着湘江经济带的发展,流域内泥沙的使用量不断增加,导致河道中的采砂活动和采砂量也大幅增加,例如《湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(湘水发[2019]9号)》设定了年采砂控制总量为6 500万 t。这是泥沙资源化的表现,也在一定程度上削减了湘江干流的输沙量。综上,湘江流域内长期水土保持工程建设、水利设施兴建、河道采砂等人类活动及其拦沙减沙效应是输沙量不断减少的主要原因。

4.2 水位、径流量和输沙量关系的突变特征

湘江干流水位、径流量在短时间尺度上波动频繁且不稳定,但可能的突变点不显著;输沙量在研究期内存在1个显著的突变点即1998年。1998年突变前后,湘江水位-径流、水位-输沙之间的关系发生了根本转变,决定系数 R^2 分别从0.66、0.31骤降至0.0005、0.0004(图8)。这种转变可能与1998年发生的长江中下游特大洪水密切相关。1998年以前湘江流域水库、防洪工程建设速度慢且标准低,抵御洪涝灾害的能力偏弱,1980-1998年,平均2年经历1次洪灾。1998年及之后湘江干支流加速推进兴修水库、闸坝和蓄滞洪区等水利工程建设与修复,尤其是湘江干流高标准修筑防洪堤坝(毛德华等,2003),对河道水位产生了根本性影响。因此,1998年之后受洪水灾害事件及其后续人类活动反馈影响,水位-径流量、水位-输沙量之间的解释关系明显减弱。可见,水位(相较于径流量)是一个不太稳定的变量,在未来湘江水沙特征分析中须谨慎考虑水位变量。

1998年突变前后,湘江径流-输沙的决定系数 R^2 从0.53增加至0.69(图8),径流量与输沙量的解释关系增强。这可能是因为,一方面兴修水利工程使河道的拦沙减沙效应增强,进一步减少了湘江干流的输沙量并使之发生突变。另一方面水利工程的运行调度及其径流调节作用也使径流-输沙的波动性减弱,稳定性增加,从而使突变后径流-输沙的解释关系变得更好。可见,湘江流域内人类活动(如水利设施兴建等工程措施)及其滞后效应对输沙量的突变特征产生了重要影响,但河道径流依然是河道输沙的主要驱动力。综上,1998年湘江中下游特大洪水灾害事件及其后续高强度人类活动响应(如高标准修筑防洪堤坝、兴建水利设施及水利工程运行调度)是水位、径流量和输沙量关系调整的重要原因。

4.3 不同时间尺度上水沙特征的周期性规律

在大于25 a的长时间尺度上,湘江干流径流量、水位和输沙量的变化周期十分相似,主周期均为27~28 a。主周期尺度上,水沙要素均呈现出准3次“低值期-高值期”的交替振荡,且偏高值周期中心尚未闭合,目前湘江水沙要素仍处于偏多时期。结合区域降水分析(肖义等,2013;罗梅芳等,2020)可知,径流量和水位的27~28 a长时间周期尺度主要受到气候因素与降水周期性影响,且27~28 a主周期变化非常规律和稳定。另外,输沙量的主周期28 a与径流量和水位的主周期27~28 a相近且比较稳定,这表明

输沙量的周期性在长时间尺度上与径流量和水位的周期性高度相关,即降水-径流周期性及其水土流失效应是输沙量主周期28 a的主要影响因素。因此,在长时间尺度上气候波动与降水周期性是水沙主周期的主要影响因素。

在小于15 a的短时间尺度上,湘江干流径流量、水位和输沙量的周期规律具有明显差异,次周期的显著性较弱。人类活动(如修筑防洪堤坝、水利工程建设及其调节作用等)对径流和水位的短时间周期产生了重要影响和干扰,这使得径流和水位的周期变化在短时间尺度上不显著,例如径流量呈现出并不显著的6 a次周期,水位未显示出次周期。而对于输沙量,次周期4 a、11 a在1985年后呈现出明显减弱的趋势,这可能与湘江流域20世纪80、90年代后加大投入水利设施和水土保持工程建设相关,例如1990年代后建成或扩建的大型水库东江水库、株树桥水库、洮水水库、涇天河水库,以及湘江干流的大源渡航电枢纽、近尾州水电枢纽、株洲航电枢纽、湘江长沙综合枢纽等。人类活动干预的逐渐加强,对输沙量变化周期的影响也逐渐加深,从而可能导致输沙量在短时间尺度上的周期性削弱。因此,人类活动也是输沙量次周期波动的主要影响因素。综上,流域内复杂人类活动干扰(如水土保持工程建设、水利工程建设、城市不透水面扩张与水利工程运行调度等的累积效应、滞后效应及抵消效应)是短时间尺度上水沙周期性减弱的重要影响因素。

参考文献

- 阿如早,车敏,2017.近60年多伦县气候特征变化分析[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),46(3):426-430.
- 郭世兴,刘斌,王光社,等,2015.基于Mann-Kendall法的汉江上游水沙趋势分析[J].水电能源科学,33(11):140-142.
- 胡光伟,毛德华,李正最,等,2014.1951-2011年湘江径流泥沙演变过程与特征分析[J].水土保持通报,34(1):166-172.
- 李红燕,王志平,羊华,等,2021.基于Morlet小波分析的弥苴河径流量变化及其影响因素分析[J].人民珠江,42(3):53-60.
- 隆院男,唐蓉,蒋昌波,等,2018.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,34(24):132-143.
- 罗梅芳,冯畅,杨柳,2020.长沙市降水变化规律研究[J].江西科学,38(5):694-709.
- 毛德华,夏军,龚重惠,2003.长沙市防洪建设中若干重要问题探讨[J].地理研究,(6):716-724.
- 彭涛,田慧,秦振雄,等,2018.气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J].泥沙研究,43(6):54-60.
- 桑燕芳,王中根,刘昌明,2013.水文时间序列分析方法研究进展[J].地理科学进展,32(1):20-30.
- 水利部长江水利委员会,2015.湘江流域综合规划[R].长沙:湖南省水利厅.
- 王文圣,丁晶,衡彤,等,2003.水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J].工程勘察,(1):32-35.
- 肖义,唐少华,陈华,等,2013.湘江流域1960-2008年降水气温变化趋势分析[J].人民长江,44(3):10-12,32.
- 徐金鑫,丁文峰,林庆明,2019.丹江流域水沙变化特征分析[J].长江流域资源与环境,28(8):1956-1964.
- 要志鑫,孟庆岩,孙震辉,等,2020.不透水面与地表径流时空相关性研究——以杭州市主城区为例[J].遥感学报,24(2):182-198.
- 张晓艳,刘梅先,2018.气候变化及人为活动对湘江流域径流和输沙的影响[J].水土保持研究,25(1):30-37.
- Gudmundsson L, Boulange J, Hong X D, et al, 2021. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change[J]. Science, 371: 1159-1162.
- Juahir H, Zain S M, Aris A Z, et al, 2010. Hydrological Trend Analysis Due to Land Use Changes at Langat River Basin [J]. Environment Asia, 3(special issue): 20-31.
- Swami V A, Kulkarni S S, 2016. Simulation of Runoff and Sediment Yield for a Kaneri Watershed Using SWAT Model[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 4(1): 1-15.
- Zhao Y, Cao W H, Hu C H, et al, 2019. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events[J]. Catena, 177: 31-40.

(责任编辑 郑金秀)

Variation of Annual Runoff, Sediment Discharge and Water Level in Xiangjiang River

FENG Chang, ZENG Jia-yuan, YANG Liu, ZHOU Wei, LIU Zi-yi

(College of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, P.R. China)

Abstract: In this study, the Xiangjiang River was selected for a case study and the trends, alterations, and periodicities of annual runoff, water level, and sediment discharge were analyzed. The analysis was based on measured water and sediment data collected from 1960 to 2015 at Xiangtan station, which covers 86.2% of the Xiangjiang River basin (81 638 km²). The succession of water and sediment at different time scales, and the influencing factors, were also characterized and analyzed. Statistical methods included the Mann-Kendall test, Sen slope estimation and Morlet wavelet. Results show that: (1) The annual runoff and water level of Xiangjiang River increased respectively by 1.54 % and 0.04 % per decade from 1960 to 2015, not a significant increase, while the annual sediment discharge decreased by 16.49 % per decade, which was a significant decrease. Long-term soil and water conservation projects and sand mining in Xiangjiang River were the primary reasons for the decreased sediment discharge. (2) During the study period, there were no significant deviations in the annual runoff and water level of the Xiangjiang River, but the annual sediment discharge did vary significantly in 1998. The correlation coefficients (R^2) between water level and runoff, and between water level and sediment discharge decreased, respectively, from 0.66 and 0.31 before 1998 to less than 0.01 after 1998. However, the correlation between runoff and sediment discharge increased, with the R^2 value increasing from 0.53 to 0.69. This change may be related to the catastrophic flood of Xiangjiang River in 1998 and the construction and operation of water conservancy projects that included reservoirs, flood control dams, and flood storage areas after 1998. (3) The annual runoff, water level and sediment discharge in Xiangjiang River had similar and stable primary periods of 27–28 years on a long time scale, and the characteristics of each primary period were very similar and stable. Climate change and precipitation periodicity were the primary influencing factors. On the short-term, the sub-periodicity of water and sediment elements were different, but not significantly, and the increase of high-intensity human activities in the basin was the primary influencing factor. The results of this study provide a scientific basis for sediment management, flood control, drought relief, water resource utilization and sustainable development in the Xiangjiang River basin and other similar basins.

Key words: water and sediment variation; deviation; periodicity; Xiangjiang River basin