

1951—2011年湘江径流泥沙演变过程与特征分析

胡光伟¹, 毛德华¹, 李正最², 许滢³

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081;

2. 湖南省水文水资源勘测局, 湖南 长沙 410007; 3. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412008)

摘要: 根据湘江主要控制站 1951—2011 年长时间序列径流与泥沙资料, 运用 Mann—Kendall 非参数检验法、小波分析法和均值差异 T 检验法等, 揭示了湘江年径流量和年输沙量演变特征与规律, 并分析了其驱动因素。结果表明: (1) 径流量呈微弱增加趋势, 而输沙量下降趋势明显; (2) 时间序列上径流量未发生突变, 而输沙量在 1997 年发生了突变, 表现为 1997 年后有显著下降趋势; (3) 小波分析表明径流量和输沙量均存在 20 和 7 a 的周期性变化规律; (4) 60 a 来湘江年径流量可以分为 1951—1954 和 1992—2002 年两个多水期, 1955—1991 和 2003—2011 年两个少水期。径流泥沙集中度与集中期分析表明输沙量年内分配不均匀性更为明显, 输沙主要集中在每年 6 月; (5) 年输沙量显著减少主要是水利工程拦沙和水土保持工程措施所致。

关键词: 径流量; 输沙量; 演变规律; 影响因素; 湘江

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0166-07

中图分类号: P343.3

Evolution Processes and Characteristics of Annual Runoff and Sediment in Xiangjiang River from 1951 to 2011

HU Guang-wei¹, MAO De-hua¹, LI Zheng-zui², XU Ying³

(1. College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China; 2. Hunan Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changsha, Hunan 410007, China; 3. Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412008, China)

Abstract: Based on long-time series data of annual runoff and sediment at key stations along the Xiangjing River from 1951 to 2011, evolution characteristics and laws of annual runoff and sediment were revealed by means of Mann—Kendall, wavelet analysis and average difference T methods, and its driving forces were analyzed. (1) The amount of annual runoff showed a slightly increasing trend and the amount of annual sediment, an obviously decreasing trend. (2) Temporally, runoff process did not show any mutation characteristic and annual sediment process, some mutation characteristics in 1997. After 1997, however, annual sediment declined significantly. (3) Wavelet analysis indicated periodicities of 20 years and 7 years for annual runoff and sediment processes, respectively. (4) The annual runoff series of the Xiangjing River can be divided into two plentiful phases of 1951—1954 and 1992—2002 and two drought phases of 1955—1991 and 2003—2011. Analyses of concentration ratio and period of annual runoff and sediment indicated that the inhomogeneity of inter-annual sediment distribution was more obvious than runoff, which mainly concentrated in June every year. (5) Significant reduction in annual sediment transportation was mainly contributed from sand controlling by water resource engineering and soil and water conservation engineering measures.

Keywords: runoff; sediment transportation; evolution law; influencing factor; Xiangjing River

收稿日期: 2013-03-21

修回日期: 2013-06-12

资助项目: 2012 年湖南省研究生科研创新项目“三峡水库运行前后洞庭湖区水沙过程响应”(CX2012B210); 2012 年度高等学校博士学科点专项科研基金联合资助项目“水沙过程对洞庭湖水质影响机理与时空变化研究”(20124306110009); 湖南省重点学科建设项目“地理学重点学科建设”(2011001); 湖南省自然科学基金重点项目“三峡工程运行后洞庭湖区洪灾易损性评估与生态补偿机制研究”(12JJ2026); 湖南省教育厅重点项目(09A055); 湖南省水利科技重大项目(湘财农指[2007]7号)

作者简介: 胡光伟(1983—), 男(汉族), 河南省固始县人, 博士研究生, 主要从事湖泊水资源与水环境、水旱灾害、水土资源利用研究。E-mail: huguangwei5188@163.com。

通信作者: 毛德华(1964—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事洪涝灾害、洪灾风险分析、湿地水文与环境、水土资源等方面的研究。E-mail: mdh408122@sohu.com。

湘江是洞庭湖流域最大的支流,是湖南省的母亲河,对洞庭湖流域的水资源安全有较大贡献。随着人类活动的不断增强,洞庭湖各主要支流径流量和输沙量均呈现出显著变化,在国内学术界引起广泛关注,学者们针对洞庭湖流域的径流泥沙变化特征、演变规律和驱动因素开展了一系列研究^[1-8]。但单独对湘江流域径流泥沙演变过程的系统研究较少,且采用的是传统统计学方法。鉴于径流量和输沙量受多种影响因素制约,是非线性极强的随机变量,利用传统统计学方法很难准确地揭示出其内在变化规律,因此本文采用较为精确的时间序列分析方法中的 Mann—Kendall 趋势分析法和均值差异 T 检验法对湘江年径流量和年输沙量的演变规律进行分析,为深入研究湘江流域及洞庭湖区水沙演变规律提供参考。

1 流域概况

湘江是湖南省最大的河流,为长江 7 大支流之一,流域内人口将近 5 000 万,占湖南省总人口的 60%左右。它发源于广西壮族自治区东北部兴安、灵川、灌阳、全州等县境内的海洋山,上游称海洋河,在湖南省永州市区与潇水汇合,称湘江,向东流经永州、衡阳、株洲、湘潭、长沙,至湘阴县芦林潭入洞庭湖后归长江。全长 856 km,湘江干流在湖南省内全长 670 km,流域面积 94 660 km²,其中湖南省内面积为 85 383 km²,占总面积的 90.2%,沿途接纳大小支流 2 157 条,主要支流有潇水、耒水、洙水、舂陵水、蒸水、涟水等,多年平均径流量 9.39×10^{10} m³,实测最大流量 20 800 m³/s。湘江流域属于亚热带季风湿润气候,雨量丰沛,但年内分配不均,降水多集中在春夏季,多年平均降水量 1 300~1 500 mm,降雨多集中在 4—6 月,占全年的 40%~45%;7—9 月干旱少雨,降水量约占年降水量的 18%;1—2 月最少,仅占全年的 8%。湘江流域的洪水主要由气旋雨形成,每年的 4—9 月为汛期,年最大洪水和洪峰水位多发生于每年的 4—8 月,其中 5、6 月出现次数最多,次洪历时 10 d 左右,并且与暴雨发生时间相对应。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采用湘江入洞庭湖控制站的湘潭水文站 1951—2011 年的年径流量和年输沙量数据以及湘潭站 1956—2011 年逐月径流量和输沙量数据资料,数据来源于湖南省水文水资源勘测局、《长江泥沙公报 2000—2011》^[9]和中国气象科学数据共享服务网。

2.2 研究方法

(1) Mann—Kendall(M—K)非参数检验法。用于对长序列数据的趋势突变进行检验分析,具体计算参照文献^[10—12]。M—K 法因为不要求原始数据服从特定概率分布,只满足时间序列随机独立即可,因此受到水文学者的广泛认可。设定时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 定义统计量:

$$dk = \sum_i^k m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (1)$$

式中: m_i ——第 i 个样本 x_i 大于 x_j ($1 \leq j \leq i$) 的累计数。

在原序列随机且独立的前提下,dk 的均值和方差分别为 $E[dk] = k(k-1)/4$, $\text{var}[dk] = k(k-1)(2k+5)/72$ ($2 \leq k \leq n$)。进一步将 dk 标准化,定义统计量 $UF_k = (dk - E[dk]) / \sqrt{\text{var}[dk]}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, n$), 当 $k > 10$ 时, UF_k 收敛于标准正态分布。采用双边趋势检验,给定一定显著水平 α (文中取 $\alpha = 0.05$), 在正态分布表中查得临界值 $U_{\alpha/2}$ 。当 $UF_k < U_{\alpha/2}$ 时,表明趋势不明显,当 $UF_k > U_{\alpha/2}$ 时,则表明存在明显趋势变化,且 UF_k 值为正表明具有上升或增加趋势, UF_k 值为负就表明具有下降或减少趋势;当 UF_k 值越过临界值线时,表示上升或下降趋势显著。把时间序列 x 逆序列 $x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1$, 按照上述过程重复计算,同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$)。 UB_k 和 UF_k 两条曲线在时间序列的某一点发生交叉,交叉点即为突变点,若突变点位于给定 95%置信度水平之间,表示突变时间在统计意义上是显著的。

(2) 小波分析。小波分析的基本思想是用一族小波函数系来表示或逼近某一信号或函数,小波函数是指具有震荡性、能够迅速衰减到零的一类函数,即 $\psi(t) \in L^2(R)$ 且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ ——基小波函数,它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一族函数系。

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a \neq 0) \quad (3)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ ——子小波,对于给定能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$, 其连续小波变换 (continue wavelet transform, CWT) 为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $W_f(a, b)$ ——小波变换系数; $f(t)$ ——一个信号或平方可积函数; a ——伸缩尺度; b ——平移参数。

(3) 均值差异 T 检验法。在径流泥沙长时间序列中,若出现从某变点起前期及后期平均径流量、输沙量均呈现出明显增加或减少的现象,称为跳跃点或突变点。定义样本长度为 N 的序列的突变指数 AI_j 为:

$$AI_j = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{S_1 + S_2} \quad (5)$$

式中: $\overline{x_1}, S_1$ ——基准年前 m_1 年时段的平均值和标准差; $\overline{x_2}, S_2$ ——基准年后 m_2 年时段的平均值和标准差。计算时采用连续移动基准年的方法,可得到突变指数 AI_j 的时间序列。

$$\text{定义统计量: } t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{S_p \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}} \quad (6)$$

式中: m_1, m_2 ——前后两段序列样本长度; S_p ——联合样本方差。

$$S_p^2 = \frac{(m_1 - 1)S_1^2 + (m_2 - 1)S_2^2}{m_1 + m_2 - 2} \quad (7)$$

式中: S_1, S_2 ——前后两时段序列的方差。该统计量 t 服从自由度为 $m_1 + m_2 - 2$ 的 t 分布,当给出一定的

显著性水平 α ,若 $t > t_\alpha$,则在 α 的显著性水平上,基准点两侧 m_1 年和 m_2 年的均值有显著差异,即在基准点处发生了突变,并取这一区间中最大突变指数 AI_j 的年份作为突变的发生时间。

3 结果与分析

3.1 年径流量和年输沙量演变的趋势性

图 1 为 1951—2011 年湘江湘潭站年径流量、年输沙量变化过程和累积年径流量、累积年输沙量变化过程线。从图 1 可以看出,湘江年径流量和年输沙量变化规律基本一致,即大水大沙,小水小沙;径流量累积变化过程线基本呈现直线状态,表明湘江径流量随时间没有发生显著趋势性变化;输沙量累积变化过程呈上凸形态,1980s 之前基本上为直线,表明年输沙量波动不大,平均年输沙量 1.14×10^7 t,1980s 以后输沙量累积过程线开始偏离原增长趋势,年输沙量有减少趋势,年平均输沙量也相应减少至 6.64×10^6 t,减少幅度达 41.91%。

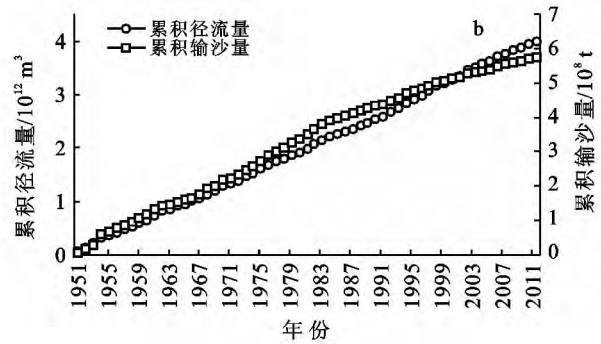
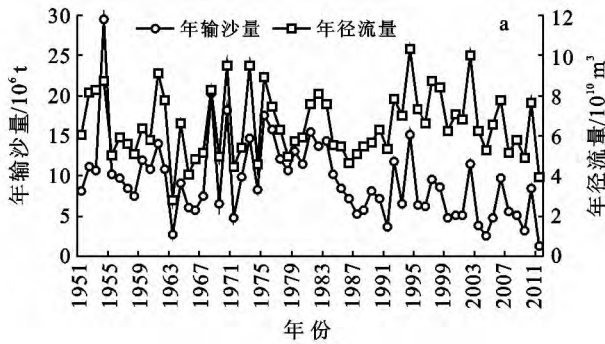


图 1 湘潭站年径流量和年输沙量(a)及累积径流量和累积输沙量(b)变化过程

湘江多年平均径流量为 $6.54 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其中汛期径流量为 $3.89 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占全年的 59.51%。年径流量最大值 $1.04 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (1994 年),年径流量最小值 $2.81 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (1963 年)。

从图 2 中可以看出,湘江径流量围绕多年平均值

震荡,以直线拟合时不满足 R^2 检验。湘江多年平均输沙量为 $9.39 \times 10^6 \text{ t}$,年输沙量最大值 $2.95 \times 10^7 \text{ t}$ (1954 年),年输沙量最小值 $1.27 \times 10^6 \text{ t}$ (2011 年)。湘江输沙量拟合的趋势线直线斜率为负,表示有较为明显的衰减趋势。

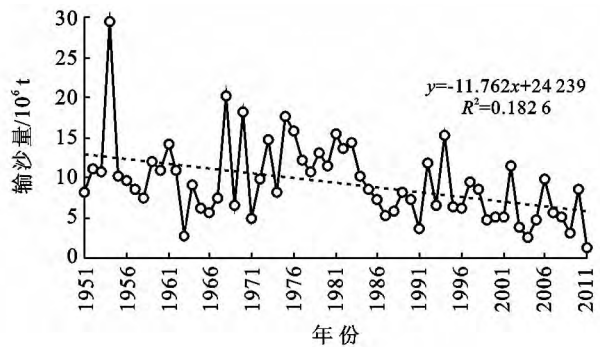
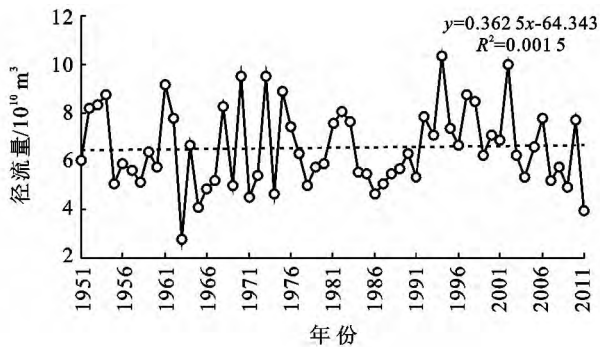


图 2 湘潭站径流量和输沙量线性拟合图

3.2 突变分析

根据 M—K 检验结果(图 3),湘江径流量在 1951—1955 和 1994—2011 年径流量处于增长的波动变化,1956—1993 年径流量处于波动减少变化,但并未突破 95%置信水平。年径流量 UF 和 UB 曲线相交于 1955,1980,1983,1987 等,且均落入 0.05 显著性水平阈值内,即湘江径流量出现突变可能发生在 1955,1980,1983,1987 年。因 UF 曲线未突破 0.05

显著性水平阈值,表明径流量没有出现显著性变化。湘江输沙量在 1951—1955,1961—1962 年和 1976—1987 年呈现增加波动变化,其余时间均呈现输沙量减少的波动变化。UF 和 UB 曲线在信度区间内相交于 1997 年,说明在这一年输沙量可能发生了突变现象,并且 UF 曲线在 1999 年突破 95%的置信水平,表明输沙量呈现出显著减少的趋势。

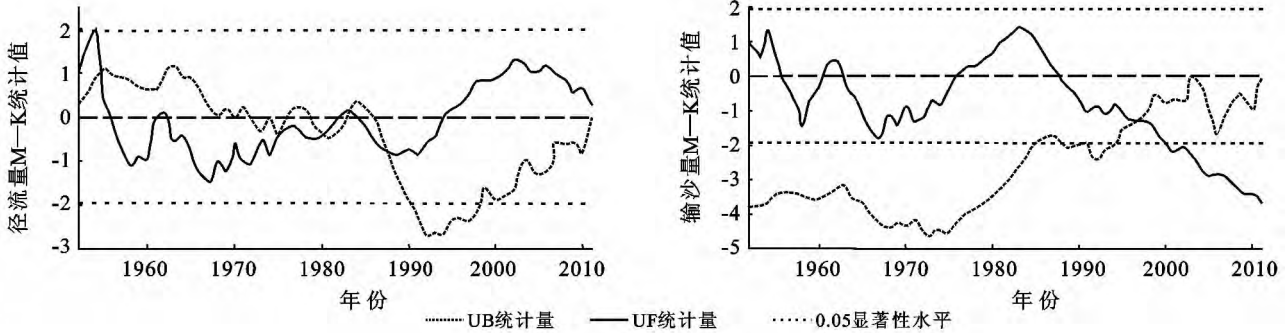


图 3 湘江湘潭站径流量、输沙量 M—K 统计值

为了验证 M—K 突变分析结果的准确性,下面通过均值差异 T 检验方法检验可能发生突变年份的科学性。取显著性水平 α 为 0.01,临界值 t_α 为 2.704,根据均值差异 T 检验结果(表 1)。当 $M=5,30,33,38$ 时,突变指数 AI_j 分别为 0.242,0.085,0.012 和 0.152,相对应的径流统计量 t 为 1.032, -1.664, -0.096 < t_α ,湘江径流量 t 统计量未通过显著性检验,因此,湘江径流量未发生明显的突变,这一点从图 1a 中径流量历年变化过程线中可以看出;对输沙量而言,当 M 为 47 时,突变指数 $AI_j=0.622$,相对应的输沙统计量 $t=3.520 > t_\alpha$,意味着湘江输沙量在第 47 a 附近发生了明显的趋势变化,即在 1997 年发生了一次泥沙突变。

表 1 湘潭站年径流量和输沙量均值差异 T 检验统计量

湘潭站	基准年	突变指数	统计量	显著水平	临界值
径流量	5	0.242	1.032	0.01	2.704
	30	0.085	-0.664	0.01	2.704
	33	0.012	-0.096	0.01	2.704
	38	0.152	-1.141	0.01	2.704
输沙量	47	0.622	3.520	0.01	2.704

3.3 周期分析

从图 4a,4b 径流量和输沙量小波分析可以得出,径流量变化过程中存在 20~25,5~7,10~13 和 2~3 a 4 类尺度的周期变化规律,其中在 20~25 a 尺度

上出现了丰—枯交替的 3 次震荡,而且该时间尺度的周期变化在整个分析时段表现出非常稳定的特性,具有全局性特征,相反,小尺度的周期变化波动性较强。由径流量小波方差图 4b 得出,湘江径流存在 20,7,10 和 3 a 的周期性。而且 20~25 a 周期尺度上的方差最大,表明该时间尺度周期性变化最明显,其他尺度上的周期性变化较小。输沙量变化(图 4c, 4d),湘潭站的输沙量周期性与径流量的周期较为一致,输沙量有 20~25,6~8,3~5 和 11~14 a 4 类尺度的周期变化规律,其中 20~25 a 尺度上出现了丰—枯交替的 3 次振荡,而且这个时间尺度的周期变化在整个统计时段表现出非常稳定的特性,具有全局性特征,而小尺度的周期变化波动性较强。从小波方差图 4d 看,输沙量存在 20,7,3 和 13 a 的周期性规律,其中第一主周期为 20 a,其对应的小波方差最大。

3.4 径流泥沙演变的阶段性

径流泥沙变化往往出现丰枯年交替的现象,一段时期表现出径流丰沛、输沙量大,一段时期表现出径流较枯、输沙量小。年径流量和输沙量的累积距平百分数能准确直观地反映径流量和泥沙量的阶段性变化特征,计算公式为:

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: X ——某一径流量或输沙量序列的累积距平百分数; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ——某一径流量或输沙量序

列; \bar{x} ——径流量或输沙量序列平均值; $i=1, 2, 3, \dots, n, n$ ——径流量或输沙量序列的样本总数。

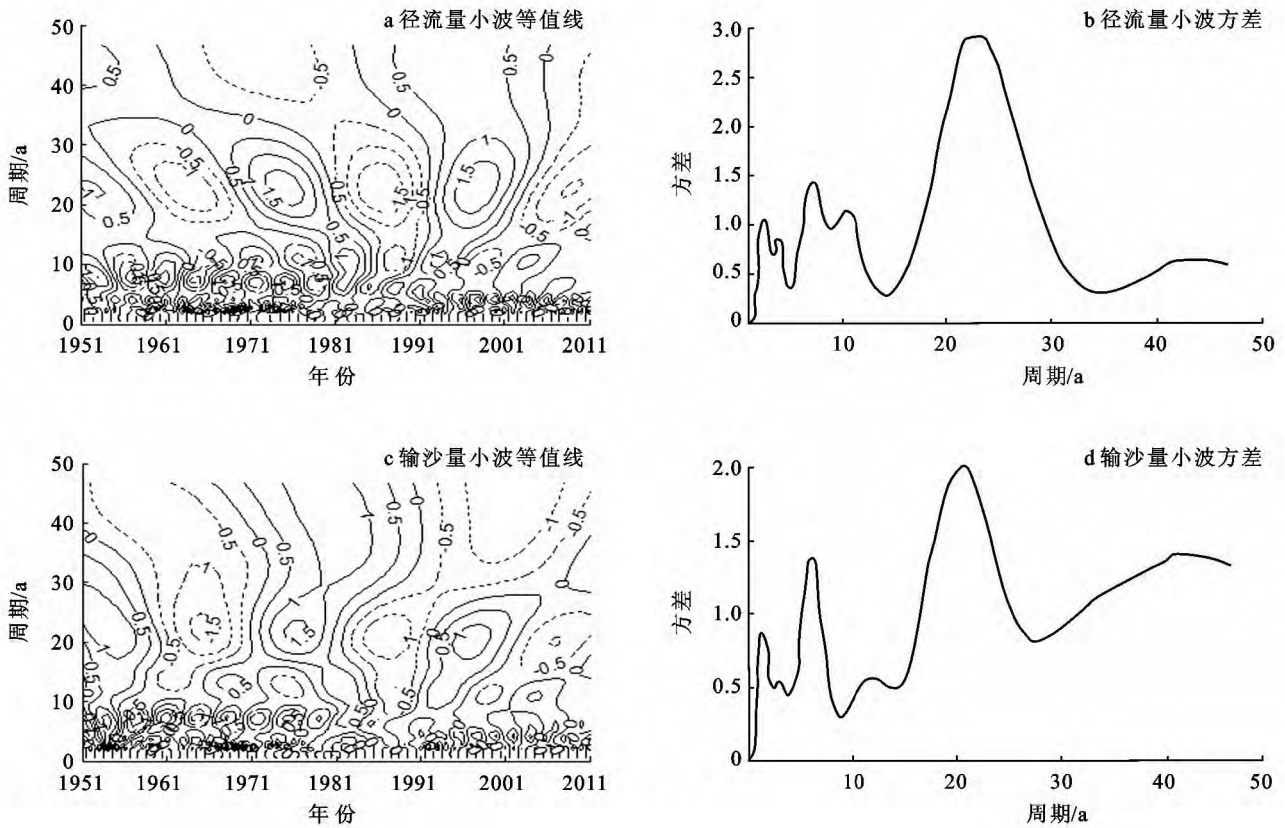


图 4 湘潭站径流量和输沙量小波分析等值线图和 小波方差

根据湘潭站年径流泥沙序列阶段性特征统计(表 2)和图 5 计算结果,可以把湘江径流量序列变化分为 4 个阶段:1951—1954, 1992—2002 年为多水期, 1955—1991, 2003—2011 年为少水期,这 4 个阶段的多年平均径流量分别为 7.82×10^{10} , 6.15×10^{10} , 7.87×10^{10} 和 $5.94 \times 10^{10} \text{ m}^3$; 同样湘江输沙量序列可以分为 2 个阶段:1951—1985 年为多沙期, 1986—2011 年为少沙期,这 2 个阶段的多年平均输沙量为 1.143×10^7 和 $6.64 \times 10^6 \text{ t}$ 。湘江输沙量演变的阶段性与湘江上游兴建水库密切相关,湖南省最大的东江水水库曾于 1958 年动工,1978 年 4 月复工,1980 年 11 月成功截流合龙,1986 年 8 月下闸蓄水,1987 年 11 月投产发电,1992 年枢纽全面竣工。进入 20 世纪,湘江输沙量明显减少的另一重要原因是湖南省水土保持工程的积极作用,说明水土保持工程措施发挥了不可替代的作用。

表 2 湘潭站年径流泥沙序列阶段性特征统计

时段	径流特性	径流量均值/ 10^8 m^3	时段	输沙特性	输沙量均值/ 10^4 t
1951—1954	多水	782	1951—1985	多沙	1 143
1955—1991	少水	615		1986—2011	少沙
1992—2002	多水	787			
2003—2011	少水	594			

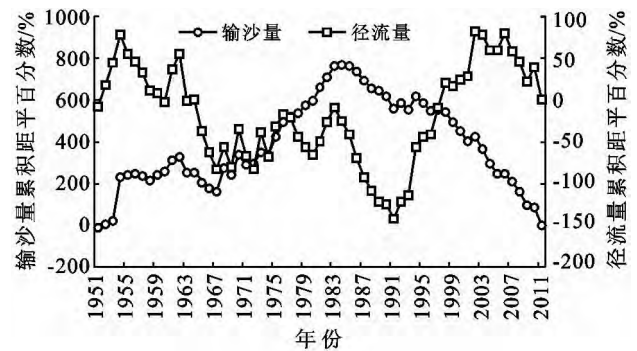


图 5 湘潭站径流泥沙累积距平百分数

3.5 径流量和输沙量演变集中度与集中期

集中度与集中期分析是最早应用于气象领域内分析气象因素在年内分配的一种向量方法,1982 年汤奇成等^[13]把集中度与集中期分析法引入到河流月径流年内分配规律中来,并成功分析中国河川径流年内分配规律,之后被应用到不同的流域中^[14-17]。集中度反映了径流泥沙年内的非均匀分布特征,集中期则反映了全年径流量和输沙量集中出现的时期(月份),具体计算方法参照文献^[18],计算结果见表 3。

由表 3 可知,湘江径流泥沙年内分配具有较为明

显的不均匀性,输沙量不均匀性尤其明显。径流量集中度为 38.2%,输沙量集中度为 57.2%,输沙量年内分配不均匀性更显著,输沙量合成向量的方向为 159.1°,也即输沙量主要集中在每年的 6 月,能够反映湘江输

沙量最大值出现的月份,与实际输沙量年内统计数据一致。从相对变化幅度来看,输沙量相对变化幅度为 21.9,明显大于径流量,输沙量绝对变化幅度为 1.73×10^6 t,也比径流量绝对变化幅度 (9.11×10^9 m³) 大。

表 3 湘潭站径流量和输沙量集中度与集中期计算结果

统计项目	时段	集中度/%	合成向量方向/(°)	月份	相对变化幅度	绝对变化幅度
径流量/ 10^8 m ³	1956—2011	38.2	106.5	5	5.0	91.1
输沙量/ 10^4 t	1956—2011	57.2	159.1	6	21.9	173.1

4 湘江径流泥沙演变的影响因素分析

本文对湘江干流湘潭水文控制站 1951—2011 年的水沙序列变化特征进行全面的分析,并根据已有的研究成果与湘江流域已注册的水库信息,对湘江流域 60 a 来水沙变化特征及其影响因素做了探讨。

4.1 湘江流域气候变化特征对湘江径流泥沙演变过程的影响

湘江径流主要来源于降水,年内分配不均匀,3—7 月径流量占全年的 66.6%,其中 5 月最大,占全年的 17.3%;8 月至翌年 2 月径流量占 33.4%,其中 1 月最小,仅占全年的 3.3%。湘江枯水径流一年出现 2 次,第 1 次是 10 月至翌年 2 月的冬季枯水,这 5 个月平均径流只占年径流量的 21.2%,湘潭站历年实测径流量最小值 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (1996 年 10 月 6 日);第 2 次是夏季枯水。湘江泥沙主要来自降水特别是暴雨对流域表土的侵蚀,汛期河流含沙量最大,且含沙量、侵蚀模数、水沙比自上而下不断增大,水土流失现象也从上而下逐渐加剧。湘江多年平均侵蚀模数在 $100 \sim 600 \text{ t}/\text{km}^2$ 。以老埠头站以上来水的含沙量最大为 92%,衡阳站至湘潭站区间来水的含沙量又比衡阳以上大 51%。

总体上看,湘江流域年径流量存在波动变化,但均无显著变化特征,流域内年径流量演变最大的影响因素是降水量的多少。李景保^[19]和张剑明等^[20]的研究表明,湘江的水位变化与流域的降水保持一致。毛德华^[21]对湖南四水流域年最大流量的研究表明,自 1985—1995 年以来,四水流域年最大流量正处于一个较高的时期,而且这种状态还将延续若干年,这与四水流域 1996 年和 1988 年出现了较大的洪峰流量是一致的。通过与降水周期比较后发现,湘江流域的径流变化对降水有较强的依赖性,与降水的变化特征保持较为一致的趋势。影响河流径流的因素很多,流域内径流变化主要受降水多年变化的影响,还同时受人类生产活动所引起的下垫面条件的改变,包括流域内水库建设、居民和工农业用水量变化等综合因素的

影响。截至 2001 年湖南省兴建了大中小型水库 13 318 座^[22],其中大型水库就达 19 座。湖南水库总库容达 $3.69 \times 10^{10} \text{ m}^3$,包括兴利库容 $2.48 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占四水多年平均径流量的 15%,可使全省增加有效灌溉面积达 $1.55 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

4.2 水利设施建设和水土保持工程措施对湘江径流泥沙演变的影响

湘江年径流量在长时间序列 1951—2011 年变化趋势不明显,是因为湘江水系发育,流域支流众多,降水丰沛,流域生产生活用水量并未对流域内径流量产生根本性影响。2010 年湘江流域工农业生产和城乡居民生活用水总量为 $1.73 \times 10^{10} \text{ m}^3$,并且每年都以 7.9% 的速度增加,其中,湘江流域规模以上企业用水总量就达 $5.10 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。根据湘江湘潭站实测资料统计,湘潭站径流量在时间序列上波动变化幅度相对较小,这表明湘江流域产水量大,水系发达,地表蒸发与植物蒸腾损失量小,而水库的大量修建以及工农业生产和城乡居民生活用水量的增加未对湘江流域的径流产生根本性的影响。湘江干流的输沙在时间序列上显著减少,主要原因是产沙量的变化受人为和自然因素的双重影响:一方面,水库的蓄水作用拦截了大量泥沙淤积库中,流域支流已建大型水库 10 座,总库容达 $1.19 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其中 9 座按省防汛办计划预留防洪库容 $1.06 \times 10^9 \text{ m}^3$,已建中型水库中有 116 座留有防洪库容 $4.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,这些水库的建设对流域泥沙输移产生重要影响。根据湖南省水利水电课题组的研究成果,湖南省四水流域水库在 20 世纪 60—80 年代共截留泥沙达 $9.55 \times 10^8 \text{ t}$ 。另一方面,自 20 世纪 50 年代以来,湖南省水土流失综合治理面积达 $22 296.4 \text{ km}^2$,共营造水土保持林 $10 035.3 \text{ km}^2$,对 1 100 条小流域开展综合治理,建成一批水土保持示范工程,初步建立起覆盖全省的水土保持监测网络。在水利工程和水土保持措施综合作用影响下,湘江泥沙的输移量显著减少。

5 结论

(1) 根据径流量和输沙量的趋势性分析,湘江径

流量没有发生明显变化,而输沙量下降趋势显著,输沙量在 1980s 以后开始表现出明显的下降,1985 年之前年平均输沙量为 1.143×10^7 t,而 1985 年之后多年平均输沙量为 6.64×10^6 t,减少幅度达 41.91%。

(2) 通过 Mann—Kendall 法和均值差异 T 检验法对湘江湘潭站 1951—2011 年年径流量和年输沙量序列变化规律进行了分析,结果表明,湘江干流 60 a 径流量在 1951—1955 和 1994—2011 年两个时段有上升趋势,1956—1993 年呈现下降趋势,但是变化并不显著;湘江输沙量在 1997 年发生了突变,呈现显著下降趋势,突变点相对应的统计量 t 值为 3.520。

(3) 由小波分析可知,湘江径流量和输沙量存在 20 a 的主要周期,并且,湘江径流量和输沙量还存在 7 a 的第二主周期。从第一、第二主周期来看,湘江径流量和输沙量的周期性变化规律非常吻合,可以进一步说明径流量和输沙量的相关关系非常显著,径流量是引起输沙量变化的最重要因素。

(4) 根据径流泥沙阶段性分析,可以把湘江径流量序列变化分为 4 个阶段:1951—1954 和 1992—2002 年为多水期,1955—1991 和 2003—2011 年为少水期;同样湘江输沙量序列可以分为 2 个阶段:1951—1985 年为多沙期,1986—2011 年为少沙期。而集中度与集中期计算结果表明,湘江径流量和输沙量年内分配不均匀性较为明显,尤其以输沙量的不均匀性更为显著,输沙量集中度为 52.7%,主要集中在每年的 6 月,且输沙量绝对变化幅度达 1.731×10^6 t。

(5) 对湘江水沙演变过程的影响因素分析可知,60 a 来湘江年径流量与年降水量的变化具有一致性,输沙量的变化主要受人为因素的影响,水利设施建设和水土保持工程措施是导致流域泥沙量减少的重要因素。

[参 考 文 献]

- [1] 高俊峰,张琛,姜加虎,等. 洞庭湖的冲淤变化和空间分布[J]. 地理学报,2001,56(3):271-276.
- [2] 张晓阳,杜耘,蔡述明. 洞庭湖演变趋势分析[J]. 长江流域资源与环境,1995,4(1):64-68.
- [3] 郭小虎,姚仕明,晏黎明. 荆江三口分流分沙及洞庭湖出口水沙转移的变化规律[J]. 长江科学院院报,2011,28(8):80-86.
- [4] 李景保,张磊,王建,等. 水沙过程变化下洞庭湖区的生态效应分析[J]. 热带地理,2012,32(1):16-21.
- [5] 卢承志. 洞庭湖治理与江湖关系[J]. 湖南水利水电,2001(1):13-15.
- [6] 李景保,王克林,秦建新,等. 洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因[J]. 地理学报,2005,60(3):503-510.
- [7] 刘卡波,丛振涛,栾震宇. 长江向洞庭湖分水演变规律研究[J]. 水力发电学报,2011,30(5):16-19.
- [8] 林承坤. 洞庭湖水沙特征与湖泊沉积[J]. 地理科学,1987,7(1):10-17.
- [9] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2000-2011[M]. 武汉:长江出版社,2000-2011.
- [10] 覃爱基,陈雪英,郑艳霞. 宜昌径流时间序列的统计分析[J]. 水文,1993(5):15-21.
- [11] 刘宇峰,孙虎,原志华. 近 60 年来汾河入黄河水沙演变特征及驱动因素[J]. 山地学报,2010,28(6):668-673.
- [12] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检验方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.
- [13] 汤奇成,程天文,李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. 地理学报,1982,37(4):383-393.
- [14] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等. 1957—2008 年黑河流域径流年内分配变化[J]. 地理科学进展,2011,30(5):550-556.
- [15] 丁瑾佳,许有鹏,潘光波. 杭嘉湖地区城市发展对降水影响的分析[J]. 地理科学,2010,30(6):886-891.
- [16] 张秋变,路紫. 旅游网站信息流距离衰减的集中度研究[J]. 地理科学,2011,37(7):886-890.
- [17] 白红英,侯钦磊,马新萍. 50 年来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. 地理科学,2012,32(10):1230-1235.
- [18] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791-795.
- [19] 李景保,吴桂生,刘晓清. 近数十年湘江流域河流水文变化规律[J]. 热带地理,1997,17(3):295-302.
- [20] 张剑明,黎祖贤,章新平. 1960—2005 年湖南省降水的变化[J]. 气候变化研究进展,2008,4(2):101-105.
- [21] 毛德华. 洪灾综合风险分析的理论方法与应用研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [22] 叶泽钢. 湖南省大型水库特点及防洪格局[J]. 水资源研究,2003,24(1):20-23.