

基于时变矩 BMA 方法的赣江流域年输沙量变化归因分析

温天福¹, 熊立华², 江 聪³, 许新发¹, 刘章君¹

(1. 江西省水利科学院, 南昌 330029; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘 要: 分析河道泥沙影响因素并进行定量归因分析, 对正确认识和评价流域水土流失治理措施有着重要意义。该研究通过对鄱阳湖赣江流域 1958—2014 年的年输沙量变化特征分析, 引入降雨侵蚀、森林覆盖以及水库调控 3 个影响因素建立年输沙量时变矩模型, 利用 BMA 方法融合 4 个时变矩模型模拟赣江年输沙量过程, 并定量归因分析年输沙量变化中多因素的贡献程度。研究表明: 1) 以降雨侵蚀力、森林覆盖率和水库调控系数为主要物理影响因子构建的时变矩模型, 可以较好地描述赣江年输沙量分布特征及时变过程, 纳什效率系数达到 0.93; 2) BMA 方法有效融合了多个时变矩模型的优点, 年输沙量模拟的不确定性区间变小, 通过遍历多因素情景组合可定量分离不同影响因素的贡献量及变化范围; 3) 相对于基准期(1958—1989 年), 变化期(1990—2014 年)赣江流域年输沙量显著减少($P < 0.05$), 主要受人类活动影响, 与双累积曲线法和产沙函数法的定量归因结果相近。森林覆盖率和大中型水库调控对赣江流域年输沙量减少贡献量分别为 414.87 和 $261.45 \times 10^4 \text{ t/a}$, 两者贡献率分别为 59.72%、37.63%, 而降雨侵蚀导致年输沙量增加约 $42.99 \times 10^4 \text{ t/a}$, 其他因素减少年输沙量 $61.40 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。对于赣江流域, 持续加强流域森林资源的保护, 强化大中型水库的调控能力, 是提升流域水土流失治理能力的重要举措。研究结果可为流域水土流失综合治理提供科学参考。

关键词: 模型; 水库; 输沙量; BMA 方法; 归因分析; 非一致性; 多因素; 赣江流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.017

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-07-0140-10

温天福, 熊立华, 江聪, 等. 基于时变矩 BMA 方法的赣江流域年输沙量变化归因分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 140-149. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.017 <http://www.tcsae.org>

Wen Tianfu, Xiong Lihua, Jiang Cong, et al. Attribution analysis of annual sediment load of Ganjiang River Basin using BMA based on time-varying moment models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 140-149. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.017 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

泥沙是河道演进和生态系统稳定重要的驱动因子之一。在 20 世纪, 全球 145 条河流中近一半年输沙量有明显变化, 其中 47% (如密西西比河、印度河、尼罗河、长江、黄河等) 呈显著减少趋势^[1]。1955—2010 年, 中国排入太平洋的年输沙量由 $20 \times 10^8 \text{ t}$ 骤减至 $5 \times 10^8 \text{ t}$ ^[2]。河流输沙量减少容易导致河床下切、河流生态环境改变以及河口三角洲退化等一系列问题。影响流域年输沙量变化的因素众多, 主要包括降雨、水利工程、水保措施以及农业耕作等。雨量、雨强是影响坡面产流输沙的主要降雨特征, 地表输沙模数和产沙量随降雨强度的增大而增大^[3-5]; 修建淤地坝、水库可直接改变水动力条件, 阻拦河道泥沙运移, 减少下游河道断面的输沙量^[6-7]; 森林覆盖减少和开荒耕作等土地利用方式则会引起坡面产沙的增加^[8-10]。

分析引起河道输沙量变化的影响因素并对其定量归因分析成为当前泥沙研究的热点问题, 归因方法多以统计分析为主, 该方法基于输沙量与降雨或径流等要素之间的统计关系, 通过对比输沙量变化来分离贡献程度, 具有对数据资料要求不高且相对简单的优点^[11]。胡春宏等^[12]分析了中国 11 条主要河流, 发现除塔里木河外, 其他主要河流 1950—2008 年年输沙量都有不同程度的减少, 其中北方河流的减小幅度较大, 主要受气候变化和人类活动双重因素影响。此外, 众多研究表明, 黄河、长江、珠江等中国大部分流域输沙量减少受降雨等气候变化的影响较小, 主要是由于植树造林、淤地坝、水库工程等人类活动的影响, 多数区域其贡献程度可达到 70% 以上^[13-16]。但多数研究主要以分离气候变化和人类活动两类贡献为主, 多种影响因素对河流输沙量变化的定量贡献研究较少。时变矩模型在描述泥沙、径流等水文序列非一致性变化时, 通过引入表征气候变化和人类活动的多种影响因素, 实现定量归因分析各影响因素的贡献量^[17]。同时, 贝叶斯模型加权平均方法(Bayesian Model Averaging method, BMA)可融合不同模型模拟值, 有效提高样本序列的模拟效果^[18]。

综上, 本研究提出通过 BMA 融合时变矩模型, 构建流域年输沙量变化定量归因分析方法。该方法通过时变

收稿日期: 2020-11-16 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 江西水利科技项目(201821ZDKT07, 201922ZDKT14, 201922ZDKT05); 国家自然科学基金项目(51809243, 51909112); 江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室开放研究基金项目(2020GPSYS06); 江西省重点研发计划(20181ACG70018)

作者简介: 温天福, 博士, 高级工程师, 研究方向为水文与水资源。

Email: wen-tianfu@whu.edu.cn

矩模型建立年输沙量分布参数与降雨侵蚀、森林覆盖和水库调控等相关因素的统计关系,通过 BMA 方法融合多个时变矩模型以提高模拟效果,进一步模拟多因素情景组合,实现不同因素的贡献分离。以赣江流域为例,分析不同因素对赣江外洲站 1958—2014 年年输沙量变化的贡献程度,为流域水土流失综合治理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赣江地处长江中下游右岸,是江西省和鄱阳湖流域最大的河流^[19],集水面积为 $8.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ (外洲站以上),见图 1。流域属中亚热带湿润季风气候区,多年平均降水量 1 627 mm,多年平均径流深 849 mm。流域以山区丘陵为主,土层较薄、土质松散,多年平均悬移质含沙量为 0.165 kg/m^3 ,多年平均年输沙量 $976 \times 10^4 \text{ t}$,主要集中在汛期,其中 4—6 月占 65.9%。流域内已经修建各类水库 4 000 余座,总库容量超过 110 亿 m^3 ,其中大中型水库 139 座。

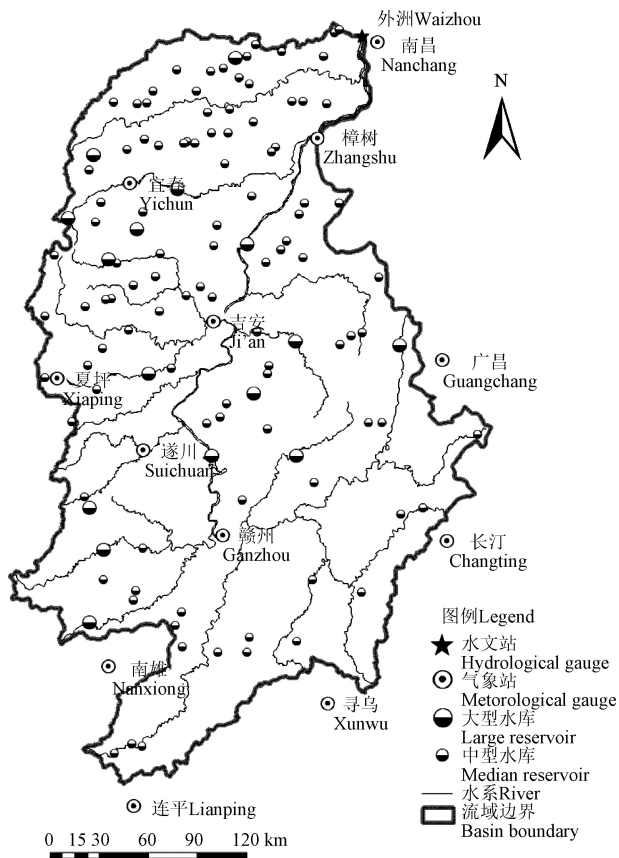


图 1 赣江流域站点和水库分布
Fig.1 Distribution of gauges and reservoirs in Ganjiang River Basin

赣江流域及周边 12 个气象站点 1958—2014 年逐日降水序列从中国气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/>) 获取,其中夏坪站缺测 14 年数据 (1999—2006 年, 2009—2014 年);外洲水文站 1958—2014 年逐日流量和含沙率序列由江西省水文监测中心提供;1958—2014 年赣江流域大中型水库资料由江西省大坝安全管理中心提供;基于历年江西省统计年鉴和中国统计

年鉴,采用面积加权法统计赣江流域历年的森林覆盖情况;赣江流域年输沙量由外洲站逐日流量和含沙率推算;基于 12 个气象站的年降雨侵蚀力运用泰森多边形法推求流域面降雨侵蚀力。1958—2014 年赣江流域年输沙量以及年降雨侵蚀力、森林覆盖率、水库调控系数序列见图 2。

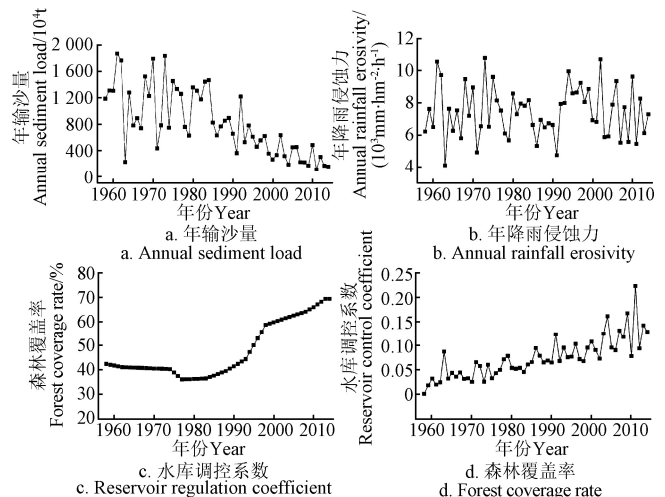


图 2 赣江流域年输沙量及协变量序列
Fig.2 Series of annual sediment load and its covariates in Ganjiang River Basin

1.2 年输沙量主要影响因素

降雨是南方地区水土流失的重要气象驱动因子,可利用降雨侵蚀力 (Re) 反映降雨对水土流失的影响,采用 Yu 等^[20]提出的基于日降雨量的月降雨侵蚀力模型。

$$Re_t = \sum_{i=1}^{12} \left(\alpha [1 + \eta \cos(2\pi fi + \omega)] \sum_{d=1}^{N_i} R_{i,d}^\beta \right) \quad (1)$$

式中 Re_t 为第 t 年的降雨侵蚀力, $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; $R_{i,d}$ 为第 i 月第 d 日超过侵蚀临界值 (本文取 12.7 mm/d) 的降雨量, mm ; N_i 为第 i 月中降雨量超过临界值的天数, d ; α 、 η 、 f 、 ω 、 β 均为模型参数, f 取 $1/12$, ω 取 $5\pi/6$ (北半球), β 取 1.5 , α 和 η 公式如下:

$$\alpha = \begin{cases} \exp(2.11 - 1.57\beta) & P_a \geq 1050 \\ 0.395 \{1 + 0.098^{[3.26(S/P)]}\} & 500 < P_a < 1050 \end{cases} \quad (2)$$

$$\eta = 0.58 + 0.25P/1000 \quad (3)$$

式中 S 为夏半年 (5—10 月) 降雨量, mm ; P_a 为年均降雨量, mm 。

在水保措施方面,郁闭度大于 0.2 的森林植被对区域水土保持作用显著^[21],流域森林覆盖面积以此郁闭度为统计标准。此外,流域干支流水库对河道输沙调控功能较强,将水库库容与河道径流量的比值作为水库调控系数^[22],可用于反映流域水利工程蓄水拦沙能力。本文分别选取森林覆盖率 (Fc) 和大中型水库调控系数 (Rc) 表征水保措施因素和水利工程因素,其中水库调控系数计算公式如下:

$$Rc_t = CV_t / R_t = \sum_{j=1}^J V_j / R_t \quad (4)$$

式中 R_{c_t} 为第 t 年流域大中型水库调控系数; CV_t 为第 t 年流域内兴建大中型水库的累积库容, 10^8 m^3 ; R_t 为第 t 年流域外洲站年径流量, 10^8 m^3 ; J_t 为第 t 年流域内兴建大中型水库的累积数量; V_j 为流域内第 j 个水库的库容, 10^8 m^3 。

1.3 年输沙量变化归因方法

1.3.1 时变矩模型

假设服从的分布线型不变, GAMLSS 模型^[23]可通过随机变量序列的统计参数与解释变量之间的线性或非线形关系模拟序列的时变矩。假定变量 y 服从概率密度为 $f(y|\theta) = f(y|\mu, \sigma, \nu)$ 的概率分布, 其中 μ, σ, ν 分别代表位置参数、尺度参数和形状参数, 由于形状参数 ν 非常敏感且难以估计, 通常只考虑位置参数 μ 和尺度参数 σ 的非一致性^[23]。结合物理协变量 Re 、 Fc 和 Rc , 可构建年输沙量时变矩模型, 其非一致性参数通式如下:

$$\begin{cases} g(\mu_t) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}_1 = \beta_{10} + \beta_{11}\text{Re}_t + \beta_{12}\text{Fc}_t + \beta_{13}\text{Rc}_t \\ g(\sigma_t) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}_2 = \beta_{20} + \beta_{21}\text{Re}_t + \beta_{22}\text{Fc}_t + \beta_{23}\text{Rc}_t \\ g(\nu) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}_3 = \beta_{30} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $g(\mu_t)$ 、 $g(\sigma_t)$ 、 $g(\nu)$ 为连接函数, 表示统计参数与解释变量之间的单调函数关系; $\mathbf{X} = [\text{Re}_t, \text{Fc}_t, \text{Rc}_t]$ 为协变量向量; $\boldsymbol{\beta}_1$ 、 $\boldsymbol{\beta}_2$ 、 $\boldsymbol{\beta}_3$ 为模型回归参数向量, 采用极大似然法求解。

在构建时变矩模型时, 选取两参数分布 (Gamma、Lognormal 和 Weibull) 和三参数分布 (Pearson-III) 共 4 种水文领域常用的概率分布函数作为年输沙量的分布函数^[24], 见表 1。采用 KS (Kolmogorov-Smirnov) 检验、残差 worm 图以及百分位数曲线图评价模型的拟合优度, 以检验水文序列是否服从备选概率分布函数。此外, 选取贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion, BIC) 作为评价备选模型优劣的标准, BIC 值越小则认为拟合效果越好。

表 1 4 种统计模型的概率分布
Table 1 Probability distribution of four statistical models

分布类型 Distribution type	概率密度函数 Probability density function	矩与参数的关系 Relationship between moments and distribution parameters
Gamma	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{1}{(\mu\sigma^2)^{1/\sigma^2}} \frac{z^{(1/\sigma^2)-1} \exp(-z/(\mu\sigma^2))}{\Gamma(1/\sigma^2)}$ $z > 0, \mu > 0, \sigma > 0$	$E(Z) = \mu$ $\text{Var}(Z) = \mu^2 \sigma^2$
Pearson-III	$f_z(z \mu, \sigma, \nu) = \frac{(z-\mu)^{1/\nu^2-1}}{\Gamma(1/\nu^2)(\sigma\nu^2)^{1/\nu^2}} \exp\left(-\frac{z-\mu}{\sigma\nu^2}\right)$ $z > \mu, \mu > 0, \sigma > 0, \nu > 0$	$E(Z) = \mu + \sigma$ $\text{Var}(Z) = \mu^2 \sigma^2$
Weibull	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{\sigma z^{\sigma-1}}{\mu^\sigma} \exp\left[-\left(\frac{z}{\mu}\right)^\sigma\right]$ $z > 0, \mu > 0, \sigma > 0$	$E(Z) = \mu \Gamma\left(1 + \frac{1}{\sigma}\right)$ $\text{Var}(Z) = \mu^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\sigma}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\sigma}\right) \right]^2 \right\}$
Lognormal	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{z} \exp\left(-\frac{(\ln(z) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ $z > 0, \mu > 0, \sigma > 0$	$E(Z) = \exp(\mu + \sigma^2/2)$ $\text{Var}(Z) = \exp(2\mu + \sigma^2)(\exp(\sigma^2) - 1)$

注: Z 和 z 分别为随机变量和随机变量的任意实数; $E(Z)$ 和 $\text{Var}(Z)$ 分别为水文序列的均值和方差; μ 、 σ 和 ν 分别为备选概率分布的位置参数、尺度参数以及形状参数。下同。

Note: Z and z are a random variable and corresponding any real number, respectively; $E(Z)$ and $\text{Var}(Z)$ are mean and variance of hydrological series, respectively; μ , σ and ν are location, scale and shape parameters of candidate distribution. Same as below.

1.3.2 基于时变矩的 BMA 方法

贝叶斯模型加权平均方法 (BMA) 是一种通过加权平均不同模型的结果得到更可靠的综合结果以及不确定性的数学方法^[25]。假设 y 为模拟变量, M 为实测数据资料, $[f_1, f_2, f_3, f_4]$ 表示拟合的 4 个时变矩组成的模型空间。基于时变矩 BMA 的概率模拟 $p(y|M)$ 可表示为

$$p(y|M) = \sum_{k=1}^4 p(f_k|M) \cdot p_k(y|f_k, M) \quad (6)$$

式中 $p(f_k|M)$ 是在观测数据 M 的条件下第 k 个分布 f_k 的后验概率, 或称为在给定数据条件下所选模型为最优模型的概率, 即 BMA 的权重 w_k , 预报精度越高的模型得到的权重越大, 且 $\sum_{k=1}^4 w_k = 1$ 。 $p_k(y|f_k, M)$ 是在模型 f_k 和观测数据 M 的条件下模拟变量 y 的后验分布。

期望最大化算法 (Expectation-Maximization, EM) 是一种求解极大似然估计的迭代算法^[18], 运用 EM 可估算 BMA 模拟变量概率分布参数 $\theta = \{w_k, \sigma_k^2\}$ ($k=1, 2, 3, 4$), 其后验分布均值 $E[y|M]$ 和方差 $\text{Var}[y|M]$ 可表示为

$$E[y|M] = \sum_{k=1}^4 p(f_k|M) \cdot E[p_k(y|f_k, M)] = \sum_{k=1}^4 w_k f_k \quad (7)$$

$$\text{Var}(y|M) = \sum_{k=1}^4 w_k \left(f_k - \sum_{k=1}^4 w_k f_k \right)^2 + \sum_{k=1}^4 w_k \sigma_k^2 \quad (8)$$

式中 σ_k^2 是模型 f_k 模拟变量的方差。

以基于时变矩的 BMA 方法以及 4 个时变矩模型的中位值作为模拟值, 采用均方根误差 (RMSE)、纳什效率系数 (NSE) 和相对误差 (RE) 3 项指标评价, 而区间模拟采用覆盖率 (Containing Ratio, CR)、平均带宽 (B) 和平均偏移程度 (D) 等 3 项指标评价。其中, RMSE、RE、 B 和 D 越小模型效果越好, 而 NSE 越大模型效果越好, CR 接近置信区间则效果越好。

1.3.3 基于时变矩 BMA 方法的归因分析

在多影响因素归因分析时, 应充分考虑某一因素受其他因素不同状态的影响, 分析该因素所有可能的分解贡献量, 取其平均值作为该因素的影响贡献量。主要有 3 个步骤^[26]: 1) 结合流域研究期内工程修建、水保措施

建设等情况，将样本序列时段划分为基准期和变化期；2) 选取表征气候变化和人类活动的影响因素并组成情景组合，运用模型遍历模拟所有组合下变化期的水文过程；3) 基于 Fixing-Changing 方法，分析不同组合的模拟差值即相应因素所对应的分解贡献量，取其均值为影响贡献量。赣江流域通过交叉组合降雨侵蚀、森林覆盖和水库调控 3 种影响因素的状态（即模型输入数据）遍历模拟可能情景组合，共 8 种，如表 2 所示。

表 2 不同影响因素情景组合

Table 2 Scenario combinations of different influence factors

情景组合 Scenario combinations	影响因素 Influence factors		
	降雨侵蚀 Rainfall erosivity	森林覆盖 Forest coverage	水库调控 Reservoir regulation
情景 1 Scenario 1	+	+	+
情景 2 Scenario 2	-	+	+
情景 3 Scenario 3	+	-	+
情景 4 Scenario 4	+	+	-
情景 5 Scenario 5	-	-	+
情景 6 Scenario 6	+	-	-
情景 7 Scenario 7	-	+	-
情景 8 Scenario 8	-	-	-

注：“-”表示该因素选取基准期均值；“+”表示该因素选取变化期实际值。
Note: “-” represents the mean value of the factor during the baseline period; “+” represents the measured value of the factor during the change period.

运用 EM 算法得到 BMA 权重 w_k 以及 4 种时变矩模型，采用 Monte Carlo 方法产生不同情景组合下年输沙量模拟值，从而量化不同影响因素的贡献量。具体步骤如下：

1) 对于每种时变矩模型，离散 1 000 个不及概率 p 生成第 t 年第 l 种情景组合下年输沙量分位数 $y_{t,l}^p$ 并构成模拟区间，公式如下：

$$y_{t,l}^p = qF(p | \hat{\mu}_{t,l}, \hat{\sigma}_{t,l}, \hat{\nu}) \\ = qF(p | \mu_{t,l}(X_{1,l} | \hat{\beta}_1), \sigma_{t,l}(X_{2,l} | \hat{\beta}_2), \nu(\hat{\beta}_3)) \quad (9)$$

式中 $qF(\cdot)$ 为模型的分位数函数； $\hat{\mu}_{t,l}$ 、 $\hat{\sigma}_{t,l}$ 、 $\hat{\nu}$ 为模型的分布参数； $X_{1,l}$ 、 $X_{2,l}$ 为分别为不同分布参数第 l 种情景组合的协变量向量； $\hat{\beta}_1$ 、 $\hat{\beta}_2$ 、 $\hat{\beta}_3$ 为模型回归参数向量。

2) 假设 BMA 权重为 $[w_1, w_2, w_3, w_4]$ ，则 4 种时变矩模型累积权重为 $w'_k = \sum_{i=1}^k w_i (k=1, 2, 3, 4)$ ，基于生成的 1 000 个随机数 $u (u \in [0, 1])$ ，依据随机数落入的累积权重范围选择时变模型。

3) 从所选模型的第 t 年第 l 种情景组合的年输沙量模拟区间中抽样，产生该种情景下该年的 1 000 个年输沙量模拟值。

表 3 基于物理协变量的年输沙量时变矩模型

Table 3 Time-varying moment models of annual sediment load based on physical covariates

分布类型 Distribution type	最优参数 Optimal value of the parameter	贝叶斯信息准则 Bayesian information criterion (BIC)	KS 检验 KS test	
			Dks	P-KS
Gamma	$\mu = \exp(1.222 + 0.770\text{Re} - 1.494\text{Fc} - 0.698\text{Rc})$ $\sigma = \exp(0.244 - 2.061\text{Re})$	-46.33	0.05	1.00
Pearson-III	$\mu = \exp(1.258 + 0.774\text{Re} - 1.517\text{Fc} - 0.719\text{Rc})$ $\sigma = \exp(0.177 - 1.945\text{Re})$ $\nu = 0.500$	-44.75	0.05	1.00
Weibull	$\mu = \exp(1.282 + 0.799\text{Re} - 1.619\text{Fc} - 0.593\text{Rc})$ $\sigma = \exp(0.383 + 1.447\text{Re})$	-37.20	0.11	0.91
Lognormal	$\mu = 0.881 + 1.071\text{Re} - 1.539\text{Fc} - 0.644\text{Rc}$ $\sigma = 0.061 + 0.127\text{Rc}$	-37.53	0.09	0.98

注：Re、Fc 和 Rc 分别代表降雨侵蚀力、森林覆盖率和水库调控系数 3 类影响因素；Dks 和 P-KS 分别为最大垂直差和通过概率。

Note: Re, Fc and Rc represent three influence factors of the rainfall erosivity, forest coverage rate and reservoir control coefficient, respectively; Dks and P-KS represent maximum vertical deviation and passing probability, respectively.

4) 将模拟的年输沙量按年从小到大排序，生成基于时变矩 BMA 方法的逐年年输沙量模拟过程，则第 t 年第 l 种情景组合不及概率为 p 的年输沙量模拟值为 $\hat{y}_{t,l}^p$ 。中位值模拟 p 取 50% 的模拟值，95% 置信区间 p 则取 2.5% 至 97.5% 分位数之间的数值。

5) 变化期第 t 年年输沙量与基准期均值之差 Δy_t ，即年输沙量的变化值。基于时变矩的 BMA 方法的不同因素对年输沙量变化的归因贡献量和贡献率计算公式如下：

$$\Delta y_{Re,t}^p = \frac{(\hat{y}_{1,t}^p - \hat{y}_{2,t}^p) + (\hat{y}_{3,t}^p - \hat{y}_{5,t}^p) + (\hat{y}_{4,t}^p - \hat{y}_{7,t}^p) + (\hat{y}_{6,t}^p - \hat{y}_{8,t}^p)}{4} \quad (10)$$

$$\Delta y_{Fc,t}^p = \frac{(\hat{y}_{1,t}^p - \hat{y}_{3,t}^p) + (\hat{y}_{2,t}^p - \hat{y}_{5,t}^p) + (\hat{y}_{4,t}^p - \hat{y}_{6,t}^p) + (\hat{y}_{7,t}^p - \hat{y}_{8,t}^p)}{4} \quad (11)$$

$$\Delta y_{Rc,t}^p = \frac{(\hat{y}_{1,t}^p - \hat{y}_{4,t}^p) + (\hat{y}_{2,t}^p - \hat{y}_{7,t}^p) + (\hat{y}_{3,t}^p - \hat{y}_{6,t}^p) + (\hat{y}_{5,t}^p - \hat{y}_{8,t}^p)}{4} \quad (12)$$

$$\Delta y_{Oth,t}^p = \Delta y_t - \Delta y_{Re,t}^p - \Delta y_{Fc,t}^p - \Delta y_{Rc,t}^p \quad (13)$$

$$\eta_{m,t}^p = \frac{\Delta y_{m,t}^p}{\Delta y_t} \times 100\% \quad (14)$$

式中 $\Delta y_{Re,t}^p$ 、 $\Delta y_{Fc,t}^p$ 、 $\Delta y_{Rc,t}^p$ 和 $\Delta y_{Oth,t}^p$ 分别代表降雨侵蚀、森林覆盖和水库调控以及其他因素第 t 年不及概率为 p 情况下对年输沙量变化的贡献量， t/a ； $\eta_{m,t}^p$ 为第 t 年不及概率为 p 情况下第 m 种影响因素（降雨侵蚀、森林覆盖、水库调控、其他因素）的贡献率。

2 结果与分析

2.1 赣江流域年输沙量模拟

当只考虑位置参数 μ 和尺度参数 σ 的时变特性时，模型时变参数划分为 4 类组合形式：1) μ 和 σ 为常数（即一致性，可认为是非一致性的特例）；2) μ 为时变而 σ 为常数；3) μ 为常数而 σ 为时变；4) μ 和 σ 均为时变。当涉及多个物理协变量时，根据协变量组合可进一步分为多种具体参数组合。不同分布类型年输沙量最优时变矩模型见表 3，模型拟合变量经过除均值无量纲化处理，显著水平选为 0.05，当 P-KS > 0.05 时，模型通过检验，否则模型不通过检验。从表 3 可见，赣江流域年输沙量模型最优参数均表现为时变特征，且年输沙量时变性可由 3 种物理协变量表征。根据 KS 检验可知，基于最优参数的 4 个时变矩模型均能通过显著性水平为 0.05 的拟合优度检验，且模型的 BIC 值均较小，因此认为 4 个模型均是合理可行的。

基于 4 种年输沙量时变矩模型 (表 3), 运用 BMA 方法模拟赣江流域年输沙量变化, 其似然函数的收敛过程如图 3 所示。迭代结果表明, Gamma、Pearson-III、Weibull 和 Lognormal 时变矩模型的权重分别为 0.225、0.245、0.255、0.275。表 4 列出了 BMA 和组成它的 4 个时变矩模型的年输沙量模拟精度。从表 4 可知, BMA 结果中位值的 RMSE、NSE 和 RE 指标值均优于单个时变矩模型, RMSE、NSE 和 RE 分别为 $125.96 \times 10^4 \text{ t/a}$ 、0.93 和 11.41%, 具有很好的模拟效果; 对于 95% 置信区间, BMA 方法的平均带宽 B 值较单个时变矩模型更小, 即不确定性区间变小, 为 $481.38 \times 10^4 \text{ t/a}$, 且覆盖率 CR 值为 94.47%, 但平均偏移程度 D 值较单个模型没有显著优势。总体上, 时变矩的 BMA 方法较组成它的单个模型在模拟年输沙量的精度和区间上表现得更为优越。

表 4 BMA 和 4 个时变矩模型年输沙量模拟效果

Table 4 Simulation evaluation of annual sediment load of BMA and four time-varying moment models

分布类型 Distribution type	中位值 Median			95%置信区间 95% confidence interval		
	RMSE/ 10^4 t	NSE	RE/%	覆盖率 Containing ratio CR/%	平均带宽 Average band-width $B/10^4 \text{ t}$	平均偏移程度 Average deviation amplitude $D/10^4 \text{ t}$
Gamma	128.57	0.93	11.60	96.49	511.81	103.25
Pearson-III	128.55	0.93	11.50	94.74	528.93	122.53
Weibull	128.74	0.93	11.77	98.25	571.10	103.25
Lognormal	128.82	0.93	11.76	92.98	494.32	103.27
BMA	125.96	0.93	11.41	94.74	481.38	105.22

基于时变矩 BMA 方法的年输沙量序列百分位数模拟曲线及其残差 worm 图如图 4 所示。从图 4 可知, 年输沙量模拟的中位数较好地拟合了年输沙量实测样本点据, 95% 置信区间也较好地覆盖了实测样本点据; 残差 worm 图中偏差位于允许范围内且接近 0, 说明模型分位残差近似服从正态分布, 表明基于时变矩的 BMA 方法对赣江流域年输沙量模拟效果很好。

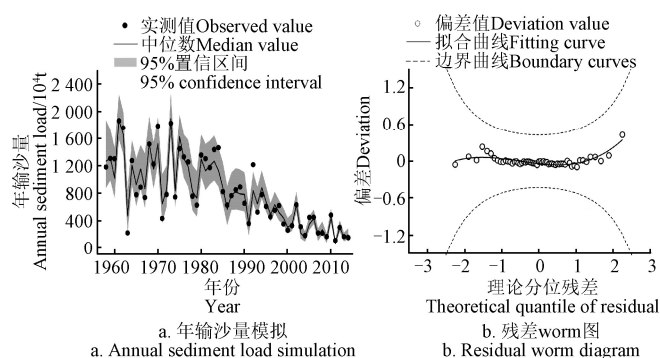


图 4 基于时变矩 BMA 方法的年输沙量分位数曲线及残差检验
Fig.4 Quantile curve and residual test of annual sediment load using BMA based on time-varying moment model

2.2 赣江流域年输沙量归因分析

采用 Pettit 变点分析法诊断 1958—2014 年赣江流域年输沙量序列的突变点为 1989 年, 进一步以时间 $t(a)$ 为协变量构造变点前后参数的时变性, 采用 4 种统计模型 (表 1) 诊断赣江流域年输沙量的非一致性特征。20 世纪 80 年代至 21 世纪初江西省实施了植树造林、梯田工程等

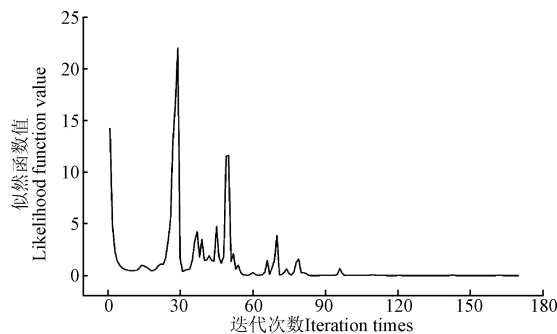


图 3 贝叶斯模型加权平均方法 (BMA) 的迭代收敛过程
Fig.3 Iteration process of Bayesian Model Averaging method (BMA)

一系列水土流失治理工程, 近 30 年赣江流域水土流失呈减少趋势^[27], 结合非参数突变检验结果, 诊断为 1989 年后赣江流域年输沙量呈减少的趋势性变化较为合理。以 BIC 为优选准则, Gamma 模型的 BIC 值最小, 为最优模型, 基于 Gamma 分布的时变矩模型为年输沙量模拟过程如图 5 所示。从图 5 可知, 1958—2014 年赣江流域年输沙量为局部趋势变化, 即 1958—1989 年为稳定期, 而 1990—2014 年为下降趋势。因此, 本文选择 1958—1989 年为基准期, 定量归因分析 1990—2014 年赣江流域年输沙量的变化。

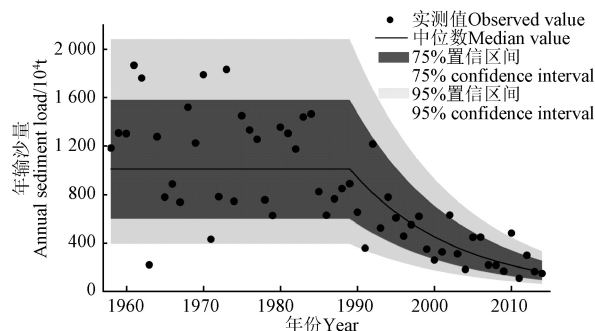


图 5 1958—2014 年赣江流域年输沙量的非一致性
Fig.5 Nonstationarity of annual sediment load in Ganjiang River Basin from 1958 to 2014

以基准期 (1958—1989 年) 和变化期 (1990—2014 年) 的物理协变量作为模型输入数据, 根据表 2 的情景组合运用时变矩 BMA 方法模拟赣江流域变化期逐年年输沙量, 如图 6 所示。根据式 (10)~式 (14), 利用

不同情景组合的差值分离年降雨侵蚀、森林覆盖和水库调控以及其他因素对赣江流域年输沙量变化的贡献。变化期赣江流域年输沙量逐年定量归因结果如图 7 所示。

从图 7 可知，年降雨侵蚀在多数年份增加了赣江流域年输沙量，而森林覆盖和水库调控有效地削减了流域年输沙量。

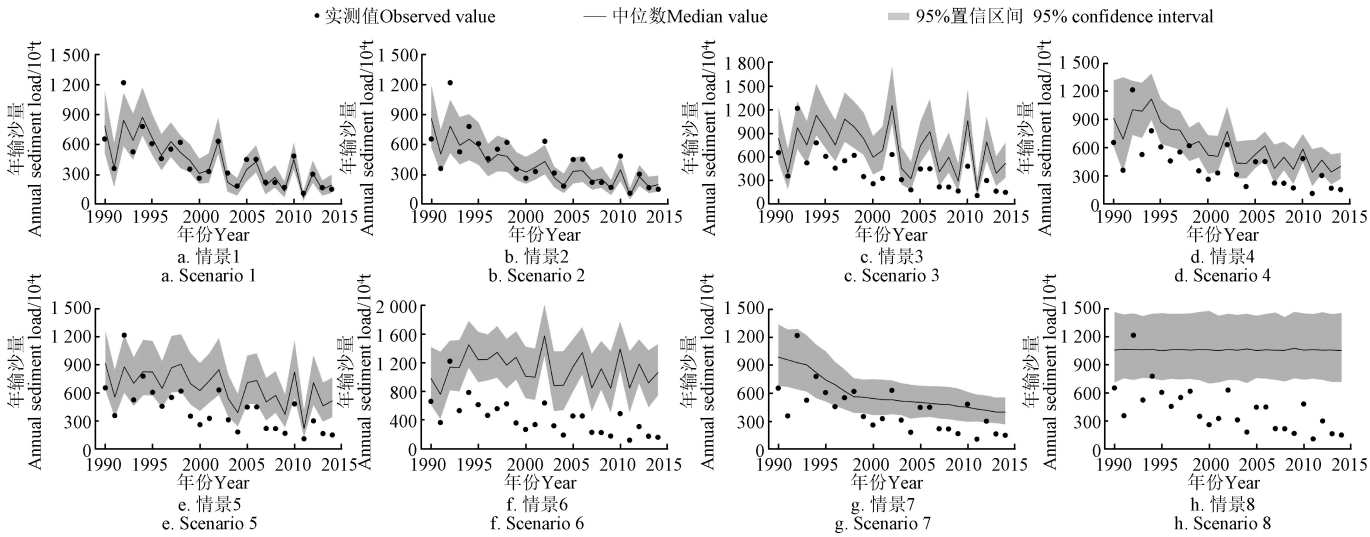


图 6 1990—2014 年不同情景下年输沙量模拟

Fig.6 Simulation of annual sediment load under different scenarios from 1990 to 2014

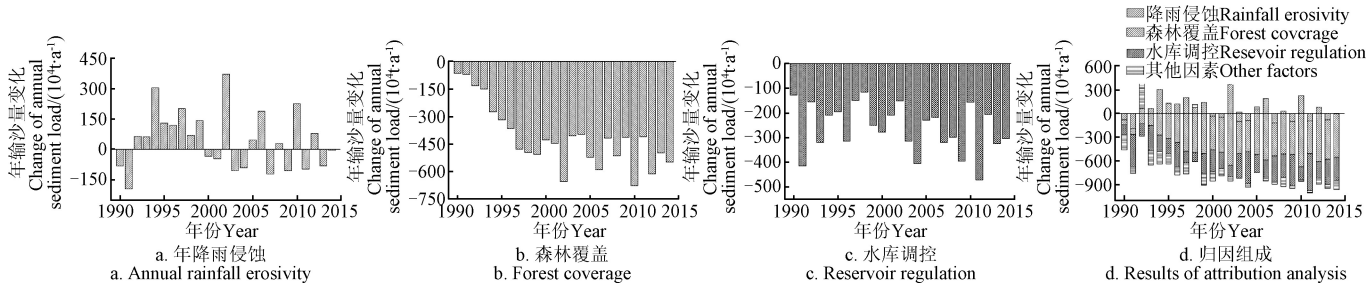


图 7 1990—2014 年年输沙量变化逐年归因结果

Fig.7 Annual attribution results of annual sediment load from 1990 to 2014

赣江流域不同时段 3 个影响因素对年输沙量变化的贡献量变化情况见表 5。1990—1994 年、2000—2014 年和 1990—2014 年 3 个时段森林覆盖的贡献量四分位区

间均为最大，其次为水库调控，降雨侵蚀的贡献变幅最小。对于赣江流域影响因素贡献量的中位数，不同时段年输沙量变化归因结果见表 6。

表 5 不同时段 3 个影响因素的贡献量区间和中位数

Table 5 Contribution interval and median value of three influence factors on annual sediment load in different periods

时段 Period	降雨侵蚀 Rainfall erosivity		森林覆盖 Forest coverage		水库调控 Reservoir regulation	
	四分位区间 Interquartile range/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	中位数 Median value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	四分位区间 Interquartile range/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	中位数 Median value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	四分位区间 Interquartile range/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	中位数 Median value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)
1990—1994	[64.41,97.93]	81.66	[−316.30, −256.86]	−284.85	[−254.20, −213.54]	−225.28
2000—2014	[4.15,31.36]	17.28	[−567.97, −445.93]	−501.37	[−325.87, −270.49]	−285.56
1990—2014	[28.25,57.99]	43.03	[−467.30, −370.30]	−414.77	[−297.20, −247.71]	−261.44

表 6 不同时段年输沙量变化归因结果

Table 6 Attribution results of annual sediment load in different periods

时段 Period	降雨侵蚀 Rainfall erosivity		森林覆盖 Forest coverage		水库调控 Reservoir regulation		其他因素 Other factor	
	贡献量 Contribution value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	贡献率 Contribution percentage/%	贡献量 Contribution value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	贡献率 Contribution percentage/%	贡献量 Contribution value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	贡献率 Contribution percentage/%	贡献量 Contribution value/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	贡献率 Contribution percentage/%
1990—1994	30.89	−7.53	−137.83	33.59	−245.52	59.84	−57.84	14.10
1995—1999	132.35	−22.08	−432.00	72.06	−205.05	34.21	−94.76	15.81
2000—2004	19.33	−2.50	−465.28	60.13	−271.58	35.10	−56.23	7.27
2005—2009	7.76	−0.95	−490.86	60.18	−292.18	35.82	−40.35	4.95
2010—2014	24.64	−2.82	−548.39	62.71	−292.93	33.50	−57.85	6.61
1990—2014	42.99	−6.19	−414.87	59.72	−261.45	37.63	−61.40	8.84

相对于基准期,以 1990—2014 年为例,降雨侵蚀增加年输沙量为 42.99×10^4 t/a,占年输沙变化总量的 -6.19%,表明赣江流域变化期侵蚀性降雨量较基准期有所增加;森林覆盖和水库调控减少年输沙量分别为 414.87×10^4 和 261.45×10^4 t/a,占变化总量的 59.72%和 37.63%,表明变化期植树造林和水库修建等人类活动变化显著,且对赣江流域年输沙量减少起主要作用;其他因素减少年输沙量 61.40×10^4 t/a,占变化总量 8.84%,进一步表明基于时变矩的 BMA 方法可以很好地解释和分离赣江流域年输沙量的变化贡献。总体而言,在不同时段中,降雨侵蚀对年输沙量变化的贡献较小,其最大贡献位于 1995—1999 年,占比 -22.08%;除 1990—1994 年外,森林覆盖较水库调控对年输沙量变化的贡献更大,占比在 60%以上;其他因素的影响在 2000 年以后对年输沙量变化的贡献均在 10%以下,在变化期的不同时段人类活动的贡献均在 90%以上,表明植树造林、水库调控等人类活动是引起赣江流域年输沙量减少的主要因素。

表 7 不同方法的年输沙量变化归因对比

Table 7 Attribution comparison of annual sediment load using different methods

时段 Period	基于时变矩的 BMA 方法		双累积曲线法		产沙函数法		%
	BMA based on time-varying moment models		Double cumulative curve method		Sediment yield function method		
	降雨变化	人类活动	降雨变化	人类活动	降雨变化	人类活动	
	Rainfall change	Human activities	Rainfall change	Human activities	Rainfall change	Human activities	
1990—1999	−16.17	116.17	−29.38	129.38	−34.18	134.18	
2000—2014	−2.10	102.10	1.16	98.84	−0.28	100.28	
1990—2014	−6.19	106.19	−7.72	107.72	−10.13	110.13	

3 讨 论

1980—2012 年鄱阳湖“五河”流域入湖泥沙呈显著减少的变化特征,降水量对流域泥沙变化无显著影响,水利、水保及林业工程等人类活动是径流泥沙变化的主要影响因素^[28]。对于赣江流域,1970—2009 年年输沙量显著减少,主要受水土保持综合治理和水利工程拦沙等人类活动影响,而流域年降水量影响较小^[29]。1970—2011 年赣江外洲站入鄱阳湖泥沙量年际波动较大,总体呈明显减少趋势,水土保持措施的实施、水利工程的修建等人类活动是入湖泥沙减少的主要驱动力。1993—2011 年期间,人类活动对入湖泥沙减少的贡献率增大到 97.24%。本研究结果表明,1990—2014 年赣江流域年输沙量呈明显减少趋势,森林覆盖和水库调控的贡献率达 106.19%,人类活动仍然是导致赣江年输沙量减少的主要因素,但流域降雨侵蚀力的增强增加了流域水土流失的风险。

近 30 年赣江流域开展了大量的植树造林、水库修建等人类活动。森林覆盖是山丘区影响水土侵蚀和坡面产流的重要影响因素之一,森林覆盖程度和质量越高,区域水土保持能力将越强^[30]。20 世纪 80 年代初期,赣江上游山区丘陵区是江西省水土流失最严重的地区之一,水土流失面积占流域面积的 21.9%,曾是全国八片水土保持治理区之一。近 30 年,赣江流域先后实施了全国八片水

2.3 不同方法归因结果对比

为了对比不同归因方法的差异,本文引入了双累积曲线法^[6]和产沙函数法^[27]对赣江流域年输沙量变化进行归因分析。对于产沙函数法,外洲站的径流、降雨的产沙弹性系数由灰色关联分析法确定,分别为 0.710 和 0.436。基于时变矩的 BMA 方法中,降雨侵蚀引起的年输沙量变化为降雨变化的贡献,其余(森林覆盖、水库调控、其他因素)归为人类活动的贡献。不同方法的年输沙量变化归因对比见表 7。

由表 7 可知,不同方法的定量归因结果相近,不同时段人类活动均是引起赣江流域年输沙量减少的主要原因。然而,基于时变矩的 BMA 方法通过一阶矩和二阶矩反映样本序列均值和方差的时变性,而双累积曲线和产沙函数仅考虑样本均值的线性关系。结果表明不同时期基于时变矩的 BMA 方法较其他 2 种方法结果变化范围较小,可以更准确地模拟年输沙量的非一致性变化过程,定量归因分析结果也更为合理可靠。

水土保持重点治理、国家水土保持重点建设工程、鄱阳湖流域水土保持重点治理工程等一系列重点水保工程^[29],累计完成 420 余条小流域综合治理,治理区域的拦沙效率达 60%以上^[31]。植树造林、退耕还林等措施大幅提升了流域森林覆盖率,2014 年森林覆盖率较 1985 年提高了近 40%,主要分布混交林、常绿针叶林、阔叶林和耕地 4 种森林类型,较大地提高了流域坡面水土保持能力。20 世纪 50 年代以来,赣江流域修建了各类水库 4 540 余座(截至 2018 年),总库容约 126.81 亿 m^3 ,占流域多年平均流量的 18.92%,其中大型水库 16 座,库容占总库容的 50%以上。水库在拦蓄赣江流域年输沙量过程中发挥了重要的作用,年输沙量与累积库容之间存在负相关性,相关系数达 -0.470。万安水库控制面积占流域上游面积的 90%以上,年均拦蓄沙量约 300×10^4 t,约占人类活动贡献的 35%,对于拦蓄赣江流域年输沙量发挥着十分重要的作用^[15]。

此外,长江中下游和江南地区的极端降水事件持续时间较长,可用降雨侵蚀力有效表征降雨引起土壤侵蚀的潜在能力^[32]。赣江流域年降雨侵蚀力略有上升趋势,其中 7—9 月降雨侵蚀力上升趋势显著,导致流域年输沙量受降雨影响呈增加趋势^[33]。但受沿东南登陆的台风型降雨影响,赣江流域降雨侵蚀力空间差异明显,流域上游区(即赣南地区)年降雨侵蚀力略有下降,中下游区年降雨侵蚀力呈上升趋势,且人类活动较为明显。在流域水土保持综合规划与管理过程中,除了水保措施和水

利工程等因素外, 还应考虑流域降雨空间变化区别不同因素综合作用, 提出更科学合理的流域水土流失综合治理的对策与措施。

4 结 论

1) 对于赣江流域而言, 引入降雨侵蚀、森林覆盖和水库调控等 3 种影响因素作为物理协变量, 基于时变矩的 BMA 方法较单个时变矩模型在模拟精度和区间上均有更好的表现, 纳什效率系数 (NSE) 为 0.93, 且覆盖率接近 95%; 通过遍历不同影响因素的组合情景, 基于时变矩的 BMA 方法可以实现 3 个及以上因素归因分析, 量化不同概率下各个影响因素对年输沙量变化贡献值的大小和区间范围。

2) 1990—2014 年赣江年输沙量呈明显的下降趋势变化, 植树造林和大中型水库调控等 2 项人类活动对流域年输沙量减少的贡献率分别为 59.72% 和 37.63%, 其他影响因素的贡献率为 8.84%, 而降雨侵蚀力在一定程度上增加了流域的年输沙量, 贡献率为 6.19%。表明自 1990 年以来赣江流域实施的一系列水土流失治理工程有效地减少了坡面侵蚀并拦蓄河道输沙量。

参 考 文 献

- [1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1): 111-126.
- [2] Liu C, Sui J Y, He Y, et al. Changes in runoff and sediment load from major Chinese rivers to the Pacific Ocean over the period 1955—2010[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(4): 486-495.
- [3] 王小博, 朱永清, 吴宜进, 等. 不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 6-11.
Wang Xiaobo, Zhu Yongqing, Wu Yijin, et al. Effects of rainfall regimes on soil erosion on red soil slopes under different vegetation types[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 6-11. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李瑞, 陈康, 刘瑞禄, 等. 基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 139-147.
Li Rui, Chen Kang, Liu Ruilu, et al. Characteristics of runoff and sediment in karst area of northern Guizhou province based on small watershed scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(11): 139-147. (in Chinese with English abstract)
- [5] 彭浩, 李忠武, 刘春, 等. 湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 60-67.
Peng Hao, Li Zhongwu, Liu Chun, et al. Comprehensive response characteristics of runoff and Sediment yield on rainfall, soil type and water conservation measures in hilly area of central Hunan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 60-67. (in Chinese with English abstract)
- [6] 高海东, 刘晗, 贾莲莲, 等. 2000—2017 年河龙区间输沙量锐减归因分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1745-1757.
Gao Haidong, Liu Han, Jia Lianlian, et al. Attribution analysis of precipitous decrease of sediment loads in the Hekou-Longmen section of Yellow River since 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1745-1757. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李勉, 李平, 杨二, 等. 黄土丘陵区淤地坝建设后小流域泥沙拦蓄与输移特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 80-86.
Li Mian, Li Ping, Yang Er, et al. Characteristics of sediment retention and transport in small watershed after construction of check dams in Loess Hilly Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(18): 80-86. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 117-124.
Wang Xuesong, Xie Yongsheng. Hydrodynamic characteristics of tapered spoil bank under simulated rainfall condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(1): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [9] 景昭伟, 何洪鸣, Soksamng Keo, 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 Zhaowei, He Hongming, Sokamng Keo, et al. The distributional patterns of sediment loads of global rivers and influencing factors[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2017, 31(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郑江坤, 李静苑, 秦伟, 等. 川北紫色土小流域植被建设的水土保持效应[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 141-147.
Zheng Jiangkun, Li Jingyuan, Qin Wei, et al. Effects of vegetation construction on soil and water conservation in small watershed of purplish soil region, northern Sichuan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(2): 141-147. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李晓宇, 刘晓燕, 李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响[J]. *水利学报*, 2016, 47(10): 1253-1259, 1268.
Li Xiaoyu, Liu Xiaoyan, Li Zhuo. Effects of rainfall and underlying surface on sediment yield in the main sediment-yielding area of the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(10): 1253-1259, 1268. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡春宏, 王延贵, 张燕菁, 等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 524-532.
Hu Chunhong, Wang Yangui, Zhang Yanjing, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 524-532. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨媛媛, 李占斌, 任宗萍, 等. 人类活动对无定河流域不同地貌区水沙变化的影响[J]. *泥沙研究*, 2017, 42(5): 50-56.
Yang Yuanyuan, Li Zhanbin, Ren Zongping, et al. The influence of human activities on the changes of water and sediment in different landforms[J]. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(5): 50-56. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [14] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119.
Zhao Yang, Hu Chunhong, Zhang Xiaoming, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 112-119. (in Chinese with English abstract)
 - [15] Wen T F, Xiong L H, Jiang C, et al. Effects of climate variability and human activities on suspended sediment load in the Ganjiang River basin, China[J]. J Hydrol Eng, 2019, 24(11): 05019029.
 - [16] 蒋凯鑫, 于坤霞, 曹文洪, 等. 黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 143-149.
Jiang Kaixin, Yu Kunxia, Cao Wenhong, et al. Attributional comparative analysis of runoff and sediment change in typical basin of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 143-149. (in Chinese with English abstract)
 - [17] 熊立华, 江聪, 杜涛, 等. 变化环境下非一致性水文频率分析研究综述[J]. 水资源研究, 2015, 4(4): 310-319.
Xiong Lihua, Jiang Cong, Du Tao, et al. Review on nonstationary hydrological frequency analysis under changing environments[J]. Journal of Water Resources Research, 2015, 4(4): 310-319. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 董磊华, 熊立华, 万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1065-1074.
Dong Leihua, Xiong Lihua, Wan Min. Uncertainty analysis of hydrological modeling using the Bayesian model averaging method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1065-1074. (in Chinese with English abstract)
 - [19] 江西省水利厅. 江西河湖大典[M]. 武汉: 长江出版社, 2009.
 - [20] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales[J]. Aust J Soil Res, 1996, 34(1): 139-152.
 - [21] Magdon P, Kleinn C. Uncertainties of forest area estimates caused by the minimum crown cover criterion: A scale issue relevant to forest cover monitoring[J]. Environ Monit Assess. 2013, 185(6): 5345-5360.
 - [22] 王延贵, 史红玲, 刘茜. 水库拦沙对长江水沙态势变化的影响[J]. 水科学进展, 2014, 7(25): 467-476.
Wang Yangui, Shi Hongling, Liu Qian. Influence of sediment trapping in reservoirs on runoff and sediment discharge variations in Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2014, 7(25): 467-476. (in Chinese with English abstract)
 - [23] Rigby R A, Stasinopoulos D M. Generalized additive models for location scale and shape[J]. J Royal Statistical Soc, 2005, 54(3): 507-554.
 - [24] 熊斌, 熊立华. 基于基流退水过程的非一致性枯水频率分析[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 873-883.
Xiong Bin, Xiong Lihua. Nonstationary frequency analysis of low-flow series considering both baseflow recession process and rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(7): 873-883. (in Chinese with English abstract)
 - [25] Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles[J]. Mon Weather Rev, 2005, 113(5): 1155-1174.
 - [26] 刘佳嘉, 周祖昊, 贾仰文, 等. 水循环演变中多因素综合影响贡献量分解方法[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 658-665.
Liu Jiajia, Zhou Zuhao, Jia Yangwen, et al. A new method to quantitatively separate the effects of multi-factors on the water cycle evolution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 658-665. (in Chinese with English abstract)
 - [27] 涂安国, 杨洁, 李英, 等. 人类活动对赣江入湖泥沙量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 76-79.
Tu Anguo, Yang Jie, Li Ying, et al. Effect of human activities on sediment load evolution into Poyang Lake from Ganjiang River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 76-79. (in Chinese with English abstract)
 - [28] 莫明浩, 杨筱筱, 肖胜生, 等. 鄱阳湖五河流域入湖径流泥沙变化特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 197-203.
Mo Minghao, Yang Xiaoxiao, Xiao Shengsheng, et al. Analysis on runoff and sediment change characteristics and factors of Poyang Lake five rivers basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5): 197-203. (in Chinese with English abstract)
 - [29] 郑海金, 方少文, 杨洁, 等. 近 40 年赣江年径流泥沙变化及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 28-32.
Zheng Haijin, Fang Shaowen, Yang Jie, et al. Analysis on evolution characteristics and impacting factors of annual runoff and sediment in the Ganjiang River during 1970—2009[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 28-32. (in Chinese with English abstract)
 - [30] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(3/4): 247-258.
 - [31] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 赣江流域径流量和输沙量的变化过程及其对人类活动的响应[J]. 泥沙研究, 2016(3): 38-44.
Gu Chaojun, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Variation of runoff and sediment discharge and response to human activities in the Ganjiang River[J]. Journal of Sediment Research, 2016(3): 38-44. (in Chinese with English abstract)
 - [32] 赖成光, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159-167.
Lai Chengguang, Chen Xiaohong, Wang Zhaoli, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity on Pearl River basin during 1960—2012[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 159-167. (in Chinese with English abstract)
 - [33] 温天福, 张范平, 胡建民, 等. 1958—2014 年赣江流域降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 7-14, 20.
Wen Tianfu, Zhang Fanping, Hu Jianmin, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity during the period 1958—2014 in Ganjiang River basin. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 7-14, 20. (in Chinese with English abstract)

Attribution analysis of annual sediment load of Ganjiang River Basin using BMA based on time-varying moment models

Wen Tianfu¹, Xiong Lihua², Jiang Cong³, Xu Xinfu¹, Liu Zhangjun¹

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Suspended sediment is a key driving factor in river evolution and ecosystem stability. However, there is a significant change in the annual suspended sediment loads in many basins under a current rapidly changing environment. Therefore, it is highly demanding to clarify the influencing factors and their attributions for the suspended sediment, thereby improving control measures of soil and water loss in basins. Taking the Ganjiang River in the Poyang Lake Basin of China as an example, the forest coverage rate increased by nearly 40% in the last 30 years, where there were 139 large and medium-sized reservoirs in 2014. In this study, the annual suspended sediment of the Ganjiang River Basin was firstly determined during the period of 1958-2014. Then, time-varying moment models were constructed for different types of probability distributions, where the factors of rainfall erosivity, forest coverage, and reservoir regulation were taken as explanatory variables. Finally, the Bayesian Model Averaging (BMA) was selected to combine four time-varying moment models for the simulation of annual suspended sediment load, and thereby to separate the attributions of different factors. The results were as follows: 1) Rainfall erosivity, forest coverage, and reservoir regulation were all key factors affecting the suspended sediment load. The time-varying moment model was constructed using four probability distributions (Gamma, Pearson-III, Weibull, Lognormal) considering the time-varying of location and scale parameters, where the rainfall erosivity (Re), forest coverage rate (Fc), and reservoir regulation coefficient (Rc) were utilized as physical covariables. The distribution characteristics and process changes of annual sediment load were reasonably described in the study areas, with a Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient (NSE) of 0.93; 2) BMA improved the simulation effect, while reduced model uncertainty, compared with the single time-varying moment model. The Root Mean Square Error (RMSE) and Relative Error (RE) of simulated value were 125.96×10^4 t/a, and 11.41%, respectively. The Containing Ratio (CR) and average band-width (B) of uncertainty interval were 94.47%, and 481.38×10^4 t/a, respectively. A fixing-changing method was selected to perform the attribution analysis of suspended sediment load using BMA under various scenario combinations. 3) The annual suspended sediment load showed a local trend in the study area from 1958 to 2014, with the change point year of 1989. There was a significant decreasing trend of annual suspended sediment load at the 5% significance level during the period from 1990 to 2014, due possibly to the increase of forest coverage during the regulation of large and medium-sized reservoirs. Specifically, the decreased sediment loads were 414.87×10^4 and 261.45×10^4 t/a, for the increase of forest coverage and reservoirs in 1958-1989, indicating a great contribution of 59.72% and 37.63%, respectively. The factor of rainfall erosivity increased the suspended sediment load by about 42.99×10^4 t/a, whereas, the forest coverage and reservoir regulation caused the decrease of 61.40×10^4 t/a. Furthermore, the decrease of suspended sediment load was actually caused by human activities, indicating better agreement with the conclusions obtained by the double cumulative curve and sediment yield function. The dynamic characteristics of the first and second moment were well elucidated in the observed samples using the BMA based on time-varying moment models, with an exact description for the mean value and variance. Therefore, the attribution analysis on the suspended sediment load was more objective and reliable in practice. Some recommendations were made here to strengthen the protection of forest resources, and the scientific regulation of large and medium-sized reservoirs, further to improve the control ability of water and soil loss in the Ganjiang River Basin.

Keywords: models; reservoirs; sediment load; BMA method; attribution analysis; nonstationarity; multi-factors; Ganjiang River Basin