

基于 Extend FAST 方法的新安江模型 参数全局敏感性分析*

任启伟¹, 陈洋波¹, 舒晓娟^{1,2}

(1. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;
2. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635)

摘要: 模型参数敏感性分析可以诊断模型结构、识别模型关键参数, 是模型建立和应用的关键步骤。该文应用高效、稳健的 Extend FAST 方法, 以流溪水库入库洪水模拟为例分析新安江模型参数的全局敏感性。结果表明, 对 Nash-Sutcliffe 效率系数、总水量平衡误差系数、低水流量误差系数、高水流量误差系数四个目标函数, 模型参数敏感性表现不同。Extend FAST 方法的部分结果与 GLUE 方法的结果进行对比, 两者对敏感性评价的结果基本一致, Extend FAST 给出的主要敏感度和参数组合作用的敏感度也可以作为模型不确定性分析的依据。

关键词: Extend FAST; 新安江模型; 全局敏感性; GLUE; 不确定性

中图分类号: P349 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)03-0127-08

Global Sensitivity Analysis of Xinanjiang Model Parameters Based on Extend FAST Method

REN Qiwei¹, CHEN Yangbo², SHU Xiaojuan^{1,2}

(1. Geography and Planning School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering,
Guangzhou 510635, China)

Abstract: Sensitivity analysis is an efficient approach to diagnose model structure and identify the dominant parameters controlling model behavior. It is also a key step in modeling practice. The global sensitivity of parameters of the Xinanjiang model is analyzed using Extend FAST method in the Liuxihe reservoir catchment. Results show that the sensitivity of four object functions perform is different. The sensitivity can be influenced by many factors, such as the initial condition and flood type. The results are compared with the scatter map generated by the GLUE uncertainty method. Both methods can get comparable sensitivity analysis results. The main effect sensitivity and interaction effect sensitivity calculated by Extend FAST also supply quantitative indices to help understand the uncertainty in hydrological model.

Key words: Extend FAST; Xinanjiang model; Global sensitivity; GLUE; Uncertainty

新安江模型适用于湿润和半湿润地区, 在国内外得到广泛的应用^[1]。赵人俊等^[2-5]提出新安江模型后, 对模型参数的取值进行了详细的研究, 并指出了各个参数的敏感性特点。赵人俊等^[5]认为参数的独立性特别重要, 只要有相关程度较高的参数存在, 其解就不稳定。这与 Keith Beven 等^[6]

提出的“异参同效”概念相同, 都揭示了水文模型中参数相互作用的现象。在应用模型时就需要考虑参数之间相互关联的程度如何, 及它们对结果的影响; 哪些参数对模型输出不确定性的影响更大, 及其贡献率。

不确定性分析和敏感性分析是研究复杂模拟系

* 收稿日期: 2009-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479033); 广东省科技计划基金资助项目(2009A030302003)

作者简介: 任启伟(1980年生), 男, 博士研究生; E-mail: reqiwei@gmail.com

统的有效方法,可用于分析模型参数、结构对输出的影响^[7]。不确定性分析主要评价输入参数的不确定性如何通过模型的结构传播到模型输出;敏感性分析则是评价不确定的模型参数对模型输出不确定性的贡献率,两种方法具有一定的相似性。比如目前广泛应用的水文模型不确定分析方法普适似然不确定性估计(GLUE)^[6],是在早期的普通敏感性分析方法(GSA)的基础上发展而来^[8],该方法给出的散点图常常作为参数敏感性的依据。舒畅等^[9]依据GLUE方法的散点图分析了新安江模型参数的敏感性。

敏感性分析方法可分为2类:局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性分析评价模型输出的局部响应,它的优点在于操作容易,对于“异参同效”现象非常普遍的水文模型,局部敏感性分析有其局限性。全局敏感性分析在整个参数空间进行,分析多个参数对模型输出总的的影响,适合于水文模型的研究。全局敏感性分析方法又可分为定性全局敏感性分析和定量全局敏感性分析。定性敏感性分析方法包括多元回归法^[10], Morris法^[16]、傅里叶幅度灵敏度检验法(FAST)等^[12]。定量敏感性分析方法包括基于方差分析的Sobol法和扩展傅里叶幅度灵敏度检验法(Extend FAST)等^[13-14]。目前,对水文模型进行全局敏感性分析逐渐成为研究热点^[15-16]。通过定量化参数的敏感性,一方面可以在优化过程中重点考虑高敏感参数而给更精确的值,减少模型不确定性;另一方面可以通过参数相互作用的敏感性,来评价模型模拟的不确定性程度。

本文以广州市流溪河水库入库洪水模拟为例,应用高效的Extend FAST方法对三水源新安江模型参数进行敏感性分析。分析时采用了3场典型洪水,给定低、中、高水平的初始含水量,共计9种方案。对9种方案分别以Nash-Sutcliffe效率系数、总水量平衡误差系数、低水流量误差系数、高水流量误差系数作为目标函数,分析新安江模型参数对不同目标函数的全局敏感性。本文还对其中一种方案用GLUE方法进行分析并与Extend FAST方法的结果对比。

1 Extend FAST方法

Extend FAST(Extend Fourier Amplitude Sensitivity Test)方法是结合Sobol方法的优点后对FAST方法改进的一个定量全局敏感性分析方法,具有稳健、较低的样本数和计算高效的特点^[12-14]。该方

法将模型的敏感性概括为单个输入参数的敏感性及各参数间的相互作用的敏感性,单个参数独立作用的敏感性用主要敏感度(main effect)衡量,参数总敏感性(独立和相互作用)用总敏感度(total effect)衡量。

FAST(Fourier Amplitude Sensitivity Test)方法的核心是用一个周期函数的曲线在参数的多维空间内搜索,然后用傅立叶变换计算参数的幅度,幅度越大参数越敏感。考虑有 n 个参数的模型 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,假定输入参数的取值范围限制在一个超立方体 $K^n = (X | 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, \dots, n)$ 内。定义一个独立变量 s ,并引入 $s \rightarrow X$ 的映射:

$$x_i = G_i(s), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

G_i 为搜索曲线函数,如果 x_i 服从均匀分布,其常见的形式包括Cukier等^[17]提出的 $x_i = \bar{x}_i e^{\bar{v}_i \sin(w_i s)}$, Koda等^[18]提出的 $x_i = \bar{x}_i (1 + \bar{v}_i \sin(w_i s))$, Saltelli^[14]等提出的 $x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(w_i s + \varphi_i))$ 等。上述各种形式中, \bar{x}_i 为中心值, \bar{v}_i 为 x_i 区间的端点值, w_i 为整数频率, φ_i 为随机偏移相, s 取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。

当 s 变化时,所有的参数在 K^n 空间中沿着一个曲线变化。在上述 G_i 的函数下,每个参数 x_i 的振荡频率为 w_i ,结果模型输出也显示出不同周期振荡函数的组合。如果第 i 个参数对输出的影响越大,输出在频率 w_i 处的振幅就越大。对模型结果进行傅立叶变换,计算频率 w_i 及其更高谐振 pw_i 的谱,就可以得到第 i 个参数变化引起的输出方差 $\hat{D}_i = \sum_{p \in Z^0} \Lambda_{pw_i}$,其中 Λ 为傅立叶变换的谱, Z^0 为0以外的整数, $Z^0 = \{-\infty, \dots, -1, 1, \dots, +\infty\}$ 。

模型总的方差可由所有频率的谱求和得到:

$$\hat{D} = \sum_{j \in Z^0} \Lambda_j = 2 \sum_{j=1}^{+\infty} \Lambda_j \quad (2)$$

参数 x_i 对输出 y 的敏感度 S_i^{FAST} 可由下式计算:

$$S_i^{\text{FAST}} = \frac{\hat{D}_i}{\hat{D}} \quad (3)$$

Saltelli^[14]对FAST方法进行改进,引入了Sobol方法^[13]分解模型的思路。Sobol方法认为模型可分解为单个参数及组合参数的函数,则模型总的输出方差也可分解为单个参数和组合参数的函数:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,n} \quad (4)$$

那么参数的敏感度可由下式计算：

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, \dots, i_s}}{D} \quad (5)$$

Saltelli 对 FAST 方法中的参数频率 w_i 设置进行了改进。当求参数 x_i 的总敏感度 (total effect) 时, 先给 x_i 设定一个频率 w_i , 其余的所有其它参数设定一个不同的频率 w_i' 。计算频率 w_i' 及其更高谐振 pw_i' 的谱, 就可以得到除参数 x_i 外的所有参数及其相互关系的影响引起的输出方差 $D_{(-i)}$ 。则参数 x_i 总敏感度为：

$$S_{T_i} = \frac{D - D_{(-i)}}{D} \quad (6)$$

x_i 的主要敏感度 (main effect), 通过计算频率 w_i 及其更高谐振 pw_i 的谱得到。对每个参数重复计算, 然后对各参数的总灵敏度归一化, 就可以得到

各参数的贡献率。

Saltelli 给出该算法参数采样的个数为：

$$N_s = nN_r(2Mw_{\max} + 1) \quad (7)$$

式中, M 为干涉因子, 一般取 4 或更高, $w_{\max} = \max\{w_i, w_i'\}$, n 为参数个数, N_r 为搜索曲线的重复次数, 可取 2。

2 新安江模型参数全局敏感性分析

2.1 新安江模型及参数

本文采用考虑了地面径流、壤中流和地下径流的三水源新安江模型。地面汇流采用纳什单位线法, 壤中流和地下径流分别采用不同的线性调蓄水库。模型中共有 15 个参数, 其物理意义及分析时的取值范围见表 2, 参数取值范围参考了文献 [3, 5]。

表 1 三水源新安江模型参数取值范围

Table 1 Parameters and ranges of Xinanjiang model

| 参数名称 | 物理意义 | 最小值 | 最大值 |
|------------|------------------------------|-------|-------|
| WM | 蓄水容量 | 130 | 250 |
| X (WUM/WM) | 上层张力水容量 WUM | 0.01 | 0.4 |
| Y (WLM/WM) | 下层张力水容量 WLM | 0.01 | 0.6 |
| K | 蒸发能力折算系数 | 0.8 | 2 |
| B | 张力水蓄水容量曲线方次 | 0.1 | 1.0 |
| SM | 表土自由水蓄水容量 | 5 | 50 |
| EX | 表土自由水蓄水容量曲线方次 | 1.0 | 2.0 |
| CX | 自由水蓄水水库对壤中流和地下水的总出流系数 | 0.01 | 0.7 |
| CY | 自由水蓄水水库对壤中流和地下水的总出流系数中壤中流的比率 | 0.01 | 0.7 |
| IMP | 不透水面积比例 | 0.001 | 0.100 |
| C | 深层蒸散发系数 | 0.1 | 0.3 |
| KI | 壤中流的消退系数 | 0.9 | 0.999 |
| KG | 地下水库的消退系数 | 0.95 | 0.999 |
| NN | 纳什单位线系数 (线性水库的个数) | 1.0 | 5.0 |
| NK | 纳什单位线系数 (汇流时间) | 2.0 | 10.0 |

三水源新安江模型中的参数 CI (自由水蓄水水库对壤中流出流系数) 和 CG (自由水蓄水水库对地下水出流系数) 要满足 $CI + CG < 1$ 的约束, 因此用两个非约束变量 CX, CY 表示, 则 $CI = CX \cdot CY$, $CG = CX \cdot (1 - CY)$ 。

2.2 数据及目标函数

本文以广州市流溪河流域上游的流溪水库作为研究实例。流溪水库大坝位于流溪河上游, 从化市良口镇境内, 距离从化市区 30 km, 广州市区 90 km。流溪水库集水面积 539 km², 坝址以上

主要有二条支流, 包括吕田水和玉溪水。流溪河流域属亚热带湿润季风气候, 年平均气温 20.3 ℃, 年平均相对湿度为 79%, 降水量年际变化大, 多雨年达 2 866.5 mm, 少雨年为 1280.7 mm。

从历史洪水中选取三场有代表性的洪水, 以库区内三个自动雨量站的泰森多边形面积加权的降雨作为输入, 用三水源新安江模型进行小时步长的入库洪水模拟。3 场洪水发生的时间分别为 1998 - 05 - 14, 2003 - 06 - 09, 2005 - 06 - 16, 文中分别简记为 flood1, flood2, flood3, 各洪水过程见图 1 (a

-c)。flood1 洪峰流量为 461 m³/s, 代表了该水库峰量中等, 短历时的洪水过程; flood2 洪峰流量为 322 m³/s, 可代表该水库小洪水的过程; flood3 是该水库一次历时长, 峰量大的洪水, 可代表该水库大洪水的过程。

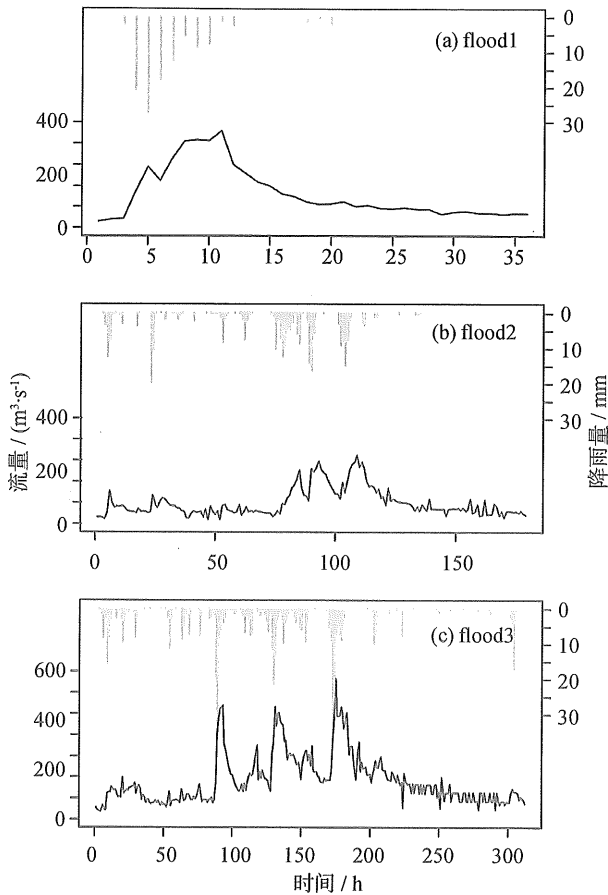


图 1 流溪河水库典型洪水过程线

Fig. 1 Typical flood events in Liuxihe reservoir catchment

为了研究三水源新安江模型参数对不同径流特征的控制作用, 分别用 Nash-Sutcliffe 效率系数、总水量平衡误差系数、低水流量误差系数、高水流量误差系数作为目标函数, 分析参数对上述目标函数的敏感性。评价高水和低水模拟情况的目标函数采用赵人俊^[2]提出的两个评价函数。

2.3 Extend FAST 结果分析

土壤前期含水量对于模型的模拟有一定的影响, 尤其对于短历时洪水预报影响较大。为了全面反映不同初始状态下模型参数的敏感性, 设计 3 种初始状态方案, 见表 3。三个初始状态分别代表流域土壤前期含水量处于低、中、高三种水平。则总的模拟方案包括 3 种不同初始状态下, 3 场典型洪水过程的模拟, 共计 9 种方案。

表 2 敏感性分析评价目标函数¹⁾

Table 2 Objective function in sensitivity analysis

| 目标函数 | 公式 | 备注 |
|---------------------|---|-------------------------------|
| Nash-Sutcliffe 效率系数 | $F_1(\theta) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - M_i(\theta))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2}$ | 总体拟合情况, 并侧重于洪峰部分 |
| 总水量平衡误差系数 | $F_2(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i(\theta) - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i}$ | 总体水量误差 |
| 低水水量误差系数 | $F_3(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n ABS(\lg(Q_i/M_i(\theta)))}{\sum_{i=1}^n ABS(\lg(Q_i))}$ | 对数取值是低水相对大, 高水相对小, 可反映低水部分的误差 |
| 高水水量误差系数 | $F_4(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n ABS(M_i(\theta) - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i}$ | 绝对值误差是高水大, 低水小, 主要反映高水部分的误差 |

1) 式中, Q_i 为实测流量值 (m³/s); $M_i(\theta)$ 为模拟流量值 (m³/s), θ 为对应的模型参数; n 为模拟序列长度。

表 3 模型初始状态方案

Table 3 Initial condition scheme for the model

| 参数 | | 初始状态方案 | | |
|-----|-----------|--------|-------|-------|
| 名称 | 物理意义 | Init1 | Init2 | Init3 |
| W0 | 初始蓄水量 | 60 | 120 | 180 |
| WU0 | 上层张力水初始蓄量 | 20 | 40 | 60 |
| WL0 | 下层张力水初始蓄量 | 30 | 60 | 90 |
| S0 | 表土自由水初始蓄量 | 20 | 25 | 30 |

对 9 种模拟方案分别用 Extend FAST 方法计算三水源新安江模型的参数敏感度。计算时采样个数设置依据式 (7), 其中 M 取 4, w_{max} 设为 20, 每个方案采样数为 4 830。由 Saltelli 搜索曲线函数得到 4 830 个参数组合, 运行模型分别计算得到 4 个目标函数序列, 进行离散傅立叶变换, 计算每个参数的主要敏感度 (main effect) 和总敏感度 (total effect), 参数组合作用的敏感度 (interactions) 可由总敏感度与主要敏感度的差得到。以 Nash-Sutcliffe 效率系数, 总水量平衡误差系数, 低水流量误差系数, 高水流量误差系数为目标函数, 得到 9 种方案下三水源新安江模型 15 个参数的主要敏感度结果见图 2, 总敏感度结果见图 3。

图 2、图 3 中, 绿、蓝、红颜色分别表示初始含水量处于低、中、高三种水平, 虚线、点圈线、粗实线分别表示 flood1、flood2、flood3 三场洪水。首先分析不同初始含水量的情况。图 2 (F1)、2

(F2)、3 (F1)、3 (F2) 中，不同颜色粗实线的分布比较一致，虚线则分布比较散，而点圈线则介于两者之间。这表明以 Nash-Sutcliffe 效率系数和总水量平衡误差系数为目标时，flood3 受初始状态的影响很小，而 flood1，flood2 受初始状态的影响比

较大。图 2 (F3)、2 (F4)、3 (F3)、3 (F4) 中，不同颜色的各种线型分布都比较散。也即以低水水量误差系数和高水水量误差系数为目标时，三场洪水对应的模型参数受初始状态的影响都比较大。

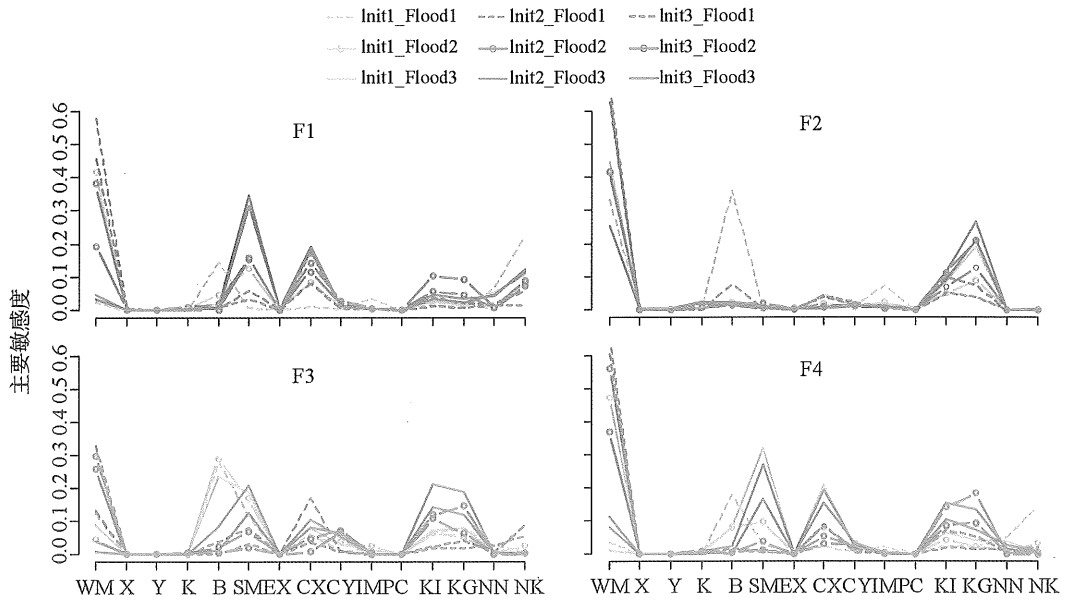


图 2 三水源新安江模型参数主要敏感度
Fig. 2 Main effect for parameters in Xinanjiang model

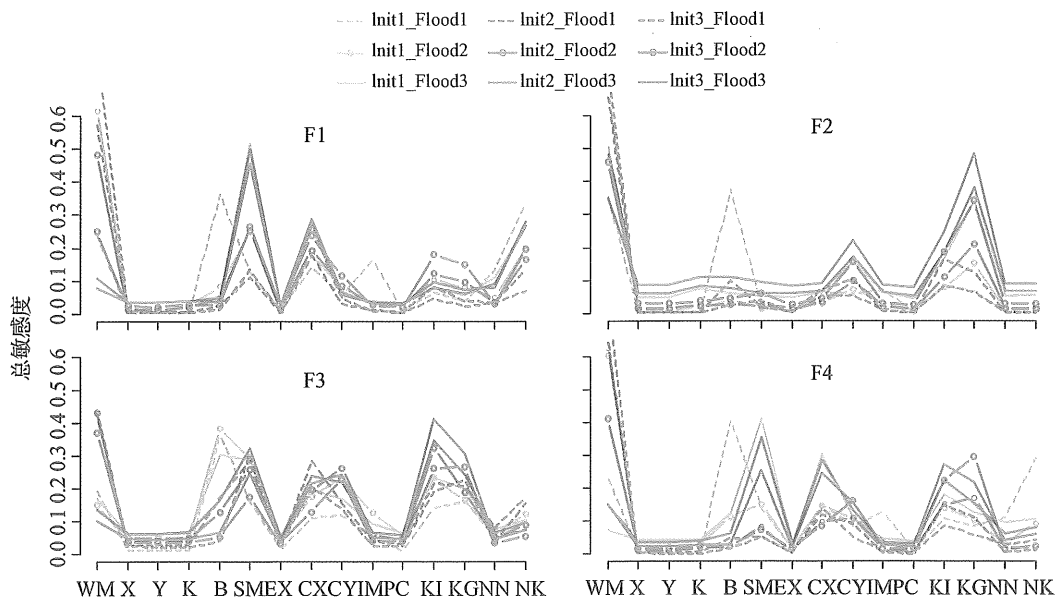


图 3 三水源新安江模型参数总敏感度
Fig. 3 Total effect for parameters in Xinanjiang model

图 2 (F1)，图 3 (F1) 反映了以 Nash-Sutcliffe 效率系数为目标的模型参数敏感性。不同初始状态

和不同洪水过程下，模型参数敏感性表现不同。总体而言，参数 CX 最敏感，参数 KI、KG、NK、NN

较敏感。SM 对 3 场洪水表现不同,它是水源划分的关键,特别是对洪峰控制作用明显,在 flood3 洪水中,SM 敏感性远大于其它两场洪水。WM 的敏感性受洪水特性和初始状态条件的影响,对于历时长大洪水不敏感,反之敏感,此亦反映出历时短的小洪水模拟时,初始状态的设定对模拟结果带来较大的不确定性。CX 在模型中分割了快速的地表径流和慢速的壤中流和地下水流,各种方案下都很敏感。KI, KG, NN, NK 是模型中控制地表水汇流,壤中流汇流,地下水汇流的 4 个参数,洪水过程中洪峰过程相对越长,则对 NN, NK 越敏感,反之对 KI, KG 更敏感。其它参数,如 X、Y、K、EX、IMP、C 的主要敏感度都接近于 0,总敏感度也小于 0.05,它们只是与其它参数相互组合对模型的结果产生影响。因此,以流量过程拟合程度为目标时,应重视对于控制流量分割和汇流的参数,当模拟短历时次洪水时,初始条件会给模拟结果带来较大的不确定性。

图 2 (F2), 图 3 (F2) 反映了以总水量平衡误差系数为目标的模型参数敏感性。敏感参数发生了变化,WM、KG 成为最敏感参数,较敏感的参数有 KI, CY, B, IMP。与 Nash-Sutcliffe 效率系数为目标不同,此时地表汇流参数 NN, NK 不敏感。对于给定的初始含水量,参数 WM 间接影响初始含水量的相对大小,因此对模拟过程的总水量平衡影响大。KG 控制了地下水出流量,可控制模拟结束时滞留的地下水量。CY 在模型中分割了壤中流和地下水流,同样可影响模型结束时滞留的地下水量。B 的敏感性在 flood1 下受初始条件影响很大,特别是初始土壤含水量水平最低时,控制产流量的参数 B 对水量平衡控制很重要。该目标下,其它参数都不敏感。总体而言,以总水量平衡误差系数为目标时,敏感参数变少,说明该目标函数相对简单,仅仅评价模型的部分结构,参数对该目标函数的不确定性较小。

图 2 (F3), 3 (F3), 2 (F4), 3 (F4) 中的全局敏感性分析分别以低水水量误差系数和高水水量误差系数为目标。两个目标下的敏感参数基本相似,同样初始条件对各场洪水的敏感性分析结果都有影响,同样,WM 在短历时洪水较敏感。其它敏感的参数有 SM、CX、CY、KI、KG、NN、NK。B 的敏感性受初始含水量影响,当初始土壤含水量给定一个低的水平时,各场洪水下 B 都很敏感,反之,B 的敏感度相对比较小。值得注意的是,CY 对低水水量误差系数更敏感,而 CX 对高水水量误

差系数更敏感,并且它们与其它参数共同作用的效果很明显。这反映了高水水量误差系数对慢速流和快速流的分割敏感,而低水水量误差系数对壤中流和地下水流的分割更敏感,因此 KI、KG 比较敏感。

总的来看,在流溪河水库 3 场典型洪水过程的模拟中,参数 X、Y、K、B、IMP、C 的敏感度相对较小,它们仅仅与其它参数相互作用对模拟结果产生影响。本文敏感性分析的结果与文献 [3] 基本一致。

2.4 与 GLUE 对比

GLUE 散点图给出了似然值与参数之间的关系,是描述参数敏感性的一个方式。上述 Extend FAST 分析的敏感性结果与 GLUE 散点图对比可以更好解释参数敏感性的表现,并检验 Extend FAST 的结果。限于篇幅,仅用 GLUE 方法分析 flood3 次洪水,以 Nash-Sutcliffe 效率系数为目标,初始土壤含水量中等水平时三水源新安江模型参数的敏感性。Extend FAST 分析的结果以直方图显示,其数据同于图 2, 图 3, 其中参数总敏感度包括主要敏感度和参数组合敏感度。

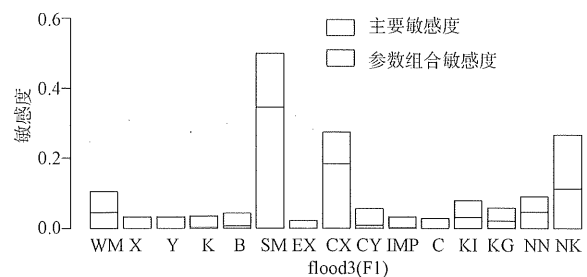


图 4 flood3 新安江模型参数敏感度

Fig. 4 Sensitivity results for parameters in Xinanjiang model in flood event 3

GLUE 具体的计算过程可参考文献 [19]。首先,假定参数均匀分布,在表 1 定义的取值范围内对 15 个参数均匀抽样,共取 50 000 组参数组,然后用新安江模型分别模拟,将 Nash-Sutcliffe 效率系数作为目标似然判据,以 0.5 为判据值的临界值,得到 15 个参数与似然判据值的散点图见图 5。

散点图显示参数 X、Y、K、B、EX、IMP、C 分布均匀,在其取值范围内似然函数值没有明显的变化趋势。参数 SM、CX、CY、KI、KG、NN、NK 有明显的“形状”,其取值对似然函数的影响明显。参数 WM 有不太明显的“形状”,它的取值对似然函数有较小的影响。GLUE 方法得到的参数与

似然值的散点图的“形状”实质上反映了该参数的敏感性，散点图分布越不均匀，参数越敏感。

与图 4 对比，Extend FAST 和 GLUE 分析的参数敏感性结果一致。GLUE 用定性的“形状”给出了参数敏感性信息，Extend FAST 给出了定量的

值，并且分别给出主要敏感度和与其它参数组合作用的敏感度。组合作用的敏感度反映了参数共同作用的影响，是“异参同效”的现象在敏感性分析中的体现。

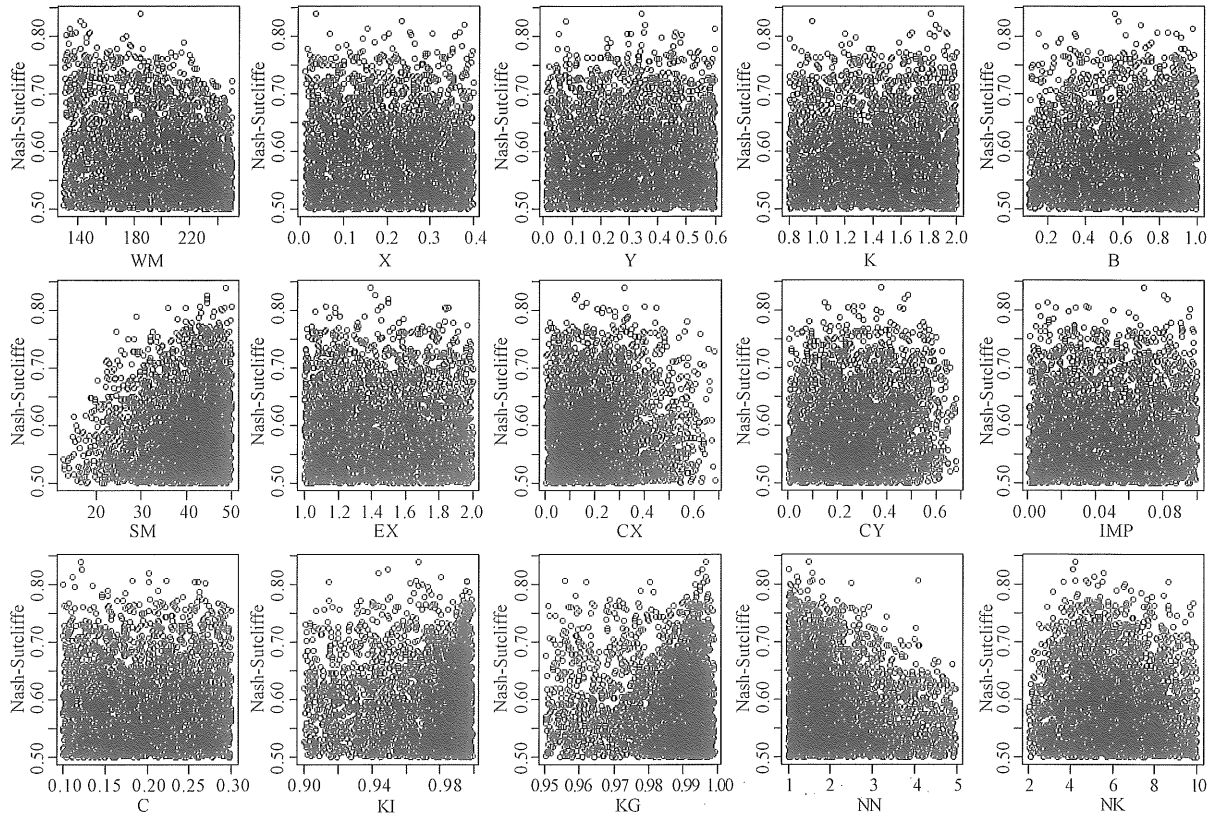


图 5 三水源新安江模型 GLUE 散点图

Fig. 5 Scatter map of GLUE method for Xinanjiang model

3 结论与展望

Extend FAST 可以高效地对三水源新安江模型的参数进行全局敏感性分析。流溪河水库典型入库洪水实例分析表明，不同目标函数下参数的敏感性表现不同，敏感性分析结果也有不确定性。以 Nash-Sutcliffe 效率系数为目标函数时，参数 SM、CX、KI、KG、NK、NN 敏感，参数 WM 在短历时洪水时受初始状态条件的影响有较大不确定性，其它参数不敏感。以总水量平衡误差系数为目标时，参数 WM、KG 最敏感，较敏感参数有 KI、CY、B、IMP。以低水水量误差系数和高水水量误差系数为目标时，参数 SM、CX、CY、KI、KG、NN、NK 敏感，参数 WM、B 的敏感性因洪水状态和初始状态不同而有较大不确定性，敏感参数因侧重不

同成分对两个目标敏感性不同。总体上，参数 X、Y、K、B、IMP、C 不敏感。

Extend FAST 方法定量的给出敏感信息，GLUE 方法的散点图定性地给出敏感信息，两者敏感性分析的结论基本一致。相对于 GLUE 的定性描述，Extend FAST 量化的敏感信息易于不同场次、不同状态、不同参数的比较。Extend FAST 的主要敏感度反映了参数独立作用对模型输出的影响，而参数组合作用的敏感度则反映了参数之间的作用对模型输出的影响，它是模型“异参同效”现象在敏感性分析中的表现。

对多个目标函数分析新安江模型参数的全局敏感性，可以帮助识别不同径流成分的控制参数，指导模型优化，降低模型复杂程度。敏感性分析结果也可以进一步作为评价参数不确定性的依据。

参考文献:

- [1] 赵人俊. 流域水文模拟 - 新安江模型和陕北模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [2] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析 [J]. 水文, 1988 (6): 2-9.
- [3] 王佩兰, 赵人俊. 新安江模型 (三水源) 参数的检验 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1989, 17(4): 16-20.
- [4] 王佩兰, 赵人俊. 新安江模型 (三水源) 参数的客观优选方法 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1989, 17(4): 65-69.
- [5] 赵人俊, 王佩兰, 胡凤彬. 新安江模型的根据及模型参数与自然条件的关系 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1992, 20(1): 52-59.
- [6] BEVEN K J. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling [J]. *Advances in Water Resources*, 1993, 16: 41-51.
- [7] SALTELLI A, TARANTOLA S, CAMPOLONGO F. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models [M]. John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [8] HORNBERGER G M, SPEAR R C. An approach to the preliminary analysis of environmental systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 1981, 12: 7-18.
- [9] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 新安江模型参数的不确定性分析 [J]. 地理研究, 2008, 27(2): 343-352.
- [10] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. *Technometrics*, 1979, 21: 239-245.
- [11] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. *Technometrics*, 1991, 33(2): 161-174.
- [12] CUKIER R I, LEVINE H B, SHULER K E. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems [J]. *Journal of Computational Physics*, 1978, 26: 1-42.
- [13] SOBOL I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical model, Math [J]. *Modeling Comput Exp*, 1993 (1): 407-414.
- [14] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.
- [15] CROSETTO M, TARANTOLA S. Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 15(5): 415-438.
- [16] VAN GRIENSVEN A, MEIXNER T, GRUNWALD S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1-4): 10-23.
- [17] CUKIER R I, FORTUIN C M, SHULER K E, et al. A study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients 1: Theory [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1973, 59(8): 3873-3878.
- [18] KODA M, MCRAE G J, SEINFELD J H. Automatic sensitivity analysis of kinetic mechanisms [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 1979, 11(4): 427-444.
- [19] BEVEN K J, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(2): 279-298.