

基于 Sobol 方法的新安江模型参数敏感性分析

张小丽¹, 彭勇^{1,2,3}, 徐炜¹, 王本德¹, 王海霞¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;
3. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 采用敏感性分析方法对复杂模型和系统的输入和输出进行定性和定量的分析, 有利于模型结构的诊断、模型参数的识别和模型的应用。现以桓仁水库流域为例, 使用 Sobol 方法, 以确定性系数、总水量误差系数、低水误差系数和高水误差系数作为敏感性分析模型的目标函数, 分别对模型单参数和多参数的敏感性进行了评价。结果表明不同目标函数下参数的敏感性不同; Sobol 能定量地给出参数的总敏感度和参数间相互作用的敏感度, 适合于分析水文模型的参数敏感性。

关键词: 新安江模型; Sobol 方法; 敏感性分析

中图分类号: P334.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0020-05

Sensitivity Analysis of Xinanjiang Model Parameters using Sobol Method

ZHANG Xiaoli¹, PENG Yong^{1,2,3}, XU Wei¹, WANG Bende¹, WANG Haixia¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Sensitivity analysis was performed to analyze the inputs and outputs of the complex model and system qualitatively and quantitatively, which can benefit the inspection of model structure, identification of model parameters, and model application. In this paper, Sobol method was applied to evaluate the sensitivity of single parameter and multiple parameters of the model in the Huanren reservoir catchment. The objective functions of sensitivity analysis included the deterministic coefficients and error coefficients of total water, low flow, and high flow. The results showed that the sensitivity of parameters was different under different objective functions, and Sobol method can provide the sensitivity for all parameters and sensitivity between each parameter, which is useful for sensitivity analysis of hydrological models.

Key words: Xinanjiang model; Sobol method; sensitivity analysis

敏感性分析是指定性或定量地分析包括模型参数在内的模型输入对模型输出的影响^[1]。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^[2]。敏感性分析可分为局部敏感性分析和全局敏感性分析两类。局部敏感性分析只能评价单个参数对模型输出的影响, 不能评价参数间相互作用对模型输出的影响, 虽然操作简单, 但由于“异参同效”现象的存在, 其局限性较大。全局敏感性分析则是在整个参数空间中分析多个参数

对模型输出的共同影响并分析参数间的相互作用, 较适用于复杂系统的研究与分析。

近年来, 采用全局敏感性分析方法研究流域水文模型的参数敏感性已成为热点。常用的全局敏感性分析方法有多元回归法、RSA、FAST、Sobol、Extend FAST、GLUE 等方法。其中, Sobol 方法具有形式简单、计算简便等优点, 是最具代表性的全局敏感性分析方法^[3], 已在 TOPMODEL、SWAT、SAG-SMA 等水文模型参数的敏感性分析中得到了应用^[3,6]。

收稿日期: 2013-10-18 修回日期: 2014-02-15 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379027; 51109025); 中央高校基本科研业务费专项(DUT13JS06); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2012490411); 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金资助项目(1214)

作者简介: 张小丽(1985-), 女, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事考虑降雨预报信息的水文预报方面研究。E-mail: zx1436@163.com

通讯作者: 彭勇(1979-), 男, 湖北公安人, 副教授, 博士, 主要从事水文气象耦合不确定环境下的水电站优化调度方面研究。E-mail: pengyong@dlut.edu.cn

Tang 等^[7]通过将 PEST、RSA、ANOVA 等三种方法与 Sobol 方法进行对比分析,认为 Sobol 方法是评价集总式模型的单个参数敏感性和多参数相互作用敏感性的最有效方法。但目前使用 Sobol 方法分析新安江模型参数敏感性的研究还比较少。孟碟^[8]将 RSA 和 Sobol 方法分别应用到新安江两水源模型参数的敏感性分析中,研究了一场洪水中各参数对确定性系数、径流总量误差、均方差和相关系数等目标函数的总敏感度和一阶敏感度。但其只说明了 Sobol 方法可用于新安江模型参数的敏感性分析,并没有分析不同量级洪水下的参数敏感性和参数间相互作用对目标函数的贡献。

本文以浑江桓仁水库流域为例,使用 Sobol 方法,以确定性系数、总水量误差系数、低水误差系数和高水误差系数作为敏感性分析模型的目标函数,分别对大、中、小三种量级洪水下三水源新安江模型参数的单独作用以及参数间的相互作用进行了深入的分析。研究结果有助于理解三水源新安江模型参数的敏感性和参数间的相互作用,可为模型的参数率定和应用提供指导。

1 模型方法

1.1 三水源新安江模型

三水源新安江模型包括蒸散发计算、产流计算、分水源计算和汇流计算 4 个部分,模型结构见图 1^[9-10]。图 1 中部分符号的意义如下: P 为降雨量, E_m 为水面蒸发, W_m 为流域蓄水量, R 为透水面积产流, F_r 为产流面积, R_b 为不透水面积产流, W 为流域蓄水量, W_U 为上层蓄水量, W_L 为下层蓄水量, W_D 为深层蓄水量, E_U 为上层蒸发量, E_L 为下层蒸发量, E_D 为下层蒸发量, E 为总蒸发量, R_s 为地面径流, R_i 为壤中流, R_g 为地下径流, Q_s 为地面总入流, Q_i 为壤中流总入流, Q_g 为地下总入流, T 为河网总入流, Q 为单元面积出流, K_e 、 X_e 为马斯京根法参数, TQ 为流域出流。其余符号的意义参见表 1。由于资料的限制,本文未研究流域分区,只计算到图 1 中 Q 处,此处得到的流量值即为流域出口的模拟流量。另外,自由水蓄水水库对壤中流的出流系数 K_i 由 $K_i = 0.7 - K_g$ 得到,滞时参数 L 按经验取为 2。因此进行敏感性分析的参数共有 13 个,各参数及参数取值范围见表 1。

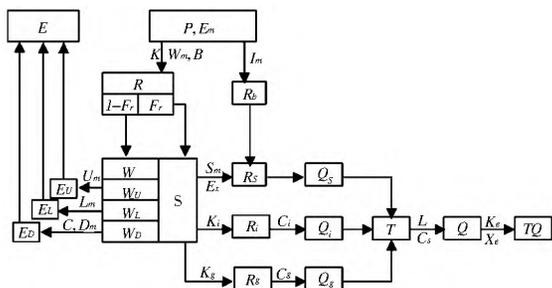


图 1 三水源新安江模型结构图

Fig. 1 Structure of Xinanjiang model

1.2 Sobol 方法

Sobol 方法是一种基于方差的定量敏感性分析方法。其核心是将目标函数的总方差分解成单个参数的方差和参数间的相互作用产生的方差。假设模型可以表示为: $y = f(X) =$

表 1 新安江模型参数及取值范围

参数	物理意义	上限	下限
U_m	上层蓄水容量	20	5
L_m	下层蓄水容量	60	30
D_m	深层蓄水容量	40	20
B	蓄水容量曲线的方次	0.5	0.3
I_m	不透水面积比例	0.07	0.04
C	蒸发能力折减系数	0.2	0.1
K	深层蒸散发系数	1	0.8
S_m	表土自由水蓄水量	25	5
E_x	表土自由水蓄水量曲线方次	1.5	1
K_g	自由水蓄水水库对地下水的出流系数	0.65	0.1
C_s	河网消退系数	0.7	0.1
C_i	壤中流的消退系数	0.9	0.1
C_g	地下水的消退系数	1	0.8

$f(X_1, \dots, X_m)$, 其中, y 为模型输出的目标函数; $X = X(X_1, \dots, X_m)$ 为模型的参数。那么 y 的方差 $D(y)$ 可以作如下分解:

$$D(y) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + \dots + D_{1,2,\dots,m} \quad (1)$$

式中: D_i 为参数 i 产生的方差; D_{ij} 为两个参数 i 和 j 相互作用产生的方差; D_{ijk} 为 3 个参数 i, j 和 k 相互作用产生的方差; $D_{1,2,\dots,m}$ 为 m 个参数共同作用产生的方差。将上式归一化后得到各参数和参数相互作用的敏感性:

$$1 = \sum_i \frac{D_i}{D(y)} + \sum_{i < j} \frac{D_{ij}}{D(y)} + \sum_{i < j < k} \frac{D_{ijk}}{D(y)} + \dots + \frac{D_{1,2,\dots,m}}{D(y)} \quad (2)$$

对于参数 i 可得到以下指标:

$$\text{一阶敏感度: } S_i = \frac{D_i}{D} \quad (3)$$

$$\text{二阶敏感度: } S_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} \quad (4)$$

$$\text{总敏感度: } S_{Ti} = 1 - \frac{D_{-i}}{D} \quad (5)$$

式中:一阶敏感度 S_i 为参数 i 作用的敏感度;二阶敏感度 S_{ij} 为两个参数 i 和 j 相互作用的敏感度;总敏感度 S_{Ti} 为参数 i 主要作用和相互作用的敏感度; D_{-i} 为除了参数 i 之外的参数的方差。

根据 Tang 等^[7]的建议,选用拉丁超立方抽样来实现 Sobol 方法,计算一阶、二阶和总敏感度共需要运行 $n \times (m + 2)$ 次模型, n 为拉丁超立方的样本数, m 则为待分析的参数个数。

1.3 目标函数

模型参数的敏感性与目标函数相关联,不同目标函数所反映的径流特征是不同的。本文以场次洪水为研究对象,选择确定性系数(f_{obj1})、总水量平衡误差系数(f_{obj2})、低水流量误差系数(f_{obj3})、高水流量误差系数(f_{obj4})作为目标函数^[3,11],见表 2。以此 4 个目标函数为基础,分析三水源新安江模型参数在不同目标函数下的敏感性。

2 实例分析

2.1 研究流域

本文选择位于浑江中游的桓仁水库作为研究实例。浑

表 2 敏感性分析目标函数

Table 2 Objective functions of sensitivity analysis

评价目标	目标函数	备注
确定性系数	$f_{obj1} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}})^2}$	总体拟合情况, 并侧重于洪峰部分
总水量平衡误差系数	$f_{obj2} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i))}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)}$	总体水量误差
低水流量误差系数	$f_{obj3} = \frac{\sum_{i=1}^n \log(Q_{obs}(i)/Q_{cal}(i)) }{\sum_{i=1}^n \log(Q_{obs}(i)) }$	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
高水流量误差系数	$f_{obj4} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i) }{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)}$	绝对值误差是高水大, 低水小, 主要反映高水部分的误差

注: n 为时段数; $Q_{obs}(i)$ 为实际流量; $Q_{cal}(i)$ 为模拟流量; $\overline{Q_{obs}}$ 为实际流量过程均值。

江发源于长白山系龙岗山脉的老爷岭南麓, 是鸭绿江右侧的最大支流, 全长 432 km, 自东北向西南流经吉林、辽宁两省。水库坝址以上河流长 247 km, 控制流域面积为 10 400 km²。桓仁流域多年平均降雨量为 876 mm, 多年平均流量为 148 m³/s, 年内降水分配不均, 主要集中在汛期(7 月至 9 月)。浑江流域图见图 2。

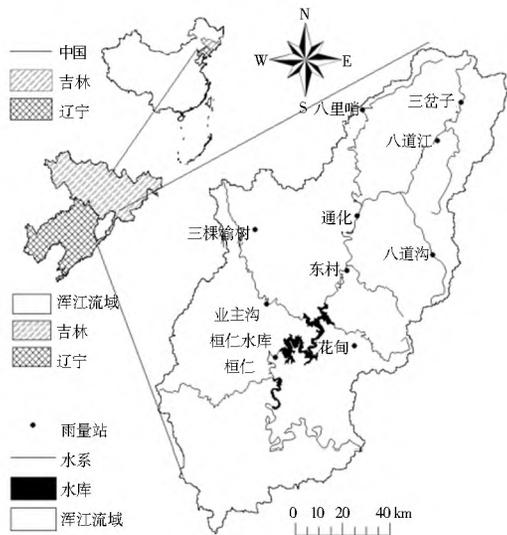


图 2 浑江桓仁水库流域及雨量站

Fig. 2 Location of the Huanren reservoir catchment and distribution of rainfall stations

2.2 资料数据

研究所需的雨洪资料为桓仁水库以上流域资料, 其中降雨资料为 10 个雨量站的加权平均值, 流量资料为桓仁水库的入库流量。从 1966 年- 2005 年的 48 场洪水中选择 3 场典型洪水来分析大、中、小洪水情景下模型参数的敏感性, 洪水过程见图 3(a) - 3(c)。其中, 洪水(a) 19730720 的总降雨量为 35.9 mm, 洪峰为 1 045 m³/s, 为小洪水; 洪水(b) 19910721 的总降雨量为 80.0 mm, 洪峰为 2 787 m³/s, 为中洪水; 洪水(c) 19730826 的总降雨量为 119.3 mm, 洪峰为 4 215 m³/s, 为大洪水。

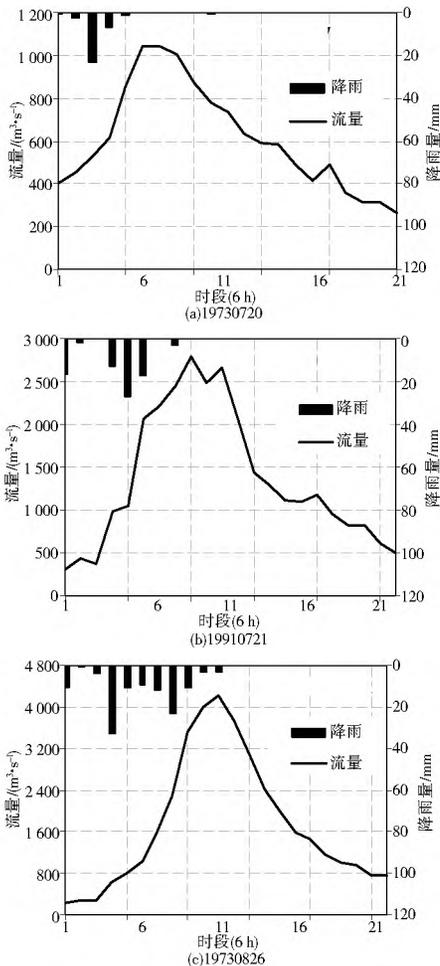


图 3 典型洪水过程线

Fig. 3 Typical flood events in the Huanren reservoir catchment

3 参数敏感性分析

三种典型洪水下 13 个参数对 4 个目标函数的一阶敏感度和总敏感度分布情况见图 4。图 4 中每一行代表同一目标函数下模型参数在三场典型洪水中的表现。柱状图的白色部分为参数的相互作用, 即“Interactions”; 灰色部分为一阶敏感度, 即“First Order”, 两部分之和为参数的总敏感度。图 5 则显示了两个参数相互作用产生的敏感度。文中指定总敏感度超过阈值 10% (图 4 中虚线所示) 的参数为敏感参数。

3.1 一阶敏感度和总敏感度分析

以确定性系数为目标函数时, 三场典型洪水的敏感参数相同, 均为自由水蓄水容量 S_m 和河网消退系数 C_s 。这是因为确定性系数在评定总体拟合结果的同时更侧重洪峰部分, 而 S_m 反映表土蓄水能力, 决定着地面径流和地下径流的比重, S_m 大时地下径流所占比重相对大, 洪峰流量相对小; 反之, S_m 小则地面径流所占比重相对大, 洪峰流量相对大^[12]。 C_s 代表河网的坦化作用, 决定着最终的流量过程, 因此这两个参数在三种情境下都是敏感参数。值得注意的是, 未达到 10% 阈值的参数的敏感性随着洪水量级的增加呈减小趋势, 如 U_m 、 L_m 、 D_m 、 B 和 K 。这是由于小洪水发生时的下垫面比较干旱, 抗干扰能力弱, 其流量过程极易受到下垫面变化的影响, 因此产流参数在小洪水中的敏感性比较高; 而中、大洪水通常是在长期降雨后发生的, 此时下垫面已经很湿润, 其

流量过程的抗干扰能力比较大,产流参数的变化对其的影响也就比较小。

以总水量误差系数为目标函数时,主要反映的是模型产流效果,因此决定流量过程的参数 C_s 不敏感。此时,小洪水的敏感性参数最多,为 7 个,分别是 U_m 、 L_m 、 K 、 S_m 、 K_g 、 C_i 、 C_g ; 对于中洪水来说, L_m 的敏感性虽然低于敏感阈值的 10%,但仍然较高,因此,可以认为中洪水的敏感参数与小洪水一致,但 U_m 、 L_m 、 K 的敏感性要略小; U_m 、 L_m 、 K 对大洪水水量的影响作用已经不明显,只有 S_m 、 K_g 、 C_i 、 C_g 等 4 个是大洪水的敏感参数。与目标函数为确定性系数时相似,参数 U_m 、 L_m 、 D_m 、 B 和 K , 随着洪水量级的增加,敏感性呈减小趋势。

目标函数为低水误差时,小洪水的敏感参数为 S_m 、 K_g 、 C_s 、 C_i 、 C_g ; 中、大洪水的敏感参数为 S_m 、 K_g 、 C_s 、 C_g 。小洪水的低水流量对壤中流和地下径流的分割敏感,因此 K_g 和 C_i 在小洪水中的敏感性要略高于在中、大洪水的敏感性。此时,小洪水参数间的相互作用也要大于中、大洪水,参数 U_m 、 L_m 、 D_m 、 B 和 K 的作用即是以相互作用的形式表现出来。

目标函数为高水误差系数和目标函数为确定性系数的结果相似,这是因为这两个目标函数都侧重于大流量部分的模拟结果。由于确定性系数同时也关注整个流量过程的模拟结果,因此,以确定性系数为目标函数时,小、中洪水的蒸散发参数 U_m 、 L_m 、 K 的敏感性也要高于以高水误差系数为目标函数时。

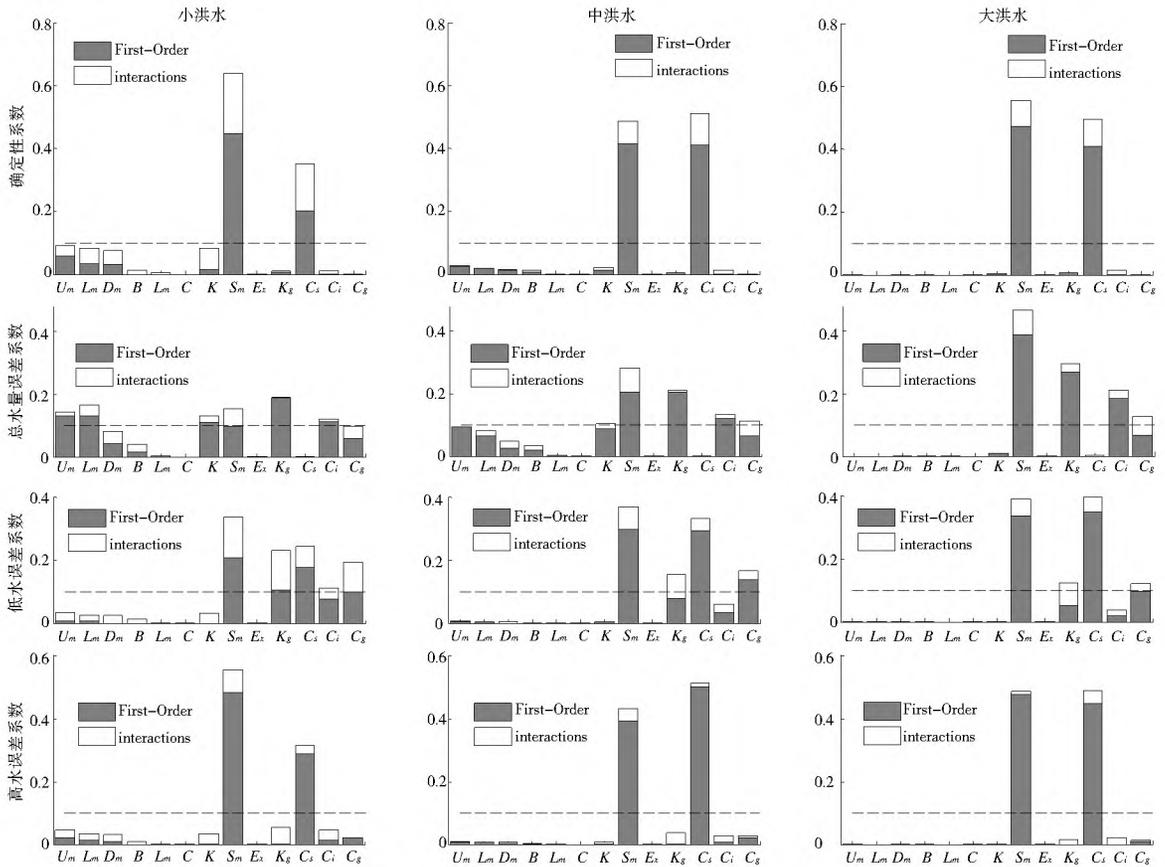


图 4 三种情景下 13 个参数对不同目标函数的一阶敏感度和总敏感程度图

Fig. 4 First-order and total sensitivity of 13 parameters to different objective functions under three scenarios

3.2 二阶敏感度结果分析

对两个参数的相互作用进行分析能更好地理解水文模拟中各过程的相互作用。图 4 中显示的各参数的相互作用在图 5 中均有表现,说明三水源新安江模型参数的相互作用主要表现在两个参数间的相互作用上,即二阶敏感度占的比重较大。

小、中洪水的降雨量较小,形成的洪峰和洪量也较小,抗干扰能力相对较弱,对下垫面等因素比较敏感,因此决定小、中洪水模拟效果的参数也较多,参数间的相互作用也随之增加,参数的不确定性增加。从图 5 可知,4 个目标函数下,有相互作用的参数个数随洪水量级的增加而减少,在小洪水中有相互作用的参数个数明显多于中、大洪水(图 5 中各目标函数下小洪水对应的图形中有颜色的格数明显多于中、大洪水)。

图 4 显示除以高水误差系数为目标函数时大洪水的 S_m

的相互作用较小外,其他情况中 S_m 的相互作用都较大。从图 5 可以看出, S_m 主要是与 C_s 、 C_g 、 K_g 、 C_i 进行相互作用(S_m 与 C_s 、 C_g 、 K_g 、 C_i 交叉处的色块均代表较高的敏感度),这体现了洪水过程中地面径流、壤中流和地下径流的相互作用。而以高水误差系数为目标函数时大洪水的 S_m 与其他参数的相互作用较小,则可能是因为大洪水的高水部分地面径流占了较大的比例,壤中流和地下径流的作用则较弱,因此参数间的相互作用也小。

以上分析结果表明:三水源新安江模型的参数敏感性在不同场次洪水、不同目标函数下有不同的表现,参数存在较大的不确定性;Sobol 方法不但能定量给出参数的总敏感程度还有助于分析参数间的相互作用,适合用于水文模型参数的敏感性分析。

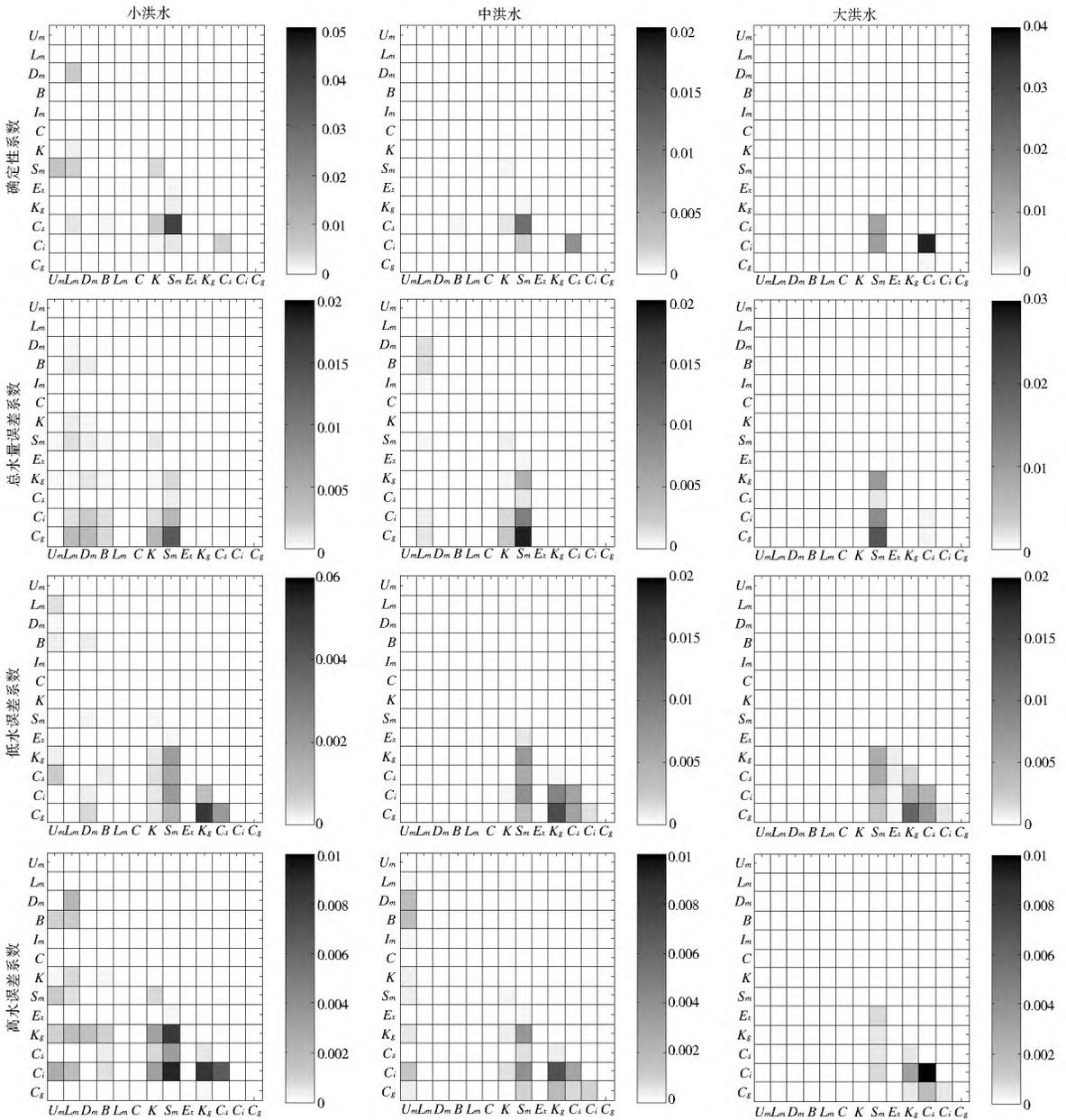


图 5 三种情景下 13 个参数对不同目标函数的二阶敏感度

Fig. 5 Second order sensitivity of 13 parameters to different objective functions under three scenarios

4 结论

本文使用 Sobol 方法分析了新安江三水源模型的参数敏感性,分别以确定性系数、总水量误差系数、低水误差系数和高水误差系数为目标函数,对大、中、小洪水参数的单独作用及相互作用进行了较深入的讨论。研究表明: Sobol 方法得到的敏感度适合多目标间的对比,是进行水文模型参数敏感性分析的有力工具;不同场次洪水和不同目标函数下得到的参数敏感性不同,参数的不确定性较大。参数敏感性分析结果有助于理解研究流域不同目标函数下不同量级洪水的洪水过程,也表明不同量级洪水参数的敏感性并不相同,只用一组参数并不能很好地模拟所有量级的洪水。将敏感性分析结果和洪水分类相结合进行模型参数率定将是下一步的研究内容。

参考文献(References):

[1] SHIN M, GUILLAUME J H, Croke B F, et al. Addressing Ten

Questions about Conceptual Rainfall runoff Models with Global Sensitivity Analyses in R[J]. Journal of Hydrology, 2013, 503: 135-152.

[2] 任启伟,陈洋波,舒晓娟. 基于 Extend FAST 方法的新安江模型参数全局敏感性分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(3): 127-134. (REN Qiwei, CHEN Yangbo, SHU Xiaojuan. Global Sensitivity Analysis of Xianjiang Model Parameters Based on Extend FAST Model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni 2010, 49(3): 127-134. (in Chinese))

[3] 任启伟,陈洋波,周浩澜,等. 基于 Sobol 法的 TOPMODEL 模型全局敏感性分析[J]. 人民长江, 2010, 41(19): 91-94. (REN Qiwei, CHEN Yangbo, ZHOU Haolan, et al. Global Sensitivity Analysis of TOPMODEL Parameters Based on Sobol Method[J]. Yangtze River, 2010, 41(19): 91-94. (in Chinese))

[4] ZHANG C, CHU J G, FU G T. Sobol's Sensitivity Analysis for A Distributed Hydrological Model of Yichun River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 480: 58-68.

(下转第 33 页)

- Scheduling Model in Danjiangkou Reservoir[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 1985, (8): 54-58. (in Chinese)
- [4] 王栋, 曹升乐, 员如安, 等. 水库群系统防洪联合调度的线性规划模型及仿射变换法[J]. 水利管理技术, 1998, 18(3): 1-5. (WANG Dong, CAO Sheng-le, YUAN Ru-an, et al. Joint Flood Control Scheduling of Reservoir Groups of Linear Programming Model and Affine Transformation Method[J]. Water Management Technology, 1998, 18(3): 1-5. (in Chinese))
- [5] Under O I, Mays L W. Model For Real Time Optimal Flood Control Operation of a Reservoir System[J]. Water Resources Management, 1990, (4): 24-45.
- [6] 沈佩君, 邵东国. 跨流域调水工程优化规划混合模拟模型研究[J]. 系统工程学报, 1992, 7(2): 43-52. (SHEN Pei-jun, SHAO Dong-guo. Interbasin Water Diversion Project Optimization Planning Hybrid Simulation Model Research[J]. Journal of Systems Engineering, 1992, 7(2): 43-52. (in Chinese))
- [7] 沈佩君, 张威升. 多种水资源的联合优化调度[J]. 水利学报, 1994, (5): 1-8. (SHEN Pei-jun, ZHANG Wei-sheng. A Variety of Joint Operation Optimization of Water Resources[J]. Journal of Water Conservancy, 1994, (5): 1-8. (in Chinese))
- [8] 郭元裕, 金兆森. 大系统试验选优理论研究[J]. 数学物理学报(A辑), 2004, 24(1): 8-15. (GUO Yuan-yu, JIN Zhao-sen. The Research of an Optimal Experimental Method for Large Scale Systems[J]. Journal of Mathematical Physics(A), 2004, 24(1): 8-15. (in Chinese))
- [9] LITTLE J D C. The Use of Storage Water in a Hydroelectric System [J]. Operational Research, 1955, (3): 187-197.
- [10] AHMED I. On the Determination of Multi Reservoir Operation Policy under Uncertainty [D]. Arizona: The University of Arizona, 2001.
- [11] 蔡治国, 王光谦, 魏加华. 黄河流域水量调度的自校正控制模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1660-1663. (CAI Zhi-guo, WANG Gang-qian, WEI Jia-hua. Self tuning Control Model for the Yellow River Water Regulation System[J]. Tsinghua Univ. (Sci&Tech), 2004, 44(12): 1660-1663. (in Chinese))
- [12] 王煜, 王道席, 王军良, 等. GIS 在水量调度决策支持系统中的应用[J]. 水科学进展, 2003, 13(1): 114-117. (WANG Yu, WANG Dao-xi, WANG Jun-liang, et al. Application of GIS to the Water Dispatching Decision Support System[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 114-117. (in Chinese))
- [13] 付湘, 纪昌明. 多维动态规划模型及其应用[J]. 水电能源科学, 1997, 15(4): 1-6. (FU Xiang, JI Chang-ming. Multidimensional Dynamic Programming Model and Its Application[J]. Water and Electricity Energy Science, 1997, 15(4): 1-6. (in Chinese))
- [14] MOHAN S, RAIPURE D M. Multi Objective Analysis of Multi-reservoir System [J]. Water Resources Plan Mgmt, 1992, 9(5): 356-370.
- [15] 王煜, 杨立彬, 侯传河, 等. 利用面向对象技术研究开发水量调度决策支持系统[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 441-446. (WANG Yu, YANG Li-bin, HOU Chuan-he, et al. Using the Object Oriented Program to Research and Develop the Water Dispatching Decision Support System[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 441-446. (in Chinese))
- [16] 江西省水利科学研究院. 赣江流域水量分配方案研究[R]. 南昌: 江西省水利科学研究院, 2008. (Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences. Study on Water Allocation in Ganjiang River Basin[R]. Nanchang: Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, 2008. (in Chinese))

(上接第 24 页)

- [5] WERKHOVEN K, WAGENER T, REED P, et al. Characterization of Watershed Model Behavior Across A Hydroclimatic Gradient[J]. Water Resources Research, 2008, 44(1): W1429.
- [6] TANG Y, REED P, WERKHOVEN K, et al. Advancing The Identification and Evaluation of Distributed Rainfall-runoff Models Using Global Sensitivity Analysis[J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): W6415.
- [7] TANG Y, REED P, WAGENER T, et al. Comparing Sensitivity Analysis Methods to Advance Lumped Watershed Model Identification and Evaluation[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2007, 11(2): 793-817.
- [8] 孟碟. 水文模型参数的灵敏度分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(2): 5-8. (MENG Die. Parameter Sensitivity Analysis of Hydrological Model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(2): 5-8. (in Chinese))
- [9] CHENG C T, ZHAO M Y, CHAU K W, et al. Using Genetic Algorithm and TOPSIS for Xinanjiang Model Calibration with A Single Procedure[J]. Journal of Hydrology, 2006, 316(1-4): 129-140.
- [10] CHENG C T, OU C P, CHAU K W. Combining A Fuzzy Optimal Model with A Genetic Algorithm to Solve Multiobjective Rainfall-runoff Model Calibration[J]. Journal of Hydrology, 2002, 268(1): 72-86.
- [11] 宋晓猛, 孔凡哲, 占车生, 等. 基于统计理论方法的水文模型参数敏感性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 642-649. (SONG Xiaomeng, KONG Fan-zhe, ZHAN Che-sheng, et al. Advances in Water Science. 2012, 23(5): 642-649. (in Chinese))
- [12] 包为民. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (BAO Wei-min. Hydrologic Forecasting[M]. Beijing: China Waterpower Press. (in Chinese))