

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0096

段浩, 赵红莉, 蒋云钟, 等. 一种改进的参数区间选取方法及在 WEP-L 模型中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 50-57. DUAN H, ZHAO H L, JIANG Y Z, et al. An improved method of parameter range selection and its application to WEP-L model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 50-57. (in Chinese)

一种改进的参数区间选取方法及 在 WEP-L 模型中的应用

段浩, 赵红莉, 蒋云钟, 贾仰文, 杜军凯, 刘佳嘉, 徐飞

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 分布式水文模型由于参数众多, 各参数之间不能完全独立, 在参数自动率定中存在部分参数的优选过程相互抑制情况。以 WEP-L (Water and Energy transfer Process in Large river basins) 分布式水文模型为例, 基于 GLUE 算法推求模型参数的后验分布, 将参数全局敏感性分析的 Sobol 方法与概念性水文模型的参数区间优选方法相结合, 给出了在较少参数采样次数条件下分布式水文模型不完全独立的多参数自动优选方案, 并在白河流域进行了应用。结果表明: (1) 用 GLUE 算法推求参数后验分布, 结合 Sobol 分析及参数的区间优选方法, 可对 WEP-L 实现参数自动率定, 模拟精度能达到 0.633; (2) 将 Sobol 全局敏感度分析与参数的区间优选方法相结合, 可进一步优化参数区间确定的原则, 提高模拟的精度。研究结果可为分布式水文模型的参数率定提供借鉴。

关键词: GLUE; 参数区间; WEP-L; 白河流域; Sobol 分析

中图分类号: TV11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0050-08

An improved method of parameter range selection and its application to WEP-L model

DUAN Hao, ZHAO Hongli, JIANG Yunzhong, JIA Yangwen, DU Junkai, LIU Jiajia, XU Fei

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: There are many parameters in a distributed hydrological model and the parameters are not completely independent from each other. During model calibration, there is mutual restraint of the selection of some parameters. The WEP-L, a distributed hydrological model, was taken as an example to validate the efficacy of the GLUE method for parameter calibration. The Sobol method and the parameter range selection method of conceptual hydrological models were combined to provide a scheme of parameter calibration for WEP-L. The scheme was applied to the Baihe basin. Results showed that the parameters of WEP-L model could be auto-calibrated with the help of GLUE method, Sobol analysis, and parameter range selection. The simulation precision was 0.633. The Sobol analysis can optimize the principle of parameter range selection and improve the simulation precision. The results can provide useful reference for the parameter calibration of distributed hydrological models.

Key words: GLUE; parameter range; WEP-L; Baihe basin; Sobol analysis

收稿日期: 2018-03-20 修回日期: 2018-05-04 网络出版时间: 2018-05-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180511.1102.008.html>

基金项目: “十三五”国家水资源立体监测体系与遥感技术应用(2017YFC0405804); 中国水利水电科学研究院基本科研专项(WR0145B012017)

Funds: National Key Research and Development Program of China National Water Resources Stereo Monitoring System and Application of Remote Sensing(2017YFC0405804); Basic Research Project of IWH National Monthly Water Storage and Water Demand Dynamic Assessment and Prediction(WR0145B012017).

作者简介: 段浩(1989-), 男, 河北人, 博士研究生, 主要从事水文及水资源方面的研究。E-mail: qying624@outlook.com

通讯作者: 赵红莉(1973-), 女, 安徽人, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源、水利信息化及水资源遥感方面的研究。E-mail: zhaohl@iwhr.com

水文模型参数的确定是模型研制与应用成功与否的关键^[1]。近年来,分布式水文模型的自动率定随着启发式算法的发展得到长足进步^[2],主要率定方法包括遗传算法、PEST 方法^[3]、SCE-UA 算法(Shuffled Complex Evolution)^[4]、GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)^[5]算法等等。这些方法已在多种分布式水文模型中得到应用^[4,6,8]并取得较好的效果,但在应用中仍存在一定问题:一方面分布式水文模型的异参同效性使模拟具有一定不确定性^[9];另一方面通过寻优的方式优化参数仍需要较大的计算次数,尤其是通过参数后验分布进行率定仍因计算量过大而受到限制^[4]。这些问题产生的一个重要原因是分布式水文模拟是高度的非线性问题,众多参数间相互作用,在参数率定过程中,一个参数取值区间的设定会影响与其关系密切的其他参数的率定结果^[10]。因此,要获得参数相对准确的分布特征,需要以较大的参数初始区间和较多的采样次数为基础。

为提高参数率定的效率,在率定参数前先对模型参数进行敏感性分析是常用的方法之一,它主要通过减少要优化的参数数量,来提高效率。该方法已在 SCE-UA^[4]、PEST^[11]等算法的参数率定中得到应用,并使优化算法的率定效率得到提升。然而,大多数方法在分析出水文模型的敏感参数后,主要是通过单参数不断迭代修正来实现率定参数的目的^[12],对模型参数间的相互作用考虑较少。事实上,对多参数的水文模型而言,参数间的相互作用也会对模型率定产生影响^[10,12,14],如在给定的土壤水蓄水容量空间分布条件下,新安江模型中土壤蓄水容量参数(WM)变大可导致蓄水容量曲线的方次参数(B)减小。

在通过考虑参数间相互影响来提高多参数水文模型模拟能力方面,Wu 等人^[14]近期对新安江模型进行了有益的尝试。作者通过构建衡量一个参数对另一个参数率定的影响程度指标($R_{CY,X}$)来量化参数间的相关性,当 R_c 为正值时,表示参数 X 取值的变化可使参数 Y 的取值区间变小、不确定性降低;当 R_c 为负时,则会使 Y 的取值区间变大、不确定性增大;当多组参数出现 R_c 负值时,Wu 等人提出一种类似于二阶敏感度的指标 Se 来确定参数优选的顺序,但在应用中 Wu 等人仅对 R_c 均值为负的参数采取了放弃优选、选用初始取值区间的简化处理方法。事实上,对于物理机理相对较强的分布式水文模型,参数之间的相互作用更加普遍,可能存在多个 R_c 均值为负的参数,如果都将其取回初始区间,

参数优选就失去意义。此外, Se 指标本身不具备判别全局优选顺序的能力, R_c 也仅是参数两两之间的影响评价,多参数的相互影响还存在高阶的相互作用。Wu 等人的发现并未完全解决多参数相互影响下的参数优选问题。

本文尝试将参数全局敏感性评价 Sobol 指数与参数相互影响这一现象相结合,给出分布式水文模型的参数取值区间优化方法,并以 WEPL(Water and Energy transfer Process in Large river basins)模型在白河流域在应用为例进行了方法的研究。研究对比了 WEPL 模型单参数区间优选、 R_c 均值优选、Sobol 全局敏感度指标优选的差异,以期为多个参数相互影响的复杂水文模型率定提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况及数据

白河流域位于北京密云水库上游,是潮白河流域的一部分,隶属海河水系,流域面积 $8\ 78 \times 10^3$ km^2 (见图 1),其中山区面积占 80% 以上^[15]。流域地处半湿润、半干旱的大陆性季风气候区,区内多年平均气温在 $6\ ^\circ\text{C}$ 到 $10\ ^\circ\text{C}$ 之间,年平均降雨量为 660 mm,降水多集中在夏季。流域内主要植被为暖温带落叶阔叶林,主要土壤类型为棕壤和褐土^[16],并有山地草甸土及浅色草甸土发育^[17]。

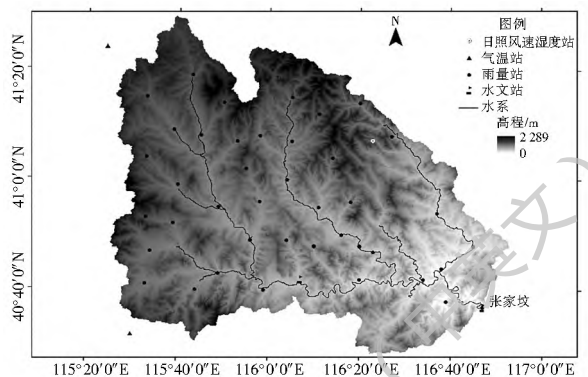


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

本研究所用流量数据为流域内张家坟水文站 1986–1990 年的月流量数据。该时段内流域降水、径流比多年均值略低^[15],年际间有明显的丰枯差异,数据能表征流域产汇流特点;气象数据包括研究区内气象站的降雨、风速、气温、日照时数、湿度等数据,从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)下载;土地利用数据为 1990 年的 LUCC(Land Use and Land Cover Change)土地利用数据;地表高程数据为 30 m 分辨率的数字高程数据(<http://www.dsac.cn/>)。

1.2 方法

1.2.1 水文模型

WEPL 模型是一个物理机制明确的分布式流域水文模型,详细描述了水循环的各个要素和环节,其参数均可测量或推算,模型建立的主要步骤包括基础数据收集、利用 GIS 技术建立数据库、根据 DEM 生成水系并划分子流域、对气象要素进行展布、推算参数、模型校验及应用等。有关 WEPL 模型的结构介绍与模拟方法详见文献[18]。

表 1 WEPL 主要模型参数

Tab.1 The main parameters of WEPL model

参数	参数物理意义	参数编号*	初始区间**
<i>Hssm</i>	洼地储留深/mm	1~9	5~200
<i>K</i>	土壤饱和导水系数修正系数	10~13	0~30
<i>Rcdt</i>	河床材质渗透系数分区修正系数	14~15	0~0.1
<i>Athk</i>	含水层厚度修正系数	16~17	50~60
<i>Rcmi</i>	气孔阻抗修正系数	18	0.05~0.15
<i>De</i>	土壤厚度/m	19~21	0~1
<i>Rmann</i>	河道曼宁修正系数	22	1~1.5
<i>Omann</i>	坡面曼宁修正系数	23	1~2
<i>Acdt</i>	土壤导水系数修正系数	24~25	10~15
<i>Storm_ks</i>	降雨入渗消减系数	26	1~6
<i>Sub_rv</i>	壤中流修正系数	27	0.01~0.1

注:* 此处编号为参数在模型中使用时的编号;** 此处初始区间为白河流域较大的取值范围,部分参数在模型垂向不同的分层而取值各异。

为建立白河流域的分布式水文模型,本研究利用 30 m 分辨率的地形数据对白河流域进行划分。对区内气象站的降雨、气温、风速、相对湿度及日照时数的逐日数据进行了时空展布。同时也对 1990 年的土地利用数据进行空间展布以作为模型输入。WEPL 的主要参数包括 11 类共 27 个参数,本文依据经验和研究区情况确定初始区间,为便于程序设计,模型引入“修正系数”的概念,即以修正系数乘以模型默认参数得到模型计算的最终参数^[4]。同时,因部分参数在模型不同区域或不同分层具有多个取值(如土壤厚度 *De* 在模型不同分层又分为 *De1_z*, *De2_z*, *De3_z* 共 3 个具体取值),为简化描述,本文对各参数进行编号,详见表 1。

1.2.2 参数后验分布推算

采用 GLUE 方法推算参数的后验分布,认为模拟值与实测值越接近,似然度越大,当模拟值与实测值的差值大于规定的阈值时,似然度为 0^[5]。GLUE 算法的计算流程可分为四步。

(1) 定义似然判据。本研究使用最常用的似然

判据 E_{NS} (式(1)), 临界阈值取 0.5。

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{mean})^2} \quad (1)$$

式中: i 是计算节点编号; n 是观测流量的总个数; $Q_{obs,i}$ 是实测流量; $Q_{sim,i}$ 是模拟流量; Q_{mean} 是实测流量的均值。

(2) 确定参数初始范围及先验分布。通常参数的先验分布难以确定,以均匀分布代替。

(3) 分析不确定性。似然值低于阈值的,认为似然度为 0。先确定参数的概率密度,然后依据似然值大小,估算一定置信水平的不确定性。

(4) 计算参数后验分布。当增加新数据时,利用 Bayes 函数以递推方式更新加权后的似然函数值(式(2))。算法详细过程可参考文献[5]。

$$L(Y | \theta_i) = \frac{L(\theta_i | Y)L_0(\theta_i)}{C} \quad (2)$$

式中: $L(Y | \theta)$ 是后验似然值; $L(\theta | Y)$ 是观测变量; $L_0(\theta_i)$ 是先验似然值; C 为归一化加权因子。

1.2.3 全局敏感性分析

采用 Sobol 分析法进行参数全局敏感性分析,能有效分析非线性水文模型多变量间相互作用下的参数敏感性^[19]。该方法将水文模型用式(3)表示。

$$Y = f(x) = f(x_1, \dots, x_p) \quad (3)$$

式中: Y 表示模型输出变量的衡量指标; x 为模型所有的参数。模型总方差 $D(y)$ 由各参数方差和参数相互作用方差组成(式(4))。

$$D(y) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j, k} D_{ijk} + D_{1,2,\dots,p} \quad (4)$$

式中: D_i 是参数 x_i 的方差; D_{ij} 为 x_i 和 x_j 参数相互作用方差; $D_{1,2,\dots,p}$ 是 p 个参数相互作用方差。将式(4)归一化后可得到各参数和参数相互作用的敏感性。一阶、二阶及全阶敏感性指数公式如式(5) - (7),详细计算过程可参考文献[19]。

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} \quad (6)$$

$$S_{Ti} = \frac{D_{-i}}{D} \quad (7)$$

式中: D_{-i} 是除参数 x_i 以外其他参数的方差; S_i 是参数 x_i 的敏感性; S_{ij} 是参数 x_i 和 x_j 相互作用的敏感性; S_{Ti} 是 x_i 与其他参数共同影响敏感性。

本文为讨论考虑率定过程中参数的相互作用对提高率定效率的影响,用 GLUE 算法生成 1000 组

参数样本并对 WEP-L 模型进行计算, 采样过程选用 LHS (Latin Hypercube Sampling) 采样方法^[20]。然后计算各参数 Sobol 指数来判断各参数的变化对 E_{NS} 的影响程度, 筛选出对 E_{NS} 敏感性高的参数。同时将模拟精度大于似然函数临界值的参数取值进行汇总, 利用方框统计图及频率直方图分析各参数的概率分布类型^[14], 为参数的区间优选做好准备。

1.2.4 多参数联合优选的影响度分析

参数区间的优选分为单参数区间优选和多参数区间优选两部分。单个参数区间的优选仍参考 Wu 等人的方法^[14]进行, 即对服从均匀分布的参数, 保持初始区间不变; 对服从指数分布的参数, 初始区间向概率密度大的一侧延长, 若参数延长后无物理意义, 则按给定的累积频率^[14] (50%) 确定最大 (MAXR) 和最小 (MINR) 区间, MAXR/MINR 即累积频率为 50% 的参数最大/小取值区间, 通过划定 MAXR 和 MINR, 来减小参数取值范围; 对服从正态分布的参数, 同样利用累积频率曲线减小参数初始区间。对于多个参数区间的优选, Wu 等人^[14]主要考虑了不同参数之间的相关性, 即某个参数区间的变化可能会引起另一个参数区间的改变, 通过引入 R_c 指标来分析一个参数区间的变动对其他参数的影响。当 $R_{c_{Y,X}}$ 越接近 1 时, 表明参数 X 的区间变化对参数 Y 区间的优化有积极作用; 相反, 当 $R_{c_{Y,X}}$ 为负值时, 代表不利于参数 Y 区间的优化。为避免参数服从均匀分布时 R_c 失效的情况出现, 本文在计算时不对参数 Y 进行区间的二次优选, 计算方法用式(8)表示。

$$R_{c_{Y,X}} = 1 - \frac{L_{Y,X}}{L_{Y,Initial}} \quad (8)$$

式中: $R_{c_{Y,X}}$ 是参数 X 区间的变化对参数 Y 区间优化的影响程度, $L_{Y,X}$ 是使用参数 X 优选后的区间及其他参数的初始区间进行优选后的参数 Y 的区间长度, $L_{Y,Initial}$ 是使用所有参数的初始区间优选后的 Y 参数的区间长度。

当 $R_{c_{Y,X}}$ 是负值时, Wu 等人引入 Se 指标来表征参数对模拟结果的敏感程度(式(9))^[14], 对 Se 较大者选用其优化后的区间。该指标本质上是表示单个参数变化对模型模拟结果的敏感性, 等效于 Sobol 分析中的一阶敏感度。

$$Se = 1 - \frac{E'_{NS Max} - E_{NS Min}}{E_{NS Max} - E_{NS Min}}$$

式中: Se 是参数区间变化对 E_{NS} 的敏感度, $E_{NS Max}$ 和 $E_{NS Min}$ 是用初始区间得到的 E_{NS} 最大值和最小值,

$E'_{NS Max}$ 和 $E'_{NS Min}$ 是用优化后区间得到的 E_{NS} 最大值和最小值。

1.2.5 考虑 Sobol 指数的多参数区间优选

本文使用 Sobol 全局敏感度指数来解决分布式水文模型多参数区间的优选问题。先用全局敏感的 Sobol 指数对 WEP-L 模型参数对全局的敏感度进行判定, 对敏感度低的参数使用其初始区间, 不进行参数区间的优化; 对全局具有较高敏感度的参数, 为考虑参数间相互作用, 按参数的 Sobol 全局敏感度指数大小, 依次确定各参数的取值区间。具体的参数优选流程见图 2。

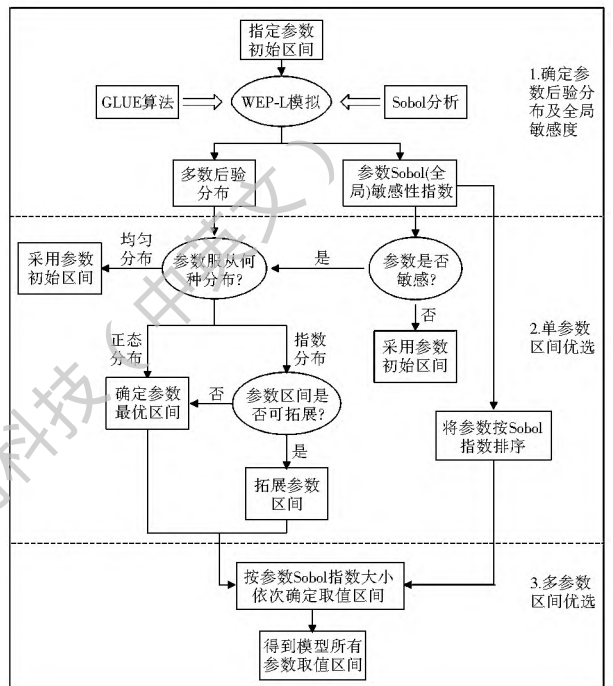


图 2 WEP-L 模型参数区间优选流程

Fig. 2 The parameter range selection procedures of WEP-L model

2 结果与分析

2.1 WEP-L 模型参数敏感度分析

为提高参数优选的效率, 先用 Sobol 分析法确定各参数变化对模型效率的影响程度, 筛选出对模型敏感的参数, Sobol 分析法的具体步骤可参考文献[19, 21]。Tang 等人的研究^[22]认为, 敏感度的阈值可根据参数数量或参数间相互作用来确定, 本研究中 Sobol 指数的低值较为接近, 如在本区分布较少的 H_{ssm} 参数, 分析时以此为阈值来确定敏感参数。图 3 给出了本研究中 WEP-L 各参数的一阶敏感性指数及全阶敏感性指数结果, Sobol 分析表明, H_{ssm} 参数中在本研究区分布较少的地物的参数等对模型的敏感性较低, Del_z 、 $Ac dt_-(1)$ 等参数对模型敏感度较高。依据 Sobol 分析的结果, 在参数区

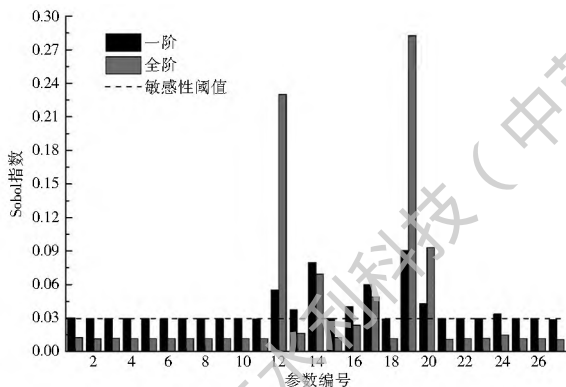


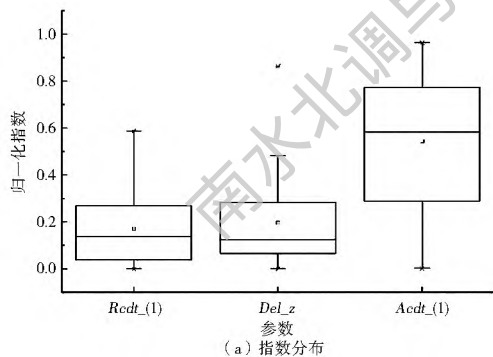
图 3 白河流域 WEP-L 模型参数 Sobol 指数

Fig. 3 Sobol index of WEP-L parameters for Baihe basin

间优选时,可重点讨论敏感性较大的 15 个参数。同时, Sobol 结果还表明部分参数的一阶敏感度排序与全阶敏感度排序有较大差异,这是由于分布式水文模型在率定中参数间的相互作用明显,而水文过程中每个环节的改变都可能影响最终的径流,即参数间具有较强的影响。

2.2 模型参数的后验分布

利用参数样本对 WEP-L 模型进行模拟,对模拟结果用方框统计图进行统计分析。为避免因各参数区间不同而导致统计结果难以对比,对参数进行归一化处理,归一化值为样本中各参数的取值与初始区间下限的差除以初始区间长度^[4]。统计分析表明, $Rcdt_{(1)}$ 、 $De1_z$ 等参数的平均值偏离方框的中值较明显,服从指数分布(图 4(a)); $Hssm_{(1)}$ 、



(a) 指数分布

$Ks_{(4)}$ 等参数符合正态分布(图 4(b));其他参数则服从均匀分布。部分参数的概率分布见图 5。

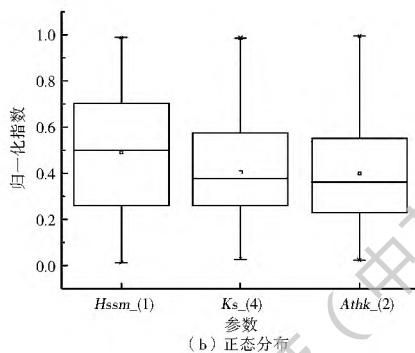
表 2 敏感参数按一阶敏感性与全阶敏感性排序对比表

Tab. 2 Sorting of parameters by first order sensibility and full order sensibility

参数编号	参数物理意义	参数名	一阶敏感性排序	全阶敏感性排序
19	土壤厚度	$De1_z$	1	1
14	河床材质渗透系数分区修正系数	$Rcdt_{(1)}$	2	4
17	含水层厚度修正系数	$Athk_{(2)}$	3	5
12	土壤饱和和导水系数修正系数	$Ks_{(3)}$	4	2
20	土壤厚度	$De2_z$	5	3
16	含水层厚度修正系数	$Athk_{(1)}$	6	6
13	土壤饱和和导水系数修正系数	$Ks_{(4)}$	7	7
24	土壤导水系数修正系数	$Acdt_{(1)}$	8	8
1	洼地储留深	$Hssm_{(1)}$	9	9
15	河床材质渗透系数分区修正系数	$Rcdt_{(2)}$	10	10
2	洼地储留深	$Hssm_{(2)}$	11	15
3	洼地储留深	$Hssm_{(3)}$	12	11
23	坡面曼宁修正系数	$Omann$	13	12
10	土壤饱和和导水系数修正系数	$Ks_{(1)}$	14	13
22	河道曼宁修正系数	$Rmann$	15	14

2.3 单参数区间优选及 Rc 值计算

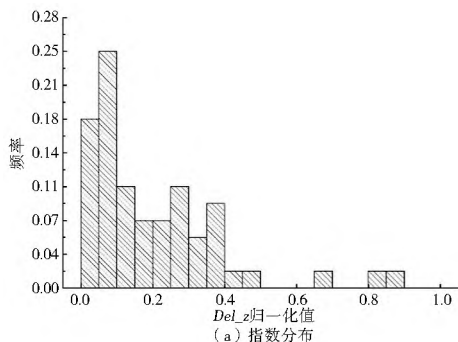
在确定各参数概率分布类型的基础上,对单参数区间进行优选主要分为两类,分别是正态分布和指数分布条件下的参数优选。表 3 给出了 $Rcdt_{(1)}$ 在不



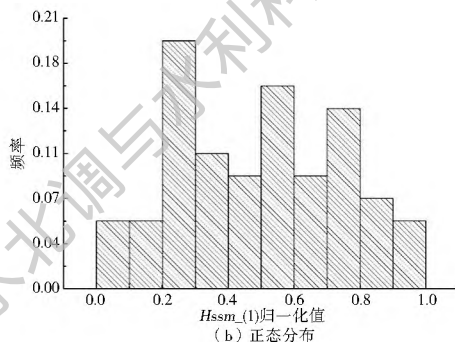
(b) 正态分布

图 4 部分参数的方框统计

Fig. 4 Box plot of part of WEP-L parameters



(a) 指数分布



(b) 正态分布

图 5 不同分布类型的概率分布

Fig. 5 Probability distribution of different types

表 3 不同 $Rcdt_{-}(1)$ 取值区间在 1 000 次计算时模型模拟结果

Tab. 3 Performance of WEP-L under 1 000 calculations with different range of $Rcdt_{-}(1)$

参数区间	E_{NS} 最大值	E_{NS} 高于临界值比例
初始区间(0~ 0.1)	0.587	0.057
MINR(0~ 0.01)	0.598	0.108
MAXR(0.01~ 0.06)	0.584	0.034

同区间条件下模型的计算结果。该参数初始区间为 0~ 0.1,服从指数分布,且概率分布在初始区间下限方向集中,但向下扩展参数区间无物理意义,故依据参数的累积频率确定 MINR 和 MAXR 来优化该参数区间。结果显示,该参数在 MINR 区间的计算结果最好,参数的区间长度明显降低,在相同的计算次数条件下, E_{NS} 的最大值提高了 0.011, E_{NS} 高于临界

值的比例提高了 0.051。

对每个参数分别进行单参数区间的优选,然后使用所有优选后的参数区间再次进行模型模拟,以检验单参数区间优选对模拟结果的影响。结果显示,使用优选后的区间进行模拟,在 1000 次循环下 E_{NS} 的最大值提高到 0.615, E_{NS} 高于临界值的比例提高到 0.145,模型模拟的效率得到较大地提高。在进行单参数区间优选后,计算敏感参数间的 R_c 指数值(表 4)(只列出不服从均匀分布参数),结果表明 WEP-L 模型参数间存在较为明显的相互影响,如 $Acdt_{-}(1)$ 分别与 $Hssm_{-}(1)$ 、 $Rcdt_{-}(2)$ 、 Del_z 三个参数有影响, $Hssm_{-}(1)$ 与 $Ks_{-}(4)$ 、 $Rcdt_{-}(2)$ 两个参数有影响。因此,在参数率定中,需要考虑参数间的相互作用来提高模型的模拟能力。

表 4 白河流域 WEP-L 模型参数 R_c 指数值

Tab. 4 R_c index value of WEP-L model for Baihe basin

参数	$Hssm_{-}(1)$	$Ks_{-}(4)$	$Rcdt_{-}(1)$	$Rcdt_{-}(2)$	$Athk_{-}(2)$	Del_z	$Acdt_{-}(1)$
$Hssm_{-}(1)$	-	- 0.20	- 0.43	- 0.12	- 0.08	- 0.29	- 0.01
$Ks_{-}(4)$	- 0.19	-	- 0.26	- 0.03	- 0.43	0.11	0.28
$Rcdt_{-}(1)$	0.18	0.06	-	- 0.22	- 0.06	0.13	0.27
$Rcdt_{-}(2)$	- 0.12	- 0.22	- 0.35	-	- 0.23	0.03	- 0.04
$Athk_{-}(2)$	0.25	0.09	0.09	0.26	-	0.20	0.30
Del_z	0.67	0.34	0.34	0.65	0.47	-	- 0.44
$Acdt_{-}(1)$	0.10	0.05	0.06	0.12	0.17	0.01	-
R_c 均值	0.15	0.02	- 0.09	0.11	- 0.03	0.03	0.06

2.4 多参数区间优选

从考虑率定过程中参数间的相互影响出发,本文用两种取值方案与采用所有单参数优选组合的方案进行对比:一种是采用 Wu 等人的做法,依据 R_c 均值的正负来确定各参数的优选区间,另一种方案是依据 Sobol 全局敏感度指标大小,顺序优选模型的各个参数。两种方案确定的各参数的优选结果如表 5 所示。利用上述参数取值方案分别对模型进行模拟,结果显示,依据 Sobol 全局敏感度大小依次确定各参数取值区间,模拟的效果最好(图 6), E_{NS} 高于临

表 5 参数在不同方案中的取值区间对比

Tab. 5 Comparison of parameter ranges in different schemes

参数	单参数优选组合	R_c 均值组合	Sobol 指数组合
$Hssm_{-}(1)$	18.50~ 23.59	18.50~ 23.59	23.46~ 29.40
$Ks_{-}(4)$	0.09~ 0.22	0.09~ 0.22	0.08~ 0.22
$Rcdt_{-}(1)$	0.00~ 0.01	0.00~ 0.10	0.00~ 0.02
$Rcdt_{-}(2)$	0.02~ 0.05	0.02~ 0.05	0.00~ 0.05
$Athk_{-}(2)$	52.46~ 55.51	50.00~ 60.00	52.70~ 55.42
Del_z	0.00~ 0.21	0.00~ 0.21	0.00~ 0.21
$Acdt_{-}(1)$	10.21~ 12.17	10.21~ 12.17	11.24~ 14.17

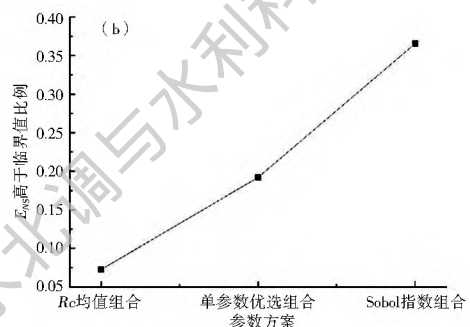
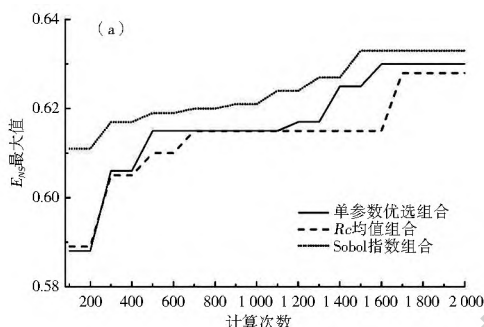


图 6 不同多参数组合方案计算结果对比

Fig. 6 Comparison of performances of different parameter schemes

界值的比例提高到 0.37, E_{NS} 最大值为 0.633。这是由于按照 Sobol 全局敏感度指数来顺序来考虑参数从而降低敏感度较低参数对全局的影响; 依据 R_c 均值确定的参数方案则简化了参数间的相互作用, 并忽略了对 R_c 均值为负的参数的优化, 对本文选用随机采样的率定方法效率较低; 而直接采用单参数优选组合方案, 由于忽略了参数间的相互影响, 虽在模拟次数较少时(图 6)效率高于 R_c 均值方案, 但其理论上的 E_{NS} 最大值要低于 R_c 均值方案。

3 结论与展望

本文以 GLUE 算法计算参数后验分布, 将参数的 Sobol 分析法与 Wu 等人提出的概念式水文模型参数区间的优选方法^[14]应用于分布式流域水文模型 WEP-L, 并在白河流域进行了实验, 得出的主要结论如下:

(1) 通过对参数后验分布的计算及全局敏感度的分析, 并在率定过程中考虑参数间的相互影响, WEP-L 模型可实现参数的自动率定, 模型纳什效率系数可达 0.633。

(2) 将 Sobol 全局敏感性分析应用于多参数区间的优选, 确定各模型参数的优选顺序, 可更好地处理 WEP-L 模型参数间的相互影响。

(3) 根据 R_c 均值确定模型参数的优选区间, 理论上可得到比单参数优选组合方案更高的模拟精度, 但对本文随机取样的率定方式而言, 当计算次数较少时, R_c 均值方案的优势不明显。

此外, 本研究推荐的 Sobol 指数组合方案仍需较多的计算次数, 在今后的研究中需进一步提高参数优选的效率。同时, 由于基于 GLUE 方法的参数采样过程具有一定的随机性, 该方法仍需更多的应用来进行验证。

参考文献(References):

- [1] 解河海, 郝振纯, 冯杰, 等. 基于遗传算法的 TOPMODEL 参数优化[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(1): 16-20. (XIE H H, HAO Z C, FENG J, et al. Parameters optimization of TOPMODEL based on genetic algorithm[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2008, 30(1): 16-20. (in Chinese))
- [2] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 649-655. (WANG Z G, XIA J, LIU C M, et al. Comments on sensitivity analysis, calibration of distributed hydrological model[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4): 649-655. (in Chinese))
- [3] 李云良, 张奇, 李相虎. 鄱阳湖流域分布式水文模型的多目标参数率定[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 565-572. (LI Y L, ZHANG Q, LI X H. Multi objectives model calibration for distributed hydrological model in the Poyang Lake watershed [J]. Resources of Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(5): 565-572. (in Chinese))
- [4] 雷晓辉, 贾仰文, 蒋云钟, 等. WEP 模型参数自动优化及在汉江流域上游的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1481-1488. (LEI X H, JIA Y W, JIANG Y Z, et al. Parameter optimization of WEP model and its application to the upstream of Han River [J]. Shuili Xuebao, 2009, 40(12): 1481-1488. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2009.12.004.
- [5] 周理, 冯威, 黎小东, 等. 基于 GLUE 方法的分布式水文模型 BTOPMC 参数不确定性分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(8): 26-33. (ZHOU L, FENG J, LI X D, et al. Parameter uncertainty analysis for distributed hydrologic model BTOPMC based on GLUE method[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(8): 26-33. (in Chinese))
- [6] 舒晓娟, 陈洋波, 黄锋华, 等. PEST 在 WetSpa 分布式水文模型参数率定中的应用[J]. 水文, 2009, 29(5): 45-49. (SHU X J, CHEN Y B, HUANG F H, et al. Application of PEST in the parameter calibration of WetSpa distributed hydrological model [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5): 45-49. (in Chinese))
- [7] 白薇, 刘国强, 董一威, 等. SWAT 模型参数自动率定的改进与应用[J]. 中国农业气象, 2009, 30(增 2): 271-275. (BAI W, LIU G Q, DONG Y W, et al. Parameters auto calibration with modified SWAT model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(supplement issue 2): 271-275. (in Chinese))
- [8] 周买春, 肖红玉, 胡月明, 等. BTOPMC/SACU 分布式流域水文模型原理和系统设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 132-139. (ZHOU M C, XIAO H Y, HU Y M, et al. Principles of BTOPMC/SACU distributed watershed hydrological model with system design[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 132-139. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.019.
- [9] VAN LIEW M W, ARNOLD J G, BOSCH D D. Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3): 1025-1040. DOI: 10.13031/2013.18514.
- [10] SONG X, ZHANG J, ZHAN C, et al. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523, 739-757. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.013.
- [11] 高伟, 周丰, 董延军, 等. 基于 PEST 的 HSPF 水文模型多目标自动校准研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 855-867. (GAO W, ZHOU F, DONG Y J, et al. PEST based multi objective automatic calibration of hydrologic parameters for HSPF model[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 855-867. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.05.013.
- [12] 江净超, 朱阿兴, 秦承志, 等. 分布式水文模型软件系统研究综述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1090-1100. (JIANG J C, ZHU A X, QIN C Z, et al. Review on distributed hydrological modelling software systems [J]. Progress in Geography, 2014,

- 33(8): 1090-1100. (in Chinese) DOI: 10.11820/dkxjz.2014.08.009.
- [13] ZHAO R J. The Xinanjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135, 37-381. DOI: 10.1016/0022-1694(92)90096 E.
- [14] WU Q F, LIU S G, CAI Y, et al. Improvement of hydrological model calibration by selecting multiple parameter ranges[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21, 393-407. DOI: 10.5194/hess-21-393-2017.
- [15] 李子君, 李秀彬. 潮白河上游 1961-2005 年径流变化趋势及原因分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊 2): 82-87. (LI Z J, LI X B. Trend and causation analysis of runoff variation in the upper reach of Chaobaihe River Basin in northern China during 1961-2005[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(supplement issue 2): 82-87. (in Chinese) DOI: 10.13332/j.1000-1522.2008.s2.001.
- [16] 密云水库上游水土资源保护领导小组办公室, 水利部海河水利委员会. 潮白河密云水库上游水土保持规划(1989-2000 年)[R]. 天津: 水利部海河水利委员会, 1989. (Water and Soil Resources Protection Leading Group Office of Miyun Reservoir Upstream, Haihe River Water Conservancy Commission, MWR. Planning of water and soil conservation of Miyun reservoir upstream of Chaobai river (1989-2000) [R]. Tianjin: Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, 1989. (in Chinese))
- [17] 赵阳, 余新晓, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 252-260. (ZHAO Y, YU X X, ZHENG J K, et al. Quantitative effects of climate variations and land use changes on annual streamflow in Chaobai river basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 252-260. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.22.035.
- [18] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (JIA Y W, WANG H, NI G H, et al. Theory and application of distributed hydrological model[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [19] 张小丽, 彭勇, 徐炜, 等. 基于 Sobol 方法的新安江模型参数敏感性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 20-24. (ZHANG X L, PENG Y, XU W, et al. Sensitivity analysis of Xinanjiang model parameters using Sobol method[J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2014, 12(2): 20-24. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2014.02.005.
- [20] 施小清, 吴吉春, 姜蓓蕾, 等. 基于 LHS 方法的地下水流模型不确定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2009(2): 1-6. (SHI X Q, WU J C, JIANG B L, et al. Uncertainty analysis of groundwater models based on the Latin Hypercube sampling technique[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009(2): 1-6. (in Chinese) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2009.02.008.
- [21] 任启伟, 陈洋波, 周浩瀚, 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 Q W, CHEN Y B, ZHOU H L, et al. Global sensitivity analysis of TOPMODEL parameters based on Sobol method[J]. Yangtze River, 2010, 41(19): 91-94. (in Chinese))
- [22] TANG Y, REED P, VAN WERKHOVEN K, et al. Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall-runoff models using global sensitivity analysis[J]. Water Resources Research, 2007, 43, W06415. DOI: 10.1029/2006WR005813