文章编号: 1672 - 3317(2018)12 - 0114 - 09

理想和实际资料情况下Nash模型参数异参同效性研究

邢贞相^{1,2}, 王 欣¹, 宫兴龙^{1,2*}, 付 强^{1,2}, 董洪涛¹
(1.东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2.农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘 要:【目的】研究异参同效问题对水文模型参数率定的影响。【方法】以黑龙江农垦红兴隆分局所辖的双鸭山农场 和友谊农场为研究区域,在理想资料和实际资料2种情况下,构建了基于SCE-UA算法的模拟优化模型,分别对 Nash模型参数进行了优化并分析了参数率定过程中的异参同效现象的表现特征。理想资料排除了水文模型输入 资料、模型结构以及模型输出等方面的误差对模型参数率定过程的干扰。【结果】在2种情况下,异参同效现象在 Nash模型参数率定过程中的表现特征为对较优似然值对应的参数组取值范围的影响和最优似然值对应的参数组 数量的影响。对不同场次洪水而言,2种情况下异参同效的2方面表现特征均与输入洪水的洪量以及洪峰的大小有 关,即随着输入洪水的洪量和洪峰的增加,异参同效现象越明显。对同一洪水而言,在理想资料情况下参数率定过 程中的异参同效显著程度小于实际资料情况下异参同效显著程度。【结论】在水文模型参数率定过程中,应基于不 同输入资料情况下参数异参同效特征分析,选取合理的参数率定方法,尽量避免或消除异参同效对参数率定的不 利影响,提高模型预报精度。

关键词:异参同效; SCE-UA; Nash模型; 理想资料; 实际资料

中图分类号: P333

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180177

邢贞相,王欣,宫兴龙,等.理想和实际资料情况下Nash模型参数异参同效性研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12): 114-122.

0引言

流域水文模型是水文学家在对自然界存在的随机复杂的水文过程及水循环规律初步认识的基础上,利用数学公式和物理原理进行的水文过程的近似表达,是水文过程模拟和水文规律研究的重要工具^[1-2]。构建水文模型的首要工作是参数率定以及模型结构的确定^[3-4]。参数率定的方法通常分为手动参数率定和自动参数率定2类^[5]。在参数率定过程中,受到多种不确定因素的影响^[6-10](如参数之间的相互影响、输入资料误差、模型结构误差以及目标函数的多极值现象等)使率定的模型参数难以有效地逼近其真值。近年来,"异参同效"现象已成为水文模型参数率定不确定性问题的研究热点。关于水文模型参数估计中存在的异参同效现象,许多学者做了诸多研究。其中,对水文模型参数估计中不确定性问题的讨论及研究主要基于2种假设^[11]:①假设水文模型参数是一组确定而未知的数值;②假设水文模型参数是服从某个联合概率分布的随机向量。以假设①为前提水文模型参数估计问题可以转换为一个超定方程的求解问题,常用的解决方法及主要解决途径是参数优化算法的改进及似然函数的选择^[12-15]。以假设②为前提,水文模型参数估计问题可以转化为数理统计问题,常见的解决方法为Bayes统计学^[16-18]。通常情况下,在假设②前提下,水文模型参数估计问题可以转换结果是对模型参数在研究流域的区间估计问题。国外的研究主要集中在参数优化算法原理的研究,其中代表性的参数优化方法有洗牌复型演化算法(Shuffled Complex Evolution Algorithm-UA, SCE-UA)^[19]、粒子群优化算法^[20-22](Particle Swarm Optimization, PSO)、模拟退火算法^[21-24](Simulated Annealing Algorithm,

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0406004);国家自然科学基金项目(51109036,51179032);黑龙江省自然科学基金项目(E2015024); 教育部高等学校博士点新教师资助基金项目(20112325120009);黑龙江省领军人才梯队后备带头人资助项目(500001);黑龙江省博士后 资助基金项目(LBH-Q12147);黑龙江省水利厅科技开发项目(201402,201404,201501);东北农业大学"学术骨干"资助项目(16XG11) 作者简介:邢贞相(1976-),男。副教授,博士,主要从事水文水资源不确定性分析与水文预报研究。E-mail: zxxing@neau.edu.cn

收稿日期:2018-03-25

SA)等。国内的异参同效研究多侧重于对参数优化过程的控制,以期达到削弱异参同效对参数率定的影响。例如,通过减少待率定模型参数的个数来减弱异参同效现象^[25],构建"参数曲线带"分析异参同效现象^[26] 以及利用引入特定的约束条件来控制参数的率定过程^[27],以达到减弱模型参数率定的异参同效现象之目 的。基于2种假设,采取合理的参数优化算法对水文模型参数进行率定过程中,均存在不可避免的参数不确 定性问题^[15]。如何采取不确定性分析方法尽量避免或降低不确定因素对模型参数率定过程产生的不利影 响,识别不敏感参数,回避异参同效,对水文模型参数率定及模型应用工作具有重要意义^[15]。

近年来,在水文模型参数异参同效的研究中发现具有相同似然函数值的参数组的数量多少与异参同效特征有着较为密切的联系,即具有相同似然值的参数组的数量越多,异参同效现象越明显,反之,异参同效现象越不明显^[28]。此外,参数对不同似然值的响应特征,即在参数优化过程中,不同似然值与其相应参数的响应带征对最优参数的求解也起着重要的影响。因此,兹尝试从参数对似然函数的响应面入手、探讨不同似然值与相应参数组的数量及其参数取值范围的响应特征,即在模拟优化模型的理论框架下,分析Nash模型参数优化结果中异参同效的双重表现特征(具有相同似然值的参数组数量以及取值范围),并结合理想资料与实际资料2种背景分别分析异参同效表现特征及其影响因素,为后期参数率定工作中异参同效问题的避免及模型模拟精度的提高提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

选用的研究区域为位于黑龙江省东部三江平原的挠力河流域内双鸭山农场和友谊农场(图1)。挠力河 流域内的七星河湿地为国家自然保护区,除所选双鸭山农场及友谊农场之外,还有饶河农场、红旗岭农场、 八五三农场等8个国有农场,是三江平原重要的水稻种植区。其中,双鸭山农场位于双鸭山市东南郊区七星 河上游,友谊农场位于黑龙江省友谊县内,本研究选用该流域内保安水文站控制区域的实测降雨洪水作为基 础数据(摘自《黑龙江省水文年鉴》)。保安水文站位于挠力河流域的内七星河上游,控制面积为1344 km²。 该流域多年平均降水量为545 mm,降水大部分集中在6—9月,占全年降水量的70%,尤其是7—8月雨量较 为集中,约占全年降水量的44%;春季5、6月降水量较少,仅占全年降水量的23%。研究区域的地理位置及 水系如图1所示。本研究选取挠力河流域保安站1960—1990年间(流域内下垫面变化较弱,水文一致性条 件较好)的8场不同量级的代表性洪水作为基础数据。



图1 挠力河流域位置图

1.2 理想资料

为便于研究分析水文模型参数率定过程中的参数不确定性问题,消除参数率定过程中由于模型输入不确定性、模型内部结构不确定性以及输出不确定性对参数率定的影响,基于理想资料来研究参数率定过程中的异参同效问题。理想资料的含义^[29]为:对于某一模型结构确定的水文模型,模型内部参数值为定值的情况下,以实测输入信息作为模型输入,利用既定模型参数值,计算得到的模型输出即为理想资料情况下的模型输出。其原理为:在该情景下模型对输入输出关系的描述不存在任何误差——既无输入误差,也不存在观测资料以及模型结构误差,即被称为理想资料。在理想资料情况下,模型模拟误差的唯一来源仅为水文模型参数率定过程中的参数误差。理想资料可借助于实际流域的降雨过程和模型参数来生成。

对于 Nash 模型而言,其模型输入为全流域面积内发生的实测净雨过程,模型输出为流域出口断面形成 的地面径流过程。兹通过新安江模型计算得出模型输入的净雨过程,在实际资料情况下,由新安江模型计 算以及实测降雨、蒸散发数据等方面所引起的误差总归结为 Nash 模型参数率定过程中的净雨输入误差。 而在理想资料情况下,模型输入、模型结构以及模型输出可视为不受误差影响。

1.3 模拟优化模型

以SCE-UA算法为优化算法,以Nash模型作为模拟模型构建模拟优化模型,并对Nash模型两参数n、k 进行同步优化。Nash模型是爱尔兰水文学家Nash基于瞬时单位线原理,假定流域出口断面的流量过程是 流域内净雨过程受流域调蓄作用的结果而构建的流域水文模型^[30]。其中,参数n、k均为反映流域调蓄能力 的参数,可分别作为线性水库的个数以及线性水库的蓄泄常数。

在模拟优化模型中,以由实测径流过程和模拟径流过程求得的似然函数为优化目标函数,通过模拟-优化过程的连续迭代,得到接近Nash模型参数真值的参数集。具体步骤为:

①设定 SCE-UA 算法的预设参数、循环次数、收敛判据以及 SCE-UA 算法的似然函数。②根据研究区特性和实测径流,利用矩法^回确定率定期洪水的 Nash 模型参数 n、k,据此确定 2 个参数的取值范围,并在该范围内随机产生 n 和 k 的初始值。③将参数 n 和 k 的初始值代入 Nash 模型中,计算流域出口径流过程,并求出似然函数值。④将似然函数值返回到优化模型中,并指导 SCE-UA 算法调整 Nash 模型参数。⑤循环步骤③和步骤④直到满足算法的收敛判据或者达到预设的最大迭代次数为止。

其中SCE-UA算法的似然函数(即该模拟优化模型的目标函数)表达式为:

$$L(N) = RMSE^{-N} , \qquad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{T} (Q_{\text{sim},t} - Q_{\text{obs},t})^2} , \qquad (2)$$

式中:N'表示形状参数,取N'=20^[32];T为参数率定期间洪水模拟时刻的总数,模拟预见期为1h;t为洪水模拟时刻;Q_{sim},、Q_{obs},分别为时刻t的流量模拟值与实测值。

2 结果与分析

2.1 理想资料情况下基于模拟优化模型的参数异参同效性分析

2.1.1 理想资料生成

理想资料生成的首要工作为Nash模型参数率定值及模型参数真值的求解。常见的Nash模型参数n、k的计算方法很多,包括矩法、熵法、图解法以及最优化法等。兹选用矩法³¹¹计算研究区域对应的Nash模型参数率定值及参数真值。

针对挠力河流域保安水文站1960—1990年间8场洪水对应的实测降水、蒸发以及流域出口断面实测径 流过程等数据,利用新安江模型计算净雨过程,利用矩法计算8组Nash模型参数率定值,并将其均值作为理 想资料情况下Nash模型参数真值。具体计算结果见表1。

 古刊	洪水编号								
快至参数	690724	720809	730910	740601	740809	740902	820828	850801	反正具但
п	2.93	3.67	4.24	3.14	3.31	3.15	3.19	3.58	3.40
k	4.15	2.54	2.54	3.33	4.72	3.17	2.64	4.19	3.41

表1 挠力河流域Nash模型参数率定值及参数真值

2.1.2 理想资料情况下基于模拟优化模型的参数优化

1)预热期处理。由表1可初步得出,该研究区域对应的Nash模型两参数的取值范围分别为: *n*∈[2.9,4.3],*k*∈[2.5,4.8]。考虑到样本容量有限和矩法的计算误差影响,将上述两参数的取值范围按适当比例进行扩展。设该研究区域内Nash模型两参数的取值范围分别为:*n*∈[0,5],*k*∈[0,7]。假定Nash模型参数 在该取值区间内呈均匀分布,设定SCE-UA算法循环次数为5000次,对Nash模型两参数进行同步优化,得 到理想资料情况下不同场次洪水对应的参数均值迭代过程如图2所示。由图2可知,同一场洪水对应的 Nash模型参数*n*,*k*的收敛速度略有不同但二者差异不大,即在同一场洪水参数迭代过程中二参数几乎同步 收敛。而不同场次洪水对应的Nash模型参数的收敛速度相差较大。另外,编号为740902场次的洪水在最 短运行次数内达到收敛,即在优化达到1000次后,参数*n*和*k*的均值基本趋于稳定。而编号为720809场次 的洪水的参数收敛速度最慢,即在优化达到2000次后,参数*n*和*k*的均值才基本趋于稳定。考虑所有场次 洪水对应参数均值的迭代稳定性,将各场洪水对应的参数优化的前2000次作为理想资料情况下基于SCE-UA算法的模拟优化模型的预热期,即取稳定后5000-2000=3000次的参数优化结果用以后期的Nash模型 参数不确定性分析。



2)异参同效特征分析。根据各场洪水对应的预热期后3000次参数优化结果及其相应的似然函数值, 绘制理想资料情况下率定期内二参数的似然函数响应面图(图3)。由图3可知,率定期内每场洪水的似然函 数响应面图中均存在多条"等值线"。其中在Nash模型参数实际率定过程中,似然函数的选取对模型率定结 果有一定程度的影响但并不影响模型参数率定结果及参数不确定性分析^[30],故图4不同洪水对应的响应面 表现为一组不完整等值线。各条等值线上的点所代表的参数值不同,但其对应的似然函数值均相同,即 Nash模型预报精度相同。这说明理想情况下利用模拟优化模型得到的Nash模型参数存在异参同效现象。 根据图3,将各场洪水的似然函数响应面上最外一条等值线内的所有参数组作为"有效"参数集合,将次内条 等值线内的所有参数组作为"较优"参数集合。由于各场洪水对应的Nash模型参数有效参数集合取值范围 及较优参数集合取值范围不同,因此无法通过直接对比各场洪水的有效参数集合取值范围和较优参数集合 取值范围来分析异参同效对参数率定的影响程度大小。因此,通过计算图3中次内条等值线所含面积与最 外一条等值线所含面积之比(表2),并将其作为异参同效对各场洪水参数率定过程中较优参数取值范围的 影响程度来进行异参同效特性分析。由表2可知,不同场次洪水对应的较优参数集合取值范围不同,且与有 效参数取值范围的比值也不相同。其中,编号820828的洪水的比值最小,而编号730910的洪水对应的比值 最大。

此外,将每场洪水中基于模拟优化模型得到的参数组所对应的似然值将其由小至大划分为5等级,其中

等级1为模拟精度最低的参数组,等级5为模拟精度最高的参数组。统计各个等级对应的Nash模型参数组 (n,k)的样本数并计算各个等级内参数组样本数所占样本总体的比值,具体见表3。由表3可知,在8场洪水 中,随着似然值的增加,其对应的Nash模型参数组数量逐渐减少。这说明在基于模拟优化模型的Nash模型 参数优选过程中,随着模拟精度的提高,异参同效对参数优化结果的影响越小。而表3中同一等级中不同场 次洪水对应的参数组数量及比值也不尽相同。例如,在等级5中,编号820828洪水的模拟精度最高的参数 组最少,而编号730910的洪水的模拟精度最高的参数组最多。



		A2 建心贝	11月示 1 千足为	小顶流四致内,	空间的权力	19-3010日	一月双多级氾	四70回		
洪号		690724	720809	730910	740601	740809	740902	820828	850801	
洪量/m ³		383.39	814.9	5873.59	500.02	1 517.03	3 880.93	370.79	1 146.72	
洪峰流量/(m³ · s ⁻¹)		23.10	46.62	664.99	24.86	57.70	293.64	19.80	62.05	
比值/%		2.36	7.37	29.24	5.91	9.83	16.44	1.02	8.95	
表3 理想资料情景下率定期每场洪水对应的不同似然等级内的参数组数量及其占比										
洪号	等级	似然值范围	参数组样本容量	比例/%	洪号	等级	似然值范围	参数组样本容量	比例/%	
	1	(0,0.4)	2 971	99.03		1	(0,0.6)	2 399	79.91	
	2	(0.4,0.8)	15	0.51		2	(0.6,1.2)	262	8.74	
690724	3	(0.8,1.2)	7	0.23	720809	3	(1.2,1.8)	193	6.43	
	4	(1.2,1.6)	4	0.11		4	(1.8,2.4)	138	4.63	
	5	(1.6,2.0)	3	0.11		5	(2.4,3.0)	8	0.29	
	1	(0,0.32)	2 841	94.71		1	(0,0.28)	2 894	96.46	
	2	(0.32,0.64)	62	2.06	740601	2	(0.28,0.56)	55	1.83	
730910	3	(0.64,0.96)	47	1.57		3	(0.56,0.84)	31	1.03	
	4	(0.96,1.28)	24	0.80		4	(0.84,1.12)	12	0.40	
	5	(1.28,1.60)	26	0.86		5	(1.12,1.40)	8	0.28	
	1	(0,0.24)	2 884	96.13		1	(0,0.9)	2 870	95.67	
	2	(0.24,0.48)	47	1.57		2	(0.9,1.8)	55	1.83	
740809	3	(0.48,0.72)	31	1.07	740902	3	(1.8,2.7)	34	1.13	
	4	(0.72,0.96)	22	0.73		4	(2.7,3.6)	20	0.67	
	5	(0.96,1.20)	16	0.53		5	(3.6,4.5)	20	0.67	
	1	(0,1.2)	2 955	98.51	850801	1	(0,0.28)	2 899	96.63	
820828	2	(1.2,2.4)	21	0.69		2	(0.28,0.56)	34	1.14	
	3	(2.4,3.6)	10	0.31		3	(0.56,0.84)	35	1.17	
	4	(3.6,4.8)	12	0.40		4	(0.84,1.12)	22	0.72	
	5	(4.8,6.0)	3	0.09		5	(1.12,1.40)	10	0.34	

表2 理想资料情景下率定期似然函数响应面的较优参数范围与有效参数范围比值

基于以上分析结果,将异参同效对基于模拟优化模型的Nash模型参数优化结果的影响分为2方面: 1)异参同效对较优参数组取值范围的影响,表现为图3中较优参数集合取值范围与有效参数集合的取 值范围的比值不同——比值越大表明异参同效对较优参数组的取值范围影响越大;反之比值越小表明异参 同效对较优参数组的取值范围影响越小。由表2可知,编号820828的洪水所对应的Nash模型参数优选过程 中,异参同效对较优参数组取值范围的影响最小。编号730910的洪水所对应的参数优选过程中,异参同效 对较优参数组取值范围的影响最大。

2)异参同效对模拟似然值最优的参数组数量的影响,即异参同效现象的明显程度,主要表现为表3中不同场次洪水对应的等级5(模拟似然值最优)内参数组的数量不同——在该等级内参数组数量及其所占比例

越大,说明异参同效现象越明显;反之,等级5内参数组数量及其所占比例越小,说明异参同效现象越不明显。对比分析表3中8场洪水等级5内参数组数量及比例发现,编号820828洪水的Nash模型参数优化过程 中异参同效现象最不明显,而编号730910洪水的Nash模型参数优化过程中异参同效现象最明显。

在理想资料情况下,对于率定期内不同场次洪水而言,异参同效现象对Nash模型参数率定的影响是不同的。从异参同效对较优参数组取值范围的影响及其对模拟似然值最优的参数组数量的影响2方面分析,并结合不同场次洪水的水文信息(洪峰及洪量)发现,异参同效对Nash模型参数率定的2方面影响程度均与 其对应的实测洪水的洪峰及洪量大小有关。

如表2所示,异参同效对较优参数组取值范围的影响最小的洪水为820828,对应的洪水总量为370.79 m³, 洪峰流量为19.80 m³/s,在率定组洪水中,其洪水总量、洪峰值均为最小;异参同效对较优参数组取值范围的 影响最大的洪水为730910,对应的洪水总量为5 873.59 m³,洪峰流量为664.99 m³/s,在率定组洪水中,其洪水 总量、洪峰值均为最大。在其他6场洪水中,随着输入洪水的洪量和洪峰的增大,其对应的较优参数集合所 占比值呈增大趋势。这说明,在理想资料情况下,利用模拟优化模型对 Nash模型参数进行优化过程中,异参 同效现象对优选参数组的取值范围的影响程度与输入洪水的洪量、洪峰有关。其中,洪水的洪量和洪峰越 小,异参同效现象对较优参数取值范围的影响越小;反之,洪水的洪量、洪峰越大,异参同效现象对较优参数 取值范围的影响越大。

如表2、表3所示,在8场洪水中730910场次的洪水的洪量以及洪峰均为最大,且其对应的模拟似然值最优(等级5)的参数组数量为26,其占所有等级参数组总数量的比例为0.86%,在率定组洪水的比例中最大, 说明异参同效现象最明显。在8场洪水中编号为820828场次的洪水的洪量以及洪峰均为最小,且其对应的 模拟似然值最优(等级5)的参数组数量为3,其占所有等级参数组总数量的比例为0.09%,在率定组洪水的 参数组比例最小,说明异参同效现象最不明显。在其他6场洪水中,随着输入洪水的洪量以及洪峰的增大, 其对应的模拟似然值最优参数组的数量及其比例呈增大趋势。这说明,Nash模型参数率定过程中异参同效 现象的明显程度主要受率定期洪水的洪量、洪峰的影响。其中,洪量和洪峰较大的洪水,率定的最优参数组 数量较多,其受异参同效的现象较明显;反之,洪量、洪峰较小的洪水,率定的最优参数组数量较少,其异参 同效现象的影响不明显。

不管是在较优参数的取值范围方面还是在最优参数组的数量方面,理想资料情况下异参同效对Nash模型参数率定结果的影响程度均主要受率定期洪水的洪量和洪峰的影响。即实测洪水的洪量及洪峰值越大,异参同效现象对其对应的Nash模型参数率定的影响越大,反之,实测洪水的洪量及洪峰值越小,异参同效现象对其对应的Nash模型参数率定的影响越小。

2.2 实际资料情况下基于模拟优化模型的参数异参同效性分析

在实际资料情况下,利用模拟优化模型对Nash模型参数(n,k)异参同效特征分析时,仍需通过对参数均 值迭代过程进行稳定性分析以确定模拟优化模型的预热期。采用与2.1.2节相同的方法,确定实际资料情况 下前1500次迭代作为模型预热期。故取迭代稳定后的3500组参数(n,k)及其对应的似然函数值用于后期 参数不确定性分析。

根据各场洪水对应的预热期后3500次参数优化结果及其相应的似然函数值,在绘制实际资料情况下 率定期内不同场次洪水对应的两参数似然函数响应面(图4)。由图4可见,在实际资料情况下,每场洪水对 应的似然函数响应面上也均存在多条"等值线"。这说明实际资料情况下,利用模拟优化模型得到的Nash模 型参数过程中也存在异参同效现象。由分析异参同效的2个表现特征的方法,同理计算实际资料情况下,率 定期内各场洪水较优参数集合取值范围与有效参数集合取值范围之比(表4)。由表4可知,实际资料情况下 不同场次洪水对应的较优参数集合取值范围不同,且与有效参数取值范围的比值也不相同。其中,编号 820828的洪水的比值最小,而编号730910的洪水对应的比值最大。另外对比表4发现在其他6场洪水中, 随着输入洪水的洪量及洪峰的增大,其对应的较优参数集合取值范围所占比例呈增大趋势。即在实际资 料情况下,异参同效现象对优选参数组取值范围的影响程度也与输入洪水的水文信息(洪水总量与洪峰) 有关——洪水的洪量及洪峰值越小,异参同效对较优参数取值范围的影响程度越小,反之,洪水的洪量及洪峰 峰值越大,异参同效对较优参数取值范围的影响程度越大。

此外,利用前文中异参同效对不同场次洪水对应的Nash模型最优参数组数量的影响的分析方法,同理

根据似然值大小划分预热期后3 500次模型参数组及其对应的似然函数值。统计各个等级对应的Nash模型 参数组并计算各个等级内参数组样本数所占样本总体的比值(表5)。由表5可知,在实际资料情况下,随着 似然值的增加,同一场洪水对应的Nash模型参数组数量也呈现逐渐减少的趋势,即随着模拟精度的提高,异 参同效对参数优选的影响越小。在实际资料情况下,820828洪水的模拟精度最高(等级5内)的参数组最少, 而编号730910的洪水的模拟精度最高(等级5内)的参数组最多。率定期内其他6场洪水中,随着输入洪水 的洪量及洪峰值的增大,其对应的最优参数组(等级5内)数量呈增大趋势。这说明,在实际资料情况下,异 参同效对最优参数组数量的影响程度也随着输入洪水的洪量及洪峰值的增大而增大。

汐	共号	690724	720809	730910	740601	740809	740902	820828	850801
洪	量/m ³	383.39	814.9	5873.59	500.02	1517.03	3880.93	370.79	1146.72
洪峰流量	$\frac{1}{2}/(m^3 \cdot s^{-1})$	23.10	46.62	664.99	24.86	57.70	293.64	19.80	62.05
比值/%		4.26	10.63	31.07	7.84	14.18	24.92	3.76	11.70
表5 实际资料情景下率定期每场洪水对应的不同似然等级内的参数组数量及其占比									
洪号	等级	似然值范围	参数组样本容量	比例/%	洪号	等级	似然值范围	参数组样本容量	比例/%
	1	(0,0.7)	3 408	97.37		1	(0,0.9)	2 570	73.45
	2	(0.7,1.4)	44	1.25		2	(0.9,1.8)	369	10.53
690724	3	(1.4,2.1)	20	0.58	720809	3	(1.8,2.7)	295	8.42
	4	(2.1,2.8)	16	0.46		4	(2.7,3.6)	241	6.89
	5	(2.8,3.5)	12	0.34		5	(3.6,4.5)	25	0.71
730910	1	(0,0.8)	2 747	78.47		1	(0,0.4)	3 280	93.72
	2	(0.8,1.6)	258	7.38		2	(0.4,0.8)	97	2.77
	3	(1.6,2.4)	214	6.11	740601	3	(0.8,1.2)	64	1.83
	4	(2.4,3.2)	150	4.29		4	(1.2,1.6)	41	1.16
	5	(3.2,4.0)	131	3.75		5	(1.6,2.0)	18	0.52
	1	(0,0.7)	3 128	89.34		1	(0,0.2)	2 973	84.94
	2	(0.7,1.4)	134	3.84		2	(0.2,0.4)	162	4.63
740809	3	(1.4,2.1)	104	2.98	740902	3	(0.4,0.6)	143	4.09
	4	(2.1,2.8)	91	2.61		4	(0.6,0.8)	131	3.75
	5	(2.8,3.5)	43	1.23		5	(0.8,1.0)	91	2.59
820828	1	(0,0.5)	3 334	95.23		1	(0,0.8)	3 299	94.24
	2	(0.5,1.0)	84	2.41		2	(0.8,1.6)	77	2.19
	3	(1.0,1.5)	48	1.37	850801	3	(1.6,2.4)	61	1.75
	4	(1.5,2.0)	25	0.72		4	(2.4,3.2)	34	0.98
	5	(2.0,2.5)	9	0.27		5	(3.2,4.0)	29	0.84

表4 实际资料情景下率定期似然函数响应面的较优参数范围与有效参数范围比值

综合以上2方面的异参同效特征分析,发现实际资料情况下异参同效对Nash模型参数率定结果的影响 程度均主要受率定期洪水的洪量和洪峰的影响。即,实测洪水的洪量及洪峰值越大,异参同效现象对其对 应的Nash模型参数率定的影响越大,反之,实测洪水的洪量及洪峰值越小,异参同效现象对其对应的Nash 模型参数率定的影响越小。



2.3 不同输入资料情况下 Nash 模型参数异参同效对比分析

在理想资料和实际资料2种情况下,利用模拟优化模型对率定期内8场洪水对应的Nash模型参数进行优化过程中均出现不同程度的异参同效现象。其中,异参同效对Nash模型参数优化率定中的2个影响特

征——较优参数取值范围和最优参数数量均与输入洪水的洪水总量及洪峰值的大小有关。具体表现为:输入洪水的洪量及洪峰越大,其对应的Nash模型参数率定中异参同效现象越明显,反之,输入洪水的洪量及洪峰值越小,异参同效现象越不明显。

在理想资料和实际资料情况下,同一场洪水的参数率定过程中异参同效现象的2个影响特征各异。即 同一场洪水中,理想资料情况下较优参数取值范围和最优参数数量及其所占比例不同于同一洪水中实际资 料情况下较优参数取值范围和最优参数数量及其比例。绘制2种情况下各场洪水对应的异参同效2种表现 特征柱状图如图5、图6所示。由图5、图6可知,同一场洪水中,理想资料情况下较优参数取值范围所占比例 与最优参数数量及其所占比例均小于同一场洪水中实际资料情况下较优参数取值范围所占比例与最优参 数数量及其所占比例。即在理想资料情况下,同一场洪水对应的Nash模型参数率定过程受到的异参同效影 响程度小于实际资料情况下同一场次洪水的参数率定中的异参同效影响程度。



3 讨论

在理想资料及实际资料情况下,通过构建模拟优化模型分析 Nash 模型参数率定过程中的异参同效现象 及其影响因素。由不同输入资料情况下 Nash 模型参数异参同效表现特征差异性分析可知,对同一场洪水而 言,模型输入输出以及模型结构是造成异参同效明显程度差异性的主要原因。与前人^[32-3]研究结果相似。另 外,根据异参同效的多重表现特征,结合输入洪水水文信息得出不同输入洪水条件下,异参同效表现特征符合 一定规律。如何在异参同效表现特征分析及规律研究的基础上制定合理的参数率定方法,尽量消除或避免异 参同效对水文模型参数率定过程产生的不利影响并进一步提高模型预报精度,是下一步需要研究的内容。

4 结 论

1)不论是在理想资料情况下,还是在实际资料情况下,Nash模型参数优化过程中均存在较强的异参同 效现象,其特征表现为2方面:一方面是异参同效对较优参数组取值范围的影响,另一方面是异参同效对模 拟似然值最优的参数组数量的影响。而这2方面的影响特征均与率定期洪水的洪峰及洪量有关,即洪量和 洪峰较大的洪水,异参同效现象对二者的影响较大;反之,洪量和洪峰较小的洪水,影响较小。

2)对于同一场洪水而言,在理想资料和实际资料2种情境下Nash模型参数率定过程中的异参同效现象 明显程度是不同的。理想资料情况下异参同效明显程度弱于同一场次洪水在实际资料情况下的异参同效 明显程度。即模型输入误差、输出误差以及模型结构误差是造成Nash模型参数率定过程中异参同效现象明 显程度出现差异性的主要原因。

参考文献:

- [1] 吴江, 胡胜. DEM分辨率对 SWAT 模型水文模拟的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11):18-23.
- [2] 金鑫, 陈琼, 金彦香. 土地利用/覆被数据精度对流域水文过程模拟的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2):108-115.
- [3] 李玉庆,张存,张文贤.水稻灌区农业面源污染物迁移转化规律模拟研究[J].灌溉排水学报,2017,36(11):29-35.
- [4] 王维, 冯忠伦, 杨伟, 等. 基于 SCE-UA 算法的新安江模型与垂向混合产流模型参数优化应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3):26-30.
- [5] 周建中, 卢韦伟, 孙娜,等. 水文模型参数多目标率定及最优非劣解优选[J]. 水文, 2017, 37(2):1-7.
- [6] 芮孝芳.水文学前沿科学问题之我见[J].水利水电科技进展, 2015, 35(5):95-102.
- [7] 任政,盛东.基于多目标GLUE算法的新安江模型参数不确定性研究[J].水电能源科学,2016,34(3):15-18.
- [8] 赵红杰,柏继云,马力.遗传扩展蚁群算法用于马斯京根模型参数估计[J].东北农业大学学报,2014,45(8):118-123.

- [9] MERZ R, PARAJKA J, BLOSCHL G. Time stability of catchment model parameters: implications for climate impact analyses[J]. Water Resources Research, 2011, 47(2).
- [10] 江善虎, 任立良, 刘淑雅,等. 基于贝叶斯模型平均的水文模型不确定性及集合模拟[J]. 中国农村水利水电, 2017(1):107-112.
- [11] 王书功.水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究[D].北京:中国科学院研究生院,2006.
- [12] 周建中, 卢韦伟, 孙娜, 等. 水文模型参数多目标率定及最优非劣解优选[J]. 水文, 2017, 37(2):1-7.
- [13] 刘苏宁,甘泓,魏国孝.粒子群算法在新安江模型参数率定中的应用[J].水利学报,2010,41(5):537-544.
- [14] 陈垌烽,张万昌,吴波.多目标遗传单纯形算法在概念性水文模型参数优化中的应用[J].水土保持通报,2008(3):107-112.
- [15] 芮孝芳.论流域水文模型[J].水利水电科技进展, 2017, 37(4):1-7.
- [16] DUAN Q, AJAMI N K, GAO X, et al. Multi-model ensemble hydrologic prediction using bayesian model averaging[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(5): 1 371-1 386.
- [17] 梁忠民,戴荣,李彬权.基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展[J].水科学进展,2010,21(2):274-281.
- [18] BEVEN K, FREER J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the glue methodology[J]. Journal of Hydrology, 2001, 249(1/4): 11-29.
- [19] DUAN Q Y, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models [J]. Water Resources Research, 1992, 28(4):1 015-1 031.
- [20] 史旭栋, 高岳林, 韩俊茹. 基于模糊推理的粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017,45(2):108-118.
- [21] COELLO A C C, PULIDO T G, LECHUGA S M. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. Ieee Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [22] 张新明, 王霞, 涂强, 等. 融合榜样学习和反向学习的粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(6):91-99.
- [23] 康立山,谢云,尤矢勇.非数值并行算法:模拟退火算法[M].北京:科学出版社,1994.
- [24] 岳振芳,高岳林.融合模拟退火的改进教与学优化算法[J].河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1):149-154.
- [25] 鲍振鑫, 张建云, 刘九夫, 等. 基于土壤属性的 VIC 模型基流参数估计框架[J]. 水科学进展, 2013, 24(2):169-176.
- [26] 刘昭,杨文元,查元源,等.基于田块尺度含水率观测的土壤水力参数多模型反演[J].农业工程学报,2015,31(6):135-144.
- [27] 张质明, 王晓燕, 潘润泽. 一种改进的不确定性水质模型参数率定方法[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3):956-962.
- [28] HER Younggu, CHAUBEY Indrajeet. Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(19): 4 220-4 237.
- [29] 包为民,李倩,李偲松,等.基于灵敏度的条件目标函数构建方法研究[J].水力发电学报, 2013, 32(2):27-34.
- [30] 姚蕾,梁忠民,王军,等. Nash汇流模型在无资料地区的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(2):23-26.
- [31] 包为民.水文预报[M].北京:中国水利水电出版社, 2011.
- [32] 朱君君, 芮孝芳, 刘氚. 基于理想资料的 Nash 模型异参同效性研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3):80-84.
- [33] 朱君君. Nash模型参数异参同效问题及参数确定方法研究[D]. 南京:河海大学, 2011.

Equifinality of the Nash Model Parameters Using Idealized and Measured Data

XING Zhenxiang^{1,2}, WANG Xin¹, GONG Xinglong^{1,2*}, FU Qiang^{1,2}, DONG Hongtao¹

- (1. School of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
- 2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Regular Institutions of Higher Education, Harbin 150030, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this work is to study the influence of equifinality phenomenon on accuracy of the Nash model parameter calibration. [Method] The Nash model parameters were calculated by the simulation-optimization model based on SCE-UA, using both idealized data and measured data. Taking Shuangyashan Farm and Youyi Farm in Hongxinglong Land Reclamation Administration in Heilongjiang province as an example, the performance of the equifinality phenomenon in parameter calibration was analyzed. The idealized data can eliminate the uncertainty caused by errors in the input data, model inaccuracy and model parameters in the calibration. [Result] Performance of the equifinality phenomenon in the Nash model parameter calibration was represented in value range and number of optimal parameters for both the idealized data and the measured data. For different flooding events, the performance of the equifinality phenomenon in terms of the two aspects was associated with the flooding volume and flooding peak for the two case studies. Specifically, the equifinality phenomenon was more noticeable with the increases in flooding volume and flooding peak. Under the same flooding event, the equifinality phenomenon was more noticeable in the parameter calibration for the idealized data than for the measured data. [Conclusion] In parameter calibration of hydrological model based on the equifinality phenomenon using different data sources, a proper parameter calibration method should be used to eliminate the unfavorable influence of the equifinality so as to improve accuracy of the model.

Key words: equifinality; SCE-UA; Nash model; ideal data; actual data