

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.001

中国半湿润流域 WRF-Hydro 模型参数敏感性分析

李致家,龚俊超,孙明坤

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:为提高 WRF-Hydro 模型在中国半湿润流域的模拟预报精度,以半湿润的陈河流域为研究对象,选取了 WRF-Hydro 模型中土层厚度乘子、水箱模型指数、土层渗透系数、地表截留深乘子、地表糙率乘子和河道糙率乘子 6 个参数进行敏感性分析。通过数据模拟这 6 个参数在合理取值范围内的不同取值对洪水模拟及各评价指标的影响,定性分析了各参数的敏感性,并采用修正的 Morris 筛选法定量判断各参数的敏感性。结果表明:土层厚度乘子、土层渗透系数及河道曼宁糙率非常敏感,根据目标函数与典型洪水分析,建议分别在 0.1~1.0、0.0~1.0、0.5~1.5 内取值。

关键词:WRF-Hydro 模型;参数敏感性;半湿润流域;修正的 Morris 筛选法

中图分类号:P338 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)05-0001-08

Parametric sensitivity analysis of WRF-Hydro model in a semi-humid watershed of China

LI Zhijia, GONG Junchao, SUN Mingkun

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the simulation accuracy in the Chinese semi-humid watershed, this study took the Chenhe Catchment in the semi-humid area as the study area and selected 6 parameters including ZSOILFAC, GWEXP, REFKDT, RETDEPRTFAC, OVROUGHRTFAC and MANNFAC for the sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters. The sensitivity of these parameters was qualitatively analyzed by studying the influence of different parameter value in the reasonable range on the flood simulation and each evaluation index, and the modified Morris screening method was used to quantitatively determine the sensitivity of each parameter. The results show that ZSOILFAC, REFKDT and MANNFAC are very sensitive, and it is suggested to take the value within 0.1 to 1.0, 0.0 to 1.0 and 0.5 to 1.5 respectively.

Key words: WRF-Hydro model; parametric sensitivity; semi-humid watershed; modified Morris screening method

水文模型作为洪水预报的重要工具,其优化改进一直是研究的热点^[1-2]。近年来,大量学者耦合气象模型与水文模型来研究洪水事件^[3]。WRF-Hydro 模型是有物理基础的、多尺度的分布式气象水文模型,在水文模拟及洪水预报中有较大的应用潜力^[4],自问世后得到了广泛应用^[5-6]。WRF-Hydro 模型包含高时空分辨率的地形和水文数据,可在一定程度上提高水文过程的模拟预报精度^[7]。与新安江模型、TOPKAPI 模型等单一水文模型相比,WRF-Hydro 模型可与大气模型耦合,模拟大气、水、能量的时空变化^[8]。与 WRF-SWMM 等大部分气象水文模型相比,WRF-Hydro 模型可实现与气象模型的双向耦合,更真实完整地模拟水文循环过程^[9]。此外,WRF-Hydro 模型对时空分辨率的复杂耦合关系也处理得非常得当^[10]。

WRF-Hydro 模型部分参数具有空间分布规律,如地表糙率由土地利用类型决定、地表截留深与坡度相关。但实际应用时仍有众多参数需要率定,对模型进行参数敏感性分析有助于确定模型关键参数、提高预报精度^[11-12],对应用与改进气象水文模型具有重要意义,但目前 WRF-Hydro 模型的参数敏感性研究还不充分。Fersch 等^[13]采用 LH-OAT 方法对 WRF-Hydro 模型 7 个陆面模式参数进行敏感性分析,但未研究对水文过程影响较大的产汇流参数。刘昱辰等^[4,14]对 WRF-Hydro 模型主要的 7 个参数给出简要的敏感性描述,并从中

基金项目:国家自然科学基金项目(52079035)

作者简介:李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

通信作者:龚俊超(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: jchaogong@163.com

引用本文:李致家,龚俊超,孙明坤.中国半湿润流域 WRF-Hydro 模型参数敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):1-8.

LI Zhijia, GONG Junchao, SUN Mingkun. Parametric sensitivity analysis of WRF-Hydro model in a semi-humid watershed of China[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 1-8.

选取土层渗透系数等 4 个参数研究敏感性。Ryu 等^[15]同样分析了刘昱辰等^[4,14]选取的 4 个参数的敏感性。虽然两者的研究取得了一定成果,但与水文相关的参数研究不充分。Sun 等^[16]研究了各参数目标函数随参数值的变化情况,但未对其现象进行深入研究。

本文根据流域产汇流机制^[17],综合考虑各重要参数对产汇流阶段的影响,以中国半湿润流域陈河流域为研究区域,选取土层厚度乘子等 6 个参数进行敏感性分析。通过确定参数取值步长和区间,计算不同参数对应的目标函数值,定性分析当前参数的敏感性,并采用修正的 Morris 筛选法定量评价 6 个参数的敏感度,以期使用 WRF-Hydro 模型调参时参数选择和率定提供参考。

1 研究流域与数据

选取陕西省陈河水文站以上集水区域为研究流域(以下简称“陈河流域”)。陈河流域地处陕西省中南部,经纬度分别为 107°~109°E、33°~35°N,流域面积约 1 380 km²,流域内黑河干流长约 105 km。陈河流域是典型的半湿润流域,流域径流深 100~500 mm,多年平均降水量为 800 mm,流域海拔高度约为 600~3 800 m,土壤类型多为壤土。流域内共有 8 个雨量站,1 个水文站,如图 1 所示。

WRF-Hydro 模型运行需要下垫面数据和气象驱动数据^[18]。陆面模式下垫面数据由 WRF 网站的静态数据经插值获得,汇流网格下垫面数据来源于地理空间数据云网站。气象驱动数据中的雨量资料来自流域内 8 个雨量站及陈河水文站,其他气象驱动数据由 GLDAS 数据获得。流量资料由陈河水文站提供。WRF-Hydro 模型需要预热以获得与实际较为相符的流域初始状态,每一年的预热期为汛期中有记录的第一场洪水的前 1 月左右,模型预热可以获得相对准确的初始场,提高模拟精度。考虑到 WRF-Hydro 模型的计算成本较高^[16],本文选取 2003—2006 年 6—10 月作为率定期,共计 8 场洪水;选取 2007—2012 年 6—10 月为验证期,共计 11 场洪水。其中,选取 20030916 和 20100820 两个洪水事件作为典型洪水进行参数敏感性分析。预热期、模拟期及洪水事件信息详见表 1。

表 1 预热期、模拟期及洪水事件信息

Table 1 Information of preheating period, simulation period and flood events

年份	洪水事件	预热期	模拟期
2003	030827		08-27T18:00—09-04T0:00
	030902	06-01T0:00—08-27T18:00	09-02T18:00—09-09T12:00
	030916		09-16T6:00—09-24T0:00
2004	040901	06-01T0:00—09-01T6:00	09-01T6:00—09-09T0:00
2005	050629		06-29T18:00—07-04T12:00
	050716	06-01T0:00—06-29T18:00	07-16T18:00—07-19T18:00
2006	060902		09-02T18:00—09-07T18:00
	060925	06-01T0:00—09-02T18:00	09-25T12:00—10-03T0:00
2007	070703		07-03T18:00—07-07T18:00
	070808	06-01T0:00—07-03T18:00	08-08T6:00—08-13T0:00
2008	080720	06-01T0:00—07-20T6:00	07-20T6:00—07-23T12:00
2009	090817		08-17T18:00—08-24T0:00
	090910	06-01T0:00—08-17T18:00	09-10T18:00—09-16T18:00
2010	100721		07-21T18:00—07-29T6:00
	100820	06-01T0:00—07-21T18:00	08-20T12:00—08-23T0:00
	100822		08-22T18:00—08-26T18:00
2011	110803		08-03T18:00—08-07T18:00
	110909	06-01T0:00—08-03T18:00	09-09T0:00—09-15T0:00
	110916		09-16T0:00—09-21T0:00

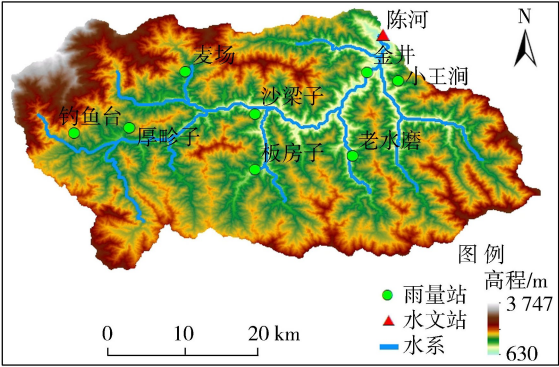


图 1 陈河流域水系及站点分布

Fig.1 Water system and station distribution of Chenhe Basin

2 研究方法

WRF-Hydro 模型是美国国家气象中心(NCAR)在 2015 年提出的陆气耦合模型,主要包含尺度较大的陆面模式和尺度较小的汇流模块^[10,16]。它以大尺度的陆面模式为基础,加入高分辨率汇流模块,旨在解决陆面模式未考虑土层侧向流和径流重分配的问题^[19]。

目前的 WRF-Hydro 模型中,有 Noah 与 Noah-MP 两种陆面模式,后者在前者的基础上进行架构调整,并增加了积雪处理等能力^[10]。陆面模式发生在分辨率较大的网格,主要计算植被冠层之下的水文气象状态变量及水量能量的通量。汇流过程发生在汇流网格中,涉及坡面流、地下径流、河道汇流等。当模型运行时,一些状态变量需要在陆面模式网格和汇流网格之间传输,传输过程中需要进行变量的空间尺度转换,相关方法参见技术指导^[10]。

2.1 参数设置

WRF-Hydro 模型具有陆面模式参数与汇流网格参数等众多参数。考虑到模型默认土层厚度值并不适用于中小流域,引入土层厚度乘子 ZSOILFAC^[7]等比修改土层厚度。因采用自动率定计算成本过高^[20],本文采用客观优选法^[21]进行参数率定。客观优选法是指对某一参数在值域内以合适的步长依次驱动模型,以目标函数来确定最优参数值。采用径流量相对误差(Pb)、纳什系数(NSE)、洪峰相对误差(REP)及峰现时间误差(TEP)评价模型模拟结果。

在 WRF-Hydro 模型参数敏感性研究中,考虑水文过程发生的先后顺序,从各水文过程中选取参数,同时考虑参数对径流量和洪水过程线形状的影响,再结合孙明坤等^[7,18]研究 WRF-Hydro 模型时调参选取的参数,最终选取 6 个主要参数为研究对象:土层厚度乘子 ZSOILFAC^[7]、水箱模型指数 GWEXP、土层渗透系数 REFKDT、地表截留深乘子 RETDEPRTFAC、地表糙率乘子 OVROUGHRTFAC 及河道糙率乘子 MANNFAC。其中,前 4 个参数与产流相关,主要控制径流分配和洪水水量,后 2 个参数为汇流参数,主要控制洪水过程线及洪峰形状。

Senatore 等^[22]在研究中直接给定土层厚度,孙明坤等^[7]认为引入土层厚度乘子 ZSOILFAC 等比修改土层默认厚度(1~4 层厚度:0.1、0.4、1.0、2.0m)更合理。GWEXP 控制概念性水箱的出流量,影响地下产汇流;REFKDT 控制各个土层之间的渗透速率、地下径流量和超渗产流量;RETDEPRTFAC 通过修改地表截留能力来影响产流量的计算;OVROUGHRTFAC 影响坡面汇流的速度;MANNFAC 等比修改河道曼宁糙率,影响河道汇流。根据 Ryu 等^[15,18,23]研究 WRF-Hydro 模型时各参数取值情况,设置参数步长及取值范围(表 2)。

表 2 WRF-Hydro 模型参数设置
Table 2 Parameters settings for WRF-Hydro model

参数	阶段	水文过程	默认值	取值范围	步长
ZSOILFAC	产流	蒸散发、下渗	1.0	0.1~2.0	0.2
GWEXP	产汇流	地下水产汇流	3.0	1.0~6.0	1.0
REFKDT	产流	超渗产流、下渗	1.0	0.2~2.0	0.1
RETDEPRTFAC	产汇流	地表截流	1.0	0.0~1.0	0.1
OVROUGHRTFAC	汇流	坡面汇流	1.0	0.1~2.0	0.1
MANNFAC	汇流	河道汇流	1.0	0.2~2.0	0.1

2.2 定性参数敏感性分析方法

采用客观优选法^[20-21]率定参数:首先校准产流参数,依次为 ZSOILFAC、GWEXP、REFKDT 和 RETDEPRTFAC,然后校正汇流参数,依次为 OVROUGHRTFAC 和 MANNFAC。当上一个参数确定最优值后,下一个参数校正时,该参数保持使用校准后的值,逐步依次校准参数。该方法目的是首先应该先保证总水量准确,然后再保证正确的水量分配。

客观优选法中各参数的最优取值依赖于当参数取不同值时对应的目标函数值。研究发现径流量和纳什系数对模型参数变化响应良好,因此选取径流量相对误差(Pb)的目标函数 f_{Pb} 和纳什系数(NSE)的目标函数 f_{NSE} 进行参数率定^[16]。针对不同参数给出不同目标函数,ZSOILFAC、GWEXP、REFKDT 及 RETDEPRTFAC 采用 f_{Pb} 率定,OVROUGHRTFAC、MANNFAC 采用 f_{NSE} 率定。

将各参数在率定期内,以设定步长在取值范围内进行改动,依次率定参数,观察每个参数对应的目标函数值变化规律,并在率定期和验证期各选一场典型洪水运行模型,分析不同评价指标随参数扰动的变化情况,以定性分析各参数敏感性。

2.3 修正的 Morris 筛选法

Morris 筛选法^[24]是 Morris 提出的局部参数敏感性分析方法。其操作简单快捷,是应用最广泛的局部敏感性分析方法。Morris 筛选法通过分析某一参数在值域内随机改变值对模型输出结果的影响,判断其敏感度。

考虑到参数在其值域内取值具有随机性,本文采用修正的 Morris 筛选法进行敏感性分析,该方法的参数敏感性判别因子 SN 参见文献[25]。依据 SN 的绝对值 S 将参数的敏感性划分如下^[26]: $S \geq 1$,则该参数是高敏感参数; $0.2 \leq S < 1$,则该参数是敏感参数; $0.05 \leq S < 0.2$,则该参数是中等敏感参数; $0 \leq S < 0.05$,则该参数是不敏感参数。

3 结果分析与讨论

3.1 参数敏感性定性分析

3.1.1 目标函数变化分析

采用客观优选法^[20]对 6 个参数依次调参,分析各参数在取值区间内变换时对应的目标函数变化情况来看定性分析参数敏感性。各参数目标函数变化曲线如图 2 所示。

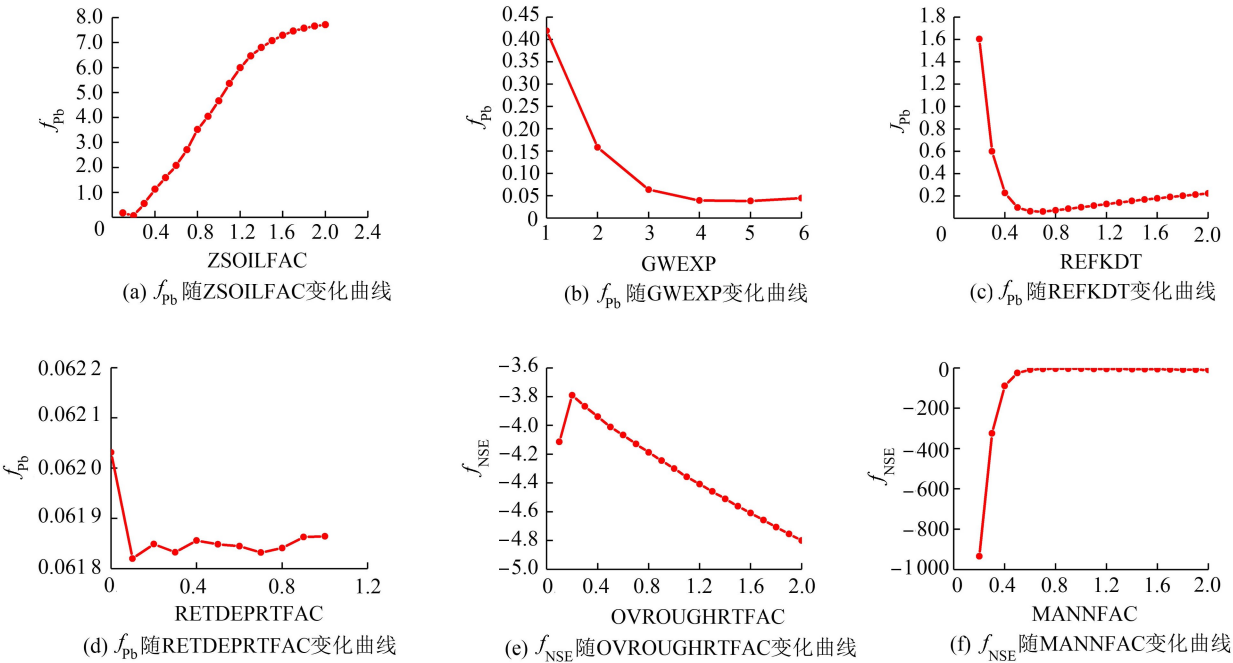


图 2 6 个参数目标函数变化曲线

Fig.2 Change curve of objective function of 6 parameters

对于产流参数, f_{pb} 随 ZSOILFAC 减小逐步减小,尤其在 0 ~ 1.0 内减幅更大,说明 ZSOILFAC 取值在 0 ~ 1.0 之间敏感性强于 1.0 ~ 2.0 之间,主要是因为土层厚度超过一定值后均无法产流。由图 2(b)可知,1.0 ~ 5.0 区间内,随着 GWEXP 取值的递增,模拟效果越来越好,目标函数变化的速度越来越慢,说明 GWEXP 取值越小越敏感。REFKDT 最优参数是 0.7,REFKDT 同样取值较小时比较敏感,当小于 0.7 时,随参数值递减, f_{pb} 增大的速度越来越快,大于 0.7 时, f_{pb} 以相近的速率递增。由图 2(d)为可知,目标函数受参数影响很小,在取值区间内 RETDEPRTFAC 相当不敏感。

对于汇流参数, f_{NSE} 随着 OVROUGHRTFAC 的增大而减小,但 f_{NSE} 的变化是稳定且较小的。 f_{NSE} 随 MANNFAC 变化巨大,当 MANNFAC 小于 1.0 时,随着取值减小 f_{NSE} 以递增的速度减小,大于 1.0 时, f_{NSE} 以相近的速度逐步减小。从整个参数变化来看,MANNFAC 的取值对洪水模拟的影响巨大。

综合来看,4 个产流参数中,ZSOILFAC、REFKDT 和 GWEXP 都比较敏感,对径流量影响较大,而 RETDEPRTFAC 相当不敏感。汇流参数中,MANNFAC 非常敏感,对洪水模拟影响较大,OVROUGHRTFAC 敏感性低于 MANNFAC。4 个敏感参数的敏感性,均在取较小值时强于取较大值时。

3.1.2 典型洪水分析

以率定期的 20030916 号洪水和验证期的 20100820 号洪水作为典型洪水进行定性参数敏感性分析。以 20030916 号洪水为例,洪水过程线随参数变化如图 3 所示。通过分析各参数在取值区间内 NSE、Pb、REP 及 TEP,判断各参数的敏感性,对目标函数分析结果进行验证与补充。

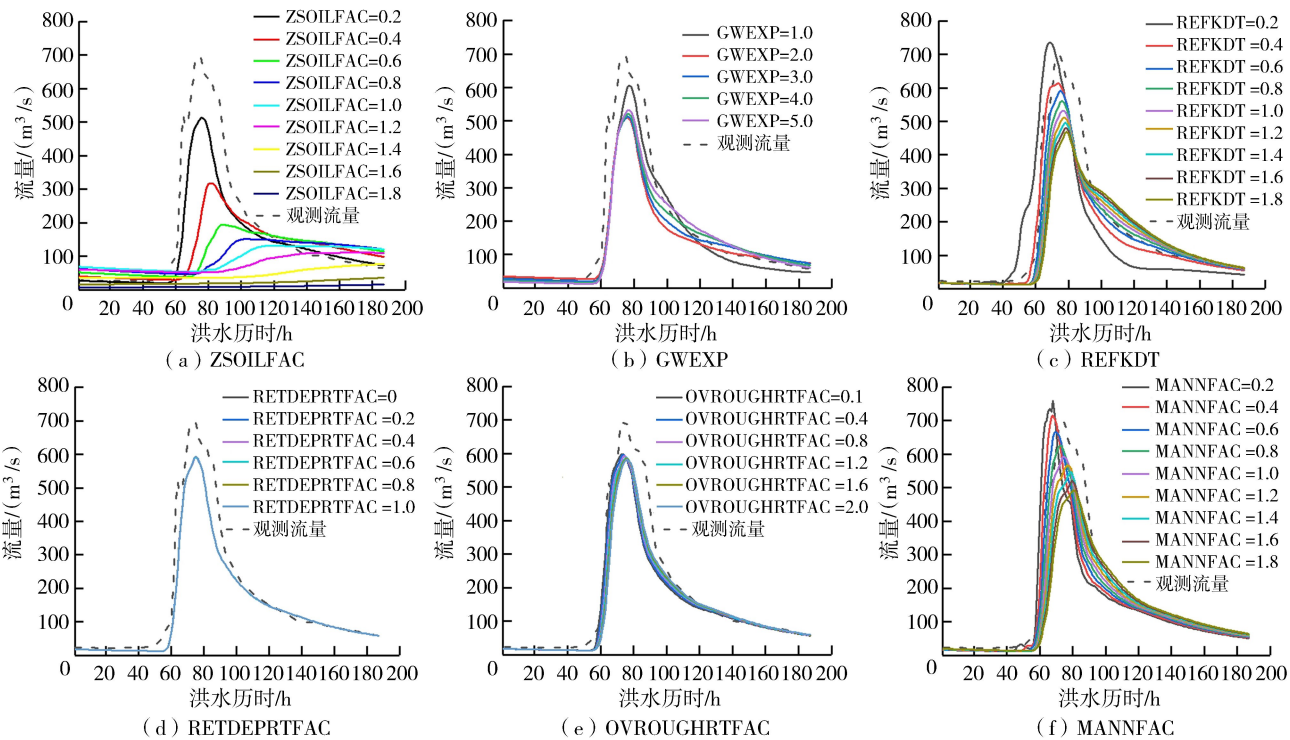


图 3 各参数不同取值时 20030916 号洪水过程线

Fig.3 Flood hydrograph of flood event 20030916 with different parameters values

土层厚度直接影响地表、壤中和地下产流量。由图 3(a)可知,ZSOILFAC 越大,模拟效果越差,地表径流减少速度减缓,土层厚度达到一定值后无法模拟出洪水过程。由表 3 可知,ZSOILFAC 扰动会造成 NSE 较大波动,取值越小对 NSE 影响越大;随着 ZSOILFAC 的增大,Pb 呈减小趋势,且 REP 和 TEP 值逐渐偏离 0,峰值剧烈减小,峰现时间大幅延迟。土层越厚越难达到蓄满状态^[5,8],导致径流量和峰值越来越小;当土层厚度达到一定程度后,产流量趋近于很小的值甚至不产流。综上,ZSOILFAC 非常敏感,NSE、Pb、洪峰流量和峰现时间都对 ZSOILFAC 取值比较敏感。

GWEXP 对洪水模拟有一定影响。由图 3(b)可知,随着 GWEXP 增大,模拟洪量先减后增,涨洪段与落洪段都逐渐陡峭,逐渐贴合实际洪水过程线,且峰值逐渐增大。由表 3 可知,两场洪水的 NSE、Pb、REP 均先减小后增大,但都波动较小,TEP 也仅波动 1 h。当 GWEXP 较小,概念性水箱更易蓄满,多余水量使土层更快饱和,因而洪量大;随着 GWEXP 增大,河道基流流量大,因此模拟洪量和峰值增大。GWEXP 比较敏感,NSE、Pb 和洪峰流量都对 GWEXP 变化有一定响应,但受影响不大。

REFKDT 对地表、壤中和地下径流都有影响。如图 3(c)可知,REFKDT 每次扰动,都会造成洪水过程线的显著变化。随着 REFKDT 的增加,起涨时间延迟,峰值减小,洪量减小。由表 3 可知,随 REFKDT 增加,NSE 先增大后减小,Pb 变化不大,REP 与 TEP 均逐渐偏离 0,即峰值逐渐减小,峰现时间有一定延迟。REFKDT 取值较小时,超渗产流量大,故洪量和峰值较高,峰现时间偏早。随着 REFKDT 增大,超渗产流量减少,壤中与地下径流略有增大,因此洪量和峰值逐渐减小,洪峰右移。REFKDT 对洪水模拟影响显著,NSE、Pb、洪峰流量和峰现时间都对 REFKDT 较敏感。

RETDEPRTFAC 修改地表截留能力,由图 3(d)可知,其在 0~1.0 内模拟的洪水过程线近乎重合。由表 3 可知,两场洪水的 NSE、Pb 和 REP 均波动较小,TEP 无波动。研究发现该参数并不是地表产流量主要影响因子,因此对洪水模拟影响较小。在取值区间内,各评价指标随 RETDEPRTFAC 变化均无明显变化。

表 3 各产流参数不同取值下模拟目标函数统计

Table 3 Simulated objective function statistics with different values of runoff parameters

参数	参数值	20030916 号洪水				20100820 号洪水			
		NSE	Pb	REP/%	TEP/h	NSE	Pb	REP/%	TEP/h
ZSOILFAC	0.2	0.809	-0.193	-29.09	3	0.753	-0.043	-25.05	4
	0.4	0.302	-0.280	-54.32	8	-0.113	-0.364	-65.67	7
	0.6	-0.050	-0.349	-71.96	16	-0.619	-0.600		
	0.8	-0.218	-0.397	-78.11	30	-0.784	-0.752		
	1.0	-0.269	-0.438			-0.908	-0.846		
	1.2	-0.319	-0.531			-1.006	-0.901		
	1.4	-0.437	-0.714			-1.076	-0.933		
	1.6	-0.578	-0.866			-1.124	-0.955		
	1.8	-0.669	-0.940			-1.157	-0.968		
GWEXP	1.0	0.883	-0.160	-12.84	4	0.771	0.031	-18.97	3
	2.0	0.800	-0.217	-26.63	3	0.727	-0.142	-27.59	4
	3.0	0.809	-0.193	-26.09	3	0.753	-0.043	-25.05	4
	4.0	0.822	-0.168	-25.02	3	0.754	0.053	-22.16	3
	5.0	0.835	-0.150	-23.31	4	0.741	0.134	-19.39	3
REFKDT	0.2	0.758	-0.115	6.07	-4	0.767	-0.047	7.75	2
	0.4	0.932	-0.140	-11.65	1	0.836	-0.084	-9.79	3
	0.6	0.911	-0.145	-14.65	2	0.827	-0.001	-15.02	3
	0.8	0.872	-0.148	-19.12	3	0.790	0.080	-17.01	3
	1.0	0.835	-0.150	-23.31	4	0.741	0.134	-19.39	3
	1.2	0.798	-0.151	-26.27	5	0.688	0.165	-21.91	4
	1.4	0.764	-0.151	-28.57	5	0.632	0.182	-24.45	4
	1.6	0.733	-0.152	-30.80	6	0.578	0.190	-27.14	4
	1.8	0.704	-0.153	-32.52	6	0.526	0.193	-29.88	4
RETDE- PRTFAC	0.0	0.9114	-0.1452	-14.82	2	0.8273	-0.0013	-14.90	3
	0.2	0.9111	-0.1453	-14.77	2	0.8276	-0.0011	-15.02	3
	0.4	0.9111	-0.1454	-14.80	2	0.8272	-0.0010	-15.02	3
	0.6	0.9112	-0.1453	-14.73	2	0.8274	-0.0011	-15.02	3
	0.8	0.9110	-0.1453	-14.69	2	0.8271	-0.0012	-15.02	3
	1.0	0.9111	-0.1453	-14.65	2	0.8273	-0.0011	-15.02	3

OVROUGHRTFAC 控制坡道汇流速度,由图 3(e)可知,洪峰随 OVROUGHRTFAC 增加而右移,但洪水过程线变化不大。由表 4 可知,NSE、Pb 和 REP 呈轻微减小趋势,且两场洪水的 TEP 都仅波动 2 h。OVROUGHRTFAC 越大,坡道汇流速率越慢,但坡道汇流速率对整个汇流过程的影响较小,因此峰现时间会随其取值增大而略显滞后,其他指标仅受轻微影响。

如图 3(f)所示,MANNFAC 扰动会造成洪水过程线较大变化。随 MANNFAC 增加,洪峰整体右移,峰值减小。由表 4 可知,随着 MANNFAC 增大,NSE 先增大后减小,Pb 变化不大,REP 剧烈减小,峰现时间逐步延迟。MANNFAC 对河道汇流影响显著,MANNFAC 过小时,汇流快,导致洪量较大;MANNFAC 过大时,汇流慢,洪峰滞后,洪量和峰值都偏小。MANNFAC 对 NSE、洪峰流量和峰现时间有较大影响,Pb 对 MANNFAC 不敏感。

综上,由典型洪水分析可知,WRF-Hydro 模型较敏感的参数主要有 3 个,分别为 ZSOILFAC、REFKDT 和 MANNFAC。ZSOILFAC 对 NSE、Pb、洪峰流量和峰现时间都有较大影响;REFKDT 对 Pb、洪峰流量和峰现时间有较大影响;MANNFAC 对 NSE、洪峰流量和峰现时间有较大影响。其次是 GWEXP,其对洪水模拟各指标的影响均不大。而 RETDEPRTFAC 和 OVROUGHRTFAC 相对不敏感,都对洪水模拟的影响较小。

3.2 参数敏感性定量分析

本文在利用修正的 Morris 筛选法分析时,以陈河流域各参数不同取值下 8 场洪水的径流量相对误差目标函数 f_{Pb} 、纳什系数(NSE)目标函数 f_{NSE} 及两者加权平均值 $(f_{NSE}+f_{Pb})/2$ 为衡量输出值变化的指标。对研究区 6 个参数,取最优参数为初始值,在最优值基础上扰动-30%、-20%、-10%、10%、20%、30%,得到扰动值及 6 个参数敏感度如表 5 所示。

表 4 各汇流参数不同取值下模拟目标函数统计

Table 4 Simulated objective function statistics with different values of routing parameters

参数	参数值	20030916 号洪水				20100820 号洪水			
		NSE	Pb	REP/%	TEP/h	NSE	Pb	REP/%	TEP/h
OVROU GHRTFAC	0.1	0.918	-0.143	-13.95	1	0.800	-0.049	-15.86	2
	0.4	0.918	-0.144	-14.09	1	0.828	-0.027	-15.09	2
	0.8	0.914	-0.145	-14.58	2	0.832	-0.009	-14.61	3
	1.2	0.908	-0.146	-15.38	3	0.820	0.006	-15.55	3
	1.6	0.901	-0.146	-15.78	3	0.801	0.019	-16.76	3
	2.0	0.892	-0.147	-16.09	3	0.779	0.029	-14.52	4
MANNFAC	0.2	0.662	-0.130	10.49	-7	-1.565	0.111	47.32	-5
	0.4	0.804	-0.135	3.27	-5	-0.205	0.054	24.77	-3
	0.6	0.877	-0.138	-3.91	-4	0.579	0.025	9.24	-1
	0.8	0.907	-0.142	-10.99	-1	0.849	0.005	-4.17	1
	1.0	0.909	-0.145	-15.66	1	0.832	-0.009	-14.61	3
	1.2	0.894	-0.149	-19.62	3	0.706	-0.018	-23.15	5
	1.4	0.867	-0.152	-22.44	5	0.556	-0.025	-29.33	6
	1.6	0.833	-0.155	-25.84	6	0.412	-0.029	-34.66	8
	1.8	0.794	-0.158	-30.11	7	0.287	-0.032	-39.34	10

表 5 6 个参数扰动结果及不同目标函数下的敏感度

Table 5 Perturbation results of 6 parameters and sensitivity analysis result under different objective function

参数	扰动值	S		
		f_{NSE}	f_{Pb}	$(f_{NSE}+f_{Pb})/2$
ZSOILFAC	0.14,0.16,0.18,0.20,0.22,0.24,0.26	5.28	7.54	6.41
GWEXP	3.5,4.0,4.5,5.0,5.5,6.0,6.5	1.08	0.10	0.59
REFKDT	0.49,0.56,0.63,0.70,0.77,0.84,0.91	0.26	2.45	1.36
RETDEPRTFAC	0.07,0.08,0.09,0.10,0.11,0.12,0.13	0.001	0.0002	0.0006
OVROUGHRTFAC	0.14,0.16,0.18,0.20,0.22,0.24,0.26	0.05	0.09	0.07
MANNFAC	0.56,0.64,0.72,0.80,0.88,0.96,1.04	5.32	0.03	2.68

由表 5 可知,目标函数不同时,参数的敏感度不一样。对于 f_{NSE} ,敏感度大小排序为 MANNFAC、ZSOILFAC、GWEXP、REFKDT、OVROUGHRTFAC、RETDEPRTFAC。ZSOILFAC、MANNFAC 和 GWEXP 属于高敏感参数,REFKDT 属于敏感参数,OVROUGHRTFAC 和 RETDEPRTFAC 均属于不敏感参数,说明对于纳什系数,影响较大的参数主要有 MANNFAC、ZSOILFAC、和 GWEXP。对于 f_{Pb} ,敏感度大小排序为 ZSOILFAC、REFKDT、GWEXP、MANNFAC、OVROUGHRTFAC、RETDEPRTFAC,其中,ZSOILFAC 和 REFKDT 属于高敏感参数,GWEXP 和 MANNFAC 属于中等敏感参数,而 OVROUGHRTFAC 和 RETDEPRTFAC 属于不敏感参数,说明对径流量相对误差影响较大的参数有 ZSOILFAC 和 REFKDT。

研究发现,取 f_{NSE} 和 f_{Pb} 的加权平均值作为最终的敏感度评价指标,可以得出 6 个参数的敏感度大小排序为 ZSOILFAC、MANNFAC、REFKDT、GWEXP、OVROUGHRTFAC、RETDEPRTFAC。此外,不论取哪个目标函数作为敏感度评价指标,ZSOILFAC 均属于高敏感参数,而 OVROUGHRTFAC 和 RETDEPRTFAC 都属于不敏感参数。

4 结 论

- a. 根据参数率定过程中目标函数随参数的变化情况来看,产流参数 ZSOILFAC、REFKDT、GWEXP 和汇流参数 MANNFAC 变化会造成目标函数较大变化,是比较敏感的参数,其他参数相对不敏感。
- b. 从典型洪水分析来看,WRF-Hydro 模型中较敏感参数有 ZSOILFAC、REFKDT 和 MANNFAC,在取值区间内该 3 个参数对模拟洪水有较大影响。且不同评价指标的参数敏感性略有差别,对于 NSE,ZSOILFAC、GWEXP 和 MANNFAC 非常敏感;对于 Pb,ZSOILFAC 和 REFKDT 非常敏感;对于洪峰流量,REFKDT 和 MANNFAC 非常敏感;对于峰现时间,ZSOILFAC 和 MANNFAC 非常敏感。
- c. 根据修正 Morris 筛选法,以 f_{NSE} 和 f_{Pb} 的加权平均值为敏感度评价指标,ZSOILFAC、REFKDT、

MANNFAC 属于高敏感参数;GWEXP 为敏感参数,OVROUGHRTFAC 属于中等敏感参数;而 RETDEPRTFAC 属于不敏感参数。

d. 在研究流域,ZSOILFAC 范围在 0.1~1.0 之间模拟效果较好;GWEXP 取值范围为 3.0~6.0 之间模拟效果较好;REFKDT 取值在 0.0~1.0 之间模拟效果较好;MANNFAC 取值在 0.5~1.5 之间模拟效果较好。

e. 在半湿润流域应用 WRF-Hydro 模型时,应首选 ZSOILFAC、GWEXP、REFKDT 和 MANNFAC 这 4 个参数率定,参考本文建议的取值区间与步长。

参考文献:

[1] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke,ZHANG QINUO,CHEN XINYU,et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[2] 张珂,周佳奇,张企诺,等. 栅格岩溶分布式水文模型[J]. 水资源保护,2022,38(1):43-51. (ZHANG Ke,ZHOU JIAQI,ZHANG QINUO,et al. Grid-based karst distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):43-51. (in Chinese))

[3] 郝春沣,贾仰文,王浩. 气象水文模型耦合研究及其在渭河流域的应用[J]. 水利学报,2012,43(9):1042-1049. (HAO Chunfeng,JIA Yangwen,WANG Hao. Atmospheric and hydrological models' coupling and application in flood forecasting of the Weihe Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(9):1042-1049. (in Chinese))

[4] 刘昱辰,刘佳,李传哲,等. WRF-Hydro 模式在水文模拟与预报应用中的研究进展[J]. 水电能源科学,2019,37(11):1-5. (LIU YUCHEN,LIU JIA,LI CHUANZHE,et al. Advances of WRF-hydro and its application in hydrological simulation and forecasting [J]. Water Resources and Power,2019,37(11):1-5. (in Chinese))

[5] MANE D,CHANDRASEKAR A. Evaluation of a stand-alone WRF-Hydro modeling system using different rainfall forcing data: case study over the Godavari River Basin,India[J]. Pure and Applied Geophysics,2022,179(10):3807-3826.

[6] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO LIJUN,ZHANG Ke,CHEN XINYU,et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))

[7] 孙明坤,李致家,刘志雨,等. WRF-Hydro 模型与新安江模型在陈河流域的应用对比[J]. 湖泊科学,2020,32(3):850-864. (SUN MINGKUN,LI ZHIJIA,LIU ZHIYU,et al. Application of WRF-Hydro modeling system in Chenhe Basin and comparison with Xin'anjiang model[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):850-864. (in Chinese))

[8] SARKAR S,HIMESH S. Evaluation of the skill of a fully-coupled atmospheric-hydrological model in simulating extreme hydrometeorological event;a case study over Cauvery River Catchment[J]. Pure and Applied Geophysics,2021,178(3):1063-1086.

[9] 郭元,李玉玲,王慧亮,等. 气象水文模型耦合的郑州城区内涝预警研究[J]. 水文,2022,42(4):61-67. (GUO YUAN,LI YULING,WANG HUILIANG,et al. Research on the meteorological and hydrological coupling models on early warning of urban waterlogging in Zhengzhou[J]. Journal of China Hydrology,2022,42(4):61-67. (in Chinese))

[10] GOCHIS D J,BARLAGE M. The WRF-hydro modeling system technical description and user's guide (Version 3.0)[M]. Boulder:NCAR,2018.

[11] 苟娇娇,缪驰远,段青云. 水文模型参数敏感性分析-优化-区域化方法研究进展[J]. 地理科学进展,2022,41(7):1338-1348. (GOU JIAOJIAO,MIAO CHIYUAN,DUAN QINGYUN. Progress in parameter sensitivity analysis-optimization-regionalization methods for hydrological models[J]. Progress in Geography,2022,41(7):1338-1348. (in Chinese))

[12] TIAN Yu,LEI Xiaohui,JIANG Yunzhong,et al. Comment on parameter sensitivity analysis of hydrological model[J]. Hydrology,2010,30(4):9-12.

[13] FERSCH B,SENATORE A,ADLER B,et al. High-resolution fully coupled atmospheric-hydrological modeling: A cross-compartment regional water and energy cycle evaluation[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(5):2457-2481.

[14] LIU Yuchen,LIU Jia,LI Chuanzhe,et al. Parameter sensitivity analysis of the WRF-hydro modeling system for streamflow simulation;a case study in semi-humid and semi-arid catchments of Northern China[J]. Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences,2021,57(3):451-466.

[15] RYU Y,LIM Y J,JI H S,et al. Applying a coupled hydrometeorological simulation system to flash flood forecasting over the Korean Peninsula[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences,2017,53(4):421-430.

[14] LIEW A. DIKIW: data, information, knowledge, intelligence, wisdom and their interrelationships [J]. Business Management Dynamics,2013,2(10):49-62.

[15] 史良胜,查元源,胡小龙,等. 智慧灌区的架构、理论和方法之初探[J]. 水利学报,2020,51(10):1212-1222. (SHI Liangsheng, ZHA Yuanyuan, HU Xiaolong, et al. A preliminary exploration of framework, theory and method for intelligent irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(10):1212-1222. (in Chinese))

[16] 陈晓楠,贾琦,韩黎明,等. 遗传程序设计在南水北调中线流量计率定中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(6):290-293. (CHEN Xiaonan, JIA Qi, HAN Liming, et al. Application of genetic programming for calibration of flowmeter in the middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009,7(6):290-293. (in Chinese))

[17] 陈晓楠,段春青,靳燕国,等. 人工神经网络在流量计率定中的应用[J]. 人民黄河,2015,37(3):129-131. (CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, JIN Yanguo, et al. Application of artificial neural networks for calibration of flowmeter in South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Yellow River,2015,37(3):129-131. (in Chinese))

[18] 陈晓楠,段春青,郭芳,等. 基于人工神经网络过闸流量模型在南水北调中线工程的应用[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(1):153-156. (CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, GUO Fang, et al. Application of gate flow model based on artificial neural network in the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2015,13(1):153-156. (in Chinese))

[19] 李广军. 基于 RBF 神经网络的 PID 整定[D]. 成都:西南交通大学,2005.

(收稿日期:2022-08-03 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 8 页)

[16] SUN Mingkun,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Evaluation of flood prediction capability of the WRF-hydro model based on multiple forcing scenarios[J]. Water,2020,12(3):874.

[17] 包为民. 水文预报[M]. 4 版. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[18] 刘洪波,菅浩然,孙明坤. WRF-Hydro 模型在典型中小流域的日径流模拟研究[J]. 水文,2021,41(4):48-55. (LIU Hongbo, JIAN Haoran, SUN Mingkun. Daily discharge simulation of small and medium-sized humid and semi-humid basins using WRF-hydro model[J]. Journal of China Hydrology,2021,41(4):48-55. (in Chinese))

[19] 李致家,张珂,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2021.

[20] YUCEL I, ONEN A, YILMAZ K K, et al. Calibration and evaluation of a flood forecasting system; Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall[J]. Journal of Hydrology,2015,523:49-66.

[21] 赵人俊,王佩兰. 流域水文模型参数的客观优化方法[J]. 水文,1993,13(4):21-24. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Objective optimization method of hydrological model parameter [J]. Journal of China Hydrology, 1993, 13(4):21-24. (in Chinese))

[22] SENATORE A, MENDICINO G, GOCHIS D J, et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems,2015,7(4):1693-1715.

[23] KERANDI N, ARNAULT J, LAUX P, et al. Joint atmospheric-terrestrial water balances for East Africa: a WRF-hydro case study for the upper Tana River Basin[J]. Theoretical and Applied Climatology,2018,131(3):1337-1355.

[24] 刘松,余敦先,张利平,等. 基于 Morris 和 Sobol 的水文模型参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(6):1296-1303. (LIU Song, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Global sensitivity analysis of hydrological model parameters based on Morris and Sobol methods[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(6):1296-1303. (in Chinese))

[25] 高颖会,沙晓军,徐向阳,等. 基于 Morris 的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):87-90. (GAO Yinghui, SHA Xiaojun, XU Xiangyang, et al. Sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Morris method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2016,27(3):87-90. (in Chinese))

[26] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2002,27(9):645-654.

(收稿日期:2022-12-16 编辑:刘晓艳)