

WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性分析

郭晨煜^{1,2}, 吕海深^{1,2}, 朱永华^{1,2}, 汪翔^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为研究 WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性,以西营河流域九条岭水文站以上区域为研究区,在离线模式下利用 2015—2018 年的全球预报系统(GFS)数据驱动 WRF-Hydro 模型。基于 LH-OAT 方法对 WRF-Hydro 模型的 6 个主要参数对不同评价指标和空间分辨率的汇流演算网格的敏感性进行了分析,定量计算了各参数的敏感性指标,划分了敏感等级,并结合典型洪水分析了各参数对洪水过程线的具体影响。结果表明:河道曼宁糙率乘子(MANNFAC)为极敏感参数,入渗系数(REFKDT)、土壤饱和导水率(REFDK)、深层导水系数(slope)为敏感参数,地表糙率乘子(OVROUGHRTFAC)为一般敏感参数,地表持水深度乘子(RETDEPRTFAC)为不敏感参数;各参数的敏感性并不是一成不变的,参数敏感度会受到评价指标的影响,有一定程度的变化;随着汇流演算网格空间分辨率的变化,各参数全局敏感度也会有小幅变化,但参数的全局敏感度等级不发生改变;MANNFAC 对峰现时间的调节效果最好,REFKDT 和 REFDK 对洪量和洪峰流量的调节效果显著,slope 可以很好地调节洪水过程线的形状。

关键词:WRF-Hydro 模型;参数敏感性分析;LH-OAT 方法;河西内陆河流域

中图分类号:P334⁺.92 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0120-08

Sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters in Hexi Inland River Basin//GUO Chenyu^{1,2}, LYU Haishen^{1,2}, ZHU Yonghua^{1,2}, WANG Xiang^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the sensitivity of WRF-Hydro model parameters in the Hexi Inland River Basin, the area above the Jiutiaoling Hydrological Station in the Xiying River Basin was taken as the research area. The WRF-Hydro model was driven by global forecast system (GFS) data from 2015 to 2018 in standalone mode. The latin-hypercube one-factor-at-a-time (LH-OAT) method was used to analyze the six main parameters of the WRF-Hydro model and was carried out with confluence grids of different evaluation objectives and different spatial resolutions. The sensitivity index of each parameter was quantitatively calculated and classified. Combined with a typical flood, the specific influence of each parameter on flood hydrograph was analyzed. The results show that the Manning roughness multiplier (MANNFAC) is an extremely sensitive parameter. The infiltration coefficient (REFKDT), the soil saturated hydraulic conductivity (REFDK), and the deep hydraulic conductivity (slope) are sensitive parameters. The surface roughness multiplier (OVROUGHRTFAC) is a general sensitive parameter, and the surface water holding depth (RETDEPRTFAC) is an insensitive parameter. The sensitivity of each parameter is not static, and the parameter sensitivity can be affected by the evaluation index, and a certain degree of change exists. With the variation of the spatial resolution of the confluence calculation grid, the global sensitivity of each parameter can also change slightly, but the global sensitivity level of the parameter does not change. MANNFAC has the best adjustment effect on peak time, REFKDT and REFDK have significant adjustment effect on flood volume and peak, and slope can adjust the shape of flood hydrograph well.

Key words: WRF-Hydro model; parameter sensitivity analysis; LH-OAT method; Hexi Inland River Basin

随着 3S 技术的发展,分布式水文模型发展迅速,现已广泛用于水文领域研究。与传统的集总式模型相比,分布式模型将流域划分成若干小网格,考虑了气候和下垫面条件的空间异质性^[1-5]。由于网

格化特性,分布式水文模型能更详细、更准确地模拟流域水文过程,但同时也伴随着模型参数相对繁杂、参数率定框架难以建立、计算成本较高等问题。

WRF-Hydro 模型是 2013 年以美国国家大气研究中心 (NCAR) 为主导、多个国家参与研发的基于物理过程的网格化分布式水文模型,是基于 Noah/Noah-MP 陆面模型的水文拓展模块^[6-7]。WRF-Hydro 模型主要包括大尺度的陆面模块和小尺度的河道汇流模块,其中,大尺度的陆面模块有 Noah 和 Noah-MP 两种陆面模型可供选择;河道汇流模块包括壤中汇流、地表汇流、地下径流和河道汇流等子模块。WRF-Hydro 模型不仅可以单独模拟多尺度洪水预报过程线,还可以与水资源管理、水质预测等其他模型或模块耦合^[8-9]。

WRF-Hydro 模型涉及参数众多,但并非每个参数对模型的模拟结果都具有显著影响。因此,对 WRF-Hydro 模型的参数进行敏感性分析很有必要。参数敏感性分析有助于识别对 WRF-Hydro 模型输出影响显著的参数和不敏感参数,降低模型参数维度,减少模型参数不确定性^[10-13]。近年来,已有学者对 WRF-Hydro 模型的部分参数进行了敏感性分析。例如:Ryu 等^[14]通过一次变化一个因子 (one-factor-at-a-time, OAT) 方法不等步长地对 WRF-Hydro 模型的入渗系数 (REFKDT)、地表持水深度乘子 (RETDEPRTFAC)、地表糙率乘子 (OVROUGHRTFAC)、河道曼宁糙率乘子 (MANNFAC) 4 个参数依次进行扰动,进行敏感性分析,得出 REFKDT 是最敏感的参数;Liu 等^[15]在中国半湿润半干旱地区,以合适的参数组合驱动 WRF-Hydro 模型,对比参数调整导致的洪量和峰现时间的变化,同样对这 4 个参数进行敏感性分析,得出 REFKDT 和 MANNFAC 是 4 个参数中最敏感的参数;李致家等^[16]通过等步长地依次对 WRF-Hydro 的土层厚度乘子 (ZSOILFAC)、水箱模型指数 (GWEXP)、REFKDT、RETDEPRTFAC、OVROUGHRTFAC、MANNFAC 6 个参数进行扰动,进行定性的敏感性分析,同时使用修正 Morris 筛选法进行定量局部敏感性分析,提出 WRF-Hydro 模型在中国半湿润地区的陈河流域应用时,ZSOILFAC、REFKDT、MANNFAC 为敏感参数。

现有研究对 WRF-Hydro 模型进行参数敏感性分析采用的方法都是局部敏感性分析方法。2020 年,Fersch 等^[17]用拉丁超立方-OAT(LH-OAT)方法对 WRF-Hydro 模型的 8 个参数进行了全局敏感性分析,得出 WRF-Hydro 模型在德国巴伐利亚州

应用时,8 个参数中只有水箱模型初始水量 (ZINIT) 为不敏感参数,其他 7 个参数均为敏感参数。目前我国对 WRF-Hydro 模型参数的全局敏感性的研究不够充分,缺乏关于汇流网格分辨率对参数敏感性的探讨^[18],与 WRF-Hydro 模型相关的研究多在湿润半湿润地区进行,为此,本文基于 LH-OAT 方法,研究使用不同评价指标和不同空间分辨率汇流演算网格时,WRF-Hydro 模型主要参数在河西内陆河流域的敏感性,并对 WRF-Hydro 模型主要参数进行敏感度分级,探究不同评价指标和空间分辨率对参数敏感性的影响。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

以河西地区内陆河水系的西营河流域为研究对象,西营河流域地处武威市西南部,流经肃南区和凉州区,是石羊河八大支流中最大的一级支流,流域面积 1 455 km²,河道长度 76.7 km,河道坡降 28.2‰。该流域径流资源丰富,年径流量达 3.79 亿 m³,多年平均流量达 12 m³/s,多年最大洪水流量 472 m³/s,最小洪水流量 0.62 m³/s。西营河流域降雨多集中在 6—9 月,占全年降水量的 69%,容易形成洪水。西营河发源于祁连山脉东段的冷龙岭和卡洼掌,东北流汇入响水河,在流域的出山口附近设有九条岭水文站 (102°03'E,37°52'N)^[19-20]。

选取九条岭水文站控制的西营河流域 (图 1) 为研究区域,流域面积 1 077 km²,属高寒半干旱气候^[21],占西营河总流域面积的 74.02%。研究区域海拔较高,地形陡峭;植被较好,水土流失轻微,土壤的持水性和透水量较大,土壤和植被滞蓄能力较强;河道分叉,渗漏严重,时常发生断流。

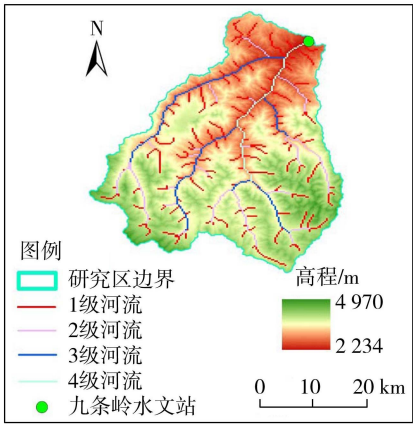


图 1 西营河流域及河网分级示意图

1.2 数据来源

研究使用的数据包括气象驱动数据、静态地理

数据、DEM 数据和实测洪水要素。气象驱动数据采用 2015 年 2 月 1 日至 2018 年 9 月 10 日时空分辨率分别为 3 h、0.25°的全球预报系统(GFS)数据,选取长波辐射、短波辐射、降雨、气温、气压、水平和竖直方向风速以及比湿这 8 个变量作为模型输入。静态地理数据包括地形、地貌和土地利用类型等自然条件的数据集,可在 WRF 官网获取,静态地理空间数据的空间分辨率为 30 s。DEM 高程数据的空间分辨率为 90 m,该数据主要用于将低分辨率网格细分形成高分辨率网格,以支持模型的汇流演算模块,弥补陆面模式中未考虑侧向流和径流重分配的缺陷,以高分辨率的网格进行模拟,这一过程通过 GIS 预处理系统进行。DEM 数据取自地理空间数据云。实测洪水要素资料取自《中华人民共和国水文年鉴》2015—2018 年第 10 卷甘肃河西地区内陆河水文资料的洪水要素表。

1.3 敏感性分析方法

采用 LH-OAT 方法进行敏感性分析。LH-OAT 方法是 2005 年 van Griensven 等^[22]结合 LH 方法和 OAT 方法提出并应用于 SWAT 模型的全局敏感性方法,包含采用 LH 方法进行抽样和采用随机 OAT 方法进行敏感性分析两个部分。LH 抽样将参数空间进行分层,并在每层进行采样。随机 OAT 方法通过轻微扰动来确定参数在各采样点的敏感性。LH-OAT 方法结合了 LH 方法的高效性和 OAT 方法的精确性,可以用较低的计算成本,科学、高效、精确、定量地确定模型参数的敏感性。

LH 抽样分为 4 个步骤:①确定每个参数取值范围,并将每个参数的取值范围等分成 n 层,即参数在每层范围出现的可能性均等,为 $1/n$ (n 为要取的采样点数量);②对各参数进行分层采样,并在各层中各取 1 个值,作为参数变量在各层的代表值;③在上一步抽取的各变量的代表值中随机选择(每个数只能使用一次)组合成 1 个采样点;④重复步骤③,得到 n 个参数组。

采用随机 OAT 方法进行敏感性分析也分为 4 个步骤:①每个采样点包含 m 个参数,采用控制变量法,每次对其中 1 个参数进行微小扰动,保持其他参数不变,模型需运行 $m+1$ 次,即可得到 m 个参数各自的相对敏感度 S_{ij} (i 表示不同参数, j 表示不同采样点);②对每个 LH 抽样参数组进行 m 次参数微小改变,且每次只改变其中 1 个参数,计算每次微小改变前后评价指标的变化情况;③由参数相对敏感度 S_{ij} 计算参数的敏感度 $S_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{ij}$;④根据参考

文献^[23],将敏感度划分为 4 级: $0 \leq |S_i| < 0.05$ 为不敏感, $0.05 \leq |S_i| < 0.20$ 为一般敏感, $0.20 \leq |S_i| < 1.00$ 为敏感, $|S_i| \geq 1.00$ 为极敏感。

参考徐会军等^[23]的研究,本文使用洪量精度评定指标(IVF)、纳什效率系数(NSE)、洪峰误差(PE)、模拟平均流量($\bar{Q}$)、相关系数(r)、模拟流量残差平方和(RSS)、峰现时间误差(PT)等 7 个评价指标,探究评价指标对 WRF-Hydro 模型主要参数敏感性的影响。

1.4 WRF-Hydro 模型设置和主要参数取值

WRF-Hydro 模型主要包括陆面模块和汇流演算模块。陆面模块的水文过程在低分辨率网格中进行,而汇流演算模块的水文过程在高分辨率网格中进行。模拟过程中,WRF-Hydro 模型通过分解/聚合程序完成陆面模式的粗网格和汇流演算模块的精细网格之间的信息交换。

选取 WRF-Hydro 模型的入渗系数(REFKDT)、地表持水深度乘子(RETDEPRTFAC)、地表糙率乘子(OVROUGHRTFAC)、深层导水系数(slope)、土壤饱和导水率(REFDK)、河道曼宁糙率乘子(MANNFAC)6 个主要参数进行敏感性分析,综合考虑已有研究成果^[14-15,17,24-25],确定各参数取值范围如表 1 所示。

表 1 参数取值范围

参数	默认值	取值范围
REFKDT	3.0	0 ~ 0.4 ^[15]
RETDEPRTFAC	1.0	0 ~ 10 ^[15]
OVROUGHRTFAC	1.0	0 ~ 1 ^[15]
slope	0.1	0 ~ 1 ^[24]
MANNFAC	1.0	0 ~ 2 ^[14,17,25]
REFDK	2×10^{-6}	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-5}$ ^[24]

2 结果与分析

以空间分辨率为 1 km×1 km 的陆面模式演算网格,分别搭配 100 m×100 m、125 m×125 m、200 m×200 m、250 m×250 m 的汇流演算网格以离线模式运行 WRF-Hydro 模型,利用 LH-OAT 方法在不同空间分辨率的汇流演算网格条件下,对 6 个参数进行敏感性分析。

将 6 个参数分为 10 层,并在各参数取值范围内使用 LH 方法进行抽样,得到 10 个采样点,抽样结果见表 2。之后,使用 OAT 方法,基于不同的评价指标和不同空间分辨率的汇流演算网格,对每个参数的敏感性指数进行计算,得到每个参数的敏感度以及敏感度等级,分析与讨论不同评价指标和汇流演算网格空间分辨率对敏感性的影响。

表 2 LH 抽样结果

采样点	RETDEPRTFAC	REFKDT	OVROUGHRTFAC	REFDK	slope	MANNFAC
1	6.325	0.169	0.888	5.837×10^{-6}	0.821	0.321
2	2.542	0.127	0.641	9.489×10^{-6}	0.049	1.343
3	3.453	0.240	0.233	2.555×10^{-6}	0.519	1.534
4	4.967	0.092	0.195	6.873×10^{-6}	0.219	0.190
5	5.884	0.390	0.452	1.448×10^{-6}	0.182	1.105
6	7.497	0.275	0.092	7.071×10^{-6}	0.949	0.826
7	8.586	0.029	0.994	8.920×10^{-6}	0.387	0.658
8	9.313	0.305	0.524	1.479×10^{-7}	0.666	0.976
9	0.116	0.047	0.396	4.390×10^{-6}	0.484	1.817
10	1.599	0.332	0.713	3.279×10^{-6}	0.738	1.651

2.1 不同评价指标对参数敏感性的影响

使用 250 m×250 m 汇流演算网格的驱动模型，分析和说明不同评价指标对参数敏感性的影响。参数敏感度指标 $|S_i|$ 计算结果见表 3，各参数敏感度等级见图 2。另外，对不同评价指标得到的各参数敏感度进行排序，结果见表 4。

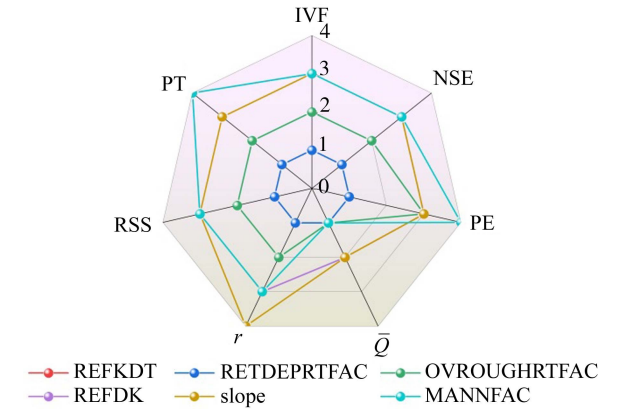


图 2 250 m×250 m 汇流演算网格下的参数敏感度等级雷达图

从表 3 可以看出，敏感性分析结果很大程度上

受到评价指标的影响，与秦萍等^[26]、徐会军等^[23]的研究结果相符。在河西内陆河流域，6 个参数对于流域出口平均流量的控制能力较弱，而对洪峰流量的调节作用显著。以出口平均流量为评价指标分析参数敏感性时，相较于其他评价指标来说得到的参数敏感度结果要小得多，6 个参数都被识别为一般敏感参数或不敏感参数。在 6 个参数中，对于出口平均流量影响较大的参数为 REFKDT、REFDK 和 slope。但以洪峰误差为评价指标分析参数敏感性时，却出现了完全不同的结果，5 个参数（除 RETDEPRTFAC）都被识别为敏感参数或极敏感参数。

从表 4 可以看出，各参数的敏感度排名也受到不同评价指标的影响，以 slope 为例，当以 PE 为评价指标时，slope 的敏感度排名为第 4 名，而当以 IVF 作为评价指标时，slope 的敏感度排名为第 1 名，从总体上看，较敏感的参数，敏感度排名受评价指标的影响较大；而敏感度较低的参数，敏感度排名不受评价指标变化的影响。REFKDT、REFDK、slope、

表 3 参数敏感度指标计算结果

评价指标	$ S_i $					
	REFKDT	RETDEPRTFAC	OVROUGHRTFAC	REFDK	slope	MANNFAC
IVF	0.47	0.00	0.09	0.46	0.51	0.30
NSE	0.78	0.01	0.08	0.58	0.50	0.67
PE	0.81	0.02	0.34	0.51	0.35	2.35
$\bar{Q}$	0.09	0.00	0.01	0.09	0.08	0.02
r	0.30	0.01	0.10	0.68	1.38	0.53
RSS	0.38	0.00	0.07	0.36	0.45	0.44
PT	1.61	0.03	0.16	1.75	0.28	3.73

表 4 参数敏感度排名

评价指标	参数敏感度排名					
	REFKDT	RETDEPRTFAC	OVROUGHRTFAC	REFDK	slope	MANNFAC
IVF	2	6	5	3	1	4
NSE	1	6	5	3	4	2
PE	2	6	5	3	4	1
$\bar{Q}$	1	6	5	2	3	4
r	4	6	5	2	1	3
RSS	3	6	5	4	1	2
PT	3	6	5	2	4	1

MANNFAC 4 个参数的敏感度排名会随评价指标的不同而波动。OVROUGHRTFAC 和 RETDEPRTFAC 的敏感度排名稳定,不受评价指标的影响,分别排第 5、6 名。

2.2 不同汇流网格空间分辨率对参数敏感性的影响

分别使用空间分辨率为 100 m×100 m、125 m×125 m、200 m×200 m、250 m×250 m 的汇流网格驱动模型,分析汇流演算网格空间分辨率对 6 个参数敏感性的影响,结果如表 5 所示。为了综合考虑不同输出变量对参数敏感性的影响,根据文献[26],分别计算各个参数对不同评价指标的敏感度指标的平均值并作为该参数的全局敏感度,结果如表 5 所示。由表 5 可见,尽管参数全局敏感度会随着汇流网格空间分辨率的改变而小幅变化,但参数敏感性等级较为稳定。相比于其他参数,REFKDT 的全局敏感度受汇流网格分辨率的影响最大,使用不同汇流演算网格分辨率进行敏感度分析,REFKDT 的全局敏感度在 0.379~0.636 之间波动,相比其他参数波动的幅度较大。不同汇流网格尺度下,MANNFAC 被识别为极敏感参数,REFKDT、slope、REFDK 均被识别为敏感参数。OVROUGHRTFAC 被识别为一般敏感参数,RETDEPRTFAC 被识别为不敏感参数。该结果验证了 Liu 等^[15]的敏感性分析结果:在 REFKDT、MANNFAC、OVROUGHRTFAC、RETDEPRTFAC 4 个参数中,REFKDT 和 MANNFAC 最为敏感,RETDEPRTFAC 对洪量调控作用最弱。由表 2 可知,REFKDT 在西营河流域的取值范围为 0~0.4,与 Liu 等^[15]提出的该参数在紫荆关流域的取值范围 1.0~4.0 有明显差异。造成 REFKDT 取值范围差异的原因可能是气候的影响。西营河流域九条岭水文站以上区域属于高寒半干旱气候带,而紫荆关流域属于温带半湿润气候。相比之下,西营河流域的降雨资源较为匮乏,总体的降雨入渗量也较少,所以 REFKDT 在西营河的取值较紫荆关流域偏小。

对不同汇流演算网格分辨率下得到的全局敏感度进行排序,REFKDT、REFDK、slope 3 个参数的敏感度排名有变化(第 2~4 名),而 MANNFAC、

OVROUGHRTFAC、RETDEPRTFAC 的敏感度排名分别为第 1、5、6 名,不随汇流演算网格分辨率的改变而改变。由此可见,在 6 个参数中,MANNFAC 是最敏感的参数,RETDEPRTFAC 是最不敏感的参数,OVROUGHRTFAC 次之。

为了综合考虑汇流演算网格空间分辨率对参数的影响,对参数进行敏感性分析,以不同空间分辨率的汇流演算网格的全局敏感度的平均值作为敏感性的最终评价指标^[26],计算结果见表 5,可以得到 6 个参数的敏感度大小排序为 MANNFAC、REFDK、slope、REFKDT、OVROUGHRTFAC、RETDEPRTFAC。

2.3 WRF-Hydro 模型参数对洪水过程线的影响

选取洪峰较为显著的 2016 年 7 月 10—12 日洪水作为典型洪水,进行 WRF-Hydro 模型参数对洪水过程线影响的分析。以 LH 抽样后模拟最优(NSE 最大)的采样点作为初始点,在参数取值范围内,保持其他参数不变,等步长地分别改变 6 个参数的取值,通过计算 NSE、PE、IVF、PT 4 个水文预报结果评价指标,分析各参数对洪水过程线的影响。6 个参数不同取值时 2016 年洪水的过程线如图 3 所示,典型洪水的水文预报结果评价指标计算结果如表 6 所示。

REFDK 对洪量和洪峰大小具有显著的调节作用。在全局敏感性分析结果中,被识别为敏感参数,IVF、NSE、PE、PT 对 REFDK 都有较好的响应。从图 3(a)可以看出,随着 REFDK 的增大,洪量增大显著且洪峰略微向后偏移。

MANNFAC 是这 6 个参数中敏感性最高的参数,对洪水过程线形状、洪峰都有很大的影响。MANNFAC 主要控制河道汇流速率,随着 MANNFAC 的增大,峰现时间向后偏移,且洪量减少,峰值也逐渐降低。由图 3(b)可知,在 6 个参数中,MANNFAC 对峰现时间的影响最大,对于典型洪水而言,MANNFAC 从 0.2 等步长增加到 1.8,模拟的洪峰向后延迟明显。由表 6 可知,NSE 随着 MANNFAC 的增大,先增大后减小。另外,MANNFAC 对于洪量和洪峰大小也有调节作用,但对洪量和洪峰大小的控制效果不如 REFKDT 和 REFDK 这两个参数。

表 5 不同汇流网格尺度下全局敏感度和最终评价指标

空间分辨率	全局敏感度					
	REFKDT	RETDEPRTFAC	OVROUGHRTFAC	REFDK	slope	MANNFAC
100 m×100 m	0.567	0.010	0.079	0.529	0.471	1.132
125 m×125 m	0.428	0.006	0.098	0.681	0.549	1.111
200 m×200 m	0.379	0.006	0.124	0.568	0.527	1.192
250 m×250 m	0.636	0.010	0.120	0.634	0.507	1.149
平均值	0.503	0.008	0.105	0.603	0.514	1.146

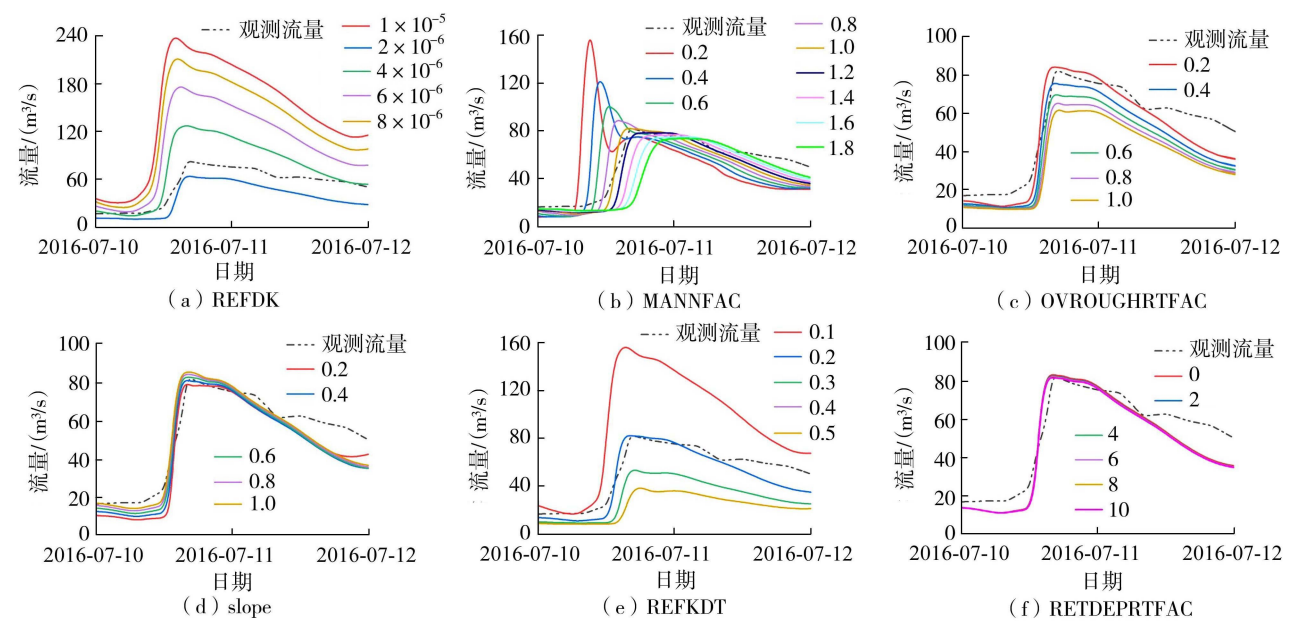


图3 参数不同取值时洪水过程线

表6 参数不同取值时评价指标计算结果

参数	取值	IVF	NSE	PE	PT/h
REFDK	2×10^{-6}	0.430	0.357	0.225	0
	4×10^{-6}	-0.271	0.569	0.538	0
	6×10^{-6}	-0.479	-6.100	1.130	-1
	8×10^{-6}	-0.574	-13.158	1.553	-2
	1×10^{-5}	-0.628	-20.357	1.878	-2
RETDEPRTFAC	0	0.101	0.808	0.006	0
	2.0	0.114	0.797	0.001	0
	4.0	0.117	0.795	0.004	0
	6.0	0.120	0.794	0.006	0
	8.0	0.122	0.792	0.008	0
	10.0	0.124	0.790	0.009	0
OVROUGHRTFAC	0.2	0.093	0.808	0.015	0
	0.4	0.216	0.705	0.082	0
	0.6	0.312	0.574	0.153	0
	0.8	0.392	0.440	0.213	0
	1.0	0.462	0.310	0.253	1
slope	0.2	0.098	0.773	0.038	0
	0.4	0.125	0.780	0.015	0
	0.6	0.107	0.805	0.003	0
	0.8	0.081	0.822	0.020	0
	1.0	0.059	0.835	0.033	0
REFKDT	0.1	-0.410	-3.347	0.892	-1
	0.2	0.117	0.796	0.003	0
	0.3	0.670	-0.120	0.349	1
	0.4	1.171	-1.097	0.531	2
	0.5	1.171	-1.097	0.531	2
MANNFAC	0.2	0.025	-1.527	1.026	-7
	0.4	0.057	-0.550	0.503	-5
	0.6	0.076	0.148	0.238	-4
	0.8	0.097	0.608	0.087	-2
	1.0	0.117	0.796	0.003	0
	1.2	0.136	0.811	0.050	7
	1.4	0.154	0.703	0.069	9
	1.6	0.171	0.539	0.090	10
	1.8	0.188	0.373	0.108	10

OVROUGHRTFAC 主要控制坡面汇流速率,该参数被识别为一般敏感参数,对洪峰大小、洪水过程线有小幅影响。如图 3 (c) 所示,随着 OVROUGHRTFAC 的增大,坡面汇流的速率减缓。峰现时间也小幅向后推移(典型洪水的峰现时间波动均为 1 h)。这意味着随着 OVROUGHRTAC 的增加,地表径流的汇流时间延长。在典型洪水中,该参数对洪峰流量和洪量有轻微的调节作用。

slope 控制着向水箱模型补给水分的速度,该参数被识别为敏感性参数,对洪水过程线形状(NSE、RSS)有较大的影响,但对洪峰流量和洪量的控制效果不显著。如图 3(d) 所示,随着 slope 的增大,洪水过程线逐渐趋于平缓,洪峰流量逐渐降低,但洪量几乎不变(slope 在 0 ~ 1 变动时,典型洪水的洪量变化在 10% 以内)。

REFKDT 对洪量、洪峰大小和洪水过程线都具有较大影响,对洪峰大小的调节效果尤为显著。由图 3(e) 可知,随着 REFKDT 的增加,洪量逐渐减小,洪峰降低,而且这种下降显然是非线性的。具体来说,随着 REFKDT 的增加,洪峰和洪量的减小速率逐渐减慢,洪水过程线逐渐平滑。对于 2016 年洪水而言,当 REFKDT 从 0.1 升至 0.2 时,洪峰流量减少了 47.36%,洪量减少了 47.21%。而 REFKDT 从 0.2 升至 0.3、从 0.3 升至 0.4 时,洪峰流量分别减少了 34.68%、28.06%,洪量分别减少了 33.12%、23.07%。另外,由表 6 可知,REFKDT 对峰现时间也有较大的影响。对于典型洪水而言,在 REFKDT 取值范围内,PT 的波动为 0 ~ 2 h。

RETDEPRTFAC 主要控制土壤洼蓄能力,当地

表水头超过预定义的地表持水深度时,就会流入河道。如图 3(f) 所示,RETDEPRTFAC 不同取值对洪水过程的影响几乎可以忽略。由表 6 可知,典型洪水的各指标对 RETDEPRTFAC 的响应较差。以往大部分学者使用 WRF-Hydro 模型对洪水进行模拟时,常常将 RETDEPRTFAC 当成影响洪量的重要参数。通过本次研究证实,WRF-Hydro 模型在河西内陆河流域应用时,RETDEPRTFAC 为不敏感参数,调节该参数对模型模拟的影响很小,故在参数率定时,为降低计算成本,可不必率定该参数。

3 结 论

a. 根据最终敏感性评价指标,MANNFAC 为极敏感参数,REFKDT、slope、REFDK 为敏感参数,OVRUGHRTFAC 为一般敏感参数,RETDEPRTFAC 为不敏感参数。参数敏感性大小排序为 MANNFAC、REFDK、slope、REFKDT、OVRUGHRTFAC、RETDEPRTFAC。

b. 6 个参数对于典型洪水的洪水过程线的调节效果不同。其中,REFKDT 和 REFDK 对于洪量和洪峰大小的控制效果显著;MANNFAC 对于峰现时间的调节效果最好,随着 MANNFAC 的增大,洪水过程线的洪峰向后偏移明显,且洪峰流量和洪量有所降低。slope 可以较好地调节洪水过程线的形状,但对于洪量的控制效果不明显。OVRUGHRTFAC 可以微调洪峰流量和峰现时间。RETDEPRTFAC 对洪水过程线的调节效果不明显。

c. 使用 LH-OAT 方法对 6 个参数进行敏感性分析时,各参数的敏感性受评价指标的影响较大,评价指标不同,部分参数的敏感度排序会有小幅变化。然而,各参数的敏感性受模型汇流演算网格空间分辨率的影响较小,各参数的敏感度类别不随空间分辨率的变化而变化。WRF-Hydro 模型应用于河西内陆河流域时,需根据防洪调度、实时预报等需求来调整参数。

参考文献:

[1] 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 Jingchao, ZHU Axing, QIN Chengzhi, et al. Review on distributed hydrological modelling software systems[J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1090-1100. (in Chinese))

[2] 芮孝芳,黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展,2004,24(2):55-58. (RUI Xiaofang, HUANG Guoru. Current situation of distributed hydrological model and its future development [J].

Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004,24(2):55-58. (in Chinese))

[3] 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 Qينو, et al. Grid-based karst distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):43-51. (in Chinese))

[4] 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 Qينو, 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))

[5] 包红军,王莉莉,李致家,等. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):340-346. (BAO Hongjun, WANG Lili, LI Zhijia, et al. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (4): 340-346. (in Chinese))

[6] 顾天威,陈耀登,高玉芳,等. 基于 WRF-Hydro 模式的清江流域洪水模拟研究[J]. 水文,2021,41(3):63-68. (GU Tianwei, CHEN Yaodeng, GAO Yufang, et al. Study of flood simulation in Qingjiang River Basin based on WRF-Hydro model[J]. Journal of China Hydrology,2021, 41(3):63-68. (in Chinese))

[7] 王维,刘佳,李传哲,等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):125-134. (WANG Wei, LIU Jia, LI Chuanzhe, et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation [J]. Water Resources Protection,2023,39(5):125-134. (in Chinese))

[8] CHAO Lijun, ZHANG Ke, YANG Zongliang, et al. Improving flood simulation capability of the WRF-Hydro-RAPID model using a multi-source precipitation merging method[J]. Journal of Hydrology,2021,592:125814.

[9] 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.

[10] 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))

[11] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):105-

112. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review of methods of parameter sensitivity analysis in hydrologic modeling[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (6) : 105-112. (in Chinese))
- [12] 曾家俊, 麦叶鹏, 李志威, 等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3) : 15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3) : 15-21. (in Chinese))
- [13] 王鹏, 董国庆, 阴祖荣, 等. 面向复杂情景的 SWMM 水质参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (5) : 31-37. (WANG Peng, DONG Guoqing, YIN Zurong, et al. Sensitivity analysis of water quality parameters in SWMM for complex scenarios [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5) : 31-37. (in Chinese))
- [14] 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.
- [15] 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 Atmospheric Sciences, 2021, 57(3) : 451-466.
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] FERSCH B, SENATORE A, ADLER B, et al. High-resolution fully coupled atmospheric-hydrological modeling: across-compartment regional water and energy cycle evaluation [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(5) : 2457-2481.
- [18] KIM S, SHEN Haojing, NOH S, et al. High-resolution modeling and prediction of urban floods using WRF-Hydro and data assimilation [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126236.
- [19] 陈庭兴, 吕海深, 朱永华. 基于 GEV 分布的西营河流域洪水特性分析 [J]. 干旱区研究, 2021, 38 (6) : 1563-1569. (CHEN Tingxing, LYU Haishen, ZHU Yonghua. Analysis of flood characteristics in Xiying River Basin based on GEV distribution [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6) : 1563-1569. (in Chinese))
- [20] 张梅洁, 吕海深, 刘娣, 等. 耦合融雪的新安江模型在干旱区径流模拟研究 [J]. 干旱区研究, 2022, 39 (2) : 379-387. (ZHANG Meijie, LYU Haishen, LIU Di, et al. Runoff simulation in an arid area using the Xin'anjiang model coupled with snowmelt [J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (2) : 379-387. (in Chinese))
- [21] 苏广全, 吕海深, 朱永华, 等. 基于博弈论组合赋权的洪水风险评价: 以武威地区为例 [J]. 干旱区研究, 2022, 39 (3) : 801-809. (SU Guangquan, LYU Haishen, ZHU Yonghua, et al. Combined weight method based on game theory for flood risk assessment in the Wuwei Region [J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (3) : 801-809. (in Chinese))
- [22] 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(1/2/3/4) : 10-23.
- [23] 徐会军, 陈洋波, 李昼阳, 等. 基于 LH-OAT 分布式水文模型参数敏感性分析 [J]. 人民长江, 2012, 43 (7) : 19-23. (XU Huijun, CHEN Yangbo, LI Zhouyang, et al. Analysis on parameter sensitivity of distributed hydrological model based on LH-OAT method [J]. Yangtze River, 2012, 43(7) : 19-23. (in Chinese))
- [24] WANG Jiali, WANG Cheng, RAO V, et al. A parallel workflow implementation for PEST version 13. 6 in high-performance computing for WRF-Hydro version 5. 0: a case study over the midwestern United States [J]. Geoscientific Model Development, 2019, 12 (8) : 3523-3539.
- [25] CERBELAUD A, LEFÈVRE J, GENTHON P, et al. Assessment of the WRF-Hydro uncoupled hydro-meteorological model on flashy watersheds of the Grande Terre tropical island of New Caledonia (South-West Pacific) [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 40: 101003.
- [26] 秦萍, 王正, 孙兆军, 等. 基于 LH-OAT 方法的 VG 模型参数敏感性分析 [J]. 节水灌溉, 2019 (10) : 97-102. (QIN Ping, WANG Zheng, SUN Zhaojun, et al. Sensitivity analysis of VG model parameter based on LH-OAT method [J]. Water Saving Irrigation, 2019 (10) : 97-102. (in Chinese))

(收稿日期: 2022 - 11 - 28 编辑: 俞云利)