

基于 SWAT 模型的径流 还原方法研究—以大汶河流域为例

陈佳蕾¹, 钟平安¹, 刘畅¹, 尚艳丽², 程传民³

(1.河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2.泰安市水文局, 山东 泰安 271000;
3.泰安市水利渔业局, 山东 泰安 271000)

摘要:在现有下垫面条件下还原天然径流是水资源配置的重要基础性工作。利用 SWAT 分布式水文模型进行径流还原计算。以大汶河流域为例, 选取流域内受人类活动影响较小、能大致反映流域天然径流情况的雪野水库、黄前水库以及东周水库所控制的 3 个子流域, 采用 SUFI-2 方法进行模型参数率定、验证和不确定性分析; 根据就近性与相似性原则, 进行全流域参数展布, 并通过 ArcSWAT2012 分析计算大汶河流域内泰安市各分区地表水资源量。结果表明: 3 个典型子流域的 P-factor 均大于 0.64, R-factor 均小于 0.72, 率定期和验证期的相关性系数和纳什效率系数均高于 0.77, 径流模拟值和实测值拟合程度高。通过 SWAT 模型还原天然径流是可行的。

关键词:径流还原; SWAT; SUFI-2; 敏感性分析; 不确定性分析; 参数展布

中图分类号: TV121 文献标识码: A 文章编号: 1000-0852(2016)06-0028-07

1 引言

水资源评价是水资源合理开发利用、水资源保护和水资源统一管理的基础^[1]。农业灌溉、工业用水、城乡生活、水库调蓄和地下水开采等各种人类活动的综合影响导致流域下垫面发生了变化, 实测径流已无法代表河流天然径流。径流还原计算是地表水资源量评价的重要工作。目前采用的径流还原方法有多种^[2-4], 其中应用比较广泛的有分项调查法、蒸发差值法、降雨径流关系法和水文模型法等。分项调查法、蒸发差值法和水文模型法都适用于在现有流域下垫面条件下还原人类活动增加或损耗的水量。其中, 水文模型法因其物理机制强、限制因素少、使用方便而获得广泛应用。1994 年, 夏岑岭等人首次使用新安江模型(集总式)进行还原分析和水资源评价^[5]。但当流域面积较大时, 集总式模型率定的参数只适用于率定时

的雨型, 无法进行下垫面变化的水文效应分析^[6]。近年来, 已有一些学者尝试应用分布式水文模型进行水资源评价^[7-8]。SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)是一个基于物理过程的分布式水文模型, 能够很好地应用于资料缺乏地区。魏怀斌等人证明了 SWAT 模型可以很好地应用于水文还原分析, 有效解决下垫面变化及人类取水过程对水文循环的影响^[9], 不足之处在于未对 SWAT 模型进行参数敏感性和不确定性分析, 而敏感性和不确定性分析是分布式水文模型参数校准和模型构建的先决条件。

本文以大汶河流域为研究区域, 利用 ArcSWAT2012 建立流域 SWAT 模型, 分析计算流域内泰安市各分区地表水资源量, 并进行敏感性及不确定性分析。

2 SWAT 模型

SWAT 模型^[10-11]是基于物理过程的, 它对水文过程

收稿日期: 2016-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579068, 51379055)

作者简介: 陈佳蕾 (1993-), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: 18251829035@163.com

通讯作者: 钟平安 (1962-), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: Pazhong@hhu.edu.cn

的模拟分为两个部分:陆面水文循环模块(产流和坡面汇流部分)和汇流演算模块(河道和蓄水体汇流部分)。根据水文循环原理,SWAT 模型对陆面水文循环过程的水量平衡基本表达式为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day,i} - Q_{surf,i} - E_{a,i} - w_{seep,i} - Q_{gw,i}) \quad (1)$$

式中: SW_t 为最终的土壤含水量,mm; SW_0 为土壤初始含水量,mm; t 为时间, d ; $R_{day,i}$ 为第 i 日的降水量,mm; $Q_{surf,i}$ 为第 i 日的地表径流,mm; $E_{a,i}$ 为第 i 日的蒸发量,mm; $w_{seep,i}$ 为第 i 存在于土壤剖面底层的渗透量和侧流量,mm; $Q_{gw,i}$ 为第 i 日的地下水补给量,mm。

按照模拟的要求,SWAT 模型需要把流域离散为一系列子流域,来实现大尺度空间变量的表述。子流域的划分基于水系分布,主要通过设置流域最小面积的阈值实现。在每个子流域内,根据不同的土地利用和土壤类型,再将每个子流域进一步划分为一个或者多个下垫面情况相对单一的水文响应单元(HRU),各 HRU 之间相互独立,是模型中最基本的计算单元。这样可以在不同的土地利用、土壤类型和水文环境下,更客观地描述水循环过程。进行模拟计算时,每一个 HRU 对产流量作出响应,然后在子流域范围内进行累加,并演算到支流,最后通过河道汇流演算到流域出口。根据地表水资源模拟需要和资料情况,本文计算地表径流选用以日降水观察为基础的 SCS 径流曲线法;潜在蒸散发计算选用 Hargreaves 法;河道演算选取马斯京根法。

SWAT-CUP 是一种专门为 SWAT 模型提供敏感性分析、校准、验证和不确定性分析的计算机程序。其程序内部搭载了多种优化算法,本文选用 SUFI-2 算法,以平方误差的加和作为目标函数。

3 应用研究

3.1 研究区概况与基本资料

大汶河隶属黄河流域,发源于山东旋崮山北麓沂源县境内,干流河道长 239km,流域面积 9 098km²。河水季节性强,水量变化大。从莱芜市开始自西向东贯穿泰安市,大部分流域面积处于泰安市境内。泰安大汶口以上为上游,大汶口至东平县戴村坝为中游,戴村坝以下为下游。

泰安市辖泰山、岱岳两个区,宁阳、东平两个县,代省管辖新泰、肥城两市(县级)。全市地形自东北向西南倾斜,东部为鲁中山区的一部分,中部为广阔平原,西

部多低山丘陵,西南部为平原,间有洼地、湖泊。泰安市属温带大陆性半湿润季风气候区,全市年平均气温 12.9℃。多年平均降水量为 701.5mm,多年平均陆面蒸发量为 484.9mm。

SWAT 模型的建立需要多种数据资料,包括:空间数据资料、土地利用数据、土壤空间分布资料、气象资料和水文资料等。空间数据资料是由 NASA SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission)提供的 30m×30m 的 DEM 数据。土地利用数据为 2010 年大汶河流域土地利用遥感卫星影像资料(见图 1)。土壤空间分布资料为中国土壤 GIS 图层,流域土壤主要有棕壤、褐土、砂姜黑土、潮土、山地草甸型土和风砂土等,其中棕壤、褐土是流域土壤组成的主要类型。气象资料为 31 个主要代表性雨量站 1956~2013 年的逐日降水量资料;泰安、泰山、淄川三个气象站 1956~2013 年的逐日最高气温、最低气温、平均气温资料;泰安气象站 1956~2013 年的逐日平均风速、平均相对湿度资料。水文资料有:雪野、黄前、东周三个水库 1978~2013 年的逐月径流资料。

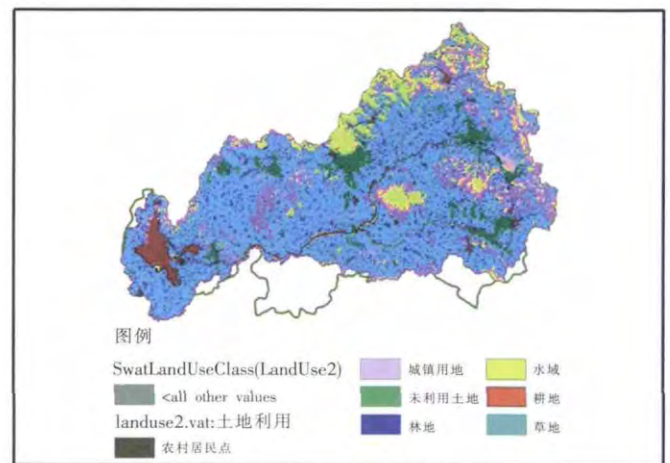


图 1 2010 年大汶河流域土地利用现状图
Fig.1 The land use of the Dawenhe River basin in 2010

3.2 SWAT 模型及参数率定

3.2.1 模型建立

在本次 SWAT 模型的建立中,利用 DEM 图提取流域水系,再根据设定的面积阈值与子流域进出口的位置等进行子流域的划分,最终得到 54 个子流域(见图 2)。根据不同土地利用和土壤类型的组合,进一步划分水文响应单元 HRU,共形成 208 个 HRU。



图2 大汶河流域 SWAT 模型子流域划分图

Fig.2 The subbasins of the Dawenhe River basin divided with SWAT model

3.2.2 参数率定

(1) 参数敏感性分析

SWAT 模型参数众多,在参数率定前进行参数敏感性分析可以去掉对模拟结果影响较小的参数,提高模型率定效率。SWAT 模型中关于径流的参数有 26 个^[12],基于 SWAT 参数率定工具和相关研究成果^[13-14],本文选取较敏感的 10 个参数进行敏感性分析,参数名称及取值范围见表 1。具体做法:利用 SUFI-2 算法中的全局敏感性分析模块,分别对雪野、黄前和东周水库所在子流域(1~3、4、29 号)的上述 10 个参数进行敏感性分析,选取 3 个子流域敏感性排名前 10 的参数进行进一步参数率定。敏感性分析结果见表 2。

表1 参数名称和取值范围

Table1 The parameters related to runoff

参数	名称	取值范围	影响对象及过程
CN2	径流曲线数	35~98	地表径流
ALPHA_BF	基流 α 系数	0~1	地下水
GW_DELAY	地下水滞后系数	0~500	地下水过程
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.02~0.2	地下水过程
SOL_AWC	土壤有效含水量	0~1	土壤水分
SOL_K	土壤饱和导水率	0~2000	土壤水分
SOL_BD	土壤容重	0.9~2.5	土壤水分
GWQMN	浅层地下水径流系数	0~5000	土壤水分
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1	土壤蒸发
SFTMP	降雪气温	0~20	降雪和融雪

表2 SUFI-2算法敏感性分析结果

Table2 The result of sensitivity analysis using SUFI-2 method

排名	雪野水库(1~3号)			黄前水库(4号)			东周水库(29号)		
	名称	T 值	P 值	名称	T 值	P 值	名称	T 值	P 值
1	CN2	-2.03	0.05	SOL_BD	-3.86	0.00	CN2	-15.56	0.00
2	ALPHA_BF	1.11	0.27	SOL_K	-3.40	0.00	SOL_BD	-12.45	0.00
3	GW_REVAP	-1.01	0.32	SOL_AWC	-3.09	0.02	ESCO	-6.00	0.00
4	SOL_BD	-0.84	0.40	ESCO	1.80	0.08	SOL_K	-5.06	0.00
5	SOL_K	-0.79	0.43	CN2	-1.28	0.21	SOL_AWC	2.37	0.02
6	GWQMN	0.65	0.52	ALPHA_BF	-0.92	0.36	ALPHA_BF	-1.11	0.27

SUFI-2 算法即采用拉丁超立方随机采样方法取得参数值,代入模型进行模拟,再计算目标函数值,并用 P-factor 和 R-factor 表示参数的不确定性程度^[15]。SUFI-2 全局敏感性分析模块即通过多元回归模型进行参数敏感性分析,将拉丁超立方采样生成的参数与目标函数值进行回归分析。在 SUFI-2 全局敏感性分析模块中,通过 t 检验方法判断模型中各个参数的敏感性。 T 值用来确定每个样本的相对显著性,绝对值越

大越敏感; P 值是 T 值查表对应的 P 概率值,决定了敏感性的显著性,值越接近 0,越显著。

(2) 参数率定

本文选取 1975~1977 年为预热期,1978~1997 年为率定期,1998~2006 年为验证期,利用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对雪野、黄前、东周水库所在子流域进行参数率定,调整上述敏感性分析所得参数,使得模拟值与实际值吻合。最终确定的参数最适值见表 3。

表3 各子流域参数最优值
Table3 The optimum parameter values of the three subbasins

雪野水库(1~3号)		黄前水库(4号)		东周水库(29号)	
名称	最优值	名称	最优值	名称	最优值
r_{CN2}	0.1504	r_{SOL_BD}	0.1255	r_{CN2}	0.1622
v_ALPHA_BF	0.4138	r_{SOL_K}	0.4172	r_{SOL_BD}	0.5895
v_GW_REVAP	0.1641	r_{SOL_AWC}	0.2836	v_ESCO	0.7742
r_{SOL_BD}	0.5146	v_ESCO	0.2029	r_{SOL_K}	0.6696
r_{SOL_K}	0.1455	r_{CN2}	0.0175	r_{SOL_AWC}	0.0542
v_GWQMN	1818.8	v_ALPHA_BF	0.7639	v_ALPHA_BF	0.2955

注:SWAT-CUP 参数名称中首字母 v 代表分析中对该参数值做替换处理; r 代表分析中对该参数值乘以(1+给定值)或相对变化。

3.2.3 模型检验

完成模型率定后采用实测径流数据进行验证,为了评价率定是否可靠(即模型模拟值是否接近实测值),选取纳什效率系数 E_{ns} 和相关系数 R^2 作为评价指标。同时,选取 SUFI-2 算法中的 P-factor 和 R-factor 来评价模型的不确定性。

E_{ns} 是一个整体综合指标,可以定量表示整个径流过程模拟值与实测值的拟合程度,一般取值范围在0~1之间,取值越接近 1 说明拟合程度越好。相关系数用于评价模拟值和实测值之间的吻合程度,其值常介于 0 与 1 之间,愈接近 1,说明实测值与模拟值线性相关程

度愈高。一般认为 $E_{ns}>0.6$ 、 $R^2>0.6$ 时拟合效果较好。从表 4 可以看出,本研究校准结果符合要求。从图 3、4 可以看出,率定期及验证期的模拟径流过程和实测径流过程拟合效果都较好。

表4 模拟评价结果
Table4 The evaluation results of runoff simulation

子流域	R^2		E_{ns}	
	率定期	验证期	率定期	验证期
雪野水库(1~3号)	0.92	0.91	0.77	0.75
黄前水库(4号)	0.87	0.86	0.85	0.84
东周水库(29号)	0.78	0.77	0.89	0.88

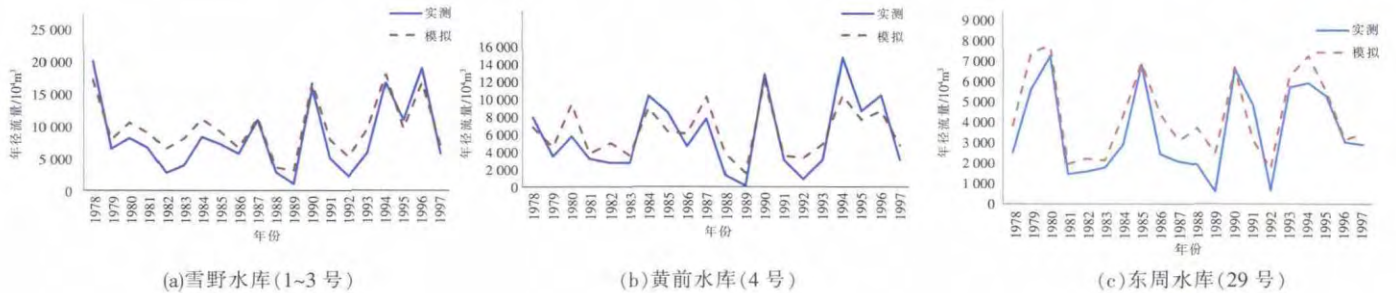


图3 率定期实测与模拟径流过程

Fig.3 The observed runoff process and simulated runoff process during calibration period

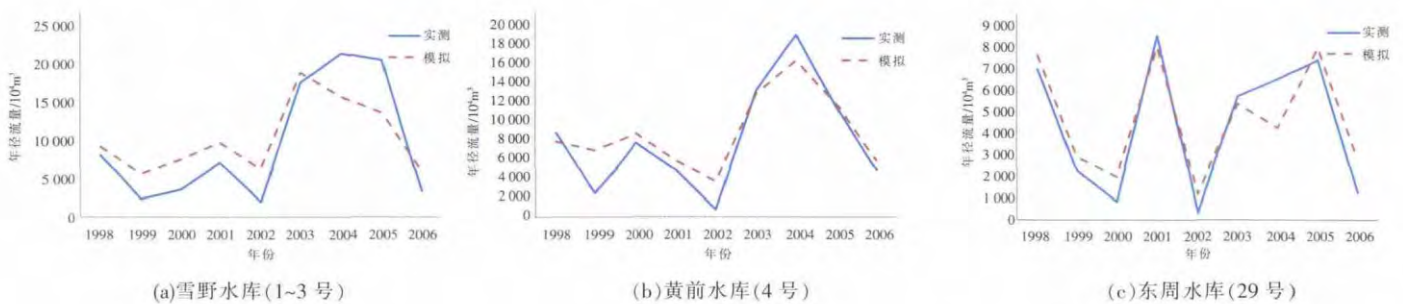


图4 验证期实测与模拟径流过程

Fig.4 The observed runoff process and simulated runoff process during validation period

P-factor 是指包括在 95% 预测不确定性内的监测数据的百分比, R-factor 是用 95PPU 带的平均厚度除以监测数据标准偏差, 95% 置信区间为 2.5%~97.5% 区间。用 P-factor 接近 1 和 R-factor 接近 0 的程度来判断校准的效果。一般认为 P-factor>0.6、R-factor<1 时模型拟合效果较好^[16]。从表 5 可以看出, 模型模拟结果不确定性较小。从纳什效率系数、相关系数、P-factor 和 R-factor 四个评价指标的分析结果可知, 利用 SWAT 模型模拟泰安市大汶河流域的径流是可行的。

表5 不确定性分析结果
Table5 The results of uncertainty analysis

子流域	P-factor	R-factor
雪野水库(1~3号)	0.80	0.62
黄前水库(4号)	0.75	0.72
东周水库(29号)	0.64	0.39

3.2.4 参数展布

典型子流域参数优化率定完成后, 利用就近性和相似性原则将参数展布到剩余 49 个子流域上。

就近性原则即分布在雪野水库、黄前水库以及东周水库周围的子流域分别沿用三个水库的参数。如: 5、6 号子流域沿用雪野水库的参数。

相似性原则即离三个水库较远的子流域根据各自的土地利用和土壤分布与三个水库的土地利用和土壤分布的相似性进行展布。具体做法是: 按各子流域不同土地利用类型(土壤类型)面积所占比例将各子流域的土地利用和土壤分布数据化, 然后将土地利用数据和土壤分布数据归一化, 计算各子流域归一化后的土地利用和土壤分布数据与三个水库归一化数据的欧式距离, 欧式距离即相似性指标, 根据距离大小选择沿用参数。归一化公式如下:

$$G_{ij} = \frac{S_{ij} - S_{i,\min}}{S_{i,\max} - S_{i,\min}} \quad (2)$$

式中: i 为子流域编号; j 为土地利用类型/土壤类型; G_{ij} 为归一化数值; S_{ij} 为第 i 子流域第 j 个土地利用数据/土壤分布数据; $S_{i,\min}$ 为第 i 子流域土地利用数据/土壤分布数据的最小值; $S_{i,\max}$ 为第 i 子流域土地利用数据/土壤分布数据的最大值。

以下展示部分子流域参数展布情况, 结果见表 6。

3.3 区域水资源量

参数率定完成后, 将参数输入模型, 以月尺度模拟整个流域 1978~2013 年的径流, 并通过泰安市各分区边界上事先添加的控制点, 用流出该分区的水量减去

表6 部分子流域参数展布情况
Table6 Distribution of the parameter in distant subbasins

子流域 编号	与典型子流域的欧氏距离			距离 最近
	雪野水库(1~3号)	黄前水库(4号)	东周水库(29号)	
8	1.545	1.837	1.661	1~3
9	0.648	0.687	0.757	1~3
15	1.733	1.719	1.639	29
16	0.977	0.672	0.941	4
20	1.598	1.676	1.496	29
21	1.629	1.589	1.479	29
22	1.144	0.914	1.170	4
32	1.246	1.162	1.231	4
33	1.334	1.468	1.390	1~3
34	1.535	1.467	1.419	29
41	1.673	1.646	1.551	29
42	1.331	1.404	1.404	1~3
52	1.604	1.589	1.502	29
53	1.706	1.692	1.611	29
54	1.561	1.560	1.450	29

流入该分区的水量, 计算出各分区逐月天然地表水资源量系列, 进而计算出泰安市各分区 1978~2013 年的年径流系列, 结果见表 7。同时, 在大汶河流域上下游各选取一个代表性断面, 对比其模拟年径流过程与实测年径流过程。上游代表性断面为莱芜(三)水文站控制断面(7号子流域出口), 7号子流域靠近雪野水库, 下垫面条件与雪野水库类似, 实测径流近似于天然径流。由图 5(a)可以看出, 7号子流域模拟年径流过程和实测年径流过程拟合程度好, 模拟年径流深与实测年径流深接近。下游代表性断面为戴村坝(三)水文站控制断面(45号子流域出口), 45号子流域处于大汶河流域下游, 离三个典型子流域较远, 人类活动对下垫面的影响无法忽视。图 5(b)中, 45号子流域模拟年径流过程普遍比实测年径流过程大, 模拟年径流深与实测年径流深的差值即为还原量。上下游代表性断面的还原量及还原量占比见表 8。

表7 泰安市各区多年平均地表水资源量
Table7 The mean annual water resources
in the various regions of Tai'an city

行政区	多年平均		
	年径流深 /mm	地表水资源量 /10 ⁴ m ³	地表水资源量 占比/%
泰山区	191	6433	5.5
岱岳区	173	30190	25.9
新泰市	221	42750	36.7
肥城市	122	15562	13.3
宁阳县(大汶河)	146	6777	5.8
东平县	111	14906	12.8
全市	150	116618	100

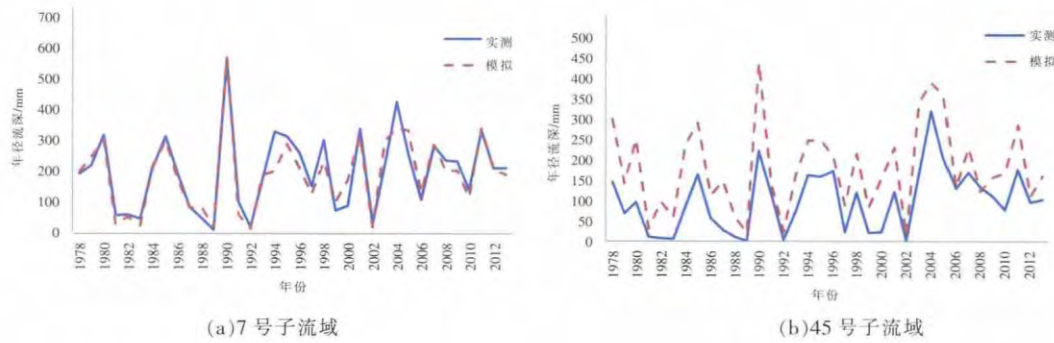


图5 上下游代表子流域模拟与实测年径流过程
Fig.5 The observed runoff process and simulated runoff process in the representative subbasins

表8 上下游代表断面还原水资源量
Table8 The restored water resources at the representative sections in up- and down-streams

断面	莱芜(三) (7号)		戴村坝(三) (45号)	
	实测	模拟	实测	模拟
多年平均年径流量/ 10^4m^3	16 236	17 007	103 660	146 441
集水面积/ km^2	855		8 227	
还原量/ 10^4m^3	771		42 781	
还原量占比/%	3.5		29.2	

4 小结

本文在大汶河流域构建了 SWAT 模型,选取典型区进行参数率定。在敏感性分析、参数率定、验证、不确定性分析和参数展布的基础上进行了径流过程的模拟。最后经过参数展布,获取了在现有下垫面条件下的地表水资源量。在此过程中,主要结论如下:

(1) 与径流有关的参数中,参数 CN2、ESCO、SOL_BD、SOL_AWC、SOL_K、ALPHA_BF、GW_REVAP 和 GWQMN 对径流模拟结果影响最为显著。

(2) 采用 SUFI-2 算法得到的参数组,可以取得较好的模拟效果。各子流域率定期及验证期的纳什效率系数和相关系数都在 0.75 以上,P-factor 都在 0.64 以上,R-factor 都小于 0.72。

(3) 经过参数展布后,通过 SWAT 模型模拟出的径流量能在一定程度上代表现有下垫面条件下的河川径流量,并由此来实现现在现有下垫面条件下还原人类活动增加或损耗的水量。

参考文献:

[1] 王浩,仇亚琴,贾仰文.水资源评价的发展历史和趋势[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2010,(3):274-277. (WANG Hao, QIU Yaqin, JIA Yangwen. Development course and tendency of water resources assessment[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural

Science), 2010,(3):274-277.(in Chinese))

[2] 燕荷叶. 径流还原计算技术方法及其应用研究[J].吉林水利,2009,(9): 65-70. (YAN Heye. Runoff revert calculation method and its applications[J]. Jilin Water Resources, 2009,(9):65-70. (in Chinese))

[3] 李爱云,吴建华.神经网络在径流量还原计算中的应用[J].东北水利水电,2006,(1):9-10+71. (LI Aiyun, WU Jianhua. Application of nervous network in reduction calculation of runoff amount[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2006,(1):9-10+71.(in Chinese))

[4] 王浩,王建华,贾仰文,等.现代环境下的流域水资源评价方法研究[J].水文,2006,(3):18-21+92.(WANG Hao, WANG Jianhua, JIA Yangwen, et al. A study on the method of water resources assessment in river basin under the present environment [J]. Journal of China Hydrology, 2006,(3):18-21+92. (in Chinese))

[5] 夏岑岭,赵人俊,卞传恂,等.湿润半湿润地区水资源评估水文模拟方法 [J]. 自然资源, 1994,(6):32-42. (XIA Cenling, ZHAO Renjun, BIAN Chuanxun, et al. Hydrological simulation for water resources assessment in humid and semi-humid region [J]. Natural Resources, 1994,(6):32-42. (in Chinese))

[6] 王忠静,杨芬,赵建世,等.基于分布式水文模型的水资源评价新方法[J].水利学报, 2008,12:1279-1285. (WANG Zhongjing, YANG Fen, ZHAO Jianshi, et al. New approach for water resources assessment based on distributed hydrological model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,12:1279-1285. (in Chinese))

[7] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价()—评价方法[J]. 水利学报,2006,(9):1051-1055.(JIA Yangwen, WANG Hao, QIU Yaqin, et al. Generalized water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model : assessment approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,(9):1051-1055. (in Chinese))

[8] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价()—黄河流域应用 [J]. 水利学报, 2006,(10):1181-1187. (JIA Yangwen, WANG Hao, QIU Yaqin, et al. General water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model : applications in the Yellow River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,(10):1181-1187. (in Chinese))

- [9] 魏怀斌,王明娜,周祖昊,等. 基于分布式水文模型水文还原的地表水资源评价 [J]. 人民黄河, 2009,(3):28-29. (WEI Huabin, WANG Mingna, ZHOU Zuhao, et al. Surface water resources assessment based on distributed hydrological model [J]. Yellow River, 2009,(3): 28-29. (in Chinese))
- [10] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation [A]. Texas Water Resources Institute Technical Report 406 [C]. Texas A&M University, 2011.
- [11] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007,(3):31-35. (PANG Jingpeng, XU Zongxue, LIU Changming. SWAT model application: state-of-the-art review [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,(3):31-35. (in Chinese))
- [12] 朱丽,秦富仓,姚云峰,等. SWAT 模型敏感性分析模块在中尺度流域的应用—以密云县红门川流域为例[J]. 水土保持研究, 2011,(1): 161-165+275. (ZHU Li, QIN Fucang, YAO Yunfeng, et al. Research of sensitivity analysis module of SWAT model in middle-scale watershed: a case study of Hongmenchuan watershed in Miyun county [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,(1):161-165+275. (in Chinese))
- [13] 杨建军,高小红,李其江,等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究, 2013,(1):82-88+93. (YANG Junjun, GAO Xiaohong, LI Qijiang, et al. SWAT model construction and uncertainty analysis on its parameters for the Huanghui River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,(1):82-88+93. (in Chinese))
- [14] Zhang X, Srinivasan R, Bosch D. Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using Genetic Algorithms and Bayesian Model Averaging[J]. Journal of Hydrology, 2009,374(3-4): 307-317.
- [15] 魏丹,刘智勇,李小冰. SWAT 模型及 SUFI-2 算法在秀尾河上游流域径流模拟中的应用 [J]. 干旱地区农业研究, 2012,(6):200-206. (WEI Dan, LIU Zhiyong, LI Xiaobing. The application of SWAT and SUFI-2 to runoff simulation in Tuweihe (upper) watershed[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012,(6):200-206. (in Chinese))
- [16] 张余庆,陈昌春,杨绪红,等. 基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在修水流域径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013,(9):24-28. (ZHANG Yuqing, CHEN Changchun, YANG Xuhong, et al. Application of SWAT model based SUFI-2 algorithm to runoff simulation in Xiushui basin [J]. Water Resources and Power, 2013,(9):24-28. (in Chinese))

Research on Runoff Restoration Method Based on SWAT Model: A Case Study in Dawenhe River Basin

CHEN Jialei¹, ZHONG Pingan¹, LIU Chang¹, SHANG Yanli², CHENG Chuanmin³

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.Tai'an Hydrology Bureau, Tai'an 271000, China; 3.Tai'an Water Conservancy and Fishery Bureau, Tai'an 271000, China)

Abstract: Restoring natural runoff is an important basic work for water resources allocation under the existing conditions of the underlying surface. In this paper, SWAT as a distributed hydrological model was used to calculate natural runoff quantity. We applied the methodology to the Dawenhe River Basin, and selected three typical sub-basins named the Xueye Reservoir, Huangqian Reservoir and Dongzhou Reservoir, which can generally reflect the natural runoff situation of the basin because of less impact by human activities. Then we calibrated and validated the model parameters and analyzed uncertainty of the model by using the SUFI-2 method. After that, we distributed all the sub-basin parameters into the whole basin based on the proximity and similarity principle and analyzed surface water resources of Tai'an City in the Dawenhe River Basin with ArcSWAT2012. The results show that P-factor in three typical sub-basins is larger than 0.64, and R-factor is less than 0.72. The relative correlation and Nash efficiency coefficient is larger than 0.77 during the periodic and validation periods. The higher fitting degree between the runoff simulation value and the measured data demonstrate that restoring natural runoff by SWAT model is feasible.

Key words: runoff restoration; SWAT; SUFI-2; sensitivity analysis; uncertainty analysis; parameter distribution