

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2019.0079

陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. 基于 SWAT 模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 09-18. CHEN X, LIU Y L, DIAO Y F, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in Haihe River basin with SWAT model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 09-18. (in Chinese)

# 基于 SWAT 模型对气候变化与人类活动影响下 径流变化的量化分析

陈鑫<sup>1,2,3</sup>, 刘艳丽<sup>1,2</sup>, 刁艳芳<sup>3</sup>, 王国庆<sup>1,2</sup>, 金君良<sup>1,2</sup>,  
鲍振鑫<sup>1,2</sup>, 刘翠善<sup>1,2</sup>, 贺瑞敏<sup>1,2</sup>, 周美娜<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;  
2. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 3. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

**摘要:**近年来在气候变化和人类活动共同影响下,海河流域径流出现了较为严重的减少趋势。为厘清气候变化和人类活动对不同流域径流变化的影响,分别以海河流域中受人类活动影响较为显著的漳河上游流域和受人类活动不显著的滦河上游流域作为研究对象,基于近 60 年的实测径流资料,验证了 SWAT 模型在海河典型流域的适用性;构建了基于 SWAT 模型的径流变化归因分析模型,分析了两种不同类型流域径流变化特点和两种影响因素的各自贡献率,进而系统分析并对比了不同驱动因素下两流域径流变化的差异特征。结果表明:近 60 年来两流域的径流均呈现下降的趋势,漳河上游以人类活动为主导因素,其贡献率为 65%;滦河上游则以气候变化为主导因素,其贡献率为 89%。相较于滦河上游流域,受人类活动影响显著的漳河上游流域流量值分布更为离散、下降更为明显,且对平水年和枯水年的影响更为显著。

**关键词:**海河流域; SWAT 模型; 气候变化; 人类活动; 比较分析

中图分类号: P333 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Impacts of climate change and human activities on runoff in Haihe River basin with SWAT model

CHEN Xin<sup>1,2,3</sup>, LIU Yanli<sup>1,2</sup>, DIAO Yanfang<sup>3</sup>, WANG Guoqing<sup>1,2</sup>, JIN Junliang<sup>1,2</sup>,  
BAO Zhenxin<sup>1,2</sup>, LIU Cuishan<sup>1,2</sup>, HE Ruimin<sup>1,2</sup>, ZHOU Meina<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources And Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** In recent years, under the combined influence of climate change and human activities, the runoff in the Haihe River basin showed a serious decreasing trend. In order to clarify the impact of climate change and human activities on runoff changes in different types of watersheds, Two typical catchments was selected in this study; one was the upper reaches of the Zhanghe River, which was significantly affected by human activities in the Haihe River basin; the other was the upper reaches of the Luanhe River, which was not significantly affected by human activities. Based on the observed runoff data of nearly 60 years, the applicability of the SWAT model in the typical watersheds of Haihe River was verified. The runoff variation attribution was investigated.

收稿日期: 2018-11-28 修回日期: 2019-02-19 网络出版时间: 2019-03-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190304.1455.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51679145; 91747103)

作者简介: 陈鑫(1994—), 男, 山东泰安人, 主要从事变化环境下水文模拟的相关研究。E-mail: qwas1477@163.com

通信作者: 刘艳丽(1981—), 女, 河南泌阳人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail: ylliu@nhri.cn

ted, and the characteristics of runoff variation and the contribution rate of two influencing factors in two different types of watersheds were analyzed. The differences of runoff variation in the two basins under different driving factors were investigated and compared. The results showed that the runoff in both basins had declined in the past 60 years. The upper reach of the Zhanghe River was dominated by human activities with a contribution rate of 65%. The upper reach of the Luanhe River was dominated by climate change with a contribution rate of 89%. Compared with the upper reaches of the Luanhe River, the runoff in the upper reach of the Zhanghe, which was significantly affected by human activities, was more scattered and its trend was more significant, as well as a more departure in the normal and the dry year.

**Key words:** Haihe River basin; SWAT model; climate change; human activities; comparative analysis

水资源是国家的基础自然资源,也是重要的战略资源,水资源既可以维持生态平衡,又是衡量国家综合国力的重要因素<sup>[1]</sup>。河川径流是水文循环和水资源系统的重要组成部分,也是地表水资源量的重要表现形式。过去几十年中,世界各地很多流域的河川径流量都发生了变化<sup>[2-11]</sup>。中国北方河川径流量的减少以海河流域最为严重<sup>[12-14]</sup>。河川径流的下降主要受到气候变化和人类活动两个因素的影响,而区分和界定气候变化和人类活动的各自影响贡献不仅是科学认识和理解环境变化对径流过程影响的要求,对于未来的水资源规划和管理也具有十分重要的意义<sup>[15]</sup>。

对于海河流域的径流变化及成因分析,已有学者从不同的角度进行了研究:卢路等<sup>[16]</sup>分析了海河流域 15 个三级区径流年际变化的不均匀性,其结果表明海河流域由南向北径流年际变化的不均匀性与变化的幅度呈现先增后减、南部大于北部以及平原区域大于山区的特性;张利茹等<sup>[17]</sup>基于 TOPMODEL 模型,对流域内 5 个水文站所在区域进行了模拟分析,其结果表明海河典型区域年径流减小主要跟人类活动有关;李立新等<sup>[18]</sup>利用 1961—2010 年海河流域内及其周边 51 个站气象数据,系统分析了海河流域不同等级干旱的时空演变规律,并预测了未来流域的干旱趋势;Zou 等<sup>[19]</sup>对海河流域各项水文指标的时空变化规律进行了探究,其结果显示径流系数在汛期规模上呈现明显的负趋势,而年度尺度的下降趋势不显著;贺瑞敏等<sup>[20]</sup>利用 VIC 模型在海河流域建立了全流域的径流平台,其结果表明年平均气温与年降水量对海河流域的径流量均有影响,且径流对气温和降水量的敏感性与年降水量的大小相关;郝振纯等<sup>[21]</sup>利用不同土地利用情景,系统评价了海河流域对土地利用变化的响应,并阐述了合理规划土地利用格局对海河流域水文事件的重要意义。

上述这些研究,从归因分析方法上主要是弹性系数法和水文模拟法,但主要集中于气候变化和人

类活动的定量贡献率的计算,并没有阐述不同贡献比例下径流的变化特征,而识别其变化特征,不仅有助于推进对气候变化和人类活动对流域径流变化的作用机理的认识,同时还直接关系到流域的水资源可持续利用和未来规划。为此,本文以海河流域为研究区域,分别选择受人类活动影响较为显著的漳河上游流域和受人类活动影响不明显的滦河上游流域,主要探讨以下问题:(1)SWAT 模型在海河不同类型子流域的适用性。(2)基于 SWAT 模型构建径流变化归因分析的水文模拟方法,并定量评估气候变化和人类活动对两种不同类型流域的贡献率。(3)比较分析气候变化和人类活动不同贡献率下典型流域的径流变化特征。

## 1 研究区域概况

本文研究区域见图 1,分别选择漳河上游及滦河上游流域。两者同属海河流域,但两者的下垫面条件有着明显的区别。漳河上游分清漳河与浊漳河两条支流,于合漳村汇合后流入岳城水库,由于漳河上游自 20 世纪 60 年代以来开展了以“引漳入林”为代表的大范围引水工程的修建,使得漳河上游受人类影响的特点显著,其径流相对于天然径流也发生了变化。三道河子站主要控制着滦河上游流域,由于该流域主要流经森林、草原和湿地,且流域内包含闪电河国家湿地公园,同时流域内并没有密集的人类聚居地和大型的水利设施,所以该流域受人类活动的影响较小。同属海河流域的上述两个支流流域在下垫面方面具有显著差异,对分析气候变化和人类活动的径流效应具有典型性,因此,本文将上述两区域选为本文的研究区域,并对两流域的径流变化特征进行对比分析,来探究气候变化和人类活动对海河流域径流的影响。

## 2 基于 SWAT 模型的径流变化归因分析模型

### 2.1 SWAT 模型及结果判定

SWAT (soil and water assessment tool) 模型

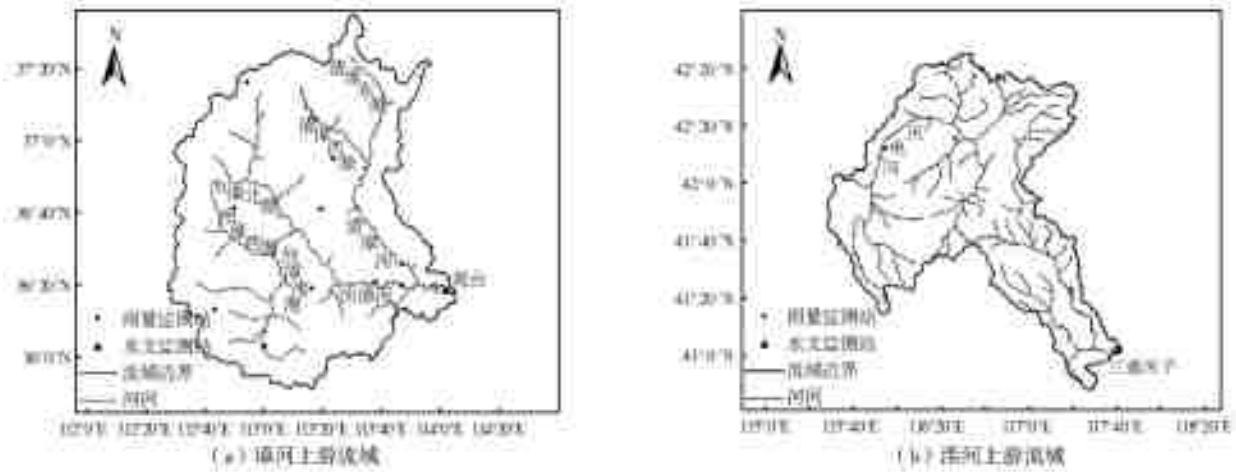


图 1 研究区域流域

Fig. 1 Map of two study watersheds

是由美国农业部(USDA)农业研究中心的 Jeff Arnold 博士于 1994 年开发的,自开发至今,已历了多个版本的完善和发展,且在美国、加拿大、澳大利亚、欧洲各国以及亚洲部分国家和地区有着广泛的应用。由于 SWAT 模型能够考虑多种影响因素如气候、土地利用、水利工程的影响,并能预测水文、水质、营养物、泥沙等要素,模块众多,且因其源代码是开源的,用户可以根据自己的实际需要对自己的模型进行改进,在国内外具有广泛的应用。基于 SWAT 模型在海河流域的应用基础<sup>[22-24]</sup>,本研究的两个典型流域也选择 SWAT 模型进行水文模拟。其中模型构建所用到的 DEM 数据来源于地理空间数据云(www.gscld.cn),土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn)的土地利用现状遥感监测数据集,土壤数据来源于 HWSD 土壤数据库,实测气象数据来源于中国气象数据网(data.cma.cn)。

为评判 SWAT 模型的模拟效果,本文将采用如下两个系数来对模型进行率定。

(1) 纳什效率系数

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t - Q_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t - \bar{Q}_t)^2} \quad (1)$$

式中: $Q_t$  为观测值; $Q_m$  为模拟值; $t$  表示观测时刻; $Q_t$  表示第  $t$  时刻的观测值; $Q_m$  表示第  $t$  时刻的模拟值; $\bar{Q}_t$  表示观测值的总平均; $NSE$  为纳什效率系数,其越接近于 1,表示模型的质量越好,可信度越高。

(2) 相关指数  $R^2$

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

式中: $SSR$  为回归平方和,其反映自变量的变化对因变量取值变化的影响; $SSE$  为残差平方和,其反映模型的拟合程度。取值范围在  $[0, 1]$ ,  $R^2$  越趋近于 1,说明回归方程拟合得越好; $R^2$  越趋近于 0,说明回归方程拟合得越差。

2.2 径流变化归因分析的水文模拟法

通过流域的径流观测资料对水文模型进行率定,评估水文模型的适用性,建立合适的模型参数集;假定率定好的模型参数可反映流域的天然径流状况,然后将人类活动影响时期的气候因子输入率定好的水文模型,进而模拟出相应时期的天然径流量,如此保证了利用水文模型还原计算的天然径流量与天然时期的实测径流量具有物理成因上的一致性。其中有两个比较关键的步骤:(1)流域水文模型的建立和率定,关键是要有较好的适用性。(2)流域天然时期和人类活动影响时期的识别。本研究中水文模型采用 SWAT 模型,采用 Mann-Kendall 方法对流域天然时期和人类活动影响时期进行划分。模型的具体示意图见图 2。

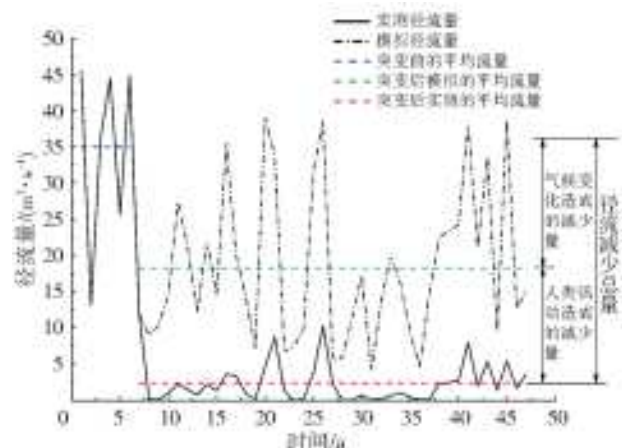


图 2 影响评价模型

Fig. 2 Impact evaluation model

以流域天然时期的径流量作为基准,则人类活动影响时期的实测径流量与天然时期基准值间的差值包括人类活动、气候变化影响两部分。人类活动和气候变化对流域径流影响的分割方法为:以径流发生突变的时间为界,分别求得突变点前后模拟径流与实测径流的年均径流量,以实测径流的变化量作为径流变化的总量,以模拟径流的变化量作为由气候变化引起的变化量,并以两者的差值作为人类活动引起的变化量。并以径流变化总量为基准,分别推求两者的贡献率<sup>[25]</sup>。

为了量化气候变化与人类活动对径流的影响,现根据模型模拟的结果,分别对突变点之前的径流量,突变点后模拟的径流量以及突变点之后实测的径流量均取其均值,并以此推求两者的贡献率。评价模式的具体公式为

$$\Delta Q = Q_h - Q_n \quad (3)$$

$$\Delta Q_c = Q_c - Q_n \quad (4)$$

$$\Delta Q_h = Q_h - Q_c \quad (5)$$

$$W_c = \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q} \quad (6)$$

$$W_h = \frac{\Delta Q_h}{\Delta Q} \quad (7)$$

式中: $Q_n$  为突变点之前的径流均值; $Q_c$  为突变点之后模拟径流的均值; $Q_h$  为实际径流; $\Delta Q_c$  为气候变化引起的均值变化度; $W_c$  为贡献率; $\Delta Q_h$  为人类活动引起的均值变化度; $W_h$  为贡献率。

### 3 径流突变检验及模型模拟

#### 3.1 两站点径流的突变检验

对两站的径流序列进行 M-K 突变检验分析,结果见图 3。可以看出,观台站径流产生突变的时间点在 1974 年左右,其 M-K 统计量  $U$  的绝对值已接近于 6,远远超过了 5% 置信水平的 1.96,虽然径流已经过还原但径流下降的趋势十分明显,这一结论

从图 5 年径流的变化上得到了验证。而造成径流减少的原因往往是多方面的,一方面,由于 20 世纪 60 年代以来,为解决流域内农业发展的需要,漳河上游先后修建了勇进渠、漳南渠、漳北渠、战备渠、红旗渠、跃进渠、大越峰渠、小越峰渠以及迎春灌区等多个引水及用水综合设施,且自建成以来已有多个渠道进行了拓建工程,除上述工程外,流域内还存在着大量未被统计的各种小型和民间自制的取水工程。大规模的生活用水,灌溉用水以及水库的蓄水发电用水已经成为了径流减少的主要因素。除了高强度的人类活动以外,气候变化,尤其是降水量的减少也是影响径流的关键因素之一。而三道河子站径流产生突变的时间点在 1962 年左右,其 M-K 统计量  $U$  的绝对值在 3 左右,虽然超过了 5% 置信水平的 1.96,但远没有观台站绝对值达到 5 的程度。这说明滦河上游近 60 年来径流量较漳河上游的变化程度较小,但仍呈现下降的趋势。对于天然流域,降水是影响径流变化的一个重要因素,从流域平均年降水量上看,1950—1960 年的降水量持续走高,但 1962 年的降水量存在一次骤降的变化,这可能是突变点产生的主要原因。

#### 3.2 SWAT 模型对历史径流的模拟

利用 SWAT 模型对两流域进行历史径流的模拟并输出,由于参数众多,本文利用 SWAT-CUP 对参数进行敏感性分析,并从中选择较为敏感的参数进行率定和验证。由于两站径流量突变点出现的时间不同,且由于模型在运行初期存在部分变量会影响模拟结果,因此本文分别为两个站点设置了 2 年的预热期,其中观台站选择 1953—1966 年作为率定期,1967—1973 年作为验证期;三道河子站选择 1954—1958 年作为率定期,1959—1961 年作为验证期,并选择  $R^2$ 、纳什效率系数以及径流均值来作为模拟评价指标(表 1、2)。两站的率定及验证结果见图 4,表 3、4 为两站参数率定的结果。

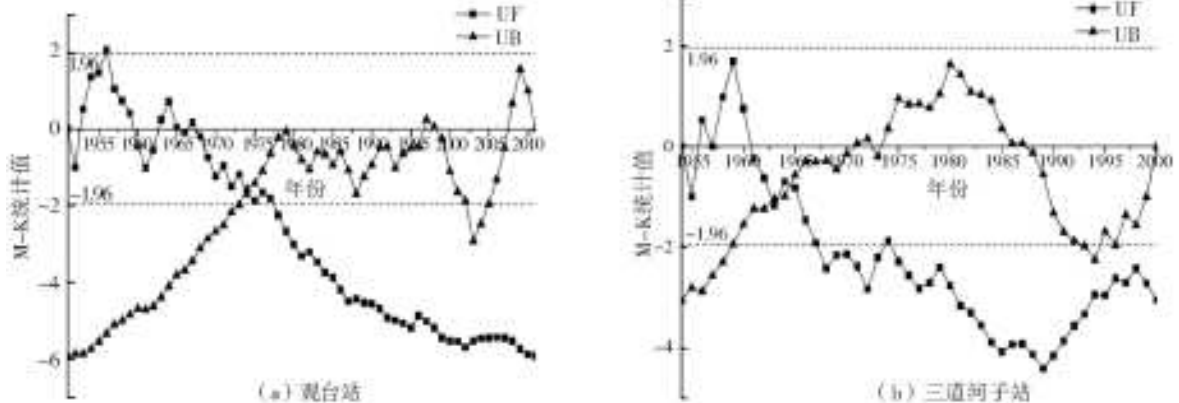


图 3 M-K 突变分析检验结果  
Fig. 3 Result of changing point test

表 1 观台站及三道河子站月径流模拟评价指标

Tab. 1 Model performance at Guantai and Sandaohezi watersheds

水文站名称	率定期		验证期	
	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE
观台站	0.75	0.75	0.87	0.78
三道河子站	0.81	0.80	0.89	0.86

表 2 观台站及三道河子站月径流均值对照

Tab. 2 Monthly runoff simulation results at Guantai and Sandaohezi watersheds

水文站名称	率定期		验证期	
	模拟	实测	模拟	实测
观台站	59.9	64.3	41.2	42.2
三道河子站	28.2	30.3	31.8	37.6

表 3 观台站率定参数范围与校准值

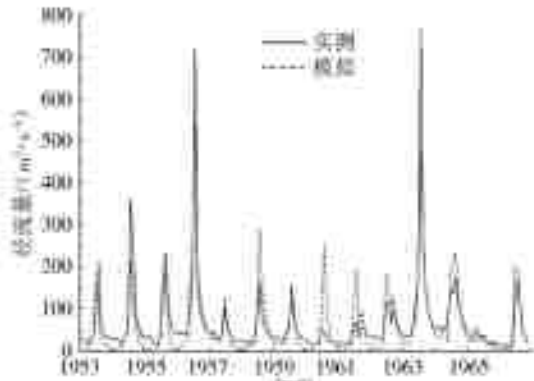
Tab. 3 The calibrated model parameters for Guantai watershed

参数	取值范围	校准值
SCS 径流曲线数	-0.2~0.2	-0.083 471
基流系数	0~1	0.600 611
地下水延迟时间	0~500	85.117 996
浅层地下水回流水位	0~5 000	608.789 063
土壤蒸发补偿系数	0~1	0.634 816
河岸有效水力传导系数	0~1	0.551 296
土壤持水系数	0~1	0.671 120
土壤饱和导水率	0~2 000	173.190 994
土壤密度	0.9~2.5	1.308 404
平均坡长	10~150	101.438 812

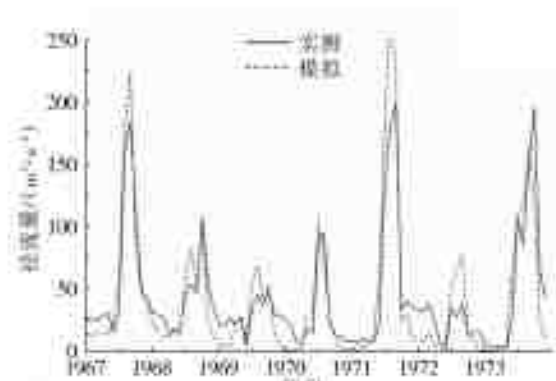
表 4 三道河子站率定参数范围与校准值

Tab. 4 The calibrated model parameters for Sandaohezi watershed

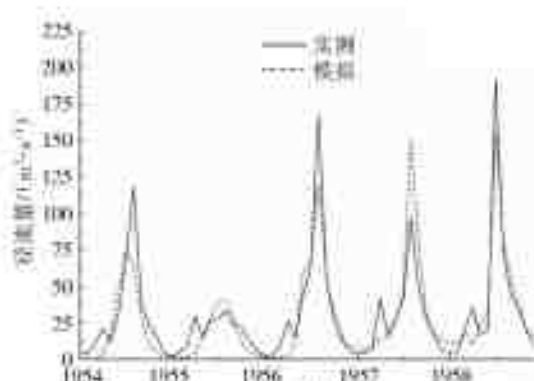
参数	取值范围	校准值
SCS 径流曲线数	35~98	60.828 491
地下水蒸发系数	0.02~0.2	0.065 007
河岸有效水力传导系数	0~1	0.940 167
土壤饱和导水率	0~2 000	46.537 235
土壤密度	0.9~2.5	1.961 246
平均坡长	10~150	118.728 828
土壤深度	-0.5~0.5	0.452 377
深蓄水层含水系数	0~1	0.378 616
平均坡度	-0.5~0.5	-0.146 106
最大冠层含水量	0~100	34.294 880



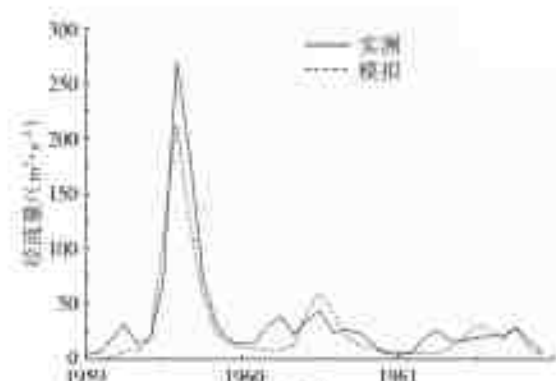
(a) 观台站率定结果



(b) 观台站验证结果



(c) 三道河子站率定结果



(d) 三道河子站验证结果

图 4 两站 SWAT 模型模拟结果

Fig. 4 SWAT model simulation results

图 4 以及表 1、2 反映了 SWAT 模型在两个流域的模拟效果,在率定期,观台站 1958、1960 及

1961 年的汛期模拟值大于实测值,1963 年汛期模拟值小于实测值,其余各个年份与观测值基本吻合。

率定期模拟均值略小于实测均值,相对误差为 6.8%;三道河子站 1954 年汛期模拟值小于实测值,1957 年汛期模拟值大于实测值,其余各个年份与观测值基本吻合。率定期模拟均值略小于实测均值,相对误差为 6.9%。在验证期,观台站在 1971 年与 1972 年汛期模拟值大于实测值,且在 1969 年 8 月至 12 月与 1971 年 9 月至 12 月的模拟值小于实测值,验证期模拟径流均值与实测径流均值相差不大,相对误差为 2.4%;三道河子站 1959 年汛期模拟值略低于实测值,1960 年汛期模拟值略高于实测值,验证期整体模拟径流低于实测径流,相对误差为 15%,高于模型其他的模拟结果。从表 3 及表 4 可以看出,两站选择的参数中,SCS 径流曲线数,河岸有效水力传导系数,土壤饱和导水率,土壤密度和平均坡长均对两流域的模拟产生影响,其中观台站的模拟主要受地下水过程以及土壤水份参数的影响,三道河子站的模拟除受地下水与土壤水过程参数的影响外,还受到地貌特征以及植被蒸散发参数的影响。该现象可能由于两流域的下垫面存在着一定的差异,使得两流域参数率定期的选择出现了差别。

综合各项指标来看,虽然两个典型流域的下垫面条件差异较大,但 SWAT 模型在两流域率定期以及验证期的纳什效率系数均大于 0.75,且模拟径流的均值与实测差距不大,说明 SWAT 模型能够较好地模拟两流域的径流过程。

#### 4 研究区域气候变化和人类活动的影响解析

##### 4.1 漳河上游观台站径流变化的归因

从图 3、5 可以看出,实测径流突变点在 1974 年,对 1974 年之前以及 1974 年之后的年平均径流量进行分析,可发现观台站的径流量在突变点之后有着明显的下降,由表 5 可知,模拟径流与实际径流的下降程度分别为 32%与 77%, $W_c$  与  $W_h$  分别为 41%与 59%。同时结合图 4 以及图 5 年径流的变化特点可以看出,在天然时期,模型模拟的结果与实测径流结果基本保持一致,模拟与实测径流的差距可视为数据观测误差或模型参数选择造成的结果。但在人类活动时期,模拟径流处于一种相对稳定的状态,而实测径流的波动程度有了显著的提升,且其在每一个波段的峰值与谷值之间也较模拟值有了更为明显的差距。尤其在 1978—1980,1997—2002 及 2007—2010 年,实测径流量已下降到接近 0 的状态,而模拟径流则普遍在 25  $m^3/s$  左右。

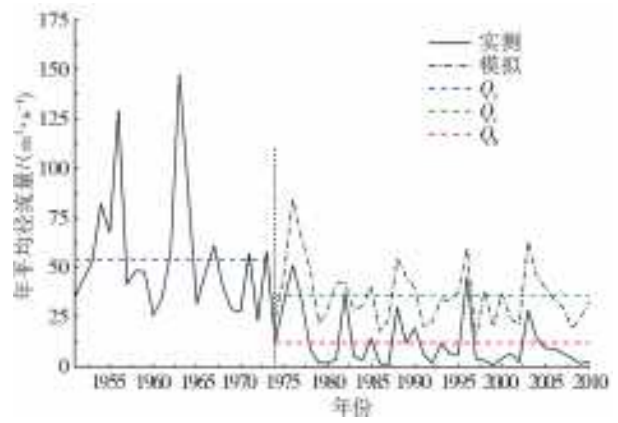


图 5 观台站年径流变化

Fig. 5 Annual runoff at Guantai station

表 5 观台站突变点前后参数变化

Tab. 5 Parameter changes before and after the changing point at Guantai station

参数	1951—1973 年	1974—2010 年 (模拟)	1974—2010 年 (实测)
年均径流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	53.25	36.28	12.19
年均径流 变化率/%		32.00	77.00
$C_v$ 值	0.59	0.42	1.23

考虑到在人类活动维持在一定程度时,人类活动对丰水年径流量的影响较小,而对平水年以及枯水年的影响较大,且突变后实测平均径流量远小于模拟平均径流量。将突变后实测径流量超过模拟平均径流量且与模拟值相接近的年份(1976,1982 与 1996 年)作为丰水年予以剔除,同时将突变前超过平均径流量两倍的年份(1956 及 1963 年)作为丰水年予以剔除,再对模拟与实际两个序列进行比较分析,则可以得到表 6。从表 6 可以看出,突变后模拟径流的年均径流量变化程度最小,而突变点后的实际径流量变化程度最大,去丰水年后模拟径流与实际径流的下降程度分别为 27.75%与 80.58%, $W_c$  与  $W_h$  分别为 35%与 65%,可以看出,人类活动对于平水年与枯水年的影响更为显著,以平水年与枯水年的贡献率作为人类活动的贡献率也可以更好地反映人类活动的影响。

表 6 剔除丰水年观台站突变点前后参数变化

Tab. 6 Parameter changes before and after the changing point at Guantai station (excluding high flow years)

参数	1951—1973 年	1974—2010 年 (模拟)	1974—2010 年 (实测)
年均径流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	47.48	34.302	9.22
年均径流量 变化率/%		27.750	80.58

综合以上数据可以看出,气候变化与人类活动在漳河上游流域均对径流有着一定的影响,但从贡献率上来看,人类活动是该流域径流变化的主要影响因素,且相较于丰水年,人类活动对于平水年以及枯水年的影响更加显著。

#### 4.2 三道河子站径流量变化归因

三道河子站主要控制滦河上游流域,流域内下垫面分两大类,上游主要为草原,河流,湖泊为典型特征的坝上高原湿地<sup>[26]</sup>,下游主要为森林覆盖,由于流域内包含闪电河湿地公园,且整个流域内无大型城镇以及大型的取水设施,所以下垫面无明显变化,人类活动对该研究区域的影响也较小。

从图 6 以及表 7 可以看出,突变点之后径流量相较突变点之前的径流量有一定的下降,且模拟径流量与实际径流量相差不大,径流下降程度分别为 41.8%与 46.8%, $W_c$  与  $W_n$  分别为 89%与 11%,但从径流的波动程度来看,突变点之后的实际径流量相较于模拟径流量更加平稳,极大与极小值之间的差距也相较于模拟值较小,这一现象一方面说明了人类活动对径流序列的稳定性有着一定的影响,另一方面,结合图 7 可以发现 SWAT 模型对于降水输入的大范围变化较为敏感<sup>[27]</sup>。由于滦河上游流域受人类活动的影响较小,所以对其径流变化的归因主要集中在气候变化这一因素上。从图 7 年降水量

表 7 三道河子站突变点前后参数变化  
Tab. 7 Parameter changes before and after the changing point at Sandaohezi station

参数	1954—1961 年	1962—2000 年 (模拟)	1962—2000 年 (实测)
年均流量	32.09	18.69	17.06
标准差	14.63	10.75	6.44
$C_v$ 值	0.46	0.58	0.38

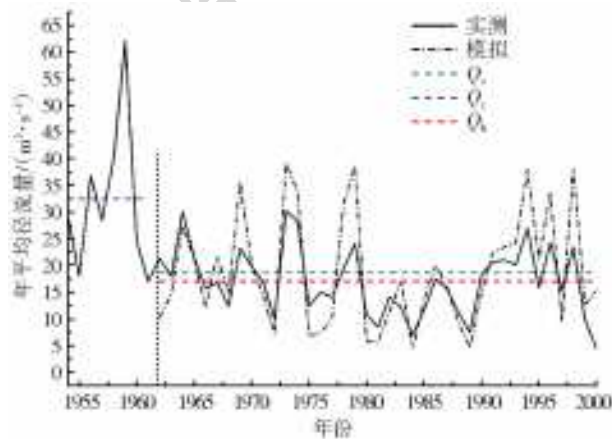


图 6 三道河子站径流变化趋势  
Fig. 6 Annual runoff at Sandaohezi station

的变化趋势来看,滦河上游的降水量整体呈现出下降的态势,且丰水年与枯水年的水量除个别年份来看,均有着不同程度的下降。从图 8 年平均气温的变化程度来看,滦河上游的年均气温近 60 年来一直呈现上升的态势,且最低点(1.43 °C)至最高点(5.43 °C)的变化程度为 4 °C,变化率为 279.72%,这与全球气候变暖的现象一致。综合气温与降水的变化来看,流域内由于平均气温的快速升高,使得流域内的蒸发量上升,加之降水量的不断减少,导致流域的产流量减少,径流量下降。

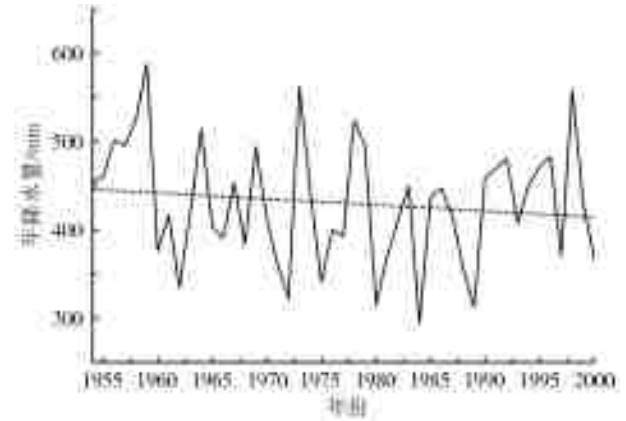


图 7 滦河上游年降水量变化趋势  
Fig. 7 Annual precipitation and its trend of Luanhe river basin

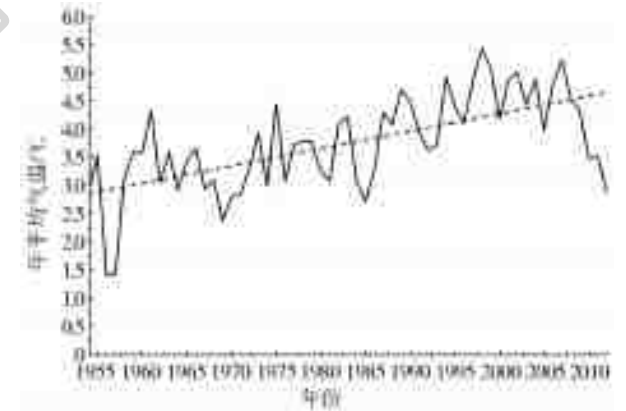


图 8 滦河上游年平均气温变化趋势  
Fig. 8 Annual average temperature and its trend of Luanhe river

在三道河子站 1954—2000 年的年均径流数据中,仅 1959 年由于多年的连续强降雨而导致径流量远超其他年份,而从图 3 与图 7 结合来看,降雨量的突变也是径流量产生突变点原因。现将 1959 年作为异常年份,将其径流数据作为异常点剔除,则突变点之前的年平均流量变为 27.79 m<sup>3</sup>/s,相应的径流下降程度分别变为 32.74%与 38.61%。可见,正常气候状态的年份,其径流量下降程度较考虑异常年份要低,下降趋势也更加缓和,这也说明异常气候条件(如连续强降雨)对天然流域的径流影响较为显著。

### 4.3 两流域径流序列变化的比较分析

对两径流的归因结果进行比较分析,结果见表 8。可以看到,两站的径流序列呈现出不同的特点。从两站年均径流量的下降程度以及径流曲线状态来看,相对于受气候变化影响较大的滦河上游流域,受人类活动影响较大的漳河流域其序列在人类影响时期的波动更大,水量减少的现象也更加明显,且这一现象在平水年及枯水年更为显著,这说明平水年及枯水年份对人类活动的影响更加敏感。其原因在于漳河上游存在较多的引水渠道,使得原本在降雨后汇集至河流的水有一部分为保障农业及生活用水被截留,且在渠道的尺寸不变的前提下,截留量不会有较为明显的变化,所以相对于水量较多的丰水年,平水年及枯水年模拟的结果与实测径流的差距更加的明显。相较于漳河上游流域,滦河上游流域实测径流的变化较为缓和,且序列的波动程度相对较低,水量虽在突变点之后有所减少,但平水年与枯水年的减少程度较全系列小,强降水的影响较为显著。从降水以及气温的序列变化来看,不断上升的平均气温以及持续走低的年降水量使得流域内的蒸发量上升,产流量减少,进而使得径流量呈现出一定程度的下降。

表 8 两流域站点实测径流的参数比较

Tab. 8 Comparison of parameters of observed runoff in two basins

参数	$W_c/\%$	$W_h/\%$	突变后 $C_v$ 值	年均径流量下降程度/ $\%$
观台站	41	59	1.23	77
观台站(平枯)	35	65	1.37	81
三道河子站	89	11	0.38	46

综合以上的分析可以看出,气候变化和人类活动对径流的影响呈现出不同的特点。对于受气候变化影响较大的滦河上游流域,其年均径流量在突变点后减少的程度较少,趋势变化相对平缓,径流序列的离散程度较低,且在去除异常年份之后,序列的变化程度更低,说明天然流域的径流易受异常气候条件的影响。对于受两种因素影响且人类活动影响较大的漳河上游流域,其年均径流量在突变点之后减小的程度较大,趋势变化相对剧烈,径流的离散程度较高,且序列在剔除丰水年后,其受人类活动影响的特点更为显著。

## 5 结论

(1)验证了 SWAT 模型的适用性。SWAT 模型在进行参数率定之后,两站的 NS 效率系数和相关指数  $R^2$  均大于等于 0.75,从总体上看,SWAT

模型可以较好地模拟两流域的天然径流状况。

(2)基于 SWAT 模型建立了径流变化归因分析的水文模拟法,分析了两类不同流域气候变化和人类活动影响的贡献率,结果表明:滦河流域上游的径流变化以气候变化为主要驱动因素,其贡献率达到了 89%,且易受到如连续降水等异常气候因素的影响;漳河上游的径流变化以人类活动为主要驱动因素,其贡献率达到 65%。通过对比分析可知,漳河流域的径流变化更为显著,其径流的下降量和下降程度也远比滦河上游流域严重。

(3)针对受人类活动影响较为不明显和较为显著两种典型流域,结果表明在气候变化单一因素的影响下,两典型流域的径流量的稳定性并没有太大的变化,但在人类活动的影响下,漳河上游流域的径流呈现出趋势变化相对剧烈,径流的离散程度较高的特性,且在平水年和枯水年,实际径流量较模拟的天然径流量有着显著的减少。表明人类活动对径流过程的影响更为剧烈,呈现明显非平稳性特征,在流域水资源可持续利用管理和规划中应引起足够的重视。

作为环境变化的两类主要组成部分,气候变化和人类活动并不是孤立存在的,在研究径流变化过程中应更加重视其耦合作用,人类活动可能加快或促进气候变化的影响进程,从而使流域径流变化呈现出非线性和非平稳性的变化。除了分析其各自贡献率以外,在未来研究中还应加强其相互作用机理的研究,以更有效地支撑流域管理决策。

### 参考文献(References):

- [1] 夏军,邱冰,潘兴瑶,等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451. (XIA J, QIU B, PAN X Y, et al. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 443-451. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2012. 04. 0443
- [2] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社, 2007. (ZHANG J Y, WANG G Q. Studies for climate change impacting on hydrology and water resources [M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese))
- [3] 刘伟,翟媛,杨丽英. 七大流域水文特性分析[J]. 水文, 2018, 38(5): 79-84. (LIU W, ZHAI Y, YANG L Y. Analysis of hydrologic characteristics in the seven major basins[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5): 79-84. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-



0852. 2018. 05. 016.
- [4] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005 年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168. (LIU E J, ZHANG X P, ZHANG J J, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1159-1168. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2013. 07. 008.
- [5] WU J, MIAO C, WANG Y, et al. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods[J]. Journal of Hydrology, 2016, 545. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 12. 050.
- [6] LOTZ T, OPP C, HE X. Factors of runoff generation in the Dongting Lake basin based on a SWAT model and implications of recent land cover change[J]. Quaternary International, 2017. DOI: 10. 1016/j. quaint. 2017. 03. 057.
- [7] HASAN E, TARHULE A, KIRSTETTER P E, et al. Runoff sensitivity to climate change in the Nile River basin[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2018. 04. 004
- [8] 冯夏清. 近 50 年大凌河流域径流变化特征分析[J]. 水文, 2017, 37(3): 84-90. (FENG X Q. Characteristics of runoff variation in Dalinghe River basin in recent 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(3): 84-90. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2017. 03. 015.
- [9] VUORENMAA J, AUGUSTAITIS A, BEUDERT B, et al. Long-term changes (1990-2015) in the atmospheric deposition and runoff water chemistry of sulphate, inorganic nitrogen and acidity for forested catchments in Europe in relation to changes in emissions and hydrometeorological conditions[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 1129-1145. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 12. 245.
- [10] 贾杰, 姜丽红. 气候变化与人类活动对渭河源区近 30 年径流量影响研究[J]. 地下水, 2017, 39(4): 130-133. (JIA J, JIANG L H. Climate change and human activities have studied the effects of nearly 30 years of runoff on Wei River source region[J]. Ground Water, 2017, 39(4): 130-133. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2017. 04. 049.
- [11] COLES A E, MCCONKEY B G, MCDONNELL J J. Climate change impacts on hillslope runoff on the northern Great Plains, 1962-2013[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2017. 05. 023.
- [12] 杨永辉, 任丹丹, 杨艳敏, 等. 海河流域水资源演变与驱动机制[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1443-1453. (YANG Y H, REN D D, YANG Y M, et al. Advances in clarification of the driving forces of watershed in Haihe River catchment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1443-1453. (in Chinese)) DOI: 10. 13930/j. cnki. cjea. 180658.
- [13] 万思成, 张建云, 王国庆, 等. 漳河上游径流变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 7-11, 18. (WAN SC, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Characteristics of runoff variation in upper Zhanghe River watershed[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(6): 7-11, 18. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2015. 06. 02.
- [14] 金君良, 王国庆, 刘翠善, 等. 气候变化下海河流域未来水资源演变趋势[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 1-6. (JIN J L, WANG G Q, LIU C S, et al. Future evolution trends of water resources in Haihe River basin under the climate change[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2016, 37(5): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2016. 05. 001.
- [15] 刘艳丽, 张建云, 王国庆, 等. 环境变化对流域水文水资源的影响评估及不确定性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(2): 102-110. (LIU Y L, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Review for impacts assessment of environmental change on hydrology and water resources and uncertainty in catchment scale[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2015, 11(2): 102-110. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1719. 2015. 02. 004.
- [16] 卢路, 刘家宏, 秦大庸, 等. 海河流域天然径流年际变化规律分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 11-13, 99. (LU L, LIU J H, QIN D Y, et al. Analysis of variation characteristics of annual runoff series in Haihe River basin[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 11-13, 99. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2011. 06. 004.
- [17] 张利茹, 贺永会, 唐跃平, 等. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 59-66. (ZHANG L R, HE Y H, TANG Y P, et al. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 59-66. (in Chinese)) DOI: 10. 16198/j. cnki. 1009-640x. 2017. 04. 009.
- [18] 李立新, 严登华, 秦天玲, 等. 海河流域 1961—2010 年干旱化特征及其变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 61-67. (LI L X, YAN D H, QIN T

- L, et al. Drought variation in Haihe River basin from 1961 to 2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26 (11): 61-67. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2012.11.031.
- [19] ZOU J, ZHAN C, XIE Z, et al. Climatic impacts of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project over the Haihe River basin in north China simulated by a regional climate model[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2017, 121 (15): 365-382. DOI:10.1002/2016JD024997.
- [20] 贺瑞敏, 张建云, 鲍振鑫, 等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 1-9. (HE R M, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin [J]. Advance in Water Science, 2015, 26(1): 1-9. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.001.
- [21] 郝振纯, 苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 491-499. (HAO Z C, SU Z K. Effects of land use change on runoff in the typical areas in Haihe River basin[J]. Advance in Water Science, 2015, 26(4): 491-499. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.005.
- [22] 张爱玲, 王韶伟, 汪萍, 等. 基于 SWAT 模型的资水流域径流模拟[J]. 水文, 2017, 37(5): 38-42, 26. (ZHANG A L, WANG S W, WANG P, et al. Runoff simulation of Zishui basin based on SWAT model[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5): 38-42, 26. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2017.05.007.
- [23] 孟现勇, 吉晓楠, 刘志辉, 等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 528-539. (MENG X Y, JI X N, LIU Z H, et al. Research on improvement and application of snowmelt module in SWAT[J]. Journal of Natural Resource, 2014, 29(3): 528-539. (in Chinese)) DOI:10.11849/zrzyxb.2014.03.016.
- [24] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 基于 SWAT 模型的渭河流域干旱时空分布[J]. 地理科学进展, 2015, 34(9): 1156-1166. (ZHAO A Z, LIU X F, ZHU X F, et al. Spatiotemporal patterns of droughts based on SWAT model for the Weihe River basin[J]. Progress in Geography, 2015, 34(9): 1156-1166. (in Chinese)) DOI:10.18306/dlkxjz.2015.09.008.
- [25] 王国庆, 贺瑞敏, 李亚曼, 等. 基于流域水文模拟的径流变化原因研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 11-13. (WANG G Q, HE R M, LI Y M, et al. Study on causes of runoff variation based on hydrological simulation: Taking Sanchuanhe River basin as a case study [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 11-13. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-7709.2008.03.004.
- [26] 姚苏红, 朱仲元, 张圣微, 等. 基于 SWAT 模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 175-180. (YAO S H, ZHU Z Y, ZHANG S W, et al. Using SWAT model to simulate the discharge of the river Shandianhe in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 175-180. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2013.01.035.
- [27] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 8-15. (HUANG Q H, ZHANG W C. Application and parameter sensitivity analysis of SWAT model[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(1): 8-15. (in Chinese)) DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2010.01.003.