

DOI: 10.5846/stxb202007141834

郭伟, 陈兴伟, 林炳青. SWAT 模型参数对土地利用变化的响应及其对不同时间尺度径流模拟的影响. 生态学报, 2021, 41(16): 6373-6383.

Guo W, Chen X W, Lin B Q. Response of SWAT model parameters to land use change and its effects on the simulation of runoff with different time scales. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6373-6383.

# SWAT 模型参数对土地利用变化的响应及其对不同时间尺度径流模拟的影响

郭 伟<sup>1</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3,\*</sup>, 林炳青<sup>1</sup>

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007

3 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

**摘要:** SWAT 模型广泛应用于土地利用变化的水文效应评估研究, 但土地利用变化是否对模型参数产生影响, 进而影响径流模拟效果还有待于进一步分析。以东南沿海福建省山美水库流域为研究区, 基于 SWAT 模型, 分别模拟 1995 年、2005 年、2015 年土地利用条件下的年、月、日尺度径流过程, 采用 SWAT-CUP 进行参数敏感性分析与自动率定, 分别获取 1995 年、2005 年、2015 年 3 种土地利用条件下径流过程模拟的最优参数集, 比较参数差异; 将 3 组参数集分别应用到不同土地利用条件, 分析参数变化对不同时间尺度径流模拟的影响。结果表明: (1) 1995—2015 年间, 研究区土地利用格局发生了较大变化, 主要表现为林地转向园地和建设用地; 3 期土地利用条件下率定的 SWAT 模型都能较好地模拟山美水库流域年、月、日尺度径流, 其效率系数  $NS$  和决定系数  $R^2$  分别大于 0.62 和 0.78。(2) 不同土地利用条件下敏感参数基本一致, 敏感参数分别为  $CN2$ 、 $SOL\_AWC$ 、 $SOL\_K$ 、 $CANMX$ 、 $ESCO$ 、 $GW\_DELAY$ 、 $OV\_N$ , 但敏感参数取值随着土地利用变化而变化, 其变化规律符合敏感参数的物理意义, 变化率基本与土地利用变化强度正相关。(3) 由土地利用变化引起的参数变化, 对年、月径流模拟的影响较小, 对日径流影响显著, 且随着土地利用变化强度的增加而增加。

**关键词:** 土地利用变化; 径流; 时间尺度; 敏感参数; SWAT 模型

## Response of SWAT model parameters to land use change and its effects on the simulation of runoff with different time scales

GUO Wei<sup>1</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2,3,\*</sup>, LIN Bingqing<sup>1</sup>

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Fujian Province Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China

3 State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

**Abstract:** The distributed hydrological model provides an effective means for runoff simulation and hydrological response to land use change. SWAT model is widely used to evaluate the hydrological response of land use change. However, the response of model's parameters to land use change and its effects on the simulation of runoff have not been well investigated. In this study, Shanmei Reservoir watershed located in the southeastern China was taken as a research area and SWAT models for the simulation of the annual, monthly, daily runoff were constructed under the land use conditions of 1995, 2005 and 2015, respectively. The optimal values set for the sensitive parameters under three land use conditions were determined with the method of SWAT-CUP, respectively. The three optimal values sets of parameters then were applied to analyze the effects

基金项目: 国家自然科学基金(41877167); 福建省科技计划引导性(重点)项目(2019Y0009)

收稿日期: 2020-07-14; 网络出版日期: 2021-05-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxwchen215@fjnu.edu.cn

of land use change on the simulation of different time scales runoff. The results showed that: (1) the land use pattern in the study area changed greatly from 1995 to 2015. The garden and urban land were increased while the forest was reduced significantly. The SWAT models well simulated the different time scales runoff process for the three land use conditions of 1995, 2005 and 2015 with the Nash-Sutcliffe (*NS*) was above 0.62 and the coefficient of determination ( $R^2$ ) above 0.78. (2) The sensitive parameters were same for the three land use conditions which included CN2, SOL\_AWC, SOL\_K, CANMX, ESCO, GW\_DELAY and OV\_N. The values of the sensitive parameters were varied with the change of land use and the variation was coincident with the physical meaning of sensitive parameters. The values of CN2, SOL\_K, CANMX, ESCO and OV\_N in the study area were gradually increased from 1995 to 2015, while the values of SOL\_AWC and GW\_DELAY gradually decreased. The reason for the changing trend of sensitive parameters was that the land use in the study area was changed partly from forest to garden, pasture, orchard and urban land from 1995 to 2015, resulting in the decrease of the forest area. (3) The change of the value of sensitive parameters, caused by land use change, had little influence on the simulation of the annual and monthly runoff but significantly on the daily runoff. The influences on the daily runoff increased with the increase of the amplitude of land use change.

**Key Words:** land use change; runoff; time scales; sensitive parameters; SWAT model

土地利用变化对生态环境的影响,是全球变化研究的重要内容;其中,土地利用变化的水文效应是研究热点之一<sup>[1]</sup>。土地利用变化,是指人类改变土地利用和管理方式,导致土地覆被的变化,土地利用变化是水文过程变化的重要影响因素<sup>[2-4]</sup>。水文模型是评估土地利用变化水文效应的有效工具,分布式水文模型的应用已成为进行土地利用变化水文效应研究的发展趋势。

SWAT (Soil and Water assessment tool)是美国农业部(United States Department of Agriculture)的农业研究中心(Agricultural Research Service)开发的流域分布式水文模型,已广泛应用于土地利用变化径流响应模拟研究<sup>[5]</sup>。Miller等应用SWAT模型在圣佩德罗河上游对70、80、90年代3个不同时期的遥感影像解译出土地覆被状况进行产流模拟,研究土地覆被变化的水文效应,结果表明该区城市、农业用地、林地增加、草地减少,使每年水量增加,水质下降<sup>[6]</sup>。木依布拉等利用SWAT模型研究得出,土地利用/覆被类型中草地和林地面积的增加有利于提高研究区水源涵养、土壤保持和维护生物多样性功能<sup>[7]</sup>。邓慧平等对梭磨河流域的日径流进行了模拟,结果表明,随着流域林地面积和冠层最大截留量的增加,地表径流、地表以下径流、总径流均不同程度的减少<sup>[8]</sup>。这些研究通常先用一期土地利用率定模型参数,并认为该参数可以反映流域下垫面的产汇流特征,因此直接将率定后的参数代入其他土地利用情景下,以此模拟分析土地利用变化对径流的影响<sup>[5-12]</sup>。也即当前土地利用变化径流响应的模拟研究,主要采用参数不变的方式。

基于SWAT模型参数的物理意义,土地利用变化对部分参数的取值应该是有影响的,近年来也有了相关研究。Wang<sup>[13]</sup>通过设定7个不同的土地利用输入条件分别进行SWAT模型率定,结果发现土地利用输入条件对模型径流模拟的模拟效果没有明显的影响。因此认为在径流模拟时,可以选择模拟期间任何一年的土地利用作为输入,但未指出不同土地利用条件下模型参数是否发生变化。Li等<sup>[14]</sup>利用1980s、1990s、2000s的气象数据及相应时期的土地利用数据,对月径流模拟的SWAT模型分段率定。结果表明,模型参数随着土地利用变化而变化;当土地利用变化较大时,不变参数会造成模型模拟效果的下降。

综上所述,第一,SWAT模型参数应该随着土地利用变化而变化,但参数变化与土地利用变化的关系需要进一步讨论;第二,结合已有研究发现<sup>[15-17]</sup>的相对于较长时间尺度的年、月径流,土地利用变化的日径流响应更为复杂,因此有必要揭示参数变化对不同时间尺度径流模拟效果影响的差异;第三, Li等<sup>[14]</sup>的研究区为近20年来实施退耕还林还草的黄河支流渭河流域,对于土地利用变化模式与此相反的快速城市化区域,模型参数随着土地利用变化的规律尚待研究。

因此,本研究选取位于快速城市化区域的东南沿海山美水库流域为研究区,开展土地利用变化对SWAT

模型参数,以及模型参数变化对不同时间尺度径流模拟效果的影响研究,以期进一步改进 SWAT 模型用于土地利用变化水文效应研究方法,为合理评估土地利用变化的水文效应提供科学支撑。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况与数据

##### 1.1.1 研究区概况

山美水库位于福建省泉州市的晋江流域东溪中游,流域面积为 1023 km<sup>2</sup>,总库容 6.55 亿 m<sup>3</sup>,是一座集灌溉、供水、防洪、发电等多功能于一体的综合性大型水利枢纽工程。山美水库多年平均来水量 14 亿 m<sup>3</sup>,水库来水主要包括上游的桃溪、湖洋溪两大支流以及龙门滩跨流域调水,流域多山地和丘陵,海拔约在 40—1360 m。流域气候属亚热带海洋性季风气候,年降雨量约为 1600 mm,其中台风雨季(7—9 月)降水量大,在此期间的降水量占全年 37%—39%;10—12 月为干季,降水量仅为全年的 20%。流域地土地利用类型以林地为主,其次是园地、耕地和建设用地。土壤类型有硅铝质红壤、铝硅质红壤、渗育水稻土、潴育水稻土、黄红壤和黄壤等,其中以硅铝质红壤分布面积最为广泛,研究区位置及站点分布见图 1。

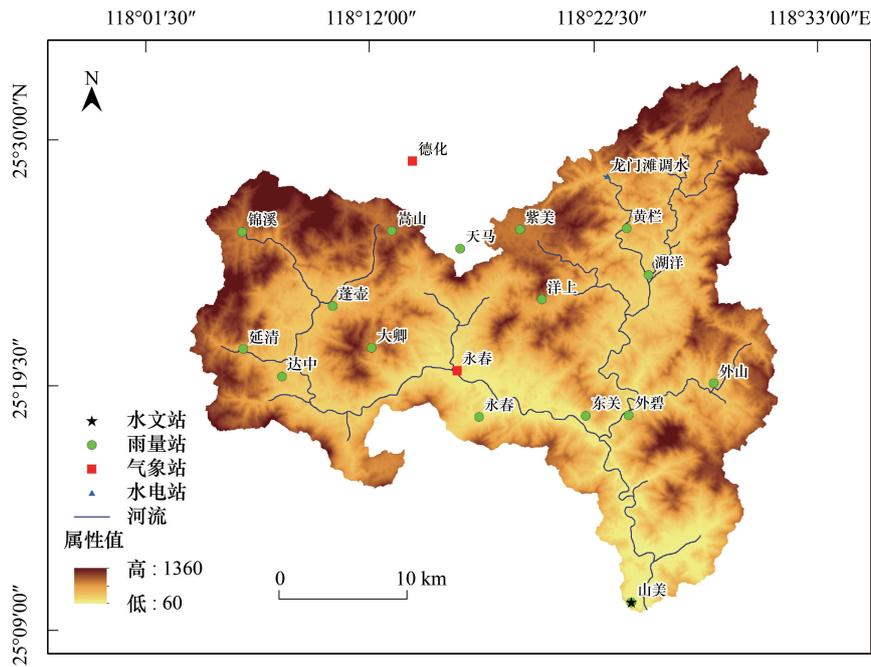


图 1 研究区位置及站点分布  
Fig.1 Location of study area and distribution of gauges

##### 1.1.2 数据来源

模型输入数据包括空间数据和气象水文数据。空间数据包括土壤、DEM 和土地利用,其中土壤资料来源于福建省 1 : 50 万数字化土壤类型分布图,DEM 采用 30 m×30 m 分辨率(来自中国科学院国际科学数据服务平台 <http://datamiffor.csdb.cn/admin/datademMain/jsp>)。本文土地利用数据包括 1995 年、2005 年、2015 年 3 期土地利用,其中 1995 年土地利用数据是本团队基于 Landsat TM 影像的目视解译<sup>[18]</sup>,确定了水田、旱地、林地、园地、草地、水域、建设用地和未利用地等 8 种较好反映区域土地利用及其变化、且适合 SWAT 模型精确模拟的土地利用分类系统<sup>[15]</sup>。利用 2015 年国家地理国情普查地表覆盖数据,按照本研究的土地利用分类系统进行归并,得到 2015 年土地利用数据。在 2015 年土地利用数据基础上,通过对 SPOT5 影像目视解译逆向变更方法,获得 2005 年的土地利用数据<sup>[19]</sup>。总体上看,2015 年国家地理国情普查地表覆盖数据具有权威性,

1995、2005 目视解译数据方法正确、精度较高;尽管遥感信息源不同,但分类可比较。因此本研究不同时期土地利用数据具有一致性和可比性,可以满足本研究要求。

1992—2018 年的逐日最高气温、最低气温、平均风速、平均相对湿度由永春和德化 2 个气象站提供。1992—2018 年的逐日入库径流量及 16 个雨量站的逐日降雨数据由山美水库管理处提供。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 SWAT 模型简介

SWAT 模型是美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的具有物理机制的分布式水文模型,适用于流域径流、水质等模拟研究,在不同尺度的流域水文模拟研究中表现出了较好的适用性<sup>[20-21]</sup>。SWAT 在子流域划分的基础上,进一步细分为水文响应单元进行模拟运算,然后通过对于子流域进行汇流演算,获取流域出口断面的径流量,其分布式的汇流演算模式更符合实际径流生成的物理过程。本研究应用 SWAT 模型对研究区的年、月及日径流过程进行模拟,地表径流计算选用径流曲线数方法(SCS runoff curve number),河道汇流过程采用马斯京根法(Muskingum)进行演算。子流域划分基于数字高程模型,采用“burn-in”算法。水文响应单元划分采用优势地面覆盖/优势土壤类型方法。

### 1.2.2 不同土地利用条件的 SWAT 模型构建

选用 1995 年、2005 年、2015 年 3 个不同时期的土地利用,将 1995—2018 年气象背景条件划分为 1995—2002 年、2003—2010 年、2011—2018 年 3 个相同时长时段,与 3 期土地利用相对应,分别进行模型的校准与验证,获取的模型最优参数集分别以 parm95、Parm05、Parm15 表示,从而构建与 3 种土地利用相适应的日径流模拟 SWAT 模型。

为了比较土地利用变化导致的 SWAT 模型参数变化对径流模拟的影响,将上述 3 套最优参数集分别应用于其他两种土地利用条件下的 SWAT 模型,可以得到如表 1 所示的情景设置。表 1 情景 1.1 表示 1995 年土地利用,对应 1995—2002 年水文气象资料,校准模型得到最优参数集 parm95;情景 1.2 表示 1995 年土地利用、1995—2002 年气象条件不变,但模型参数改用 2005 年土地利用校准的最优参数集 parm05;情景 1.3 表示 1995 年土地利用、1995—2002 年气象条件不变,但模型参数改用 2015 年土地利用校准的最优参数集 parm15。表 1 的其他两组情景与此类似,从而分别得到 3 种土地利用条件下,各自最优的 3 组模型参数用于其他土地利用条件时的径流模拟结果,进而比较结果的差异。

表 1 模型构建与分析情景设置

Table 1 Model construction and analysis of scenarios settings

情景 Scenarios	土地利用数据 Land use date	气象数据 Meteorological data	模型参数集 parameters set
1.1	1995	1995—2002	Parm95
1.2	1995	1995—2002	Parm05
1.3	1995	1995—2002	Parm15
2.1	2005	2003—2010	Parm05
2.2	2005	2003—2010	Parm95
2.3	2005	2003—2010	Parm15
3.1	2015	2011—2018	Parm15
3.2	2015	2011—2018	Parm95
3.3	2015	2011—2018	Parm05

Parm95:1995 年土地利用率定参数集 Set of parameters for land use, 1995;Parm05:2005 年土地利用 Set of parameters for land use, 2005; Parm15:2015 年土地利用率定参数集 Set of parameters for land use, 2015

### 1.2.3 参数敏感性分析与参数率定

SWAT 模型中影响径流的参数众多,且每个参数对模型影响程度不同,根据前人经验选取影响径流的 13 个主要参数<sup>[22-23]</sup>。为了减少参数率定过程的盲目性,同时能更好地研究流域土地利用变化对参数变化的响

应程度,需对模型参数进行敏感性分析。参数敏感性分析是通过每个参数微小变化对模型输出结果的影响来确定哪些参数对流域影响更大的方法。

SWAT 模型参数率定方法主要有自动率定和手动率定,手动率定的参数取值受人为主观影响很大,参数率定过程要耗费大量的时间和精力,率定效率低,自动率定以自动优化算法为基础,能够综合考虑参数的物理意义,率定效率高<sup>[24]</sup>。因此选用自动率定法率定 SWAT 模型。采用 SWAT-CUP 中 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting version 2) 算法进行敏感性分析及率定,迭代次数为 500 次。SUFI-2 算法可较好地解决 SWAT 模型自带的 SCE (Shuffled Complex Evolution) 优化算法参数率定繁琐且收敛效果不理想等问题,并可将率定后的参数范围通过模拟值与实测值的 95PPU (95 Percent Prediction Uncertainty) 图可视化,用以寻求模型模拟效果最佳的一系列参数最优组合<sup>[25]</sup>。为评价模型的模拟精度,选用纳什效率系数 (NS)、确定性系数 ( $R^2$ )、相对误差 (Re) 作为模型适用性的评价指标,公式如下:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2}$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right]^2$$

$$Re = \frac{Q_{sim} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \times 100\%$$

式中,  $Q_{obs}$  为观测值;  $Q_{sim}$  为模拟值;  $Q_{avg}$  为实测径流平均值;  $\overline{Q_{sim}}$  为模拟平均值;  $n$  为样本个数。当这 3 个指标分别达到相应的标准,  $R^2 > 0.7$ ,  $NS > 0.55$ ,  $|Re| < 25\%$ , 表示模型适用于流域径流过程的模拟<sup>[26]</sup>。

#### 1.2.4 综合土地利用动态度

采用综合土地利用动态度反映研究区 1995—2015 年土地利用变化的总体情况。综合土地利用动态度属于土地利用年变化率<sup>[27]</sup>, 公式为:

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中,  $LC$  为研究时段内综合土地利用动态度,  $LU_i$  为监测起始时刻第  $i$  类土地利用类型的面积,  $LU_{i-j}$  为监测时段内第  $i$  类土地利用类型转化为非  $i$  类土地利用类型面积的绝对值,  $T$  为监测时段长度。

## 2 结果分析

### 2.1 土地利用变化分析

对 3 期土地利用进行统计, 结果见图 2、表 2。研究区占主导地位的土地利用类型为林地、园地、耕地, 3 种地类面积之和占研究区总面积的 90% 以上, 其他类型较少。1995—2015 年间, 林地、旱地、未利用地 3 种地类呈减少趋势, 而草地、园地、建设用地、耕地 4 种地类呈增加的趋势, 水域面积变化很小; 以园地的增加, 林地

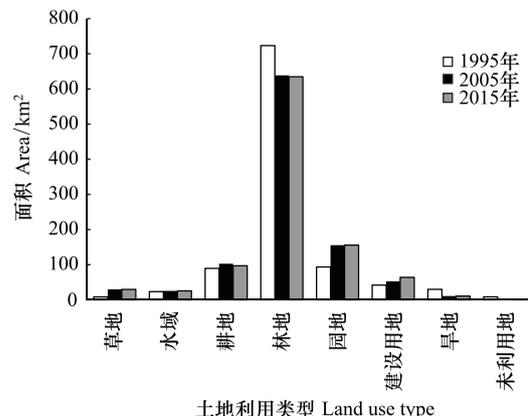


图 2 山美水库流域 1995—2015 年土地利用面积

Fig.2 The area of land use from 1995 to 2015 in Shanmei Reservoir watershed

的减少为主要特点。变化最大的林地减少了 12.28%、88.82 km<sup>2</sup>;园地增长了 66.65%、62.21 km<sup>2</sup>;建设用地增加了 52.7%、22.09 km<sup>2</sup>。从时间上来看,1995—2005 年间土地利用变化较大,2005—2015 年变化较小。

表 2 山美水库流域 1995—2015 年土地利用变化分析

Table 2 Analysis of land use change from 1995 to 2015 in Shanmei Reservoir watershed

年份 Year	面积和变化率 Area and rate	林地 Forest	园地 Garden	耕地 Orchard	建设用地 Urban land	草地 Pasture	水域 Water	旱地 Dryland	未利用地 Unused land
1995	面积/km <sup>2</sup>	723.34	93.34	89.43	41.92	8.25	23.27	29.98	8.53
	比例/%	71.05	9.16	8.78	4.12	0.81	2.29	2.94	0.85
2005	面积/km <sup>2</sup>	638.63	155.42	102.51	52.69	29.78	25.3	10.59	3.92
	比例/%	62.68	15.25	10.06	5.17	2.93	2.48	1.04	0.39
2015	面积/km <sup>2</sup>	634.52	155.55	97	64.01	29.69	25.45	10.61	2
	比例/%	62.27	15.27	9.52	6.28	2.91	2.50	1.04	0.21
1995—2005	变化率/%	-11.71	66.51	-14.63	25.69	260.97	8.72	-64.68	-54.04
2005—2015	变化率/%	-0.64	0.08	-5.38	21.48	-0.30	0.59	0.19	-48.98
1995—2015	变化率/%	-12.28	66.65	8.46	52.70	259.88	9.38	-64.61	-76.55

## 2.2 SWAT 模型校正与验证

3 期土地利用条件下年、月、日尺度径流模拟结果如表 3。不同时间尺度径流模拟  $NS$  均大于 0.62,  $R^2$  均大于 0.78,  $|Re|$  均小于 25%。表明 SWAT 模型对山美水库流域年、月、日尺度径流过程模拟效果良好,可以合理反映流域不同时期、不同时间尺度的径流过程。

表 3 3 期土地利用条件下不同时间尺度径流模拟结果

Table 3 Runoff simulation results of different time scales in three land use conditions

时间尺度 time scales	1995 年土地利用 Land use 1995			2005 年土地利用 Land use 2005			2015 年土地利用 Land use 2015		
	$NS$	$R^2$	$Re/\%$	$NS$	$R^2$	$Re/\%$	$NS$	$R^2$	$Re/\%$
年 Annual	0.92	0.94	-9.91	0.91	0.96	-6.89	0.62	0.91	-15.95
月 Monthly	0.90	0.93	-10.50	0.96	0.97	-7.22	0.88	0.93	-15.52
日 Daily	0.65	0.80	-10.70	0.87	0.88	-7.46	0.77	0.78	-15.53

$NS$ : 纳什效率系数 Nash-Sutcliffe;  $R^2$ : 确定性系数 Coefficient of determination;  $Re$ : 相对误差 Percent bias

## 2.3 敏感性参数及其变化

由 SUFI-2 算法确定的 3 种不同土地利用条件下径流敏感性参数及其率定结果如表 4 所示。在表 4 中,  $t$  值表示参数敏感性的大小,其绝对值越大,代表该参数在某一区域越敏感;  $P$  值表示该参数敏感性的置信水平,其值越接近 0,代表该参数越重要。一般认为,在  $P$  值小于等于 0.05 的情况下,该参数比较敏感重要;而在  $P$  值大于等于 0.3 的情况下,该参数不敏感<sup>[28]</sup>。由表 4 可知,不同土地利用条件下的敏感参数是一样的,分别为 CN2、SOL\_AWC、SOL\_K、CANMX、ESCO、GW\_DELAY、OV\_N,且排序基本一致。其它参数如 GWQMN、GW\_REVAP、EPCO、SLSUBBSN、ALPHA\_BF 等对径流不敏感。该结果表明,土地利用变化对参数的敏感性没有影响。

表 4 结果还表明,尽管土地利用变化对参数的敏感性没有影响,但不同土地利用条件下参数的取值是不同的。如土壤水分条件 II 下的 SCS 径流曲线数 CN2 的值,随着土地利用的变化而变化,在 1995—2015 年间逐渐增大;而饱和渗透系数 SOL\_K 在 1995—2015 年间逐渐变小。这些敏感性参数取值变化规律及其合理性将在下文进一步讨论。

## 2.4 参数变化对不同时间尺度径流模拟效果的影响

根据表 1, 3 种土地利用条件下,模型参数变化对径流模拟效果的影响比较如图 3 所示。图中蓝色三角区域为不合理区,表示效率系数  $NS$  小于 0.55,或  $R^2$  小于 0.7,即模型模拟效果差,不满足径流模拟需要。

由图 3 可知,将 3 套率定参数分别代入不同土地利用条件,年、月径流的  $NS$  及  $R^2$  均落在蓝色区域外,表明年、月径流模拟结果较好,即参数变化对年、月径流模拟影响较小。从日径流看, $NS$  及  $R^2$  均在使用与土地利用匹配的参数集模拟下落在蓝色区域外,即模拟效果较好,而在使用与土地利用不匹配的参数集模拟下  $NS$  及  $R^2$  均落在蓝色区域内,即模拟效果差,并且模拟结果的变化随着土地利用变化强度越大越显著。具体表现在,1995 年土地利用条件下,parm95、parm05、parm153 组不同参数集的径流模拟结果, $NS$  由 0.65 下降到 -0.73 再降到 -0.77,同样  $R^2$  由 0.80 下降到 0.41 再降到 0.39。在 2015 年土地利用条件下,参数集 parm15、parm05、parm95 的模拟结果, $NS$  由 0.77 下降到 0.23 再降到 -0.19,同样  $R^2$  由 0.78 下降到 0.50 再降到 0.3。2005 年土地利用条件也呈现类似的变化趋势。

表 4 山美水库流域参数敏感性分析及最佳率定值

Table 4 Analysis of sensitive parameters and optimal values in Shanmei Reservoir watershed

参数名称 Parameter name	取值范围 Value range	敏感性排序 Sensitivity order						最佳值 Optimal value		
		Parm95 (t 值/P 值)		Parm05 (t 值/P 值)		Parm15 (t 值/P 值)		Parm95	Parm05	Parm15
R_CN2	(-0.5—0.5)	-72.58	0.00 <sup>1</sup>	-71.56	0.00 <sup>1</sup>	-49.96	0.00 <sup>1</sup>	-0.23	-0.1	-0.08
A_SOL_AWC	(-0.2—0.2)	14.51	0.00 <sup>2</sup>	14.11	0.00 <sup>2</sup>	10.86	0.00 <sup>2</sup>	0.18	0.15	0.13
R_SOL_K	(-0.8—0.8)	13.65	0.00 <sup>3</sup>	10.05	0.00 <sup>3</sup>	4.96	0.00 <sup>4</sup>	-0.64	-0.24	-0.2
V_CANMX	(0—100)	6.97	0.00 <sup>4</sup>	9.51	0.00 <sup>4</sup>	8.90	0.00 <sup>3</sup>	57	61	72
V_ESCO	(0—1)	3.12	0.00 <sup>5</sup>	-5.55	0.00 <sup>5</sup>	-2.89	0.00 <sup>5</sup>	0.6	0.9	1
V_GW_DELAY	(0—500)	-1.95	0.05 <sup>6</sup>	-2.16	0.03 <sup>7</sup>	-2.28	0.02 <sup>6</sup>	27	17	17
V_OV_N	(0.1—0.8)	1.73	0.08 <sup>7</sup>	2.56	0.00 <sup>6</sup>	1.50	0.13 <sup>7</sup>	0.18	0.58	0.57
V_RCHRG_DP	(0—1)	-1.11	0.26 <sup>8</sup>	-1.02	0.30 <sup>8</sup>	-1.25	0.21 <sup>8</sup>	0.5	0.3	0.3
V_GWQMN	(0—5000)	0.23	0.81 <sup>12</sup>	-0.70	0.48 <sup>9</sup>	-0.74	0.45 <sup>9</sup>	600	500	900
V_GW_REVAP	(0.02—0.2)	0.58	0.55 <sup>9</sup>	-0.36	0.71 <sup>10</sup>	0.48	0.62 <sup>13</sup>	0.15	0.09	0.08
V_EPCO	(0—1)	0.42	0.66 <sup>11</sup>	-0.29	0.76 <sup>11</sup>	0.59	0.55 <sup>11</sup>	0.1	0.3	0.6
V_SLSUBBSN	(10—150)	-0.57	0.56 <sup>10</sup>	0.21	0.79 <sup>13</sup>	-0.52	0.6 <sup>12</sup>	37	52	42
V_ALPHA_BF	(0—1)	-0.08	0.93 <sup>13</sup>	0.28	0.77 <sup>12</sup>	0.60	0.52 <sup>10</sup>	0.1	0.048	0.036

V\_：赋值 replace;R\_：乘(1+x) multiply by(1+x);A\_：加值 add;CN2：径流曲线数 Curve number of moisture condition II;SOL\_AWC：土壤层有效水容量 Available water of the soil layer;SOL\_K：饱和渗透系数 hydraulic conductivity of the soil;CANMX：最大冠层截流量 Maximum canopy storage;ESCO：土壤蒸发补偿系数 Soil evaporation compensation factor;GW\_DELAY：地下水滞后时间 Groundwater delay time;OV\_N：曼宁坡面粗糙系数 Manning's n value for overland flow;RCHRG\_DP：深蓄水层渗透系数 Deep aquifer permeability coefficient;GWQMN：浅层地下水再蒸发系数 Reevaporation coefficient of shallow groundwater;GW\_REVAP：地下水再蒸发系数 Groundwater revap coefficient;EPCO：植被吸水补偿系数 Compensation coefficient of vegetation water absorption;SLSUBBSN：陆上水流长度 Average runoff lag time;ALPHA\_BF：基流  $\alpha$  系数 Baseflow recession constant

综上所述,应用与土地利用不匹配的参数集时,不同时间尺度径流的响应规律不同,年、月较长时间尺度径流影响较小,但日径流影响显著,且随着土地利用变化强度越大,模拟结果的变化越显著。

### 3 模型参数取值对土地利用变化响应的讨论

上述不同土地利用条件下敏感参数的率定结果(表 4)表明,土地利用变化对径流参数的敏感性没有影响,对敏感参数的取值有较大影响。现就土地利用变化对敏感参数取值的影响规律进行分析、讨论。

#### 3.1 敏感参数取值的变化规律

CN2 是土壤水分条件 II 下的 SCS 径流曲线数,是土壤渗透特性、土地利用类型和前期土壤水分条件的综合反映,CN2 越大产流量越大<sup>[29-30]</sup>。由表 4 可知,CN2 随着土地利用的变化在 1995—2015 年间逐渐增大,这与研究区 1995—2015 年土地利用由林地转变为园地、耕地及建设用地有关。研究表明不同土地利用类型对降水的涵养能力不同,从大到小依次为林地、草地、耕地、建设用地,因此林地转变为园地、草地、耕地及建设用地导致水源涵养能力下降。SOL\_AWC 表示土壤层有效水容量<sup>[31]</sup>,SOL\_AWC 随着土地利用的变化在 1995—2015 年间逐渐减小,其原因是与 2005、2015 年相比,1995 年森林覆盖面积大,1995 年相应的水源涵养能力较

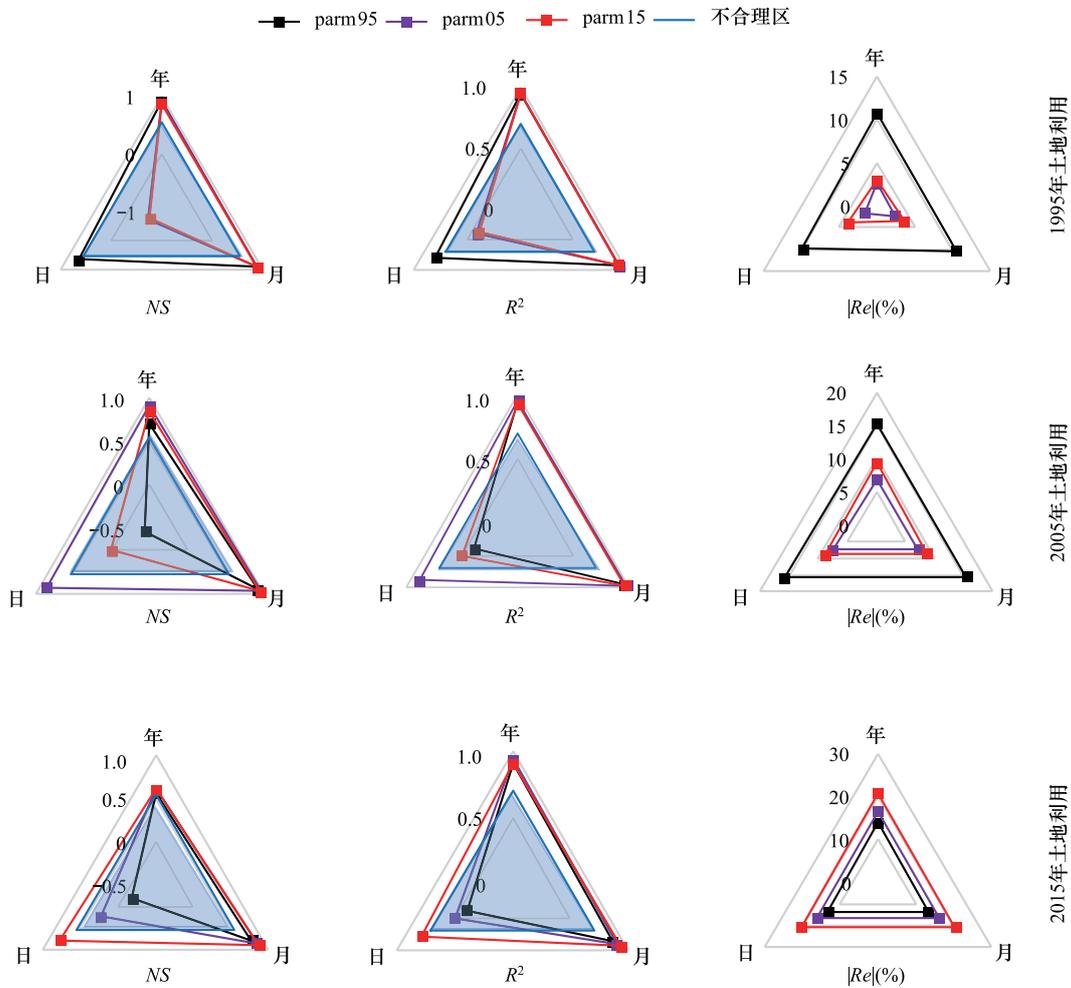


图 3 SWAT 模型参数对不同时间尺度径流模拟效果的影响

Fig.3 Effects of SWAT model parameters to effects on the simulation of runoff with different time scales

Parm95:1995 年土地利用参数集 Set of parameters for land use, 1995;Parm05:2005 年土地利用 Set of parameters for land use, 2005; Parm15:2015 年土地利用参数集 Set of parameters for land use, 2015

2005 年、2015 年强。SOL\_K 表示饱和渗透系数,该参数将土壤水的流量与水力梯度相联系,度量水流在土壤中的运动的难易程度<sup>[31]</sup>,1995 年到 2015 年间 K 系数逐渐增大,与园地、草地等土地利用类型相比林地透水性强,土壤中水力梯度增强有关。CANMX 表示最大冠层截流量,表示植物冠层对降雨截流量的影响<sup>[32-33]</sup>,1995 年到 2015 年间 CANMX 的取值由 57 增加到 72,与研究区主要土地利用类型由林地转变为园地、草地,植被冠层数量增加有关。土壤蒸发补偿系数 ESCO 是调整土壤中因毛细作用、土壤裂隙等对土层蒸发量的影响系数<sup>[34-35]</sup>,其值由 0.6 增加到 1,与研究区 1995 到 2015 年间林地减少、土壤层有效水减少、园地增长明显及农业用地的保墒作用使得土壤浅层的蒸发量减少有关。GW\_DELAY<sup>[36-37]</sup>表示降水入渗补给地下水的滞后时间,1995 年土地利用条件下地下水迟滞时间较 2005 年及 2015 年长,与 1995 年相比 2005 及 2015 年林地数量大有关,林地相比园地等其他土地利用类型,根系较为发达,故会延长地表水补给地下水的的时间。OV\_N 表示曼宁坡面粗糙系数,1995 年到 2015 年间 N 的取值逐步增大,与研究区土地利用变化导致的产量增大,水深增加有关,Shen<sup>[38]</sup>等的研究表明,N 值随着水深的增加而增大。

显然,土地利用变化对敏感参数取值的影响规律,符合敏感参数的物理意义。

为了更好地反映土地利用变化对敏感参数取值的影响,图 4 比较了 1995—2005 年、2005—2015 年各敏感参

数值年变化率与综合土地利用动态度的关系。由图可知,1995—2015 年综合土地利用动态度为 1.1%,2005—2015 年综合土地利用动态度为 0.1%,表明 1995—2005 年的土地利用变化比 2005—2015 年大。与此相对应,除 CANMX 外,其他参数值年变化率也是 1995—2005 年比 2005—2015 年大,表明土地利用变化越大,敏感参数取值变化越大。

### 3.2 敏感参数取值的区域差异

与 Wang 等<sup>[13]</sup>的研究结论相比,本文在验证了在模拟流域的径流量时,可以选择模拟期间任何一年的土地利用作为输入的观点基础上,进一步提出不同土地利用条件下敏感参数取值发生了显著变化。

为了比较在不同气候地区、不同地表覆盖情况下,模型参数对土地利用变化的响应特征,为该模型应用提供更有支持,可与提供了敏感参数变化结果的类似研究<sup>[14]</sup>进行比较,见表 5。从敏感参数来看,与山美水库流域相比,渭河流域与地下水及土壤有关的敏感参数较多,且敏感性较强,是因为黄河支流渭河流域属于西北内陆干旱区,与本研究东南沿海湿润区山美水库流域有较大差异,相比而言干旱区水文过程更复杂,虽然其降水量不多,但渭河流域靠近秦岭等高大山脉,高山覆盖厚厚的雪层为地下水提供源源不断的补给<sup>[21]</sup>。从敏感参数取值变化来看,Li 等<sup>[14]</sup>的研究中研究时段内土地利用主要表现为农业用地草地显著增加,建设用地增加不明显,相应的敏感参数土壤水分条件 II 下的 SCS 径流曲线数 CN2 的值随着土地利用逐渐减小;最大冠层截流量 CANMX 的取值逐渐减小,曼宁坡面粗糙系数 OV\_N 取值逐渐减小,地下水滞后时间 GW\_DELAY 逐渐减小,而本研究从反面支持了上述观点,本文研究区在 1995—2015 年间土地利用变化主要表现为林地减少,建设用地增加,与此对应敏感参数中 CN2 的取值,随着土地利用在 1995—2015 年间逐渐增大;CANMX 的取值逐渐增大,曼宁坡面粗糙系数 OV\_N 取值逐渐增大,地下水滞后时间 GW\_DELAY 逐渐减小。

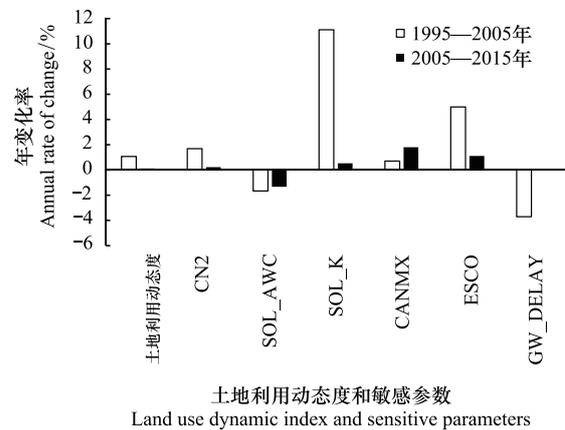


图 4 1995—2015 年敏感参数取值年变化率与综合土地利用动态度的关系

Fig.4 The relationship between annual change rate of sensitive parameters and dynamic attitude of comprehensive land use from 1995 to 2015

CN2:径流曲线数;SOL\_AWC:土壤层有效水容量;SOL\_K:饱和渗透系数;CANMX:最大冠层截流量;ESCO:土壤蒸发补偿系数;GW\_DELAY:地下水滞后时间;

表 5 敏感参数的区域差异

Table 5 Regional differences of values of sensitive parameters

类型 Types	研究区 Study area	
	东南沿海山美水库流域 Shanmei Reservoir watershed in the southeast coast	西北内陆渭河流域 Wei River Basin in inland northwest China
敏感参数 sensitive parameters	CN2、SOL_AWC、SOL_K、CANMX、ESCO、GW_DELAY、OV_N	CN2、SOL_AWC、SOL_Z、SOL_K、EPCO、CANMX、SLSUBBSN、OV_N、CH_K2、ALPHA_BF、REVAPMN、GW_DELAY、GW_REVAP、RCHRG_DP、GWQMN
土地利用变化特征 Analysis of land use change	林地减少,建设用地增加	农业用地、草地显著增加,建设用地增加不明显
相同敏感参数取值变化 The value of same sensitive parameters	CN2 增大 SOL_AWC 减小 SOL_K 增大 CANMX 增大 GW_DELAY 增大 OV_N 增大	CN2 减小 SOL_AWC 不变 SOL_K 不变 CANMX 减小 GW_DELAY 减小 OV_N 减小

SOL\_Z:土壤层深度 Soil depth;CH\_K2:主河道水力传导度 Main channel hydraulic conductivity;REVAPMN:发生再蒸发的浅层含水层水位阈值 Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap

## 4 结论

以山美水库流域为研究区,基于 SWAT 模型,分别模拟 1995 年、2005 年、2015 年土地利用条件及相应气象条件时的年、月、日尺度径流过程;分析了随着土地利用变化模型径流模拟敏感参数的变化,以及参数变化对不同时间尺度径流模拟效果的影响,得出以下结论:

(1)1995—2015 年间,研究区土地利用格局发生了较大变化,主要表现为林地转向园地和建设用地、耕地转向建设用地,3 期土地利用条件下率定的 SWAT 模型都能较好地模拟山美水库流域年、月、日尺度径流,其模拟效率系数  $NS$  和决定系数  $R^2$  均大于 0.65 和 0.78,相对误差  $Re$  绝对值小于 25%。

(2)1995—2015 年间不同土地利用条件下最敏感的 7 个参数是一样的,分别为  $CN2$ 、 $SOL\_AWC$ 、 $SOL\_K$ 、 $CANMX$ 、 $ESCO$ 、 $GW\_DELAY$ 、 $OV\_N$ ;但敏感参数值随着土地利用而变化, $CN2$ 、 $SOL\_K$ 、 $CANMX$ 、 $ESCO$  取值逐渐增大, $SOL\_AWC$ 、 $GW\_DELAY$  取值逐渐减小,与林地转变为园地、草地、耕地及建设用地增加导致的流域水源涵养能力变化有关,且变化率基本与土地利用变化强度正相关。

(3)土地利用变化引起的参数变化,对年、月较长时间尺度径流模拟效果的影响较小,对日径流模拟效果影响显著,且随着土地利用变化强度的增加而增加。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 权瑞松. 基于情景模拟的上海土地利用变化预测及其水文效应. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1552-1562.
- [ 2 ] 廉丽姝, 李宝富, 陈忠升, 陈亚宁, 孙小银. 基于 WRF 模式评估土地利用/覆被变化的气候和水文效应. 生态学报, 2018, 38(3): 917-925.
- [ 3 ] 孙占东, 黄群. 长江流域土地利用/覆被变化的大尺度水文效应. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2703-2710.
- [ 4 ] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 李宗善, 杨荣金. 黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能. 生态学报, 2014, 34(23): 7013-7025.
- [ 5 ] Chirachawala C, Shrestha S, Babel M S, Virdis S G P, Wichakul S. Evaluation of global land use/land cover products for hydrologic simulation in the Upper Yom River Basin, Thailand. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135-148.
- [ 6 ] Miller S N, Kepner W G, Mehaffey M H, Hernandez M, Miller R C, Goodrich D C, Devonald K K, Heggem D T, Miller W P. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, 38(4): 915-929.
- [ 7 ] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 张润. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2018, 38(14): 5149-5157.
- [ 8 ] 邓慧平, 孙菽芬, 李倩. 可用于陆面过程模型的地形指数水文模型中简化参数化方案的研究. 气象学报, 2010, 68(3): 351-364.
- [ 9 ] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.
- [ 10 ] Wang H, Sun F B, Xia J, Liu W B. Impact of LUCC on streamflow based on the SWAT model over the Wei River Basin on the Loess Plateau in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 1929-1945.
- [ 11 ] Eckhardt K, Breuer L, Frede H G. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *Journal of Hydrology*, 2003, 273(1/4): 164-176.
- [ 12 ] Zhou F, Xu Y P, Chen Y, Xu C Y, Gao Y Q, Du J K. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [ 13 ] Wang Q R, Liu R M, Men C, Guo L J, Miao Y X. Effects of dynamic land use inputs on improvement of SWAT model performance and uncertainty analysis of outputs. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 874-886.
- [ 14 ] Li Y Y, Chang J X, Luo L F, Wang Y M, Guo A J, Ma F, Fan J J. Spatiotemporal impacts of land use land cover changes on hydrology from the mechanism perspective using SWAT model with time-varying parameters. *Hydrology Research*, 2019, 50(1): 244-261.
- [ 15 ] Lin B Q, Chen X W, Yao H X, Chen Y, Liu M B, Gao L, James A. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 55-63.
- [ 16 ] Guo H, Hu Q, Jiang T. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1/4): 106-122.
- [ 17 ] Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, Nash M S, Jackson M, Erickson C. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the

- upper San Pedro Watershed. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/4): 105-114.
- [18] 杨柳, 刘梅冰, 陈莹, 陈兴伟. 山美水库集水区径流模拟的日尺度 SWAT 模型. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 3-5.
- [19] 吴思佳, 林金煌, 陈文惠, 程瑞彤, 郑振灿, 李震宇. 2000 年以来 4 个时期闽三角城市群中的湿地格局及变化. *湿地科学*, 2018, 16(06): 717-722.
- [20] Zeng S D, Xia J, Du H. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(2): 401-413.
- [21] 林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 刘梅冰. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析. *生态学报*, 2014, 34(7): 1772-1780.
- [22] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究. *自然资源学报*, 2013, 28(11): 1988-1999.
- [23] 窦小东, 黄玮, 易琦, 刘晓舟, 左慧婷, 李蒙, 李忠良. LUCC 及气候变化对澜沧江流域径流的影响. *生态学报*, 2019, 39(13): 4687-4696.
- [24] 陈强, 苟思, 秦大庸, 周祖昊. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法. *水利学报*, 2010, 41(1): 113-119.
- [25] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, Peter S, 姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. *生态学报*, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 855-900.
- [27] 徐苏, 张永勇, 窦明, 花瑞祥, 周宇建. 长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应. *地理科学进展*, 2017, 36(4): 426-436.
- [28] 成向荣, 渠勇建, 虞木奎, 吴初平, 袁位高. 植被覆盖变化对衢江流域水文效应的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1829-1835.
- [29] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method. *Australian Journal of Soil Research*, 1989, 27(3): 511-523.
- [30] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R, King K W. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas: Texas Water Resources Institute, 2002: 94-114.
- [31] 芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 131-152.
- [32] 陈昌春, 张余庆, 项瑛, 王腊春. 土地利用变化对赣江流域径流的影响研究. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1758-1769.
- [33] Toba T, Ohta T. Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model. *Hydrological Processes*, 2008, 22(14): 2634-2643.
- [34] Li Z L, Shao Q X, Xu Z X, Cai X T. Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: a case study of SWAT model applied to Yingluoxia Watershed in Northwest China. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1/4): 76-83.
- [35] Gao X, Chen X W, Biggs T W, Yao H X. Separating wet and Dry years to improve calibration of SWAT in Barrett Watershed, southern California. *Water*, 2018, 10(3): 274.
- [36] 王政友. 降水入渗补给地下水滞后时间分析探讨. *水文*, 2011, 31(2): 42-45.
- [37] 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. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 108-115.
- [38] Shen H W. *River Mechanics*. Fort Collins: Water Resources Publications, 1971: 64-79.