

引用格式: 闫聪聪, 陈兴伟, 郭伟, 陈莹, 刘梅冰. SWAT 模型时变和不变参数法模拟的土地利用变化径流效应比较[J]. 山地学报, 2023, 41(1): 144-154.

YAN Congcong, CHEN Xingwei, GUO Wei, CHEN Ying, LIU Meibing. Comparison of runoff effects incurred by land use changes based on time-varying method and invariant parameter methods of SWAT [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 144-154.

SWAT 模型时变和不变参数法模拟的土地利用变化径流效应比较

闫聪聪¹, 陈兴伟^{1,2,3*}, 郭伟¹, 陈莹^{1,2}, 刘梅冰^{1,2}

(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: 基于 SWAT 模型的时变参数和不变参数法可以用来模拟土地利用变化引起的径流效应。这两种方法评估环境水文效应的差异性仍缺乏定量分析。本文以东南沿海山美水库流域为例, 在参数敏感性分析基础上, 采用自动率定方法, 分别构建 1995 年、2015 年土地利用的 SWAT 模型, 并运用时变参数和不变参数法对土地利用变化径流效应进行模拟。结果表明: (1) 两期土地利用模型率定的参数集都能很好地模拟流域年、月和日尺度径流过程; 纳什效率系数分别大于 0.83、0.90 和 0.66。(2) 土地利用变化基本不影响径流模拟参数的敏感性, 但对参数取值影响较大; 参数取值变化与土地利用变化方式密切相关。(3) 与时变参数法相比, 不变参数法低估了土地利用变化对年、丰水径流的影响, 高估了对枯水径流的影响, 时变参数法模拟结果更为合理。如时变参数法模拟的年径流平均增加 1.22%, 不变参数法为 0.23%; 时变参数法年最小 1 d 径流平均减小 2.72%, 不变参数法为 5.07%。研究成果改进了 SWAT 模型的时变参数法, 进一步完善了应用 SWAT 模型评估土地利用变化对径流影响的模拟方法, 可为流域水资源管理提供依据。

关键词: 土地利用变化; 径流; SWAT 模型; 时变参数; 不变参数

中图分类号: P933

文献标志码: A

气候变化和人类活动是流域水文变化的驱动因素^[1-4]。人类土地利用活动造成的水文效应, 一直是水文科学研究的热点^[5-7]。土地利用变化主要通过影响蒸散发、截留、下渗等使产汇流过程发生改变^[8-9]。研究土地利用变化造成的水文效应的方法有试验流域法、特征变量时间序列法、水文模型法、综合法^[10]。其中, 分布式水文模型应用更为广泛^[11-12]。

SWAT 模型 (Soil and Water Assessment Tool, SWAT) 是普遍应用的半分布式水文模型。应用

SWAT 模型研究土地利用变化水文响应的常用方法是不变参数法, 即用某一期土地利用数据建模、率定模型参数, 保持模型参数不变, 只替换土地利用情景, 进行土地利用变化水文响应的模拟分析^[13-16]。时变参数法则分析土地利用变化对参数的影响, 对不同时期土地利用模型参数分别进行率定, 从而改进模型^[17-21]。

时变参数法的应用存在一个疑惑。径流曲线数 (Soil Conservation Service Curve Number, SCS-CN) 法中的 CN 值反映地表产流能力, 是 SWAT 模型最

收稿日期 (Received date): 2022-10-14; 改回日期 (Accepted date): 2023-02-10

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (U22A20554)。[National Natural Science Foundation of China (U22A20554)]

作者简介 (Biography): 闫聪聪 (1997-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向: 水文学与水资源。[YAN Congcong (1997-), female, born in Yuncheng, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on hydrology and water resource] E-mail: yancongcong0106@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 陈兴伟 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 流域水沙污染物过程与防灾减灾。[CHEN Xingwei (1963-), male, Ph. D., professor, research on water-sediment-nutrient processes of watershed and disaster prevention and mitigation] E-mail: cxwchen215@fjnu.edu.cn

敏感参数之一。在时变参数法中,参数 CN 值随着土地利用的变化而改变^[17-21]。然而,CN 值取决于土地利用类型、水文土壤组特征和前期土壤湿度条件^[22-25],一般来讲,水文土壤组特征和土壤平均湿度条件基本不变,则流域土地利用的改变并不影响 CN2 的取值(CN2 为土壤水分平均状态下的 CN 取值)。在保持不同时期土地利用模型的 CN2 值不变条件下,应明确土地利用变化对参数的影响。

根据 SWAT 模型的物理建模条件以及以上讨论,用时变参数法进行土地利用变化水文效应的模拟比不变参数法更为合理,但两种方法分析结果的差异,仍需进一步探讨。本研究以山美水库流域为例,探讨在模型参数 CN2 不变条件下,参数随土地利用变化而变化的规律,进而分析时变参数和不变参数法对土地利用变化径流效应模拟的差异,以完善 SWAT 模型的土地利用变化水文效应的评估方法,为流域水资源管理等提供依据。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

山美水库坐落于福建省山美村,是以灌溉为主,

兼具防洪、发电等功能的水库工程,其集水面积 1023 km²,总库容 0.655 km³。山美水库流域(图 1; 25°9'N ~ 25°30'N, 118°1'E ~ 118°33'E)地处台湾海峡西岸的中部,地形以山地和丘陵为主。研究区属亚热带季风气候,气候温暖湿润。

1.2 数据来源

SWAT 模型构建需要的空间数据包括数字高程数据、土地利用数据、土壤数据等;气象数据包括流域的降雨数据、逐日最高气温、最低气温、相对湿度等;径流数据用于模型率定与验证。1995 年土地利用数据基于 Landsat TM 影像,按照目视解译的标准方法自行解译,精度较高^[26];2015 年采用国家地理国情普查地表覆盖数据^[27];两期土地利用数据的分类可比较,具有可比性。模型所需的数据及来源见表 1。

2 研究方法

2.1 土地利用变化对 SWAT 模型参数影响的模拟

2.1.1 两期土地利用的 SWAT 模型

模型最小集水面积阈值为 1500 ha,将研究区划分为 38 个子流域。土壤类型分为 10 类,其中硅铝

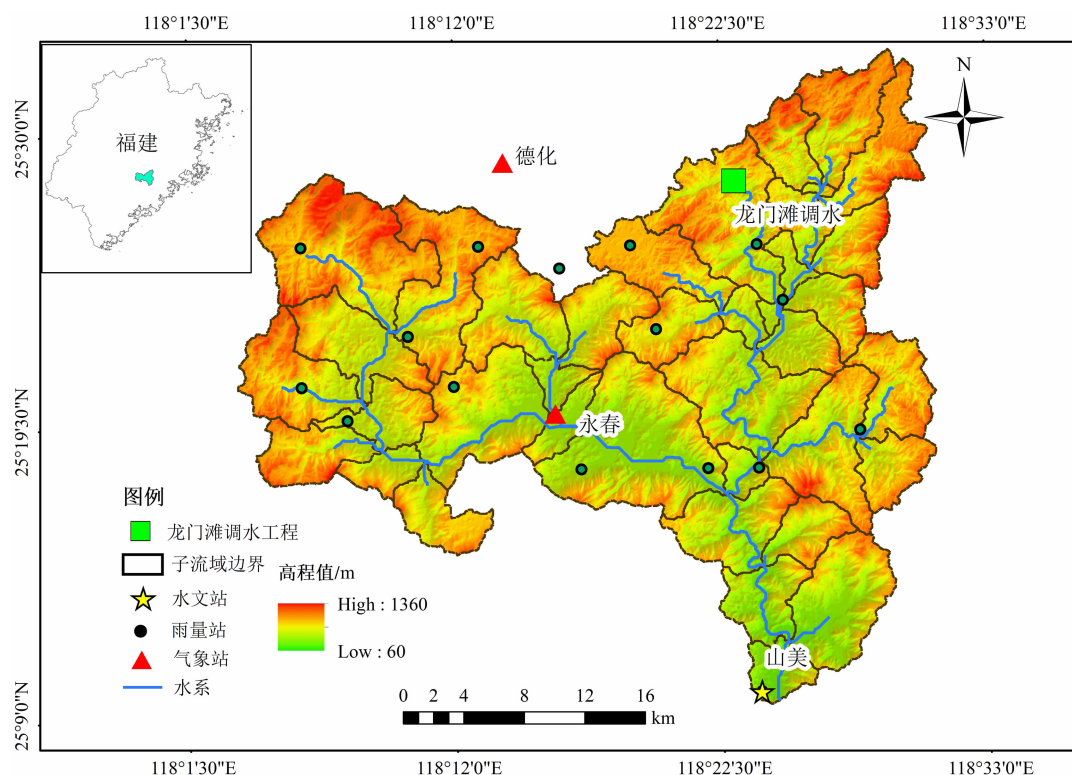


图 1 山美水库流域概况图

Fig. 1 Location map of the Shanmei Reservoir basin, China

表 1 数据来源

Tab. 1 Data source

数据类型	分辨率/比例/尺度/年份	数据来源	数据描述
DEM 图 (Discrete Element Method)	30 m × 30 m	中国科学院国际数据服务平台 http://datamiffor.csdh.cn/admin/datademMain/jsp	高程、坡面
土地利用图	1995 年 2015 年	TM 影像解译 ^[26] 国家地理国情普查地表覆盖数据 ^[27]	土地利用/植被覆盖空间分布
土壤类型图	1:50 万	福建省农业科学院土壤肥料研究所	土壤类型空间分布
气象	1995—2018 年日观测数据	山美水库管理处永春、德化气象站	逐日降雨数据,逐日最高、最低气温,相对风速,相对湿度
水文	1995—2018 年日观测数据	山美水库管理处	逐日入库径流量

质红壤、黄红壤、水稻土分布面积最为广泛。土地利用类型分为林地、园地、草地、建设用地等 8 类。为更准确模拟土地利用变化的参数和径流效应,以 1995 年、2015 年两期土地利用数据,结合对应时期 1995—2002 年、2011—2018 年两个相同时长的气象数据分别构建 SWAT 模型。产流采用 SCS 径流曲线数法,汇流计算采用马斯京根法。模型设置 1 年预热期、5 年率定期和 3 年验证期,通过模型预热期消除估算模型初始值的影响。1995—1999 年、2011—2015 年为模型率定期,2000—2002 年、2016—2018 年为模型验证期。首先对 2015 年土地利用模型进行率定得到其参数集 Item2015。根据 SWAT 模型 SCS 径流曲线法的计算原理,流域土地利用的改变,并不影响 CN2 的取值,两期土地利用条件下的 CN2 值也应该是一致的。因此,将 1995 年土地利用模型的 CN2 值设置为与参数集 Item2015 中相同的 CN2 值,然后对 1995 年土地利用模型进行率定,得到 1995 年土地利用模型参数集 Item1995。

2.1.2 参数敏感性分析与率定

运用敏感性分析法筛选出对模拟结果有重要影响的参数,是提高模型率定效率的重要步骤。SWAT2009 版本自带的 LH-OAT (Latin Hypercube-One factor at a Time, LH-OAT) 敏感性分析方法,是 LH 抽样法和 OAT 敏感度分析法的结合。这保证了所有参数在其范围内被抽样,且参数变化对模拟的影响可以通过敏感度 S_i 反映。依据参数敏感度的大小将参数划分为 4 个等级,敏感度越高参数取值的变化对模拟结果影响越大^[28]。本研究对径流模拟涉及的 26 个参数进行敏感性分析。

SWAT 模型率定主要有手动和自动率定法。手动率定法在调参过程中带有较强的主观性,而自动率定则通过优化算法对参数进行调整,结果客观性较强。因此,采用 SWATCUP 软件中的 SUFI-2 优化算法。该算法通过 P -factor 和 R -factor 来评估模型校准的不确定性, P -factor 越接近于 1、 R -factor 越接近 0 模拟效果越好。同时,为量化模型的模拟效果,采用纳什效率系数 (NS)、确定性系数 (R^2)、百分比偏差 ($PBIAS$) 这三个指标来衡量,一般认为,当 $R^2 > 0.60$ 、 $NS > 0.60$ 、 $|PBIAS| < 25\%$,即认为模型适用于研究流域^[29]。

2.2 土地利用变化径流效应时变参数和不变参数法

2.2.1 模拟情景设置

为比较 SWAT 模型时变参数法和不变参数法模拟土地利用变化径流效应的差异,在保持气象数据不变的条件下,仅改变土地利用数据和参数集,如表 2 的模拟情景。不变参数法即是在 2011—2018 年气象条件下,1995 年和 2015 年两期土地利用均采用参数集 Item2015;时变参数法也是相同的 2011—2018 年气象条件,1995 年和 2015 年土地利用分别应用与之相匹配的模型参数集 Item1995 和 Item2015。

表 2 模拟情景设置

Tab. 2 Simulation scenarios

方法	气象数据时长	土地利用数据时间	参数集
不变参数	2011—2018 年	2015 年	Item2015
		1995 年	Item1995
时变参数	2011—2018 年	2015 年	Item2015
		1995 年	Item1995

2.2.2 径流特征指标

为比较 SWAT 模型不变参数和时变参数法模拟的差异,选取年、月平均流量,以及日尺度反映洪水径流特征的年最大 1 d 流量和年连续最大 5 d 流量、反映枯水径流特征的年最小 1 d 流量和年连续最小 7 d 流量四种径流特征指标。已有研究表明,这些不同时间尺度的径流特征指标,适用于分析本区域的水文特征和土地利用变化的影响^[13]。

2.2.3 径流变化率

采用径流变化率来反映由时变参数法和不变参数法模拟土地利用变化径流效应的差异。径流变化量为 2015 年土地利用条件下模拟的径流量减去 1995 年土地利用条件下模拟的径流量,径流变化率为径流变化量与 1995 年土地利用条件下模拟径流量的比值。

3 结果分析

3.1 土地利用变化对模型参数的影响

3.1.1 敏感性参数

两期土地利用条件下参数敏感性分析结果如表 3。根据敏感度分级阈值,当敏感度 S_i 小于 0.05 时,即认为参数不敏感,因此表中只列出了两期土地利用条件下的极敏感、敏感、一般敏感参数,共有 10 个。由表 3 可知,个别参数的排序略有差异,但两期土地利用模型筛选出的敏感参数是相

同的,即径流模拟参数的敏感性基本不受土地利用变化的影响。

3.1.2 参数的率定与验证

将表 3 中的 10 个参数作为模型的率定参数,1995、2015 年两期土地利用模型自动率定所得到的参数集如表 4,表中参数取值变化率为 Item2015 的参数取值减去 Item1995 的参数取值再除以取值范围。由表 4 可知,9 个可变参数中,变化率大于 10% 的有 5 个,最大达 -43.79%,表明土地利用变化对参数取值的影响比较大。

模型相应的率定和验证结果如表 5。由表 5 可知,两期土地利用条件下的年径流模拟 NS 和 R^2 大于 0.80;月径流模拟 NS 和 R^2 大于 0.90;日径流 NS 和 R^2 大于 0.66, $|PBIAS|$ 均小于 3%。结合模型评级标准^[29],两期土地利用模型对山美水库流域径流过程的模拟满足要求,径流实测值和模拟值吻合好,可以合理反映流域不同时期、不同时间尺度的径流过程。

3.2 时变参数和不变参数法结果差异

3.2.1 年径流响应差异分析

图 2 为 2011—2018 年气象条件下,采用时变参数和不变参数法模拟的土地利用变化对径流的影响。径流变化率为 1995—2015 年土地利用变化所导致的径流变化程度。由图 2 可知,不变参数法径流变化率在 2012 年、2017 年、2018 年为负值,其余为正值,2011—2018 年平均变化率为 0.23%。时变

表 3 山美水库流域径流模拟参数敏感性分析结果

Tab. 3 Sensitivity analysis results for parameters of runoff simulation in Shanmei Reservoir basin

类别	敏感度 分级阈值	参数	参数描述	参数敏感度(S_i)	
				1995 年	2015 年
极敏感	$S_i \geq 1$	CN2	SCS 径流曲线数	1.93	3.47
		SURLAG	地表径流延滞系数	2.26	1.17
敏感	$0.20 \leq S_i < 1$	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.23	0.59
		CH_N2	主河道曼宁值	0.27	0.46
		SOL_AWC	土壤有效含水量	0.33	0.41
一般敏感	$0.05 \leq S_i < 0.20$	CANMX	最大冠层截留量	0.08	0.20
		SOL_K	土壤饱和导水率	0.15	0.17
		GW_DELAY	地下水迟滞时间	0.05	0.10
		ALPHA_BF	基流 α 因子	0.11	0.09
		GWQMN	初始水深*	0.05	0.05

注:初始水深为回归流产生时需要浅层蓄水水中的初始水深。

参数法所求的径流变化率除 2018 年外均为正值,时变参数法的年平均变化率为 1.22%。表明在相同气象条件下,山美水库流域 1995—2015 年的土地利用变化使得年径流增加,且时变参数法的径流变化量总体大于不变参数法。

表 4 参数取值范围及两期土地利用模型率定参数集

Tab.4 Ranges of parameter value and results of calibrated parameters for two phases of land use

参数	取值范围	Item 1995	Item 2015	参数取值 变化率/%
r__CN2. mgt	-0.5 ~ 0.5	0.18	0.18	0.00
v__SURLAG. bsn	0.05 ~ 24	0.08	0.09	0.04
v__ESCO. hru	0 ~ 1	0.12	0.10	-2.00
v__CH_N2. rte	0 ~ 1	0.41	0.40	-1.00
r__SOL_AWC. sol	-0.5 ~ 0.5	0.12	0.29	17.00
v__CANMX. hru	0 ~ 100	33.00	24.05	-8.95
r__SOL_K. sol	-0.5 ~ 0.5	0.30	0.15	-15.00
v__GW_DELAY. gw	0 ~ 500	281.46	62.49	-43.79
v__ALPHA_BF. gw	0 ~ 1	0.29	0.01	-28.00
v__GWQMN. gw	0 ~ 500	452.00	385.00	-13.40

注:参数名之前的 r、v 表示参数的修改方式,r 表示为参数原始值乘以 1 与参数率定值之和,v 表示用参数率定值直接替代参数的原始值。

3.2.2 月径流响应差异分析

将两种方法模拟的 2011—2018 年月径流量进行逐月平均,得出土地利用变化引起的逐月径流变化率,如图 3。与 1995 年土地利用相比,2015 年土地利用条件下,4 月至 9 月丰水季节的月径流量增加,10 月至次年 3 月枯水季节的月径流量总体减

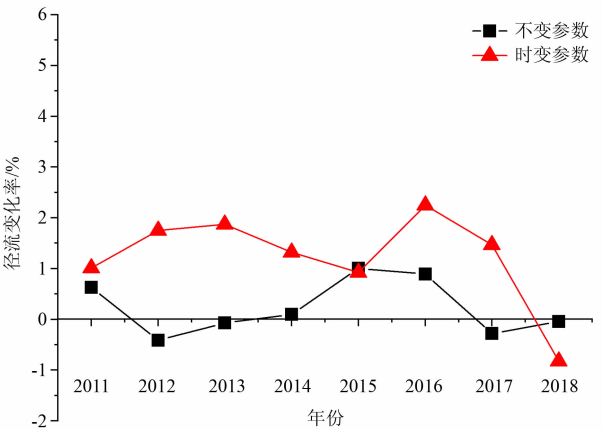


图 2 年径流响应差异

Fig.2 Difference of annual runoff response to land use change

小,月径流变化率多为负值。即在相同气象条件下,山美水库流域 1995—2015 年土地利用变化对径流的影响具有季节性,丰水季节径流量总体增加,枯水季节径流量总体减少。将两种方法在 4 月至 9 月丰水季节和 10 月至次年 3 月枯水季节的月径流量变化分开统计。丰水季节不变参数法的平均变化率为 0.83%,时变参数法的平均变化率为 2.19%,时变参数法所求得的径流变化率在丰水季节明显大于不变参数法;枯水季节不变参数法的平均变化率为 -1.01%,时变参数法的平均变化率为 -0.39%,不变参数法的径流变化率绝对值在枯水季节大于时变参数法。这表明不变参数法运用同一套参数集分析土地利用变化的径流响应,会低估丰水季节的径流变化,高估枯水季节的变化。

3.2.3 日径流响应差异分析

3.2.3.1 洪水径流

图 4 为 2011—2018 年气象条件下,山美水库流

表 5 两期土地利用模型各时间尺度径流模拟效果

Tab.5 Simulation results of runoff with each time scale for two phases of land use

时间尺度	模型分期	1995 年土地利用模型 (Item1995)			2015 年土地利用模型 (Item2015)		
		NS	R ²	PBIAS/%	NS	R ²	PBIAS/%
年	率定期	0.83	0.91	-0.70	0.94	0.95	-1.00
	验证期	0.98	0.99	-1.10	0.86	0.97	-2.60
月	率定期	0.90	0.94	-1.20	0.95	0.97	-0.90
	验证期	0.97	0.98	-1.00	0.92	0.92	-2.70
日	率定期	0.68	0.7	-1.20	0.73	0.77	-0.90
	验证期	0.75	0.75	-1.10	0.66	0.66	-2.60

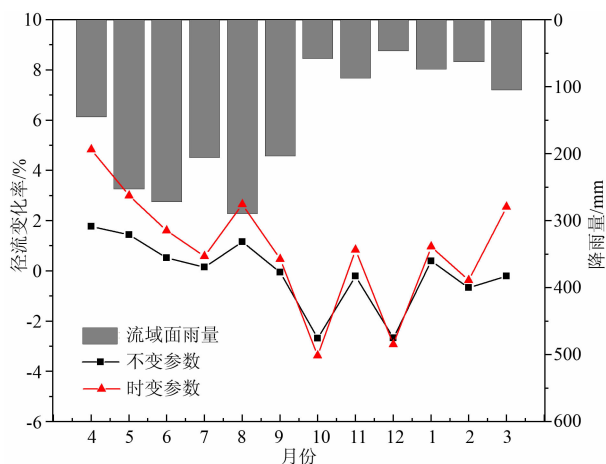


图3 月径流响应差异

Fig. 3 Difference of monthly runoff response to land use change

域土地利用变化对年最大1 d 和年连续最大5 d 洪水径流的影响。年最大1 d 和年连续最大5 d 的径

流变化率均为正值,这表明在相同气象条件下,2015 年土地利用的洪水径流要大于 1995 年土地利用。结果也表明,时变参数法的径流变化率要大于不变参数法,即不变参数法低估了土地利用变化对洪水径流的影响。

3.2.3.2 枯水径流

图 5 为不变参数、时变参数两种方法模拟的土地利用变化对日枯水径流的影响。在相同气象条件下,相比于 1995 年土地利用,2015 年土地利用下的枯水径流,除了 2011 和 2016 年的年最小 1 d 和年连续最小 7 d 枯水径流增加,其他年份均为负值,总体变小。时变参数法模拟的年最小 1 d 枯水径流变化率均值为 -2.72% ,不变参数法为 -5.07% ;前者模拟的年连续最小 7 d 枯水径流变化率均值为 -3.32% ,后者为 -6.21% 。同样表明不变参数法高估了 1995—2015 年土地利用变化对枯水径流的影响。

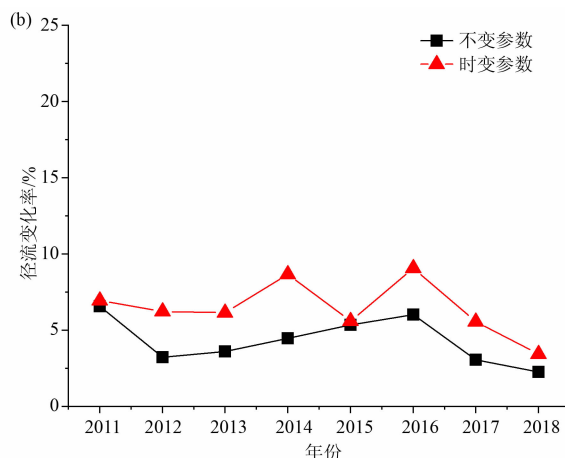
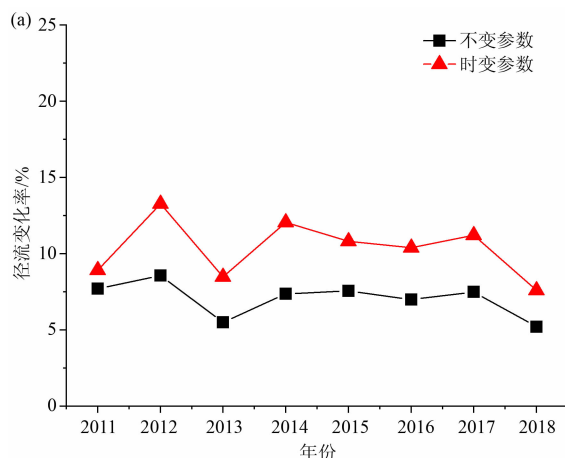


图4 洪水径流响应差异: (a) 年最大1 d; (b) 年连续最大5 d;

Fig. 4 Difference in response of flood runoff to land use change:

(a) annual maximum runoff of 1 day; (b) annual maximum runoff of continuous 5 days

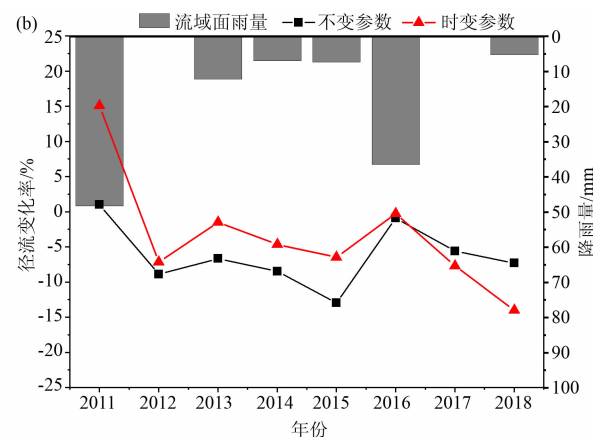
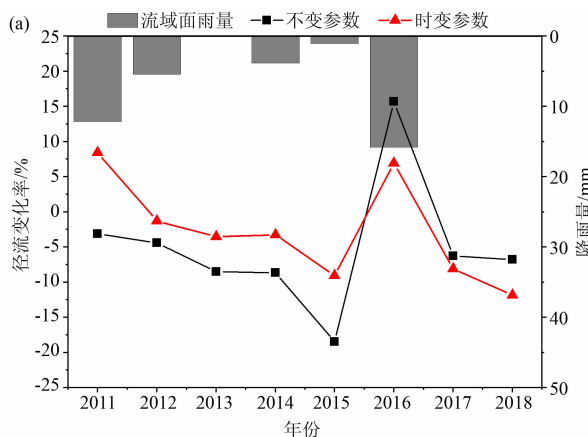


图5 枯水径流响应差异: (a) 年最小1 d; (b) 年连续最小7 d

Fig. 5 Difference in response of low flow runoff to land use change:

(a) annual minimum runoff of 1 day; (b) annual minimum runoff of continuous 7 days

4 讨论

4.1 土地利用变化对参数的影响

上述结果表明,土地利用变化对模型参数敏感性影响很小,但参数取值差异较大。本研究参数取值的变化与 Blue Nile River 流域^[30]和 Gummara 流域^[19]的研究结果基本相似。这两个流域的土地利用变化表现为森林面积的大幅减少和旱地面积的增加,则与此相关的参数最大冠层截流量 CANMX 与土壤蒸发参数 ESCO 随森林面积的减少其取值降低。从山美水库流域来看,1995—2015 年间,林地、园地、建设用地是变化最为明显的地类,主要表现为林地的减少,相应地,建设用地和园地的增加^[20]。面积占比最高的林地由 723.34 km² 减少到 634.52 km²,园地面积由 93.34 km² 增加到 155.55 km²,建设用地面积由 41.92 km² 增加到 64.01 km²,其他地类如草地、水域、耕地等变化不明显。从表 4 参数变化看,ESCO 是土壤蒸发参数,该值越小,蒸发量越大。1995—2015 年建设用地、园地增长,土壤表层的蒸发量增长,该值相应变小。CANMX 为最大冠层截流量,是叶面指数的函数,该参数值越大则冠层截流量越大^[31]。1995—2015 年间,林地面积减少、建设用地增加,叶面截流量和植被郁闭度下降,导致冠层截流量降低,该值也相应变小。

Blue Nile River 流域^[30]和 Gummara 流域^[19]的研究还表明,反映地下水渗漏以及补给的参数呈下降趋势,随土地利用的变化地下水量和基流减少,这与表 4 中 GW_DELAY、ALPHA_BF 参数值的降低导

致地下水流量减少的结果是一致的。GW_DELAY 是降水补给地下水的延滞时间^[32],山美水库流域 1995 年林地面积显著大于 2015 年,林地发达的根系使其对水源涵养作用强,这导致 1995 年土地利用下 GW_DELAY 大于 2015 年。ALPHA_BF 为基流 α 因子,该参数值越大,则地下径流量越大^[33]。1995 年土地利用条件下该参数值也更高。SOL_K 表示饱和渗透系数,该参数反映土壤传输水分的能力,其入渗性能越大,该参数值越大^[34]。1995—2015 年该参数值减小,这与林地的入渗要大于园地、草地、建设用地有关。

综上所述,土地利用变化对部分模型参数取值影响较大,其中 CANMX、ESCO、GW_DELAY、SOL_K 和 ALPHA_BF 等参数,随林地面积减少而减小的变化趋势,可以在其他流域参考应用。同时需要指出,考虑到流域水文过程的复杂、SWAT 模型反映水文过程能力的局限,以及模型异参同效、过参化等问题尚难以评估,SWAT 模型参数随土地利用变化的规律还有待于进一步研究。

4.2 土地利用变化径流效应的合理性分析

综合上述结果,可以得到 2011—2018 年气象条件下,1995—2015 年间山美水库流域土地利用变化导致的不同时间尺度径流的变化(表 6)。两种方法的结果都表明:土地利用变化影响下,年径流变化率较小;月径流变化幅度略大于年径流,丰水期径流增加,枯水期径流减少。日尺度的洪水径流和枯水径流则有显著的增加和减少。该结果与多数研究揭示的森林蓄丰补枯作用、林地对雨洪风险的影响一致^[35-36]。

表 6 两种方法的土地利用变化径流效应模拟结果比较

Tab. 6 Comparison in simulation results of the effect of land use change on runoff between the two methods

时间尺度	不变参数法		时变参数法		变化率差值/%
	径流变化范围/%	平均值/%	径流变化范围/%	平均值/%	
年	-0.41 ~ 0.89	0.23	-0.82 ~ 1.87	1.22	0.99
月	-2.68 ~ 1.77	0.25	-3.37 ~ 4.83	1.29	1.04
丰水季节	-0.06 ~ 1.77	0.83	0.48 ~ 4.83	2.19	1.36
枯水季节	-2.38 ~ 0.4	-1.01	-3.37 ~ 0.96	-0.39	0.62
年最大 1 d	5.20 ~ 8.56	7.05	7.61 ~ 13.28	10.35	3.30
年连续最大 5 d	2.26 ~ 6.58	4.32	3.44 ~ 8.68	6.47	2.15
年最小 1 d	-18.49 ~ 15.71	-5.07	-11.87 ~ 8.43	-2.72	2.35
年连续最小 7 d	-12.94 ~ 1.04	-6.21	-14.00 ~ 15.11	-3.32	2.89

表 6 结果还表明,两种方法的模拟结果差异较大。由于两种参数集反映了各自土地利用条件下的产流过程。2015 年土地利用下基流小、冠层截留量小、地表径流量大;则参数集 Item2015 在丰水时期就表现较强的产流能力,而在枯水时期表现较弱的产流能力。这导致应用不变参数法将 Item2015 用于 1995 年土地利用时,就会增强 1995 年土地利用条件下的产流能力,低估土地利用变化对年径流、丰水季节径流以及日洪水径流的影响;也会进一步使两期土地利用下的枯水径流差异变大,从而高估土地利用变化对枯水径流的影响。

总体上看,采用时变参数法结果较为合理。但仍需要进一步分析两种方法模拟结果差异较大的原因。

5 结论

以山美水库流域为研究区,分析了模型参数 CN2 不变条件下,SWAT 模型径流模拟参数随土地利用变化而变化的规律,以及时变参数和不变参数法对土地利用变化径流效应模拟的差异,得到以下结论:

(1)两期土地利用模型年、月、日尺度径流模拟均符合建模要求,年径流模拟 NS 和 R^2 大于 0.80;月径流模拟 NS 和 R^2 大于 0.90;日径流 NS 和 R^2 大于 0.66,偏差百分比均小于 3%。

(2)土地利用变化对模型参数敏感性影响很小,但对参数取值影响较大,模型参数取值变化规律与土地利用变化方式密切相关。由于该流域林地大幅减少、建设用地面积增加,导致冠层截留、土壤入渗、产流能力相应变化,模型参数 ESCO、CANMX、SOL_K、GW_DELAY、ALPHA_BF 取值减小。

(3)时变参数和不变参数法对土地利用变化径流效应模拟存在较大差异。总体上看,采用时变参数法结果较为合理。在相同气象条件下,不变参数法低估了 1995—2015 年土地利用变化对年、丰水径流的影响,高估了对枯水径流的影响。应进一步分析产生这种差异的原因,完善土地利用变化径流效应的模拟方法。

参考文献 (References)

[1] SHARMA P J, PATEL P L, JOTHIPRAKASH V. Impact of rainfall

variability and anthropogenic activities on streamflow changes and water stress conditions across Tapi Basin in India [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **687**: 885 – 897. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.097

- [2] 赵琳林, 孙美平, 孙皓, 等. 天山北坡奎屯河流域径流模拟及对气候变化的敏感性分析[J]. *山地学报*, 2018, **36**(5): 722 – 730. [ZHAO Linlin, SUN Meiping, SUN Hao, et al. Discharge simulation and sensitivity to climate change of the Kuytun River Basin on the north slope of Tianshan Mountains, China [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(5): 722 – 730] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000368
- [3] XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 8254. DOI: 10.1038/s41598-017-09215-z
- [4] 陆文, 唐家良, 章熙锋, 等. 山地流域水文模拟研究进展与展望[J]. *山地学报*, 2020, **38**(1): 50 – 61. [LU Wen, TANG Jialiang, ZHANG Xifeng, et al. Hydrological simulation in mountainous region: Present state and perspectives [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(1): 50 – 61] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000490
- [5] MEKONNEN D F, DUAN Zheng, RIENTJES T, et al. Analysis of combined and isolated effects of land-use and land-cover changes and climate change on the upper Blue Nile River basin's streamflow [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, **22**(12): 6187 – 6207. DOI: 10.5194/hess-22-6187-2018
- [6] 胡巍巍, 郑明国. 1970 年以来赣江流域水沙变化及归因分析[J]. *山地学报*, 2021, **39**(6): 821 – 829. [HU Weiwei, ZHENG Mingguo. Water and sediment changes in the Ganjiang River basin of China since 1970 and its attribution analysis [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(6): 821 – 829] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000641
- [7] 毛熙彦, 蒙古军. 土地利用变化的水文效应研究进展[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, **49**(5): 928 – 936. [MAO Xiyan, MENG Jijun. Impacts of land use changes on water resources: A literature review [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, **49**(5): 928 – 936] DOI: 10.13209/j.0479-8023.2013.124
- [8] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. *水科学进展*, 2014, **25**(1): 21 – 27. [SHI Xiaoliang, YANG Zhiyong, YAN Denghua, et al. On hydrological response to land-use /cover change in Luanhe River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(1): 21 – 27] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.01.005
- [9] 章燕喃. 密云水库流域近三十年径流变化及归因分析[D]. 北京: 清华大学, 2014: 2 – 4. [ZHANG Yannan. Attribution analysis on the change of runoff in the upstream of Miyun Reservoir during last 30 years [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 2 –

- 4] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000490
- [10] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报, 2009, **64**(4): 456-468. [TANG Huajun, WU Wenbin, YANG Peng, et al. Recent progresses of Land Use and Land Cover Change (LUCC) models [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, **64**(4): 456-468] DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.04.008
- [11] 王林, 陈兴伟. 退化山地生态系统植被恢复水文效应的 SWAT 模拟[J]. 山地学报, 2008, **26**(1): 71-75. [WANG Lin, CHEN Xingwei. Simulation of hydrological effects on vegetation restoration of degraded mountain ecosystem with SWAT model [J]. Mountain Research, 2008, **26**(1): 71-75] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2008.01.012
- [12] 肖森元, 杨广, 何新林, 等. 玛纳斯河流域 MIKE SHE 水文模型率定[J]. 山地学报, 2021, **39**(1): 1-9. [XIAO Senyuan, YANG Guang, HE Xinlin, et al. Calibration of hydrological modelling by MIKE SHE for the Manas River Basin, Xinjiang, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(1): 1-9] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000571
- [13] LIN Bingqing, CHEN Xingwei, YAO Huaxia, et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model [J]. Ecological Indicators, 2015, **58**: 55-63. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.05.031
- [14] MCGINN A J, WAGNER P D, HTIKE H, et al. Twenty years of change: Land and water resources in the Chindwin catchment, Myanmar between 1999 and 2019 [J]. Science of the Total Environment, 2021, **798**(1): 148766. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148766
- [15] SAMAL D R, GEDAM S. Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the Upper Bhima river basin, India [J]. Environmental Challenges, 2021, **5**: 100251. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100251
- [16] 王博威, 李建柱, 冯平. 土地利用变化对潘家口水库控制流域径流影响[J]. 水利学报, 2018, **49**(3): 379-386. [WANG BOWEI, LI Jianzhu, FENG Ping. Impacts of land use change on runoff in Panjiakou Reservoir watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(3): 379-386] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170962
- [17] AGHSAEI H, DINAN N M, MORIDI A, et al. Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran [J]. Science of the Total Environment, 2020, **712**: 136449. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136449
- [18] LI Yunyun, CHANG Jianxia, LUO Lifeng, et al. Spatiotemporal impacts of land use land cover changes on hydrology from the mechanism perspective using SWAT model with time-varying parameters [J]. Hydrology Research, 2019, **50**(1/2): 244-261. DOI: 10.2166/nh.2018.006
- [19] TEKLAY A, DILE Y T, SETEGN S G, et al. Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia [J]. Catena, 2019, **172**: 65-75. DOI: 10.1016/j.catena.2018.08.013
- [20] 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[J]. 生态学报, 2021, **41**(16): 6373-6383. [GUO Wei, CHEN Xingwei, LIN Bingqing. Response of SWAT model parameters to land use change and its effects on the simulation of runoff with different time scales [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(16): 6373-6383] DOI: 10.5846/stxb202007141834
- [21] 李苏. 气候变化和人类活动对流域径流的影响研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021: 96-98. [LI Su. Study on the impact of climate change and human activities on Watershed Runoff [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021: 96-98] DOI: 10.27104/d.cnki.ghbjy.2021.000405
- [22] MISHRA S K, PANDEY A, SINGH V P. Special issue on Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, **17**(11): 1157-1157. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000694
- [23] Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. National engineering handbook; Part 630 hydrology [M]. Washington: Government Printing Office, 2004: 9.1-9.14.
- [24] Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. National engineering handbook; Part 630 hydrology [M]. Washington: Government Printing Office, 2009: 7.1-7.15.
- [25] 李润奎, 朱阿兴, 陈腊娇, 等. SCS-CN 模型中土壤参数的作用机制研究[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(10): 1778-1787. [LI Runkui, ZHU Axing, CHEN Lajiao, et al. Effects of soil parameters in SCS-CN runoff model [J]. Journal of Natural Resource, 2013, **28**(10): 1778-1787] DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.10.012
- [26] 杨柳. 泉州山美水库集水区土地利用与覆被变化的水文响应[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 14-16. [YANG Liu. Simulation of the hydrologic response to land-use and land-cover change in Shanmei reservoir catchment of Quanzhou [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 14-16]
- [27] 吴思佳, 林金煌, 陈文惠, 等. 2000 年以来 4 个时期闽三角城市群中的湿地格局及变化[J]. 湿地科学, 2018, **16**(6): 717-722. [WU Sijia, LIN Jinhuang, CHEN Wenhui, et al. Patterns and changes of wetlands in the urban agglomeration of Min Delta in 2000, 2005, 2010 and 2015 [J]. Wetland Science, 2018, **16**(6): 717-722] DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2018.06.004
- [28] 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**(1-4):

- 10–23. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.008
- [29] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, **50** (3): 855–900. DOI: 10.13031/2013.23153
- [30] GEBREMICAEL T G, MOHAMED Y A, BETRIE G D, et al. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: A combined analysis of statistical tests, physically-based models and landuse maps [J]. Journal of Hydrology, 2013, **482**: 57–68. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.023
- [31] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J]. 自然资源学报, 2013, **28** (11): 1988–1999. [LIN Bingqing, CHEN Ying, CHEN Xingwei. A study on regional difference of hydrological parameters of SWAT model [J]. Journal of Natural Resource, 2013, **28** (11): 1988–1999] DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.11.015
- [32] 王政友. 降水入渗补给地下水滞后时间分析探讨[J]. 水文, 2011, **31** (2): 42–45. [WANG Zhengyou. Discussion on lag time of rainfall penetration recharge to groundwater [J]. Hydrology, 2011, **31** (2): 42–45] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.02.010
- [33] 陈利群, 刘昌明, 李发东. 基流研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, **25** (1): 1–15. [CHEN Liqun, LIU Changming, LI Fadong. Reviews on base flow researches [J]. Progress in Geography, 2006, **25** (1): 1–15] DOI: 10.3969/j.issn.1007-6301.2006.01.001
- [34] 梁向锋, 赵世伟, 张杨, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和和导水率的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (2): 636–642. [LIANG Xiangfeng, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling forest area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29** (2): 636–642] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.011
- [35] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析[J]. 地理学报, 2020, **75** (5): 1065–1078. [LIN Feng, CHEN Xingwei, YAO Wenyi, et al. Multi-time scale analysis of water conservation in a discontinuous forest watershed based on SWAT model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75** (5): 1065–1078] DOI: 10.11821/dlxb202005013
- [36] 吕英烁, 王瑶函, 郑曦. 基于 SWAT 模型的北京平原区森林景观格局对雨洪减缓的影响研究[J]. 生态学报, 2021, **41** (10): 4036–4051. [LYU Yingshuo, WANG Yaohan, ZHENG Xi. Influence of forest landscape pattern on flood mitigation in Beijing Plain based on SWAT model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41** (10): 4036–4051] DOI: 10.5846/stxb202005281379

Comparison of Runoff Effects Incurred by Land Use Changes Based on Time-Varying Method and Invariant Parameter Methods of SWAT

YAN Congcong¹, CHEN Xingwei^{1, 2, 3*}, GUO Wei¹, CHEN Ying^{1,2}, LIU Meibing^{1,2}

(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: Both the time-varying parameter method and the invariant parameter method of SWAT model have wide applicability in hydrology to evaluating the effects of runoff incurred by land use changes due to engineered activities over a catchment; however, there was a lack of careful examination of the two methods for the differences in simulating environ-hydrological consequences.

In this study, it conducted a case study of the Shanmei Reservoir basin in the southeast coast of China. Two SWAT models of land use of 1995 and 2015 were constructed by separately. Based on sensitivity analysis of parameters and automatic calibration method, it obtained two optimal parameter sets for the two models to runoff simulation. The effects of land use change on runoff were then simulated with the invariant and time-varying parameter methods respectively. Results are as follows: (1) The model with the calibrated optimal parameter sets well simulated the annual, monthly and daily scale runoff processes in the Shanmei Reservoir basin under two-phase

land use conditions. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients were bigger than 0.83, 0.90 and 0.66 for annual, monthly and daily runoff respectively. (2) Land use change had little effect on the sensitivity of model parameters. The 10 most sensitive parameters were the same for the two land use conditions; just differed slightly in the ranking of the sensitivities, however, the parameter values varied greatly for the two land use conditions. The variation of model parameters was closely related to the way of land use change. (3) There were obvious differences in the simulation of the effects of land use changes on runoff between the time-varying parameter method and the invariant parameter method. Under the same meteorological conditions, the invariant parameter method underestimated the effect of land use change on annual and wet season runoff and overestimated the effect in dry season. For example, the average increase in annual runoff was 1.22% for the time-varying parameter method and 0.23% for the invariant parameter method; the average decrease in annual minimum 1 d flow was 2.72% for the time-varying parameter method and 5.07% for the invariant parameter method. The simulation result with time-varying parameter method is more reasonable and it suggests the modelling of the impact of land use change on runoff using SWAT should consider the change of model parameters with the change of land use. The research improves the simulation method on the impact of land use change on runoff using SWAT model and provides a reference for water resource management.

Key words: land use change; runoff; SWAT model; time-varying parameter; invariant parameter

(责任编辑 钟雨倩)