

DOI: 10.5846/stxb201811302610

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): - .
Dou X D, Huang W, Yi Q, Liu X Z, Zuo H T, Li M, Li Z L. Impacts of LUCC and climate change on runoff in Lancang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

LUCC 及气候变化对澜沧江流域径流的影响

窦小东¹, 黄 玮^{2,*}, 易 琦³, 刘晓舟¹, 左慧婷⁴, 李 蒙², 李忠良⁴

1 云南省气象服务中心, 昆明 650034

2 云南省气候中心, 昆明 650034

3 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650504

4 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044

摘要:运用 SWAT 模型, 通过设置不同情景, 定量分析了澜沧江流域土地利用与土地覆被变化(Land Use and Land Cover Change, 简称 LUCC)和气候变化对径流的影响, 并结合 RCP4.5、RCP8.5 两种排放情景对流域未来径流的变化进行预估。结果表明: SWAT 模型在澜沧江流域径流模拟中具有很好的适用性, 率定期和验证期的模型参数 R^2 分别达到 0.80、0.74, Ens 分别达到 0.80、0.73; 从土地利用变化方面考虑, 流域内的农业用地转化为林地或草地, 均会导致径流量的减少, 而林地转化为草地则会引起径流量的增加, 农业用地、林地、草地三者对径流增加贡献顺序为农业用地>草地>林地, 从气候变化方面考虑, 流域内的径流量与降雨量成正比, 与气温成反比; 2006—2015 年间澜沧江流域气候变化引起的月均径流减少幅度强于 LUCC 引起的月均径流增加幅度, 径流变化由气候变化主导; 在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下, 2021—2050 年间澜沧江流域的径流均呈增加趋势, 这与 1971—2015 年间流域实测径流的变化趋势相反。

关键词: SWAT 模型; 澜沧江流域; LUCC; 气候变化; 径流模拟

Impacts of LUCC and climate change on runoff in Lancang River Basin

DOU Xiaodong¹, HUANG Wei^{2,*}, YI Qi³, LIU Xiaozhou¹, ZUO Huiting⁴, LI Meng², LI Zhongliang⁴

1 Yunnan Meteorological Service Center, Kunming 650034, China

2 Yunnan Provincial Climate Center, Kunming 650034, China

3 School of Resource Environment and Earth Science in Yunnan University, Kunming 650504, China

4 School of Remote Sensing & Geomatics Engineering in Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Using the SWAT (Soil and Water Assessment Tools) model, the impacts of LUCC (land use and land cover change) and climate change on runoff in Lancang River Basin were quantitatively analyzed by setting different scenarios. The future runoff changes were predicted with RCP4.5 and RCP8.5 emissions scenarios in Lancang River Basin. The results showed that the SWAT model had good applicability in runoff simulation of Lancang River Basin. The model parameters R^2 of calibration and validation periods were 0.80 and 0.74, respectively. The model parameters Ens of calibration and validation periods were 0.80 and 0.73, respectively. Considering the land use change, the conversion of farmland into woodland or grassland would reduce basin runoff, but the conversion of woodland into grassland would increase basin runoff. The contribution to basin runoff from big to small was farmland, grassland, and woodland. Regarding climate change, the basin runoff was proportional to rainfall, but inversely proportional to temperature. The reduction of monthly runoff caused by climate change was stronger than the increment caused by LUCC in Lancang River Basin from 2006 to 2015. Therefore,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761109;41765003); 中国气象局气候变化专项(CCSF201736)

收稿日期: 2018-11-30; 修订日期: 2019-04-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hweimao12@163.com

runoff change was dominated by climate change. The runoff in Lancang River Basin in both RCP4.5 and RCP8.5 emissions scenarios would increase from 2021 to 2050, which is contrary to the measured basin runoff from 1971 to 2015.

Key Words: SWAT model; Lancang River Basin; LUCC; climate change; runoff simulation

土地利用与土地覆被变化(LUCC)和气候变化是影响流域水资源变化的最直接因素,也是流域水资源变化研究的热点^[1-5]。LUCC 通过下垫面覆盖物的改变,影响冠层截留、地表蒸散发、下渗、土壤水分含量等来改变流域的水资源状况^[6-9],气候变化则通过改变大气降水的时空分布、地表蒸发等来影响流域的径流量^[10-11],其中通过气候模式数据驱动水文模型是气候变化水文响应研究的一个新方向,相对于通过主观假设流域内未来气温和降水的变化来研究其水文响应具有更好的科学性、合理性,是未来研究气候变化水文响应的主流和热点。澜沧江是沿岸居民的母亲河,流域上建有漫湾、大朝山、糯扎渡等 8 座梯级水电站^[12-13],是我国西电东送的重要支撑,其水资源状况时刻影响着沿岸居民的生产生活。因此,研究 LUCC 和气候变化对澜沧江流域水资源的影响,对当地政府和沿岸几千万居民具有重要的现实意义。

分布式水文模型在 LUCC 和气候变化对流域水资源影响的模拟研究方面已得到广泛应用^[14-16],其中,由美国农业部(USDA)下属的农业研究所(ARS)研制开发的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型能够利用 RS 和 GIS 提供的空间数据信息、属性数据信息,来模拟不同土地利用、土壤类型以及管理等条件下的大面积复杂下垫面流域的水量、水质和水沙迁移等^[17-20],其主要应用领域之一就是 LUCC 和气候变化的水文响应进行模拟分析^[21-22]。例如,祖拜代^[1],李帅^[2],郭军庭^[6]等分别利用 SWAT 模型研究了乌鲁木齐河上游、清水河、潮河流域的土地利用和气候变化对径流的影响,但利用气候模式数据驱动 SWAT 模型对流域未来的径流变化趋势进行预测却极少报道。SWAT 模型是否适用于澜沧江流域? LUCC 和气候变化对径流的影响机理是什么? LUCC 和气候变化对澜沧江流域径流的具体影响是什么? 不同气候情景下,未来澜沧江流域径流是如何变化的? 这些问题并不清楚。因此,本研究结合 2006、2015 年土地利用数据和近 50 年气象观测数据以及 RCP4.5、RCP8.5 气候排放情景数据,通过设置不同的情景,分别驱动 SWAT 模型对澜沧江流域径流进行模拟、预测,力图回答上述问题,以期能为流域水资源规划管理、生态环境保护、水电安全生产等提供必要的科学依据。同时,本研究对驱动 SWAT 模型的气候模式数据的处理方法也可对相关研究者提供参考。

1 研究区概况

澜沧江是湄公河上游在中国境内河段的名称,其发源于中国青海省唐古拉山东北部杂多县,全长约 2153km,流域面积约 $17.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国西南地区的大河之一^[23]。澜沧江流经青海、西藏和云南三省,在云南省西双版纳傣族自治州勐腊县出境后称为湄公河(Mekong River),澜沧江及其下游的湄公河流域共穿越 6 个国家,纵贯 13 个纬度,最大相对高差近 6000m(图 1),跨 6 种气候带,是一个特殊的环境变化敏感区,它在地理、气候、水文、生态学等方面都具有重要的科学研究价值^[24-26]。澜沧江流域附近共建有县级气象站点 43 个

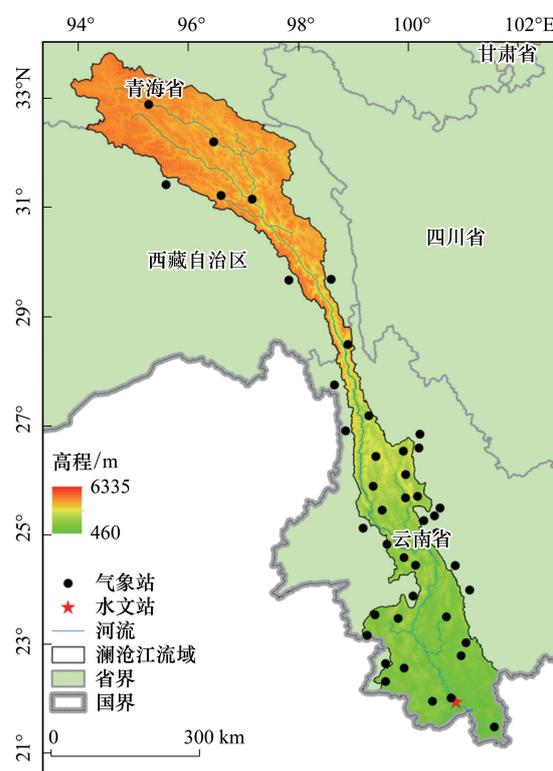


图 1 澜沧江流域示意图

Fig.1 Sketch map of Lancang River Basin

(图 1)。根据联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 构建的 HWSD (Harmonized World Soil Database) 土壤数据库, 流域内主要土壤类型有永冻薄层土 (Gelic Leptosols)、简育高活性淋溶土 (Haplic Luvisols)、松软薄层土 (Mollic Leptosols) 等共 52 种。根据 SWAT 模型要求, 将流域内土地利用类型划分为农业用地、林地、草地、城镇用地、水体、未利用地、湿地共 7 种 (图 2, 表 1)。

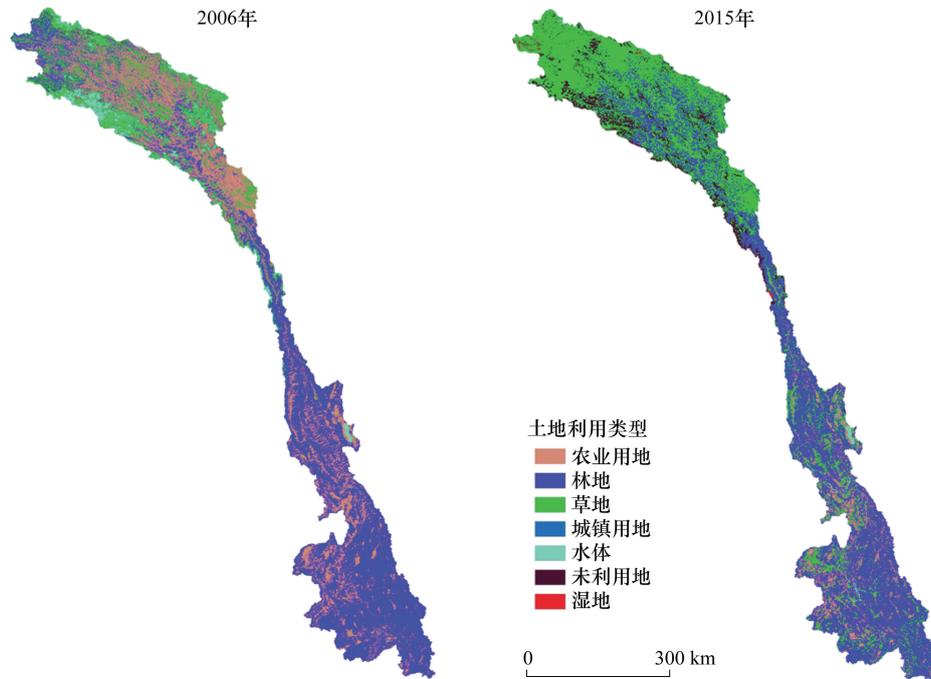


图 2 澜沧江流域 2006 (a)、2015 (b) 年土地利用类型图

Fig.2 Land use map of Lancang River Basin in 2006 (a) and 2015 (b)

表 1 2006 年、2015 年澜沧江流域土地利用面积比例

Table1 Land use percentage of Lancang River Basin in 2006 and 2015

年 Year	面积比例 Area percentage/%						
	农业用地 Agricultural land	林地 Forest land	草地 Grassland	城镇用地 Urban areas	水体 Water body	未利用地 Unused land	湿地 Wetland
2006	32.90	44.88	18.02	0.04	3.77	0.38	0.01
2015	17.09	35.82	45.84	0.34	0.39	0.33	0.19
变化 Change	-15.81	-9.06	27.82	0.30	-3.38	-0.05	0.18

2 数据与方法

2.1 基础数据

建立 SWAT 模型所需的基础数据包括 DEM 数据、土地利用类型数据、土壤类型数据、气象数据、水文数据 (表 2)。

2.2 模型的建立及参数率定与验证

本研究采用 SWAT 模型, 利用 DEM 进行澜沧江流域及其子流域划分、河网生成, 再结合土地利用栅格数据、土壤栅格数据, 划分各子流域内的水文响应单元, 并根据收集的土壤数据、气象数据分别建立土壤属性数据库、气象属性数据库, 进而建立澜沧江流域的 SWAT 模型 (1966—1970 年为模型预热期, 1971—1984 年为模型参数率定期, 1985—1997 年为模型参数验证期, 1998—2015 年为模型不同情景对比期)。

表 2 SWAT 模型基础数据列表

Table 2 List of basic data for SWAT model

数据类型 Data types	数据描述 Data description	数据来源 Data source	处理方法 Method
DEM Digital elevation model	90m * 90m	国际科学数据 服务平台	Arcgis 裁剪、投影变换
土地利用栅格数据 Land use raster data	2006 年欧空局土地利用栅格数据; 2015 年清华大学土地利用栅格数据	欧洲太空局; 清华大学	Arcgis 裁剪、重分类、投影变换
土壤栅格数据 Soil raster data	HWSO 数据库土壤栅格数据	HWSO 土壤数据库	Arcgis 裁剪、投影变换
气象数据 Meteorological data	1966—2015 年逐日气象数据;RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,2016—2050 年 逐日气象数据	云南省气象局	结合 SWATWeather 建立天气发生器数 据库;建立 SWAT 模型输入文件
水文数据 Hydrological data	1971—2015 年逐月径流数据	云南省水文局	按 SWAT_CUP 实测水文数据输入格式 处理
土壤属性数据 Soil attribution data	粘土、壤土、沙土和砾石的土层属性; 土壤水文分组、土壤容重、饱和水力 传导系数、土壤侵蚀因子等	HWSO 土壤数据库	查询 HWSO_DATA 数据表,并结合土壤 水文特性软件 SPAW 计算得到

利用 SWAT_CUP,结合允景洪水文站 1971—1997 年逐月径流观测数据,对与径流量有关的参数进行重复率定和验证,利用决定系数 R^2 (公式 1)与纳什效率系数 Ens (公式 2)^[2,27] 检验模型是否通过验证,直到模拟结果通过检验为止。

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{avg})(Q_{p,i} - Q_{pavg})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{pavg})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (1)$$

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

式中, $Q_{o,i}$ 为实测流量值, $Q_{p,i}$ 为模拟流量值, Q_{avg} 为实测流量平均值, Q_{pavg} 为模拟流量平均值。 R^2 与 Ens 均在 0—1 之间变动,且均越接近于 1 模拟精度越高。研究表明^[1-2,16]; $R^2 > 0.50$ 即为模拟值与实测值的相关程度符合标准, $R^2 > 0.70$ 模拟比较准确, $R^2 = 1$ 表明完全吻合; $1.00 \geq Ens > 0.75$ 模拟结果优秀, $0.75 \geq Ens > 0.65$ 模拟结果良好, $0.65 \geq Ens > 0.50$ 模拟结果合格, $Ens \leq 0.50$ 模拟结果不合格。

2.3 情景设置

2.3.1 极端土地利用情景

通过研究不同土地利用类型相互转变对径流的影响,可揭示 LUCC 对径流的影响机理。为此,本研究采用极端假设的方法,即假设将某一土地利用类型全部转化为另一土地利用类型,然后模拟出流域的径流量,再根据模拟径流量相对基准径流量的变化情况,判断出这两种土地利用类型对流域产流的贡献顺序。鉴于澜沧江流域内主要土地利用类型为农业用地、林地、草地,且三者总和超过 95% 的实际情况(表 1),本研究以 2006 年土地利用数据和 1998—2006 年气象数据为基准,设置如下四种情景(表 3),以此研究农业用地、林地、草地相互转化时对流域径流的影响,进而得出三者对流域产流的贡献顺序。

2.3.2 调试好的本地化的 SWAT 对气候要素的敏感度分析

根据 IPCC 第五次评估报告,在未来可能的气候变化范围内设置如下情景(以情景 1 为基准期),以此研究不同气候要素对径流的影响:

情景 5:气温不变,设置降水增加 20%、10% 和减少 10%、20% 四种方案;

情景 6:降水不变,设置气温增加 1℃、2℃ 两种方案。

表 3 极端土地利用情景设置
Table 3 Extreme land use scenario setting

情景 Scenarios	土地利用数据 Land use data	气象数据 Meteorological data	情景 Scenarios	土地利用数据 Land use data	气象数据 Meteorological data
情景 1 Scenario 1	2006 年	1998—2006 年	情景 2 Scenario 2	将所有农业用地转为林地	1998—2006 年
情景 3 Scenario 3	将所有农业用地转为草地	1998—2006 年	情景 4 Scenario 4	将所有林地转为草地	1998—2006 年

2.3.3 LUCC 和气候变化综合情景

采用如下 3 种情景(表 4)分析 LUCC 和气候变化对流域径流的影响。同样以情景 1 为基准期,对比情景 7 可知 LUCC 对径流的影响;对比情景 8 可知气候变化对径流的影响;对比情景 9 可知 LUCC 和气候变化对径流的综合影响。

表 4 土地利用和气候变化综合情景设置
Table 4 Integrated land use and climate change scenarios

情景 Scenarios	土地利用数据 Land use data	气象数据 Meteorological data	情景 Scenarios	土地利用数据 Land use data
情景 1 Scenario 1	2006 年	1998—2006 年	情景 7 Scenario 7	2015 年
情景 8 Scenario 8	2006 年	2007—2015 年	情景 9 Scenario 9	2015 年

2.3.4 不同气候变化情景下澜沧江未来径流变化预估

预估气候情景数据采用全球气候模式比较计划第五阶段(CMIP5)的 EC-EARTH 全球模式驱动区域气候模式 RegCM4^[28],模拟预估的澜沧江流域 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景^[29]下 1981—2099 年逐日气象数据,模式分辨率为 25×25km。排放情景采用 IPCC AR5 使用的最新温室气体排放情景(典型浓度排放路径: Representative Concentration Pathways, RCPs),RCP8.5 为最高的温室气体排放情景,RCP4.5 为中间稳定路径,其实际变化与中国未来经济发展趋势较为一致,适合中国国情,符合政府对未来经济发展、应对气候变化的政策措施^[30]。

为了分析澜沧江流域径流变化特征,根据经纬度,采用 matlab 的双三次插值方法将预估数据插值到流域周边 43 个气象站点,并参照初征^[31]的订正方法对数据进行订正,以消除气候模式模拟结果存在的系统性误差,订正后流域年降水量均方根误差由 480mm 减小到 88.6mm;年平均气温均方根误差由 3.02℃ 减小为 0.02℃。

本研究使用订正后的 2016—2050 年逐日气象数据(2016—2020 作为模型预热期),在 RCP4.5 情景下,2021—2050 年间,澜沧江流域平均降雨量呈增加趋势,增加速度为 8.5mm/10a,平均气温增速为 0.29℃/10a;在 RCP8.5 情景下,平均降雨量也呈增加趋势,但增加速度更高,为 37.9mm/10a,平均气温增速为 0.35℃/10a,以此数据驱动 SWAT 模型预估澜沧江流域 2021—2050 年的径流变化。

3 结果与分析

利用 ARCGIS 加载整理好的 DEM 数据,结合实际河网数据,集水面积阈值设定为 300000 hm²,将澜沧江流域划分为 19 个子流域,载入重分类后的土地利用类型数据、土壤类型数据,坡度划分为 2 类,土地利用类型、土壤类型、坡度分级的阈值分别设置为 25%、20%、25%,最终将全流域划分为 49 个水文响应单元。

3.1 参数率定与验证结果

对与径流有关的 26 个参数^[32]进行率定,结果显示(表 5)26 个参数中对径流产生最为敏感的参数为土壤饱和导水系数(SOL_K)、河岸贮水的基流因子(ALPHA_BNK)、SCS 径流曲线系数(CN2)、最大冠层截留量(CANMX)、子流域平均坡长(SLSUBSN)、降雪气温(SFTMP),这说明流域径流主要受地表水与地下水转换、

最大冠层截留量、地形、气候条件影响。允景洪水文站参数率定与验证结果(图 3)显示,率定期参数 R^2 、 Ens 分别达到 0.80、0.80,验证期参数 R^2 、 Ens 分别达到 0.74、0.73,因此,SWAT 模型在澜沧江流域径流模拟中具有很好的适用性,可以用 SWAT 模型进行流域径流模拟。

表 5 澜沧江流域 SWAT 模型敏感性参数

Table 5 Sensitive Parameters of SWAT model in Lancang River Basin

参数名称 Parameter name	参数定义 Parameter definition	调参方法 Calibration method	取值范围 Value range	最佳值 Optimal value	敏感性排名 Sensitivity order
SOL_K	土壤饱和导水系数	r	(-1,195)	34.01	1
ALPHA_BNK	河岸贮水的基流因子	v	(0,1)	0.19	2
CN2	SCS 径流曲线系数	r	(-0.5,0.5)	-0.44	3
CANMX	最大冠层截留量	v	(0,100)	21.58	4
SLSUBBSN	子流域平均坡长	v	(10,150)	28.64	5
SFTMP	降雪气温	v	(-5,5)	2.73	6
SOL_Z	最大根系深度	r	(-1,10.5)	0.84	7
GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	v	(0.02,0.2)	0.03	8
SOL_ALB	潮湿土壤反照率	r	(-1,5)	-0.08	9
REVAPMN	深层地下水再蒸发系数	v	(0,1000)	132.39	10
ALPHA_BF	基流系数	v	(0,1)	0.15	11
SOL_AWC	土壤可利用有效水	r	(-1,8)	-0.94	12
SMFMN	12 月 21 日最小融雪度日因子	v	(0,10)	8.69	13
SURLAG	地表径流延迟时间	v	(1,24)	4.08	14
TIMP	结冰气温滞后系数	v	(0,1)	0.06	15
GWQMN	浅层地下水径流参数	v	(0,5000)	2068.32	16
ESCO	土壤蒸发补偿系数	v	(0,1)	0.2	17
SMTMP	融雪最低气温	v	(-5,5)	-0.51	18
SMFMX	6 月 21 日最大融雪度日因子	v	(0,10)	4.96	19
OV_N	坡面漫流的曼宁系数	v	(0.01,30)	5.13	20
CH_N2	主河道曼宁系数	v	(-0.01,0.3)	0.26	21
EPCO	植被蒸腾补偿系数	v	(0,1)	0.61	22
RCHRG_DP	深蓄水层渗透系数	v	(0,1)	0.43	23
GW_DELAY	地下水滞后系数	a	(-31,469)	312.23	24
CH_K2	主河道水力传导率	v	(-0.01,500)	122.63	25
TLAPS	气温递减率	v	(-50,50)	0.43	26

注:参数的调整方法 v、a、r,分别是赋值,加值,乘以(1+给定值)

3.2 情景模拟结果分析

3.2.1 不同土地利用类型转变对径流的影响

以情景 1 作为基准期,对比情景 2(表 6)可知,将占流域总面积 32.90%的农业用地(表 1)全部转化为林地,会导致月均径流量减少 $87.23 \text{ m}^3/\text{s}$,可见林地相对于农业用地具有减流作用;对比情景 3 可知,将占流域总面积 32.90%的农业用地全部转化为草地,会导致月均径流量减少 $15.47 \text{ m}^3/\text{s}$,可见草地相对于农业用地也具有减流作用;对比情景 4 可知,将占流域总面积 44.88%的林地(表 1)全部转化草地,会导致月均径流量增加 $93.22 \text{ m}^3/\text{s}$,可见草地相对于林地具有增流作用。因此,农业用地、林地、草地三者对径流增加的贡献顺序为农业用地>草地>林地。

3.2.2 气候要素对径流的影响

当气温不变,降水量分别增加 20%和 10%时,月均径流量分别增加了 $191.39 \text{ m}^3/\text{s}$ (11.57%)和 $78.41 \text{ m}^3/\text{s}$ (4.74%);降水量分别减少 10%和 20%时,月均径流量分别减少了 $48.96 \text{ m}^3/\text{s}$ (2.96%)和 $116.13 \text{ m}^3/\text{s}$

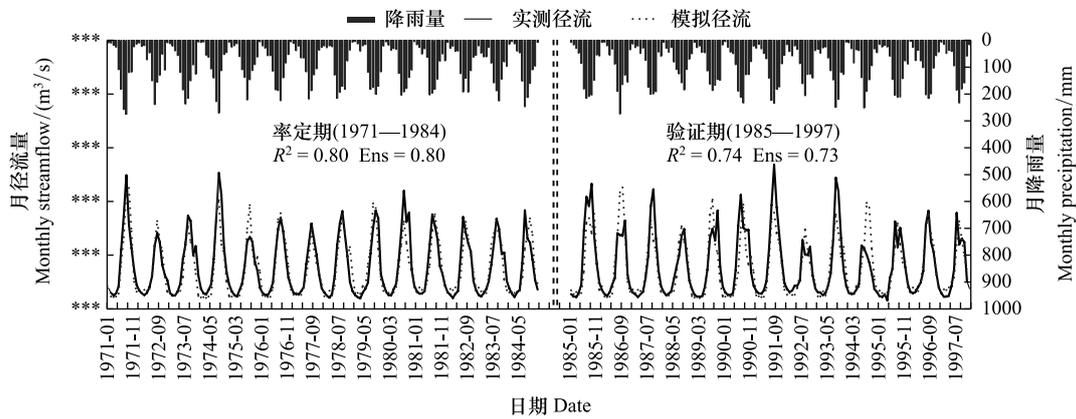


图 3 澜沧江流域率定期和验证期降雨量及径流模拟结果

Fig.3 Precipitation and Simulation results of calibration and validation period of runoff in Lancang River Basin

(7.02%)(表 7),可见径流量的变化趋势和变化幅度与降水变化成正比。当降水不变,气温分别增加 1℃ 和 2℃ 时,月均径流量分别减少 22.50 m³/s(1.36%)和 36.23 m³/s(2.19%),可见径流量的变化趋势与气温变化趋势成反比,变化幅度与气温变化幅度成正比。

表 6 澜沧江流域极端土地利用情景下径流模拟结果

Table 6 Simulation results of the scenario of extreme land use type in Lancang River Basin

情景 Scenarios	月均径流量 Monthly mean runoff/(m ³ /s)	相对情景 1 的径流量变化 Change in runoff relative to scenario1/(m ³ /s)
情景 1 Scenario 1	1654.21	-
情景 2 Scenario 2	1566.98	-87.23
情景 3 Scenario 3	1638.74	-15.47
情景 4 Scenario 4	1747.43	93.22

表 7 澜沧江流域气候要素对径流的影响

Table 7 Impact of climate elements on runoff in Lancang River Basin

情景 5 Scenario 5	P×(1+20%)	P×(1+10%)	P×(1-10%)	P×(1-20%)	情景 6 Scenario 6	T+1	T+2
T	1845.60	1732.62	1605.25	1538.08	P	1631.71	1617.98
径流变化 runoff variation	191.39 (11.57%)	78.41 (4.74%)	-48.96 (-2.96%)	-116.13 (-7.02%)	径流变化 runoff variation	-22.50 (-1.36%)	-36.23 (-2.19%)

3.2.3 LUCC 和气候变化共同影响下的径流模拟

模拟结果表明:情景 7、8、9 月均径流量分别为 1666.57m³/s、1605.07m³/s、1617.43m³/s(表 8)。以情景 1 为基准期,对比情景 7 可知,LUCC 引起月均径流量增加 12.36m³/s,结合表 1 可知,2006—2015 年,流域内农业用地、林地、草地、城镇用地、水体、未利用地、湿地的变化率分别为 -15.81%、-9.06%、27.82%、0.30%、-3.38%、-0.05%、0.18%,总体上增加的草地面积绝大部分由农业用地和林地转化而来,因此 2006—2015 年间,LUCC 引起的月均径流量增加是由流域内林地转化为草地所致,且林地转化为草地引起的径流增加量强于农业用地转化为草地引起的径流减小量;对比情景 8 可知,气候变化引起月均径流量减少 49.14m³/s,而气象观测数据显示,2007—2015 年间较 1998—2006 年间流域内月平均降雨量减少 9.16mm、月平均气温升高 0.2℃,这两项变化均会引起径流的减少,因此减少的径流由降雨和气温变化共同引起;对比情景 9 可知,土地利用和气候变化共同导致流域月均径流量减少 36.78m³/s。因此,2006—2015 年间,澜沧江流域 LUCC 引起的月均径流量增加幅度小于气候变化引起的月均径流量减少幅度,澜沧江径流量总体上呈减少趋势,相对于 LUCC 而言,气候变化在澜沧江径流变化中起主导作用。

表 8 澜沧江流域不同情景模拟结果

Table 8 Simulation results of different scenarios in Lancang River Basin

情景 Scenarios	月均径流量 Monthly mean runoff / (m ³ /s)	相对情景 1 的径流量变化 Change in runoff relative to scenarios1 / (m ³ /s)
情景 7 Scenario 7	1666.57	12.36
情景 8 Scenario 8	1605.07	-49.14
情景 9 Scenario 9	1617.43	-36.78

3.2.4 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下澜沧江未来径流变化预估

预估结果显示:RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,2021—2050 年间澜沧江流域径流均呈增加趋势,增加的速率分别为 4.47 亿 m³/10a 和 7.39 亿 m³/10a(图 4)。而澜沧江流域允景洪水文站实测径流显示:1971—2015 年间,流域径流呈减小趋势,减小的速率为 22.74 亿 m³/10a。可见,RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,流域径流变化趋势已发生改变,由原来的减少趋势变为增加趋势。

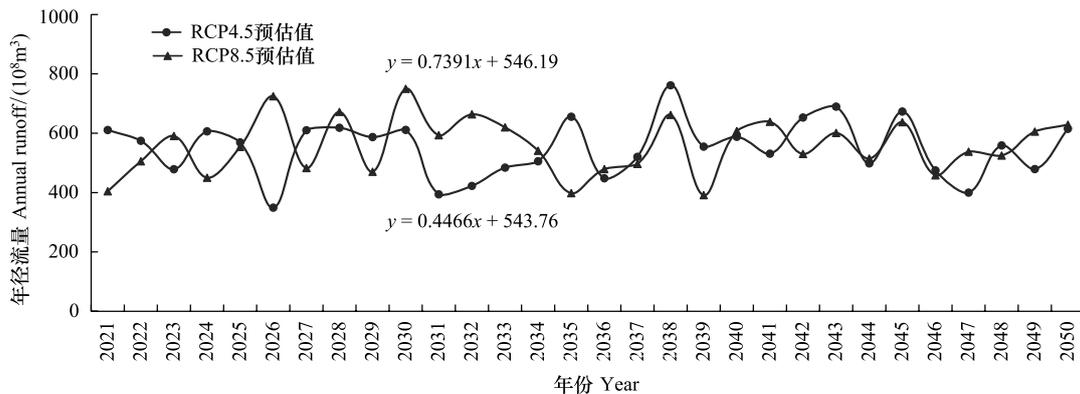


图 4 澜沧江流域 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下年径流量趋势预估图

Fig.4 Trend Prediction Map of Annual runoff under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in the Lancang River Basin

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) SWAT 模型在澜沧江流域径流模拟中具有很好的适用性,可以用 SWAT 模型来进行流域径流模拟、预测,率定期模型参数 R^2 、 Ens 分别达到 0.80、0.80,验证期 R^2 、 Ens 分别达到 0.74、0.73。

(2) 从土地利用方面考虑,将农业用地转化为林地或草地,均会导致径流量的减少,而将林地转化为草地则会引起径流量的增加,农业用地、林地、草地三者对径流增加贡献顺序为农业用地>草地>林地。从气候变化方面考虑,流域径流量与降雨量成正比,与气温成反比。

(3) 2006—2015 年间澜沧江流域气候变化引起的月均径流减少幅度强于 LUCC 引起的月均径流增加幅度,径流变化由气候变化主导。

(4) 预估结果显示,在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候排放情景下,2021—2050 年间澜沧江流域径流均呈增加趋势,增加的速率分别为 4.47 亿 m³/10a 和 7.39 亿 m³/10a,这与 1971—2015 年间流域实测径流变化趋势相反。

4.2 讨论

澜沧江流域集中了从热带到高寒地带的多种生物资源和森林资源,矿藏资源丰富,水能资源巨大,但其位于中国西南生态环境脆弱区^[33],一方面,随着人类活动改造自然能力的加强,人类活动对地表覆盖的改变对径流的影响不容忽视,另一方面,气候变化导致的水热条件变化也会对流域径流产生深远的影响。从研究结

果来看气候变化在澜沧江流域径流变化中占据主导作用,但这不等于说人类可以肆无忌惮的开采资源,无节制无规划的改变地表覆盖。

相关研究表明 LUCC 作为人类活动的集中体现,其直观反映了人类活动对自然环境的影响,并影响着流域的水文过程^[34]。本研究结果中的农业用地、林地、草地三者对径流增加的贡献顺序与张新荣^[35]的研究结果一致,林地转化为草地、农业用地降低了冠层截留、入渗和蒸发^[36-37],因此引起径流增加。将草地转化为农业用地引起径流的增加,推测是相对草地而言,农业用地降低了土壤的涵养水源能力,增加了产汇流作用所致。2006—2015 年间澜沧江流域 LUCC 主要为农业用地和林地转化为草地,其中,农业用地转化为草地主要发生在上游的青藏高原地区(图 2),这直观反映了近年来当地政府退耕还草的成果,虽然这种土地利用类型变化降低了径流量,但对改善青藏高原脆弱的生态环境和澜沧江源头的水质则大有益处。林地转化为草地主要发生在澜沧江中下游的云南省境内,主要是沿岸居民过度砍伐树木,导致林地退化所致,虽然这种地类变化有益于径流的增加,但对沿岸生态环境的长远发展必然会产生负面的影响。

气候变化作为影响流域水文过程的主要因素之一^[10],其对水资源的影响主要体现在降水和温度的变化上^[15]。本研究表明,在对流域未来径流变化预估中,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,澜沧江流域径流均呈增加趋势,这与黄金龙^[10]对 RCP4.5 情景下长江上游流域径流模拟的结果一致,推测是由于在 RCP4.5 情景下,长江上游流域降雨呈增加趋势^[10],而澜沧江流域降雨也呈增加趋势(RCP4.5、RCP8.5 情景下,2021—2050 年均降雨量较 1971—2015 年均降雨量分别增加 70.63mm、105.4mm)所致。

本研究中 SWAT 模型可以较好的用于澜沧江流域的径流模拟,但模型的模拟精度并没有达到优秀的标准^[1,2,5,16],推测与如下因素有关。流域内水电站、水库的建设和生产会考虑丰枯水期的安全生产需要而人为进行蓄水或泄洪,这必将会对径流产生一定的影响,甚至会改变径流的月际或年际分配。廖文婷^[38]等研究表明,葛洲坝和三峡水利枢纽的建立使下游宜昌站径流的年内分配趋于平缓,洪峰被削弱,洪水发生几率降低,枯水期有所提前。黄维^[39]等研究表明,三峡工程减少了洞庭湖上游的来水量,改变了洞庭湖原来的水位/量变化规律。贾凤^[40]研究表明,流域梯级电站开发对径流的人工控制对松花江中下游自然河流状态的径流量年内分配具有很大的影响。然而由于数据获取的原因,本研究在模拟时无法考虑水电站及水库对径流的影响,这将会在一定程度上降低模型的模拟精度,同时,流域内居民生产生活用水等也会在一定程度上影响径流,这些也有待于进一步研究。此外,本研究在利用 SWAT 模型开展 2021—2050 年的径流预估时,除气象驱动数据为模式计算结果提供外,其余土壤数据、植被覆盖数据采用的是历史时期数据,这与未来的实际情况必然不同,因此也会给预估结果带来一定的不确定性。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 李帅,魏虹,刘媛,马文超,顾艳文,彭月,李昌晓. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟. 生态学报, 2017, 37(4): 1252-1260.
- [3] 杨满根,陈星. 气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量影响的 SWAT 模拟. 生态学报, 2017, 37(23): 8107-8116.
- [4] Guo J, Su X L, Singh V P, Jin J M. Impacts of climate and land use/cover change on streamflow using SWAT and a separation method for the Xiyang River Basin in northwestern China. Water, 2016, 8(5): 192.
- [5] Yang L S, Feng Q, Yin Z L, Wen X H, Si J H, Li C B, Deo R C. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 1100-1112.
- [6] 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.
- [7] 官兴龙,付强,邢贞相,关英红,王斌,李茉. 土地利用方式对平原-丘陵-湿地交融区水资源的影响. 农业机械学报, 2018, 49(6): 254-262.
- [8] Zhang L, Nan Z T, Yu W J, Ge Y C, Xu Y. Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change

- impactson watershed hydrology using distributed hydrological models. *Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 1016-1028.
- [9] Li B Q, Xiao W H, Wang Y C, Yang M Z, Huang Y. Impact of land use/cover change on the relationship between precipitation and runoff in typical area. *Journal of Water and Climate Change*, 2018, 9(2): 261-274.
- [10] 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 翟建青. RCP4.5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响. *气象*, 2016, 42(5): 614-620.
- [11] Zhang Y, Zhong P A, Chen J, Bing J P, Xu D H, Wang M L. Impacts of climate change and human activities on the Three Gorges Reservoir inflow. *Water*, 2017, 9(12): 957.
- [12] 刘世梁, 安南南, 尹艺洁, 成方妍, 董世魁. 基于 SWAT 模型的澜沧江中游小流域水土流失与 NDVI 时空动态相关性. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 62-67.
- [13] 陈晓舒, 赵同谦, 李聪, 郑华. 基于不同利益相关者的水电能源基地建设经济损益研究——以澜沧江干流为例. *生态学报*, 2017, 37(13): 4495-4504.
- [14] 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.
- [15] 王莺, 张强, 王劲松, 张雷. 基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 175-185.
- [16] 孟现勇, 王浩, 雷晓辉, 蔡思宇. 基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析. *生态学报*, 2017, 37(21): 7114-7127.
- [17] 何云玲, 李同艳, 熊巧利, 余岚. 2000—2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(24): 8813-8821.
- [18] 渠勇建, 成向荣, 虞木奎, 吴初平, 袁位高. 基于 SWAT 模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 130-134.
- [19] 吕乐婷, 王晓蕊, 孙才志, 张杰. 基于 SWAT 模型的细河流域蓝水绿水资源量时空分布研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 39-47.
- [20] Anand J, Gosain A K, Khosa R. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga Basin to land use change using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 503-519.
- [21] 杨凯杰, 吕昌河. SWAT 模型应用与不确定性综述. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 17-31.
- [22] 周帅, 王义民, 郭爱军, 周凯, 李紫妍. SWAT 模型参数不确定性对黄河上游径流模拟的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(8), doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.08.018.
- [23] 王政祥. 澜沧江流域近 15 年水资源及其利用状况分析. *人民长江*, 2018, 49(22): 40-44.
- [24] 于文金, 苏荣, 邵明阳, 于步云, 谢涛, 黄亦露. 澜沧江流域暴雨干旱灾害与海温异常波动规律的相关性. *生态学报*, 2016, 36(4): 1115-1124.
- [25] 王书霞, 张利平, 李意, 余敦先. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究. *气候变化研究进展*, 2019, 15(1): 23-32.
- [26] 于文金, 黄亦露, 邵明阳. 澜沧江流域极端天气灾害特征及波动趋势. *生态学报*, 2015, 35(5): 1378-1387.
- [27] 胡胜. 基于 SWAT 模型的北洛河流域生态水文过程模拟与预测研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [28] Gao X J, Shi Y, Giorgi F. Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface model. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2016, 9(4): 246-254.
- [29] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JF, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ. The next generation of scenarios for climate change research and Assessment. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [30] 陆敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体减排和对中国的挑战. *气候变化研究进展*, 2010, 6(6): 436-442.
- [31] 初征, 郭建平, 赵俊芳. 东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响. *地理学报*, 2017, 72(7): 1248-1260.
- [32] 王学. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用/覆被变化的水文效应研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012.
- [33] 罗开盛, 陶福禄. 基于 SWAT 的西北干旱区县域水文模拟——以临泽县为例. *生态学报*, 2018, 38(23): 8593-8603.
- [34] 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.
- [35] 张新荣, 刘林萍, 方石, 姜文超, 王金臣. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 2013-2021.
- [36] 王杰, 黄英, 段琪彩, 刘新有. 土地利用变化情景下牧羊河水文响应研究. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(6): 756-762.
- [37] 吴森, 石朋, 张行南, 瞿思敏, 陈昂. 土地利用变化对径流影响的定量研究. *人民黄河*, 2018, 40(3): 39-43.
- [38] 廖文婷, 邓红兵, 李若男, 郑华. 水利工程对坝下径流的影响——以葛洲坝、三峡水利枢纽为例. *生态学报*, 2018, 38(5): 1750-1757.
- [39] 黄维, 王为东. 三峡工程运行后对洞庭湖湿地的影响. *生态学报*, 2016, 36(20): 6345-6352.
- [40] 贾凤. 丰满水电站对径流影响评价研究. *水利科技与经济*, 2018, 24(2): 66-71.