

基于 SWAT 模型的南渡江流域土地利用/ 覆被变化的径流响应

曹 灿^{1,2}, 孙 瑞^{2,3}, 吴志祥^{2,3}, 李 茜¹

(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.中国热带农业科学院

橡胶研究所, 海口 571101; 3.海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海南 儋州 571737)

摘 要:为了探究热带岛屿性流域土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change,LUCC)的水文效应,以海南岛典型热带岛屿性流域南渡江流域为研究区,构建本地化 SWAT 模型,模拟流域水文过程及其对 LUCC 的响应,揭示流域径流的变化规律,对比不同土地利用类型的水文过程及调蓄能力,探讨了典型热带岛屿性流域 LUCC 的径流效应。结果表明:SWAT 模型在南渡江流域的适用性良好,径流模拟对植被蒸散发、产生径流的坡面状况、土壤状况和地下水过程较敏感。不同土地利用类型对流域的产流贡献顺序为耕地>其他林地>橡胶林地;耕地产流能力最强,其他林地和橡胶林地具有一定的截流蓄水作用。综上所述,与 1990 年相比,2015 年南渡江流域河流径流量减少,流域 LUCC 导致的地表径流减少是河流径流量减少的直接原因,而蒸散发加剧是地表径流减少的主要原因。

关键词:土地利用/覆被变化; 径流响应; SWAT 模型; 南渡江流域; 海南岛

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0167-09

Responses of Streamflow to Land Use/Cover Changes in Nandu River Basin Based on SWAT Model

CAO Can^{1,2}, Sun Rui^{2,3}, WU Zhixiang^{2,3}, LI Qian¹

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China;

3.Hainan Danzhou Tropical Agro-ecosystem National Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: In order to explore the hydrological effects of land use/cover change (LUCC) in tropical island watersheds, taking the Nandu River Basin, a typical tropical island basin in Hainan Island, China, as the study area, we constructed a localized soil and water assessment tool (SWAT model) to simulate the hydrological process and its response to LUCC, with an aim to reveal the changes of streamflow. The streamflow effects of LUCC could be explored in typical tropical island basin. The hydrological processes and storage capacity of different land use types were compared. The results were summarized as follows. The SWAT model had good applicability in the Nandu River Basin. Streamflow simulation based on the SWAT model was sensitive to vegetation evapotranspiration, slope conditions, soil conditions and groundwater processes. The order of contribution of different land use types to streamflow generation in the basin was tillage land, other forest land and rubber plantation. The strongest flow yield capacity of tillage land was found, while a certain interception and water storage effect were found in other forest land and rubber plantation. To sum up, compared with 1990, the river streamflow decreased in 2015 in Nandu River Basin. The decrease of surface runoff caused by LUCC was the direct reason for the decrease of streamflow, while the increase of evapotranspiration was the main reason for the decrease of surface runoff.

收稿日期:2021-09-18

修回日期:2021-10-22

资助项目:海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC335);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-33-ZP3);中国热带农业科学院基本科研业务费揭榜挂帅项目(1630022022003)

第一作者:曹灿(1995—),女,重庆合川人,硕士研究生,研究方向为土地利用变化的水文效应。E-mail:m13677624207@163.com

通信作者:孙瑞(1985—),女,陕西榆林人,博士,助理研究员,主要从事土地利用变化的环境效应研究。E-mail:sunrui_85@163.com

李茜(1981—),女,陕西汉中,博士,副研究员,主要从事环境生态修复研究。E-mail:li_q@nxu.edu.cn

Keywords: LUCC; streamflow response; SWAT model; Nandu River Basin; Hainan Island

土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)对流域水循环具有重要影响,基于水文模型开展流域土地利用变化的水文效应是全球环境变化研究的热点和前沿问题。其中,SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是应用最为广泛的流域水文模型之一^[1]。它是美国农业部(USDA)和农业研究中心(ARS)于 20 世纪 90 年代开发的用于流域管理的分布式水文模型^[2],可以较好地模拟天然的径流过程,反映流域径流变化特征,并且综合考虑了流域下垫面对水文过程调节的差异性,可以追踪土地利用变化下的降水、冠层截留、蒸散发、地表径流、土壤水、地下水等主要水文过程的分配^[3]。SWAT 模型具有较强的模拟预测能力,被很多学者用于模拟气候变化及 LUCC 的流域水文响应。目前基于 SWAT 模型已开展的研究表明,林地能增加渗漏,减少地表径流,具有蓄水保水的作用,林草地还可以防止洪峰发生;耕地的产流能力较强,而建设用地的不透水面有助于径流增加^[4-13]。

橡胶林是热带地区典型的经济作物和重要的人工林。因全球经济的迅猛发展和天然橡胶需求量的持续增加,近几十年来橡胶林面积在热带地区迅速扩张。目前,围绕橡胶林大面积种植引起的干旱、水土流失等生态学问题的争议很大^[14]。国内外很多学者针对橡胶林生态系统的水文过程进行了研究^[15-26]。研究表明橡胶林蒸腾量与橡胶林分密度、叶面积指数和土壤水分有效性有关,主要吸水性较接近土壤表层^[15-17]。橡胶林仅表层土壤水源涵养功能降低显著,但整体仍可较好保持土壤水分^[18],这是因为橡胶林的凋落物在数量及持水能力上都优于热带季节雨林^[19]。不同林龄橡胶林间水源涵养功能整体差异不大^[20],但对不同深度土壤水利用比例的季节性波动大^[21]。橡胶林的大面积种植加剧了橡胶林的蒸散量^[22],加快了土壤水分的流失,造成河流流量降低和土壤侵蚀增加等问题^[23-24]。因而橡胶种植的扩张引发了人们对水文循环完整性的担忧。在海南,张晓娟^[25]和耿思文等^[26]针对橡胶林生态系统进行了定位观测研究,分析了影响橡胶林水汽通量的主要环境因子以及橡胶林的水分循环和水量平衡特征。然而在热带地区,前人对橡胶林的研究主要集中在水文过程的定位观测等,缺乏对橡胶树大面积种植对整个流域环境水循环的影响以及流域径流对 LUCC 特别是橡胶林面积变化的定量研究^[27]。

南渡江是海南岛最长的河流,橡胶林是该流域的

重要植被类型。近几十年来,因剧烈的人类活动影响,流域植被覆盖变化显著^[28-29]。其中,橡胶林面积迅速扩张对流域水资源的影响是社会各界广泛关注的问题。为此,本文以南渡江流域为研究区,通过构建流域生态水文研究数据库及 SWAT 模型研究平台,模拟流域水文过程及其对 LUCC 的响应,对比不同土地利用类型的水文过程及调蓄能力,探讨典型热带岛屿性流域橡胶林面积扩张对径流的影响,为后续保障水安全、改善水环境、修复水生态等工作提供科学依据。

1 研究区概况

南渡江干流发源于白沙县,斜贯海南岛中北部,最终流入琼州海峡,涉及人口 225.6 万人。流域地处热带北部地区边缘,有明显的干湿两季,台风频繁,降雨充沛,汛期(5—10 月)径流量集中,占全年总径流量的 70%以上^[30]。

南渡江流域(109°36'—110°34'E,19°9'—19°55'N)以龙塘水文站为流域出口。流域总面积为 5 333 km²,海拔范围为 3~1 405 m,平均海拔高度 116 m,地势呈西南高东北低,流域内 1990—2015 年的年均降水量为 1 975 mm,雨季(5—10 月)、旱季(11—4 月)的降水量分别占 81%,19%,降雨量南部多于北部。土地利用类型(2015 年)以林地(包括橡胶林)为主,占流域总面积的 68.1%;耕地次之,占流域面积的 26.2%;建筑与未利用地、水域面积较少,分别占流域面积的 3.8%,1.9%(图 1A)。土壤类型共 13 种,以麻黄砂土为主,占流域面积 52.0%;其次为淡麻砖土、肉泥田和湖光岩焦灰土,分别占流域面积的 27.0%,9.9%,4.4%;扁骨土、潮州淡砂土、河砂泥田、红黏泥土、麻黄砖土、泥肉基、砂砖土田、杂砂黄红土和紫棕泥土均不超过流域面积的 2.0%(图 1B)。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

SWAT 模型的输入数据内容及来源见表 1。基于 ArcGIS 平台的 ArcSWAT 按照输入的数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)数据自动提取河网,再设定集水面积阈值,生成子流域,接着按照独特的土地利用、土壤分类、坡地将子流域进一步细分为水文响应单元(Hydrological Response Unit,HRU)。在构建南渡江流域 SWAT 模型过程中,设定土地利用类型、土壤类型、坡度分级的阈值分别为 20%,20%,20%,

将研究区划分为 83 个子流域和 242 个 HRU(图 1C)。在此基础上输入气象数据,通过输入降水量、温度、太

阳辐射、相对湿度、风速等信息,创建模型数据库,计算每个 HRU 的产汇流情况。

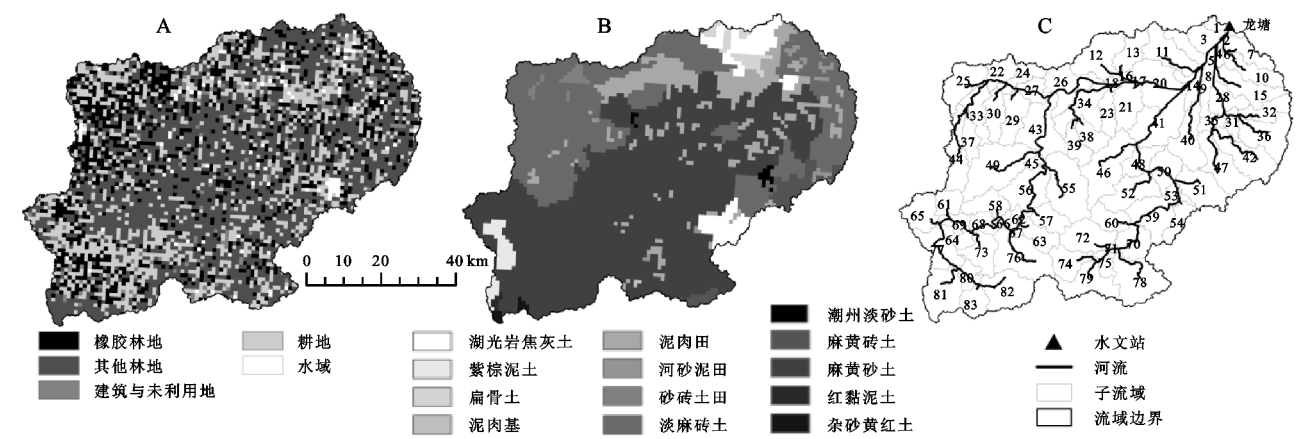


图 1 南渡江流域土地利用类型、土壤类型与子流域划分

表 1 SWAT 模型基础数据内容及来源

数据类型		数据描述	数据来源
数字高程模型	空间分辨率 30 m×30 m		美国空间信息情报局(National Geospatial-intelligence Agency,NGA)
土地利用/覆被数据	空间分辨率 30 m×30 m		Landsat 多光谱影像提取 ^[31]
土壤分类数据	空间分辨率 1 km×1 km		中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
土壤属性数据	黏土(CLAY)、壤土(SILT)、砂土(SAND)、砾石(ROCK)等;土壤湿容重(SOL_BD)、有效持水量(SOL_AWC)、饱和渗透系数(SOL_K)等参数		通过《中国土种志》查询和土壤水特性软件 SPAW(Soil-plant-atmosphere-water)计算得到
气象数据(1961—2020 年)	海口、儋州、琼中和琼海等气象站的逐日降水、气温、风速、相对湿度以及太阳辐射等数据		中国气象数据网(http://data.cma.cn/)
水文数据(1961—2013 年)	龙塘站的逐日径流数据		海南省水文统计年鉴

2.2 研究方法

2.2.1 SWAT 模型 SWAT 是一个流域尺度模型,用于评估连续长时段内各种土地利用和管理实践对水量和水质的影响,模型的主要组成部分包括天气、水文、土壤温度和性质、植物生长和土地管理,所有的水文过程都可以基于水量平衡方程(公式 1)进行模拟^[13]。

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

(1)

式中:SW_t为时间 t 时(天)的最终土壤含水量(mm);SW_o为第 i 天的初始土壤含水量(mm);R_{day}为第 i 天的降水量(mm);Q_{surf}为第 i 天的地表径流(mm);ET_a为第 i 天的蒸散量(mm);W_{seep}为第 i 天土壤底部的渗透水量(mm);Q_{gw}为第 i 天返回到地下水的水量(mm)。

2.2.2 参数敏感性分析 敏感性分析是对给定流域最敏感参数的计算,了解该模型模拟流域内水文过程的密切程度^[32]。本研究选择 SWAT-CUP(Calibration and Uncertainty Programs)软件内置的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型进行敏感性分析、校准和验证。SUFI-2 被广泛使用主要是因为达到可接受的校准结

果所需的运行次数相对较少,比 SWAT-CUP 的其他程序少 2~30 倍;其中对结果不确定性的解释程度被定义为 p-factor 和 r-factor,这两种测量方法结合在一起,使大多数测量数据具有最小的不确定度^[33]。最后根据每个参数的 t-state 值与 p-state 值,确定研究区径流的参数敏感性排序。观测数据与最终的最佳模拟输出之间根据决定系数(R²),Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)和百分比偏差(PBIAS)^[34]对拟合优度进一步量化,用于评估模型的性能。根据 R²,NSE 和 PBIAS 值,可将 SWAT 模型模拟结果可靠性划分为非常好、好、满意、不满意 4 个等级^[35]。

2.2.3 土地利用情景设置 通过研究不同土地利用类型相互转变对流域径流的影响,可揭示土地利用方式对径流的影响机理。本研究采用极端情景模拟方法,即假设将某一土地利用类型全部转变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期径流量的变化情况,判断不同土地利用类型对流域产流的贡献顺序。鉴于南渡江流域内主要土地利用类型为耕地、其他林地和橡胶

林地,本研究以 2015 年土地利用数据和 1990—2015 年的气象数据为基准,设置如下 3 种极端情模拟情景(表 2),以此研究耕地、其他林地、橡胶林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。

表 2 南渡江流域不同土地利用情景设置

情景	实测和模拟土地利用情景设置	气象数据时段
C ₀	1990 年	1990—2015 年
C ₁	2015 年(基准年)	1990—2015 年
C ₂	将所有耕地转为其他林地	1990—2015 年
C ₃	将所有其他林地转为橡胶林地	1990—2015 年
C ₄	将所有耕地转为橡胶林地	1990—2015 年

表 3 1990 年和 2015 年南渡江流域土地利用类型面积分布及占比

项目	耕地		其他林地		橡胶林地		水域		建筑与未利用地	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
1990 年	1612.25	30.23	2579.53	48.37	945.99	17.74	106.48	2.00	88.50	1.66
2015 年	1395.81	26.17	2514.82	47.16	1116.64	20.94	101.51	1.90	203.98	3.83
变化	-216.44	-4.06	-64.71	-1.21	170.65	3.20	-4.97	-0.09	115.48	2.17

由表 4 可知,其他林地主要由耕地和橡胶林地转入,建筑与未利用地和水域转入较少,转入面积达 967.87 km²,占总转入面积的 38.49%。耕地主要由其他林地和橡胶林地转入,而建筑与未利用地和水域转入较少,转入面积为 863.05 km²,占总转入面积的 61.83%。建筑与未利用地由其他土地利用类型转入的占比最高,达 91.85%,主要由耕地和其他林地转

3 结果与分析

3.1 南渡江流域土地利用变化特征

1990 年和 2015 年南渡江流域土地利用类型均以耕地、其他林地和橡胶林地为主,三者之和分别占总面积的 96.34%,94.27%(表 3)。1990—2015 年,南渡江流域耕地、其他林地和水域面积持续减少,变化率分别为-4.06%,-1.21%,-0.09%;橡胶林地和建筑与未利用地面积分别增长 3.20%,2.17%。土地利用方式的转变直观反映了研究区 20 世纪 90 年代以来城镇化扩张和热带农业发展下大面积种植橡胶林地,占据了一部分耕地、其他林地以及水域的空间。

入,转入面积分别为 103.24,46.02 km²。橡胶林地主要由其他林地和耕地转入,转入面积分别为 408.74,396.35 km²。水域主要由耕地和其他林地转入。综上所述,几种土地利用类型互相转换的现象突出,其他林地由其他土地利用类型转入的面积最大,耕地、橡胶林地次之;建筑与未利用地的其他土地利用类型转移占比变化最剧烈,橡胶林地次之。

表 4 1990—2015 年南渡江流域土地利用类型转移矩阵

年份	土地利用类型	2015 年				
		耕地	建筑与未利用地	其他林地	橡胶林地	水域
1990 年	耕地	532.76	103.24	554.73	396.35	25.17
	建筑与未利用地	34.67	16.63	12.97	14.72	9.52
	其他林地	566.73	46.02	1546.96	408.74	11.09
	橡胶林地	235.78	24.57	391.74	292.04	1.86
	水域	25.87	13.53	8.43	4.79	53.87
	总计转入面积	1395.81	203.98	2514.82	1116.64	101.51
其他土地利用类型转入面积		863.05	187.36	967.87	824.60	47.64

3.2 基于 SWAT 模型的流域径流模拟

3.2.1 SWAT 模型校准与验证 根据龙塘水文站的径流观测数据,选择 1961—1976 年作为 SWAT 模型径流模拟的预热期,1977—1987 年和 2006—2013 年分别设置为率定期和验证期,此处 SWAT 模型的校准和验证均是基于 2015 年土地利用数据进行模拟的。通过参数的敏感性排序(表 5),将参数率定最佳值代入 SWAT 模型得到径流模拟最优结果。SWAT 模型的参数率定结果显示,对南渡江径流产生最为密切的 18 个参数中,敏感性排序前 5 依次为 EPCO, SLSUBBSN,CH_K2,SOL_BD 和 GW_DELAY,这

说明南渡江径流对植被蒸散发、产生径流的坡面状况、土壤状况和地下水过程较为敏感。

研究区径流模拟结果的 R²,PBIAS 和 NSE 在率定期分别为 0.88,-5.81%,0.85,在验证期分别为 0.96,-21.63%,0.89(表 6),表明率定期和验证期研究区流域的月尺度径流模拟值与观测值之间有较好的一致性。由图 2 可知,率定期和验证期径流的模拟值与观测值均拟合较好,模拟值能较好地反映实际径流。综上,SWAT 模型在南渡江流域具有良好的适应性,表明 SWAT 模型可用于该流域的径流过程模拟及其对土地利用变化的响应研究。

表 5 参数敏感性排序

排序	参数名称	物理意义	最佳值	下限	上限
1	r__EPCO.hru	植被蒸发补偿系数	-0.86	-1	1
2	r__SLSUBBSN.hru	子流域平均坡长	8.85	0	15
3	v__CH_K2.rte	主河道水力传导度	11.75	5	20
4	r__SOL_BD.sol	土壤湿容重	1.63	-0.5	2.5
5	v__GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	5.37	1	20
6	v__GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	-0.82	-1	1
7	v__ALPHA_BF.gw	基流消退系数	0.23	0	1
8	r__SOL_Z.sol	土壤表层到底层的深度	0.54	-1	1
9	v__GWQMN.gw	浅层地下水径流系数	1.94	0	2
10	v__ALPHA_BNK.rte	河岸储水回归系数	0.69	0	1
11	r__SOL_AWC.sol	土壤有效水含量	0.78	-1	1
12	r__SOL_K.sol	土壤饱和水力传导度	0.90	-1	1
13	v__REVAPMN.gw	潜水极限蒸发深度	3.30	0	10
14	v__ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.13	0	1
15	r__CANMX.hru	最大冠层截留量	0.74	-1	1
16	r__HRU_SLP.hru	平均坡度	0.034	0	0.2
17	v__CH_N2.rte	河道曼宁系数	0.22	-1	1
18	r__CN2.mgt	SCS 径流曲线系数	-0.23	-1	10

表 6 SWAT 模型在南渡江流域的模拟评价结果

指数指标	1977—1987 年 (率定期)	2006—2013 年 (验证期)	性能评价
R ²	0.88	0.96	非常好/非常好
NSE	0.85	0.89	非常好/非常好
PBIAS/%	-5.81	-21.63	非常好/满意

3.2.2 南渡江流域径流变化特征 考虑到目前获得的 1990 年和 2015 年两期研究区土地利用数据,此处基于基准期 2015 年的土地利用数据模拟并补充了 1990—2005 年、2014—2015 年的年径流,再与研究区 2006—2013 年的年径流观测值,共同构成 1990—2015 年南渡江流域年径流量变化趋势(图 3)。1990—2015 年南渡江流域出口龙塘站的年均径流年际波动较大,平均值为 191.14 m³/s,整体变化趋势不显著(图 3A),无明显突变(图 3B)。研究时段内南渡江流域径流量最低值出现在 2004 年(93.5 m³/s),1991 年和 2006 年的年均径流量亦较低,分别为 103.9,100.0 m³/s;最高值出现在 2000 年(292.6 m³/s),1997 年和 2009 年亦较高,分别为 285.3,281.7 m³/s。根据估算结果,1990 年和 2015 年南渡江径流量分别为 180.43,130.16 m³/s,均属于年均径流量偏低的年份。

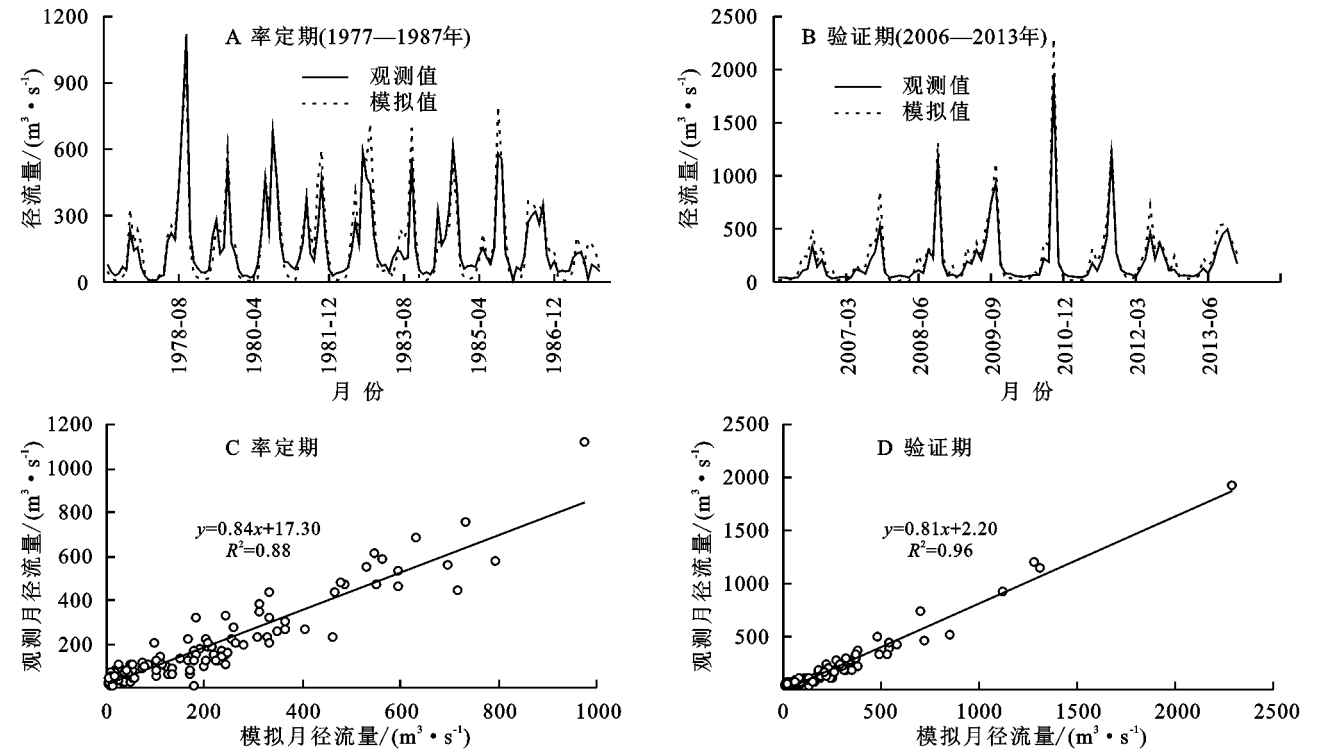


图 2 SWAT 模型在南渡江流域的模拟评价结果

3.3 南渡江流域径流对 LUCC 的响应

运用 SWAT 模型分别模拟了 1990 年和 2015 年两期土地利用数据下的南渡江流域 1990—2015 年径流量。结果表明,不同土地利用方式下模拟的 1990—2015 年的多年年均径流量,C₁ 情景比 C₀ 情景

的多年平均径流量减少 0.33%,暗示土地利用变化对南渡江流域河流径流量的影响相对较小。而 2015 年土地利用下模拟的 2015 年径流比 1990 年土地利用下模拟的 1990 年径流下降了 27.86%,表明除土地利用外,其他因素对流域径流影响更大。

1990—2015 年南渡江流域各水文要素增长量由大到小为:潜在蒸散发>实际蒸散发>浅层渗透水>回归流>浅层含水量>地下深层水;侧向流(即壤中流)和地表径流减少(表 7)。这说明土地利用变化导致流域蒸散发加剧,实际蒸散发和潜在蒸散发分别增加 28.90、36.40

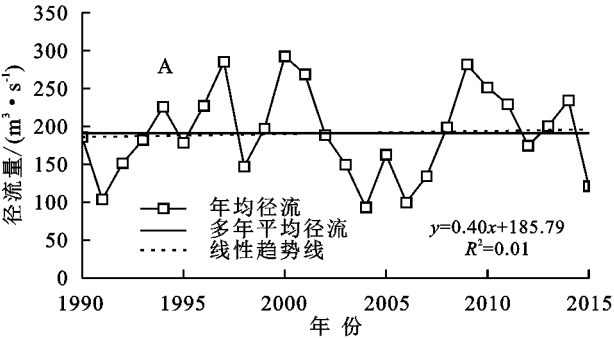


图 3 1990—2015 年南渡江流域年径流量变化趋势及 M-K 突变检验

1990—2015 年南渡江流域总径流的主要来源是基流,基流平均占总径流的 65.5%(表 8)。与 1990 年相比,2015 年流域基流与总径流占比增加,地表径流与总径流占比下降,但是基流与降水的占比和地表径流与降水的占比分别降低了 0.71%、1.29%;同时

表 7 南渡江流域不同土地利用类型下各水文要素变化

项目	实际蒸散发	潜在蒸散发	地表径流	侧向流	浅层渗透水	浅层含水量	地下深层水	回归流
1990 年	730.90	904.80	416.06	64.24	762.40	18.08	38.12	724.21
2015 年	759.80	941.20	397.73	44.83	770.92	18.78	38.55	732.29
变化量	28.90	36.40	-18.33	-19.41	8.52	0.70	0.43	8.08

表 8 南渡江流域不同土地利用类型下各水文要素占比

年份	基流/总径流	地表径流/总径流	总径流/降水量	入渗量/降水量	深层补给量/降水量	实际蒸散发量/降水量
1990 年	0.65	0.35	0.61	0.39	0.02	0.37
2015 年	0.66	0.34	0.59	0.39	0.02	0.38

3.4 南渡江流域不同土地利用类型的径流响应

3.4.1 不同土地利用类型对径流的贡献 基于 SWAT 模型模拟 C₁、C₂、C₃、C₄ 等不同土地利用情景下南渡江流域 1990—2015 年的径流量。结果表明, C₂、C₃ 和 C₄ 情景下的年均径流均低于 2015 年基准期的 C₁ 情景(图 4),即流域因极端土地利用方式均呈现出年均径流减少的趋势。引起径流减少的模拟情景由大到小为: C₃>C₄>C₂。 C₃ 情景(所有其他林地转变为橡胶林地)的年均径流减少最多,达 3.00%,即橡胶林地与其他林地相比有产流减少的作用; C₄ 情景(所有耕地转变为橡胶林地)的年均径流减少次之为 1.65%,反映出橡胶林地较耕地也有减少产流的能力。 C₂ 情景(所有耕地转变为其他林地)的年均径流减少 1.20%,说明其他林地截流能力高于耕地。因此可知,研究区土地利用类型对流域产流的贡献排序

为:耕地>其他林地>橡胶林地,且 3 种极端土地利用情景均会导致流域径流的明显下降。

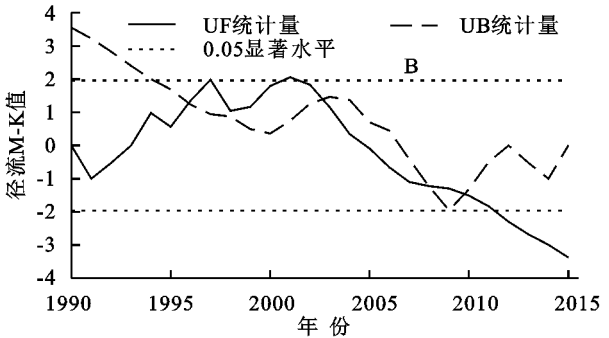


图 4 南渡江流域不同土地利用变化情景下的径流响应

流域实际蒸散发增加,入渗量和深层补给量变化不明显。综上所述,1990—2015 年南渡江流域 LUCC 导致的地表径流减少,是流域河流径流量减少的直接原因,而实际蒸散发的增加是导致地表径流减少的主要原因。

表 7 南渡江流域不同土地利用类型下各水文要素变化

项目	实际蒸散发	潜在蒸散发	地表径流	侧向流	浅层渗透水	浅层含水量	地下深层水	回归流
1990 年	730.90	904.80	416.06	64.24	762.40	18.08	38.12	724.21
2015 年	759.80	941.20	397.73	44.83	770.92	18.78	38.55	732.29
变化量	28.90	36.40	-18.33	-19.41	8.52	0.70	0.43	8.08

表 8 南渡江流域不同土地利用类型下各水文要素占比

年份	基流/总径流	地表径流/总径流	总径流/降水量	入渗量/降水量	深层补给量/降水量	实际蒸散发量/降水量
1990 年	0.65	0.35	0.61	0.39	0.02	0.37
2015 年	0.66	0.34	0.59	0.39	0.02	0.38

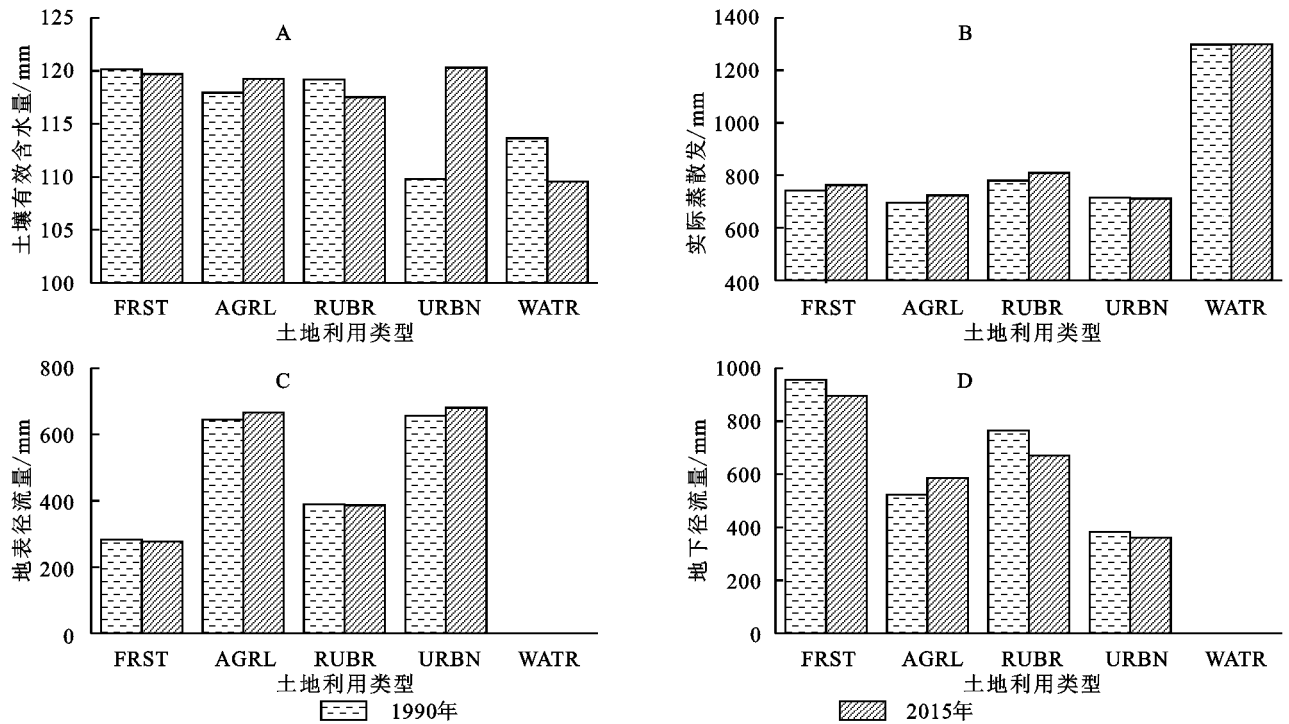
3.4 南渡江流域不同土地利用类型的径流响应

3.4.1 不同土地利用类型对径流的贡献 基于 SWAT 模型模拟 C₁、C₂、C₃、C₄ 等不同土地利用情景下南渡江流域 1990—2015 年的径流量。结果表明, C₂、C₃ 和 C₄ 情景下的年均径流均低于 2015 年基准期的 C₁ 情景(图 4),即流域因极端土地利用方式均呈现出年均径流减少的趋势。引起径流减少的模拟情景由大到小为: C₃>C₄>C₂。 C₃ 情景(所有其他林地转变为橡胶林地)的年均径流减少最多,达 3.00%,即橡胶林地与其他林地相比有产流减少的作用; C₄ 情景(所有耕地转变为橡胶林地)的年均径流减少次之为 1.65%,反映出橡胶林地较耕地也有减少产流的能力。 C₂ 情景(所有耕地转变为其他林地)的年均径流减少 1.20%,说明其他林地截流能力高于耕地。因此可知,研究区土地利用类型对流域产流的贡献排序

3.4.2 不同土地利用类型对流域水文要素的影响 基于 1990 年和 2015 年土地利用数据分别模拟了南渡江流域不同土地利用类型的水文响应。在不同土地利用变化下,土壤有效含水量表现为其他林地>耕

地>橡胶林地>建筑与未利用地(图 5A),其中橡胶林地面积增加引起土壤有效含水量下降。流域实际蒸散发排序为水域>橡胶林地>其他林地>建筑与未利用地>耕地(图 5B),水域的实际蒸散发远高于其他土地利用类型,除水域外,橡胶林地的实际蒸散发较高,橡胶林地面积增加致使蒸散发增强。地表径流表现为建筑与未利用地>耕地>橡胶林地>其他林地(图 5C),橡胶林地地表产流能力远低于建筑与未利用地和耕地,橡胶林地面积扩张引起地表径流下降;而其他林地面积减少会导致其地表径流减少。不同土地利用类型的地表径流高则其相应的地下径流

低,反之亦然。故而地下径流表现为其他林地>橡胶林地>耕地>建筑与未利用地(图 5D),且不同土地利用类型的地下径流均差值较大,橡胶林地的地下径流随面积增加而降低。综上所述,耕地具有较高的地表径流量,其他林地具有较高的地下径流量,但其他林地和橡胶林地的产流能力均低于耕地。橡胶林地面积扩张会引起橡胶林的蒸散发增强,同时土壤有效含水量、地表径流和地下径流均出现不同程度的下降。总体而言,1990—2015 年的 LUCC 对南渡江流域水文过程的影响主要体现在蒸散发增加,地表径流和地下径流降低,与同时段年均径流减少的结论一致。



注:FRST 表示其他林地,AGRL 表示耕地,RUBR 表示橡胶林地,URBN 表示建筑与未利用地,WATR 表示水域。

图5 1990年和2015年不同土地利用类型的土壤有效含水量、实际蒸散发、地表径流与地下径流变化

4 讨论

在不同土地利用方式下模拟流域径流,从1990—2015年的多年平均径流量看,2015年土地利用下的模拟值比1990年模拟值减少0.33%;但从单年径流量看,2015年土地利用下对应的该年径流比1990年下降了27.86%。这从侧面反映出南渡江河流径流量降低主要受气候变化的影响。基于统计分析,2015年流域年降水量较1990年降低25.05%,气温升高1.21℃。据此推测,降水量降低以及气温升高致使蒸发量增加是南渡江流域2015年河流径流量较1990年下降的主要原因。为此,基于SWAT模型模拟南渡江流域径流对气候变化的响应将是未来研究重点。

水文过程中,蒸散发是植被及地面整体向大气输送的水汽总通量,是水循环的重要组成部分。耿思文^[26]和刘珉^[36]等在海南儋州橡胶林生态系统的水量平衡中研究发现,单一的橡胶林蒸散发与同纬度热带雨林相当,蒸散发达到降水量的55%。因本研究中除橡胶林地外还有其他土地利用类型,且其他林地的划分也并非典型的热带雨林,故流域蒸散发仅为降水的38%。另外,我们计算得到南渡江流域蒸散发平均值754 mm,这与林友兴等^[37]对热带雨林、橡胶林、亚热带常绿阔叶林等不同森林生态系统蒸散量的研究结果相近。研究区橡胶林地的面积增长有94%是由耕地净转入的,由于耕地土壤含水量比橡胶林地高,实际蒸散发比橡胶林地低,故耕地转变为橡胶林地引起土壤含水量下降,实际蒸散发增强;除耕地外

还有10%是其他林地转变为橡胶林地,同时橡胶林地的6%转出为建筑与未利用地,而地下径流表现为其他林地>橡胶林地>耕地>建筑与未利用地,且不同土地利用类型的差值较大,故橡胶林地整体表现为面积扩张引起地下径流下降。研究表明流域橡胶林的种植面积扩张在一定程度会对径流的产生起调节作用,但流域本身是处于水资源相对紧张的状况,故建议当地政府部门应当合理规划土地利用格局,保护景观多样性,避免单一的土地利用方式。

南渡江流域不同土地利用类型的产流贡献排序为耕地>其他林地>橡胶林地。这与李旦等^[38]在海南岛万泉河上游流域的研究结果一致。另外,流域水文效应不仅与土地利用类型相关,也受到土地利用类型的面积大小制约,并且未来土地利用状况将会更加复杂和破碎,径流对土地利用变化的响应过程有待进一步细化。且由于气候变化比土地利用变化对流域水循环的影响更显著^[39],降水是主导流域径流变化的主要气候因子^[40-42]。南渡江流域内径流与降水的分布均具有典型的旱雨季特征,雨季占全年的80%左右,需要持续关注全球变暖背景下的流域水资源状况,并采取有效措施应对。合理规划土地利用结构,优化土地利用布局是应对气候变化下水文负效应的有效措施,是实现南渡江流域水资源合理分配的有效手段。

5 结论

(1) 1990年和2015年南渡江流域的2期土地利用类型均以其他林地、耕地和橡胶林地为主,均占总面积94%以上,其他林地分布最广。土地利用类型转变中,耕地、其他林地和水域面积均减少,分别为-4.06%, -1.21%, -0.09%,橡胶林地和建筑与未利用地面积分别增长3.20%, 2.17%。

(2) SWAT模型在南渡江流域的适宜性良好,径流模拟对植被蒸散发、产生径流的坡面状况、土壤状况和地下水过程较敏感。1990—2015年流域径流年际波动性较大,1990年和2015年均属于年均径流量偏低的年份;基于这两年分别对应的土地利用来模拟单年径流,2015年径流量比1990年下降27.86%。

(3) 1990—2015年LUCC对南渡江流域河流径流量减少的影响相对较小。其中,流域LUCC导致的地表径流减少是河流径流量减少的直接原因;而蒸散发加剧是地表径流减少的主要原因。

(4) 南渡江流域不同土地利用类型的产流贡献

排序为耕地>其他林地>橡胶林地;耕地对流域具有增流作用,与此相比其他林地和橡胶林地有一定截流持水作用。因流域内橡胶林地面积扩张主要由耕地和其他林地转入,致使蒸散发增加,地表径流和地下径流均出现不同程度的下降,进而引起河流径流量微弱减少。

参考文献:

- [1] 荣易,秦成新,杜鹏飞,等.基于模型研究质量评价的SWAT模型参数取值特征分析[J].环境科学,2021,42(6):2769-2777.
- [2] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [3] 史晓亮,李颖,严登华,等.流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J].水土保持研究,2013,20(4):301-308.
- [4] 祖拜代·木依布拉,师庆东,普拉提·莫合塔尔,等.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[J].生态学报,2018,38(14):5149-5157.
- [5] 何孟铮,李宏伟,刘杨,等.顾及土地利用类型的大坡岭流域水文响应模拟研究[J].水电能源科学,2021,39(5):17-20.
- [6] 刘磊,邹进,陈欣,等.土地利用变化对云龙水库流域径流的影响[J].贵州大学学报:自然科学版,2021,38(5):33-39.
- [7] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].生态学报,2017,37(4):1252-1260.
- [8] 窦小东,黄玮,易琦,等. LUCC及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J].生态学报,2019,39(13):4687-4696.
- [9] 傅春,毛安琪.抚河流域径流对土地利用变化时空响应[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):342-350.
- [10] 李烁阳,刘小燕,杨贵羽,等.土地利用变化对渭河流域水文过程的影响[J].水土保持研究,2021,28(3):133-140.
- [11] 窦小东,彭启洋,张万诚,等.基于情景分析的LUCC和气候变化对南盘江流域径流的影响[J].灾害学,2020,35(1):84-89.
- [12] Mo G, Zhang Y, Huang Y, et al. Evaluation and hydrological impact of land-use changes in the Longtan basin[J]. Journal of Earth System Science, 2020,129(1):1-11.
- [13] Manashi P, Masoud N A, Adel S. Assessing crop water productivity under different irrigation scenarios in the Mid-Atlantic Region [J]. Water, 2021, 13. DOI: 10.3390/w13131826.
- [14] 安锋,陈秋波,谢贵水,等.橡胶人工林的水文生态效应[J].中国农学通报,2010,26(22):359-365.

- [15] Hardanto A, Röhl A, Hendrayanto, et al. Tree soil water uptake and transpiration in mono-cultural and jungle rubber stands of Sumatra[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017,397:67-77.
- [16] Sopharat J, Gay F, Thaler P, et al. A simple framework to analyze water constraints on seasonal transpiration in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015,5.DOI:10.3389/fpls.2014.00753.
- [17] Niu F, Röhl A, Meijide A, et al. Rubber tree transpiration in the lowlands of Sumatra[J]. *Ecohydrology*, 2017,10(7).DOI:10.1002/eco.1882.
- [18] 文志,赵赫,刘磊,等.海南土地利用变化对土壤水源涵养功能的影响[J].*应用生态学报*,2017,28(12):4025-4033.
- [19] 熊壮,叶文,张树斌,等.西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性[J].*浙江农林大学学报*,2018,35(6):1054-1061.
- [20] 董安涛.西双版纳不同林龄橡胶林土壤特征及水源涵养功能研究[D].昆明:云南师范大学,2016.
- [21] 曾欢欢,刘文杰,吴骏恩,等.西双版纳地区丛林式橡胶林内植物的水分利用策略[J].*生态学杂志*,2019,38(2):394-403.
- [22] 凌楨.西双版纳橡胶林蒸散量时空变异特征及其预报模型研究[D].昆明:云南师范大学,2021.
- [23] 赵娜,王兆印,徐梦珍,等.橡胶林种植对纳板河水生态的影响[J].*清华大学学报:自然科学版*,2015,55(12):1296-1302.
- [24] Neyret M, Robain H, de Rouw A, et al. Higher runoff and soil detachment in rubber tree plantations compared to annual cultivation is mitigated by ground cover in steep mountainous Thailand[J]. *Catena*, 2020,189. DOI:10.1016/j.catena.2020.104472.
- [25] 张晓娟.海南岛西部橡胶林生态系统蒸散特征研究[D].海口:海南大学,2016.
- [26] 耿思文,吴志祥,杨川.海南儋州地区橡胶林生态系统水汽通量变化特征及其对环境因子的响应[J].*西北林学院学报*,2021,36(1):77-85.
- [27] Liu J, Liu W, Zhu K. Throughfall kinetic energy and its spatial characteristics under rubber-based agroforestry systems[J]. *Catena*, 2018,161:113-121.
- [28] 雷金脊,陈宗铸,陈小花,等.1980—2018年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J].*生态学报*,2020,40(14):4760-4773.
- [29] 罗红霞,戴声佩,李茂芬,等.海南岛植被覆盖变化驱动因子及相对作用评价[J].*国土资源遥感*,2020,32(1):154-161.
- [30] 吴际伟,纪义彤,朱丽蓉,等.南渡江龙塘站水位流量关系变化及成因分析[J].*人民珠江*,2018,39(8):37-42.
- [31] Sun R, Wu Z X, Chen B Q, et al. Effects of land-use change on eco-environmental quality in Hainan Island, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,109.DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105777.
- [32] Chilagane N A, Kashaigili J J, Mutayoba E, et al. Impact of land use and land cover changes on surface runoff and sediment yield in the Little Ruaha River Catchment[J]. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2021,11(3):54-74.
- [33] Teshager A D, Gassman P W, Secchi S, et al. Modeling agricultural watersheds with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT): calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit HRUs[J]. *Environmental Management*, 2016,57(4):894-911.
- [34] Wu J, Deng G, Zhou D, et al. Effects of climate change and land-use changes on spatiotemporal distributions of blue water and green water in Ningxia, Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2021,13(7):674-687.
- [35] 奚建梅.基于 SWAT 模型的黄河源区河流泥沙变化研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2020.
- [36] 刘珉,吴志祥,杨川,等.海南岛橡胶林水分循环过程特征研究[J].*中国农学通报*,2012,28(22):27-33.
- [37] 林友兴,张一平,费学海,等.云南不同森林生态系统蒸散特征的比较研究[J].*云南大学学报:自然科学版*,2019,41(1):205-218.
- [38] 李旦,徐文,叶长青,等.气候变化和人类活动干扰下万泉河流域水文情势变化特征分析[J].*水电能源科学*,2019,37(12):14-17.
- [39] 王莺,王劲松,武明,等.土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(1):135-142.
- [40] 罗开盛,陶福祿.黑河径流对 LUCC 和气候变化的敏感性分析[J].*干旱区研究*,2018,35(4):753-760.
- [41] Xu Z P, Li Y P, Huang G H, et al. A multi-scenario ensemble streamflow forecast method for Amu Darya River Basin under considering climate and land-use changes[J]. *Journal of Hydrology*,2021,598.DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126276.
- [42] 曹灿,孙瑞,吴志祥,等.基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应[J].*水土保持研究*,2022,29(2):255-264.