

基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化 对径流影响研究

王一然^{1,2}, 丁文峰^{1,2}, 张冠华^{1,2}

(1.长江水利委员会 长江科学院 水土保持研究所, 武汉 430010;

2.水利部 山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘 要:为定量分析土地利用类型变化对径流的影响,基于 SWAT 模型,通过分析丹江流域近 20 年来的土地利用变化,并设置 3 种不同土地利用情景模式,探究了土地利用类型对流域径流的影响作用。结果表明:SWAT 模型率定期和验证期的决定性系数 R^2 和纳什效率系数 NS 分别为 0.8, 0.73 和 0.86, 0.78, 适用于丹江流域径流模拟。2000—2020 年,丹江流域土地利用变化引起的径流变化为 -0.18% ;情景 1 中,把林地、草地全变为耕地的情况下,模拟的年均径流变化率为 61.65% ,情景 2 中,把耕地和草地全转换为林地的情况下,模拟的年均径流变化率为 -12.69% ,情景 3 中,把耕地和林地全转换为草地的情况下,模拟的年均径流变化率为 24.24% 。耕地对径流深度的影响系数为 0.26 mm/hm^2 ,林地对径流深度的影响系数为 -13.35 mm/hm^2 ,草地对径流深的影响系数为 -0.01 mm/hm^2 。由此得出,耕地对产流起促进作用,草地和林地对产流起抑制作用。为维护丹江流域生态环境,增强丹江流域径流供给,应科学开发耕地资源。

关键词:SWAT 模型; 径流变化; 土地利用/覆被变化; 丹江流域

中图分类号:P333; F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0062-06

Study on the Impact of Land Use Change on Runoff in Danjiang Watershed Based on SWAT Model

WANG Yiran^{1,2}, DING Wenfeng^{1,2}, ZHANG Guanhua^{1,2}

(1.Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang River Scientific Research

Institute, Changjiang Water Resources Committee, Wuhan 430010, China; 2.Research Center on

Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention, the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract:In order to quantitatively analyze the impact of land use type changes on runoff, based on the SWAT model, the land use changes were analyzed in the Danjiang River Basin in the past 20 years, and three different land use scenarios were set up to explore the impact of different land use types on runoff. The results show that the decisive coefficient R^2 and the Nash efficiency coefficient NS of the SWAT model were 0.8, 0.73 and 0.86, 0.78 in the regular and validation periods, respectively, which were suitable for the runoff simulation in the Danjiang River Basin; from 2000 to 2020, the runoff change caused by land use change in the Danjiang River Basin was -0.18% ; in scenario 1, when the forest land and grassland are all turned into cultivated land, the simulated average annual runoff change rate is 61.65% ; in scenario 2, when all cultivated land and grassland are converted into forest land, the simulated average annual runoff change rate is -12.69% ; in scenario 3, when all cultivated land and forest land are converted into grassland, the simulated annual average runoff change rate is 24.24% ; The influence coefficient of cultivated land on runoff depth was 0.26 mm/hm^2 , the influence coefficient of forest land on runoff depth was -13.35 mm/hm^2 , and

收稿日期:2021-04-19

修回日期:2021-06-17

资助项目:国家重点研发计划(2019YFC1510705);国家自然科学基金(41877082);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CKSF2021487/TB);长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2019185/TB)

第一作者:王—然(1997—),女,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为域侵蚀产沙与调控。E-mail:434231494@qq.com

通信作者:丁文峰(1975—),男,河南汝州人,博士,教授级高工,主要从事土壤侵蚀与水土保持、土地资源与环境研究。E-mail:dingwf@mail.crsri.cn

the influence coefficient of grassland on runoff depth was -0.01 mm/hm^2 . It can be concluded that cultivated land promotes runoff, while grassland and forest land inhibit runoff. In order to maintain the ecological environment of the Danjiang River Basin and enhance the runoff supply of the Danjiang River Basin, cultivated land resources should be developed scientifically.

Keywords: SWAT model; runoff change; land use/cover change; Danjiang River Basin.

自 20 世纪 90 年代“国际地圈与生物圈计划”(IGBP)和“全球环境变化的人文因素计划”(IHDP)的首次提出,土地利用/覆盖变化被列为跨越性的重点研究课题^[1],土地利用变化对水文要素的影响这一课题同样受到广泛关注。近年来,受气候变化和人类活动的影响,流域水文循环过程发生很大改变^[2]。作为可以影响流域下垫面和气候变化的因素之一,土地利用/覆被变化可以通过影响地表植被截留、蒸散发和下渗等水文过程,进而影响径流变化^[3]。

国内的关于植被覆盖变化引起的水文响应变化研究较多^[4-7],但定量分析土地利用类型对径流的影响程度的相关文献较少^[8-9]。目前为止,研究土地利用/覆被变化对流域水沙关系影响的方法主要有:统计分析、定量分析对比试验和模型模拟等^[10-11]。统计分析法^[10]是采用非参数检验和突变点分析等方法,分析不同土地利用状况下的年降水、径流和输沙变化,评价土地利用变化对流域产流产沙的影响。但该方法具有一定的局限性,无法反映土地利用变化对流域水文响应机制和流域空间的差异性,且在缺乏相关数据的流域无法应用。定量分析对比试验法^[12]是通过选取气候、植被、下垫面等条件相似的若干小流域,控制其中一个流域的土地利用类型,改变另一个流域的植被覆盖度,观测由土地利用变化引起的水文响应变化。该方法要求对比研究区在试验期间应具有相似的地质、水文、气候等条件,也因此限制了其广泛使用,结论不能推广至试验区外,特别是在降雨分布不均、地形地貌差异性较大的流域^[13]。相比之下,水文模型则可以弥补统计分析和定量分析对比试验这两种方法的缺陷,更好地解决空间分布差异性问题。因此,近年来得到了广泛应用^[5-7]。

丹江流域为南水北调中线工程调水区。“南水北调工程”被列为中国跨世纪的骨干工程之一,丹江流域的水质水量也成了国家重点关注对象。丹江流域被列为我国流域治理重点区、河南水土保持防治工程重点治理区等。随着丹江流域生态经济发展和工程的建设,土地利用/植被覆盖发生了很大程度的变化,致使流域下垫面条件和流域范围内产汇流过程发生变化。因此,本文旨在利用 SWAT 模型模拟观测水文响应的宏观研究基础上,利用 MATLAB R2017b

软件定量地分析计算不同土地利用类型对径流的影响,提出相关水土保持措施,为丹江流域的生态建设规划提供方法借鉴。

1 研究区概况

丹江源头位于秦岭南麓,自西北流向东南,途径陕西、河南、湖北 3 省,最终汇入丹江口水库。丹江流域位于 $109^{\circ}30' - 111^{\circ}30' \text{E}$, $32^{\circ}30' - 34^{\circ}30' \text{N}$, 全长 430 km, 高程为 130~2 072 m, 流域面积为 1.07 万 km^2 。流域年均降雨量为 750~850 mm, 年平均径流量在 16 亿 m^3 左右, 年平均输沙量约为 180 万 t。植被覆盖率达 40%, 主要土地利用类型为林地、草地和耕地, 3 种土地利用类型面积占流域总面积仅 90% (图 1)。依据 HWSD (Harmonized World Soil Database) 土壤数据库, 流域主要以棕壤、黄棕壤、褐土为主。该流域径流的年内分布也随着降雨的影响变得极度不均衡。由于丹江流域大都是中低山的山区, 峡谷沟壑相间排列, 地势由西北沿着东北依次降低, 使得丹江流域气候变化极其显著, 具有亚热带气候特点, 春冬两季降雨较少, 夏季暴雨较多, 秋季持续降雨, 年降水量随着地形的增高而增高, 造成了该流域降雨分布极不均匀的特点^[14]。

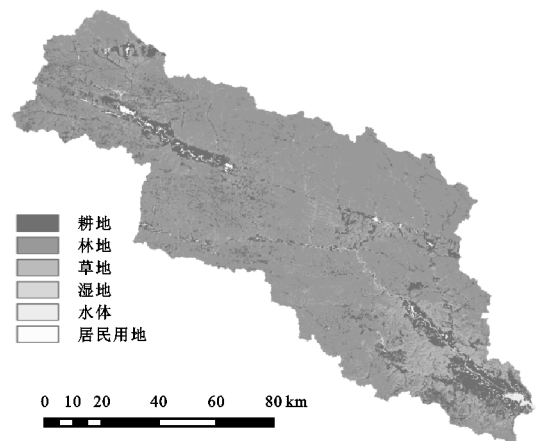


图 1 2010 年丹江流域土地利用数据

2 材料与方法

2.1 模型概述

SWAT 模型是一个实用性较强、已被广泛采用的分布式水文模型^[15-16]。SWAT 模型由水文过程子

模型、土壤侵蚀子模型、污染负荷子模型 3 个部分构成。在 SWAT 模型运行过程中,水量平衡是模型中所有水文发生过程中的原始驱动力。SWAT 模型采用的水量平衡的方程如下^[17]:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{n=1}^t (R_n - Q_n - E_n - W_n - T_n) \quad (1)$$

式中: SW_t 为第 n 天的含水量(mm); SW_0 为第 n 天的土壤初始含水量(mm); t 为时间(d); R_n 为第 n 天的总降雨量(mm); Q_n 为第 n 天的总地表径流量(mm); E_n 为第 n 天的蒸发蒸腾量(mm); W_n 为第 n 天的土壤剖面下渗量(mm); T_n 为第 n 天的地下水回流量(mm)。

SWAT 模型在模拟时,会依据 DEM 数据,土壤类型和土地利用数据将流域划分为许多子流域,每个子流域再被土地利用、土壤面积、坡度的最小阈值比划分为许多水文响应单元(HRU)。叠加每个 HRU 所计算得出的物质产量得到每个子流域的产量,最后进行坡面汇流和河网汇流得到水文模拟结果^[18]。

本文采用决定系数 R^2 和纳什效率系数 NS 作为评价指标来评判拟合的效果^[19]。决定性系数 R^2 表示的是模型模拟值与实测值的变化趋势, R^2 越大,则说明变化趋势越相似;纳什效率系数 NS 则表示模型的总体效率, NS 越大,则说明模拟的结果可信度越高。 R^2 和 NS 计算公式如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum (M - \bar{M})(S - \bar{S})}{\sqrt{\sum (M - \bar{M})^2 \sum (S - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S - M)^2}{\sum_{i=1}^n (S - \bar{M})^2} \quad (3)$$

式中: M 为模拟值; S 为实测值; \bar{M} 为模拟平均值; \bar{S} 为实测平均值; n 为实测值的个数^[20]。一般规定,决定系数 $R^2 > 0.5$, 纳什效率系数 $NS > 0.5$, 模型模拟即达到满意结果。当 $R^2 \geq 0.75$ 或 $NS \geq 0.75$ 时,则模型模拟结果较好。

2.2 数据来源与处理

DEM 数据、土地利用数据(图 1)、土壤数据、气候数据及水文数据为模型运行需要输入的数据。本研究采用的 DEM 数据是 90 m 分辨率的 GDTM 数据,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);土壤数据来源于 1 km 格网世界土壤数据库(简称 HWSD);土地利用数据采用的是 globeland30 土地利用数据(<http://www.globallandcover.com/>);所采用的实测逐月径流数据摘自 2008—2013 年的长江上游丹江支流的水文年鉴;气象数据采用的 CMADS(中国气象同化驱动数据集)数据集。

2.2.1 土壤类型数据 将丹江流域土壤物理性质相似的土壤重分类后,构建重分类后的土壤数据库。模型中的土壤数据主要包括物理属性数据和化学属性数据,其中物理属性数据对模型水文响应单元中水循环起着重要作用。本文采用全球 HWSD 世界土壤数据库作为土壤物理性质来源,包括土壤部分物理属性,如砾石含量、黏土含量、含沙量、淤泥含量、有机碳含量、酸碱度、碳酸盐含量、电导率等^[21]。而其他土壤物理数据可以用美国农业部开发的土壤特性计算软件 SPAW 计算,如土壤湿密度(容重)、土壤层有效持水量(mm)、土壤饱和水力传导系数(mm/h)等。

2.2.2 土地利用数据 本研究获取到的土地利用类型数据库只有一级分类,故不对该土地利用数据进行重分类。土地利用见图 1。

2.2.3 气象观测数据 因 CMADS 气象数据模拟出来的效果明显优于实测气象数据^[22],故本文将 CMADS 气象数据导入 SWAT 模型中。CMADSV1.1 提供 0.25° 的空间分辨率和逐日的时间分辨率(时间尺度为 2008—2016 年),并提供各种模型所需气象数据,包括日平均温度,日最高/低温度,日累计 24 h 降水量,日平均太阳辐射等。CMADS 利用数据循环嵌套、重采样、模式推算及双线差值等多种技术手段建立,具有数据来源广、多时间尺度和多分辨率的特点,现已被广泛采用,尤其适用于气象数据缺乏的流域^[23]。

2.2.4 水文数据 本研究采用荆紫关水文站作为 SWAT 模型模拟的参考水文站点。荆紫关水文站位于湖北、陕西、河南 3 省交界处,是丹江流域最重要的代表站,也是丹江口水库、南水北调中线最重要的水文控制站,控制面积为 7 086 km²。本研究实测径流采用的是长江流域上游丹江流域水文年鉴上的荆紫关水文站 2008—2013 年的径流数据。

2.3 情景设定

土地利用/覆盖变化水文效应多采用 5 种方法进行情景分析:历史反演法、参照对比法、模型预测法、极端土地利用法和土地利用空间配置法^[24]。本文为探究 2000—2020 年近 20 年来土地利用变化对径流的影响,研究单一土地利用类型变化对径流的影响,以 2010 年土地利用现状为基准年,考虑两方面因素设置了 3 种情景。一方面是为了排除地形地貌、下垫面条件等外在因素的影响,本研究采用极端土地利用法;二是由于丹江流域近些年来开展了一系列的生态保护工程建设,如退耕还林政策等使得丹江流域近几年的林、草、耕 3 种土地利用类型相互转换较为频繁。因此本文设置了林地模式、草地模式、耕地模式 3 种

极端情景,研究土地利用类型对径流的影响。3 种极端情景设置面积变化见表 1。

表 1 3 种情景下的土地利用类型变化

土地利用 类型	S ₁ (耕地情景)		S ₂ (林地情景)		S ₃ (草地情景)	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕地	10581.63	98.75	0.00	0.00	0.00	0.00
林地	0.00	0.00	10581.63	98.75	0.00	0.00
草地	0.00	0.00	0.00	0.00	10581.63	98.75
湿地	23.08	0.22	23.08	0.22	23.08	0.22
水域	34.4	0.32	34.4	0.32	34.4	0.32
居民用地	76.88	0.72	76.88	0.72	76.88	0.72

注:S₀代表基准情景,为 2010 年土地利用现状。S₁代表林地、草地全变为耕地,湿地、水域及居民用地土地利用类型保留;S₂代表耕地、草地全变为林地,湿地、水域及居民用地土地利用类型保留;S₃代表耕地林地全变为草地,湿地、水域及居民用地土地利用类型保留。

3 结果与分析

3.1 参数敏感性分析

使用 SWAT-cup 率定参数时,应先选择适合该流域的模拟参数。SWAT 模型里存在多参同效的情况,为了提高运算速度,减少调参时间,需提前对模型参数进行敏感性分析,进而筛选出对研究结果影响比较大的参数^[18]。敏感性分析结果采用统计量 t (t -Stat)值和显著性指标 p (p -value)值进行衡量, t 值绝对值越大, p 值越接近 0,则参数的敏感性越强。本文选取了 16 个敏感性径流参数,其中较为敏感的几个参数为 $r_SOL_AWC().sol$ (土壤有效含水量), $v_GWQMN.gw$ (发生回归流所需浅层含水量的水位阈值), $r_SOL_ALB().sol$ (湿土反射率), $v_ESCO.hru$ (土壤蒸发补偿系数), $r_SOL_K().sol$ (饱和渗透系数)。其中表 2 为模拟出来的径流参数敏感性排序和模拟得出的 16 个最佳参数取值。

3.2 拟合结果与分析

本文设置 2008—2010 年为率定期,2011—2013 年为验证期。丹江流域荆紫关站径流模拟结果见图 2—3。

由图 2—3 可知,(1) 丹江流域的 SWAT 模型模拟的径流值较实测径流值偏大,但可以基本反映出 3 年来径流量的变化趋势。丹江流域除了丹江口水库以外,还有 1 座中型水库和 19 座小型水库,控制面积达到 2 005.31 km²,模拟值比实测值偏大和丹江流域大坝的蓄水拦截等水利措施的建设施用有很大关系。(2) 2010 年和 2011 年的径流量明显大于其他年份,这是因为 2010 年丹江“2010·7”暴雨洪水事件,丹江整个流域普降大到暴雨,丹江商南县于 7 月 23—25 日持续性暴雨,为丹江流域最大暴雨点,降雨量高达 213 mm。7—9 月,丹江流域下游的荆紫关水文站降雨量分别为 309,126,121 mm。2011 年的 9 月份秋汛期,多日

连续降雨导致河道大坝水位上涨,径流量陡然增大,在荆紫关水文站达到了 387 mm 的产流深度。

表 2 丹江径流模拟敏感参数最佳值

敏感性 排序	径流 参数	t -Stat	p -Value	初始 取值	最终 取值
1	$r_SOL_AWC().sol$	0.015	0.987	-0.2~0.4	-0.1498
2	$v_GWQMN.gw$	0.053	0.957	0~2	0.7119
3	$r_SOL_ALB().sol$	0.250	0.800	0~0.25	0.1300
4	$v_ESCO.hru$	-0.440	0.660	0~1	0.3051
5	$r_SOL_K().sol$	0.550	0.590	-0.8~0.8	1.4775
6	$r_CN2.mgt$	-0.690	0.490	-0.2~0.2	0.3461
7	$v_GW_DELAY.gw$	-0.770	0.450	30~450	71.7566
8	$v_ALPHA_BF.gw$	0.940	0.350	0~1	0.9238
9	$v_CH_K2.rte$	0.997	0.320	0.01~150	-73.5969
10	$v_BIOMIX.mgt$	-0.999	0.320	0~1	1.1510
11	$v_SFTMP.bsn$	-1.120	0.270	-5~5	-2.9829
12	$v_GW_REVAP.gw$	1.300	0.200	0.02~0.2	0.0847
13	$v_CH_N2.rte$	-1.470	0.140	0~0.3	0.0499
14	$v_CANMX.hru$	1.560	0.120	0~100	29.4144
15	$v_REVAPMN.gw$	1.620	0.110	190~579	195.3821
16	$r_SOL_BD().sol$	-1.680	0.096	-0.5~2.5	0.5684

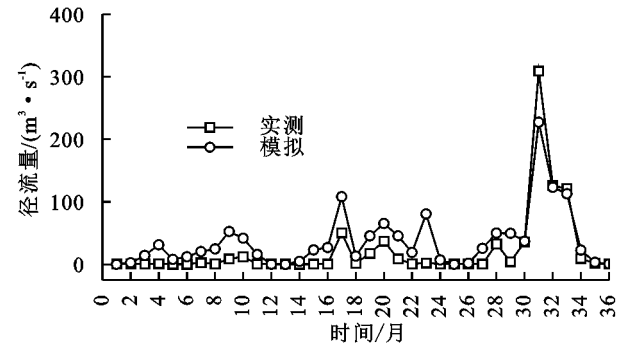


图 2 2008—2010 年径流校准模拟效果

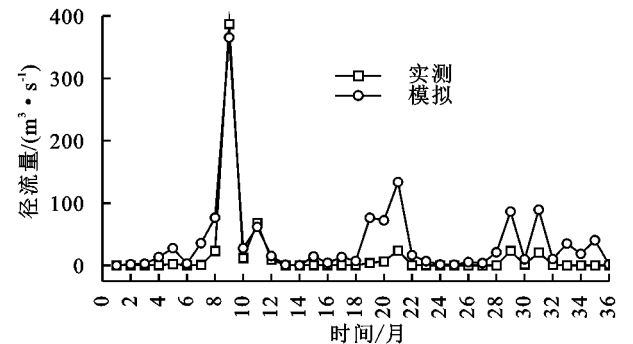


图 3 2011—2013 年径流验证模拟效果

由表 3 可知,丹江流域径流模拟结果在可接受范围。径流率定期的 R^2 ,NS 依次为 0.8,0.73;验证期的 R^2 ,NS 依次为 0.86,0.78,模拟效果较好,说明 SWAT 模型适用于丹江流域地区。

3.3 径流结果与分析

(1) 土地利用类型及径流变化分析。依据丹江流域土地利用类型分布特征,共有耕地、林地、草

地、湿地、水域、居民用地 6 大类。通过多年土地利用类型变化表(表 4)可知,该流域主要以耕地、林地和草地为主,面积占 90%以上,其中林地占比达 70%以上,为主要土地利用类型。2000—2020 年,丹江流域 6 种土地利用类型都有不同程度的变幅,其中耕地、草地面积整体呈现下降趋势,而林地、湿地、水体和居民用地占地面积呈现上升的趋势,耕地为年均下降率最大的土地利用类型,达 $9\text{ km}^2/\text{a}$;其次为草地,达 $4\text{ km}^2/\text{a}$;居民用地面积变化最为明显,面积占比扩大为原来的 3 倍以上,由 2000 年的 59 km^2 变为 2020 年的 187 km^2 ,变化率达 $6\text{ km}^2/\text{a}$;湿地的年均

表 4 2000—2020 年土地利用类型面积绝对变化量和变化率

代码	土地利用类型	2000 年		2020 年		2000—2020 年 净变化/ km^2	年变化率/ ($\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)
		面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%		
10	耕地	1559.31	14.55	1366.48	12.75	-192.83	-9.64
20	森林	7714.05	72.00	7778.91	72.59	64.86	3.24
30	草地	1361.63	12.71	1278.08	11.93	-83.55	-4.18
50	湿地	5.67	0.05	22.02	0.21	16.35	0.82
60	水体	16.49	0.15	84.47	0.79	67.98	3.39
80	居民用地	58.85	0.55	186.04	1.74	127.19	6.36

(2) 不同情景模式下径流变化分析。由表 5 可以看出,3 种情景年均径流深的排序为:耕地(S_1)>草地(S_3)>林地(S_2);随着情境的不断变化,有且只有 S_2 (耕地、草地全变为林地)的年均径流深度降低,径流变化率为负值,这说明林地的蓄水能力强,可以显著减小地表径流; S_1 (林地、草地全变为耕地)年均径流变化量绝对值是最大的,这说明耕地具有较强促进产流的作用; S_3 (耕地、林地全变为草地)年均径流变化量为正值,这是因为流域内林地面积较大,耕地转换为草地对地表径流的影响较小,而林地全转为草地,可以极大地增加径流量,其增加的径流量比耕地转换为草地减少的径流量多,所以大体趋势上草地情景(S_3)的径流量比基准情景(S_0)的高。

表 5 几种情景下径流年平均值

土地利用情景	年均径流深/mm	径流变化率/%
S_0	5210.74	0.00
S_1	8423.38	61.65
S_2	4549.27	-12.69
S_3	6473.95	24.24

3.4 不同土地利用类型对径流的影响系数

耕地、林地和草地 3 种土地利用类型为丹江流域土地利用主要类型,用 MATLAB R2017b 计算得到耕、地林、地草地 3 种土地利用类型对径流的影响系数,记为 M_a, M_b, M_c 。

由表 6 可知,耕地对径流的影响系数为 $0.26\text{ mm}/\text{hm}^2$,林地对径流的影响系数为 $-13.35\text{ mm}/\text{hm}^2$,

增长率最小,为 $0.82\text{ km}^2/\text{a}$ 。这是因为丹江地区很好地响应了政府退耕还林政策;该流域的居住人口在缓慢增多,这和丹江经济带建设发展有关。20 年来丹江流域土地利用变化较小,所以径流率变化不大,2000—2010 年的径流变化率为 -0.16% ,2010—2020 年的径流变化率为 -0.015% ,2000—2020 年的径流变化率为 -0.18% 。

表 3 径流校准期和验证期模拟评价指标

模拟期	R^2	NS
率定期(2008—2010 年)	0.80	0.73
验证期(2011—2013 年)	0.86	0.78

草地对径流的影响系数最小,为 $-0.01\text{ mm}/\text{hm}^2$ 。耕地面积变化和径流量的变化为正相关,林地和草地面积变化和径流量的变化呈负相关,这说明耕地可以增加地表径流的产生,减少地下水的补给;林地可以抑制径流的产生,增加地表下渗量、增加地下水的补给;其中草地对径流量的影响系数最小,这说明草地并不能明显地减少径流。

表 6 土地利用变化对径流深度的影响

土地利用类型	影响系数/ ($\text{mm} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\Delta_{2000-2010}/$ mm	$\Delta_{2010-2020}/$ mm	$\Delta_{2000-2020}/$ mm
耕地	0.26	0.127	0.374	0.500
林地	-13.35	8.272	0.388	8.660
草地	-0.01	-0.007	-0.002	-0.008

注: $\Delta_{2000-2010}$ 、 $\Delta_{2010-2020}$ 、 $\Delta_{2000-2020}$ 分别为 2000—2010 年、2010—2020 年、2000—2020 年土地利用类型对径流深度的影响。

4 讨论

为探究土地利用变化对流域径流的影响,本文建立了 SWAT 模型,并结合理论与实际,设定了几种极端情况下的情景。结果表明,只有林地情景径流减少,耕地和草地情景下径流增加;耕地对径流的影响系数为正,草地和林地对径流的影响系数均为负值。

目前,已有许多学者运用 SWAT 模型进行径流模拟,所得结论与之类似。李佳等^[25]通过几种情景设定,研究讨论长江源区土地利用变化对径流的影响。结果表明,只有流域植被覆盖面积最大情景下,

径流量比基准年少,裸地、草地、土地退化情景径流量均相较增加。罗巧等^[7]研究发现,湘江流域的土地利用变化对径流影响尤为敏感,林地和草地的增加使得径流量减少。王磊等^[8]通过建立 SWAT 模型模拟后发现,在采用极端土地利用法和基于实际情况下设置的几种情景中,只有耕地情景的径流变化率为正值,且耕地对径流影响系数为正。说明耕地具有增加径流的作用。而林地和草地对径流的影响系数为负值,说明林地和草地两种土地利用类型可有效截流。

另外,也有学者的研究成果与本文论述的结果有所差异。王学等^[9]对白马河流域土地利用进行了 20 a 的分析与预测,建立了 SWAT 模型,并采用多目标决策函数法计算不同土地利用类型对径流深的贡献系数。研究表明,林地对径流的产生起促进作用,而耕地对径流的产生起抑制作用。这是因为该地地形起伏较剧烈,使林冠的蒸腾作用加剧,导致林地上空产生大量水汽;而又因为林地海拔高出地面,阻碍了平流空气移动,迫使水汽凝结,进而增加林区垂直降水,增加径流。

目前为止,还没有研究能够确切地说明土地利用/覆被变化哪些影响因素改变对径流产生何种影响,且无法确定植物覆被程度增高对径流起促进还是抑制作用。不同的研究地区、不同的地质地貌土壤构成下,所得的研究结果也略有不同。一般认为,在北方地区,除石质山区外,森林覆盖率越大,则年径流量越小,而南方湿润地区与之相反^[25]。

在研究土地利用对径流的影响时,本文仅考虑单一土地利用类型对径流的影响,没有考虑从流域地形地貌、土地利用不同配置、整体布局规划等方面对径流的影响。后续我们将从流域土地利用布局出发,结合地形地质等方面,采用土地利用空间配置法探讨具有地区针对性的最佳土地利用布局方法。

5 结论

(1) 丹江流域 2000—2020 年近 20 a 的土地利用变化不显著,该流域耕地面积和居民用地面积变化量较大,2000—2020 年径流变化率只有-0.18%。

(2) 以 2010 年的土地利用现状作为基准年,排除其他因素的干扰,采用极端土地利用情景的设定,在不同土地利用类型的情况下,对径流的截留能力:林地>草地>耕地。

(3) 耕地对径流的影响系数为 0.26 mm/hm^2 ,说明耕地有促进径流的作用。林地和草地的影响系数为 $-13.35, -0.01 \text{ mm/hm}^2$,说明这两种土地利用类型可有效抑制径流产生。

参考文献:

- [1] 张冠华,张平仓,张晓峰.三峡库区土地利用/覆被变化及其驱动力研究进展[J].中国水土保持,2017(5):47-51.
- [2] Zhang L, Cheng L, Chiew F, et al. Understanding the impacts of climate and landuse change on water yield [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018,33:167-174.
- [3] 曾思栋,夏军,杜鸿,等.气候变化、土地利用/覆被变化及 CO_2 浓度升高对滦河流域径流的影响[J].水科学进展,2014,25(1):10-20.
- [4] 王莺,张雷,王劲松.洮河流域土地利用/覆被变化的水文过程响应[J].冰川冻土,2016,38(1):200-210.
- [5] 程程.基于 SWAT 模型的土地利用和土地覆被变化及气候变化对元江流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(5):52-59.
- [6] 杨军军.基于 SWAT 模型的湟水流域径流模拟研究[D].西宁:青海师范大学,2012.
- [7] 罗巧,王克林,王勤学.基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J].中国生态农业学报,2011,19(6):1431-1436.
- [8] 王磊,刘亭亭,谢建治.基于 SWAT 模型的张家口清水河流域径流模拟[J].水土保持研究,2019,26(4):245-251.
- [9] 王学,张祖陆,宁吉才.基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J].生态学杂志,2013,32(1):186-194.
- [10] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响[J].农业工程学报,2012,28(14):236-243.
- [11] 董国强,杨志勇,于赢东.下垫面变化对流域产汇流影响研究进展[J].南水北调与水利科技,2013,11(3):111-117,126.
- [12] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2005,310(1/4):28-61.
- [13] DeFrie S R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future[J]. Hydrological Processes, 2004,18(111):2183-2186.
- [14] 任建民.丹江流域水文特征浅析[J].西北水力发电,2002,18(4):57-57.
- [15] 张蕾,卢文喜,安永磊,等.SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展[J].生态环境学报,2009,18(6):2387-2392.
- [16] 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.
- [17] 谢金红,程先富,邓良,等.安徽省大别山区江子河小流域的水文模拟与分析[J].测绘与空间地理信息,2012,35(5):39-42.

- Water, 2019, 11(10). DOI: 10.3390/w11101958.
- [9] Zhou Y, Shi C, Fan X, et al. The influence of climate change and anthropogenic activities on annual runoff of Huangfuchuan basin in northwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 120(1): 137-146.
- [10] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 93-100.
- [11] 张佳, 王厚杰, 张勇, 等. 黄河中游主要支流输沙量变化对黄河入海泥沙通量的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 21-30.
- [12] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163.
- [13] 刘强, 尉飞鸿, 常康飞, 等. 皇甫川流域水沙变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1506-1513.
- [14] 柳莎莎, 王厚杰, 张勇, 等. 气候变化和人类活动对黄河中游输沙量影响的甄别[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(4): 41-50.
- [15] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区 1997—2007 年的水沙变化趋势及其成因[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 1-7.
- [16] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119.
- [17] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.
- [18] 穆兴民, 王万忠, 高鹏, 等. 黄河泥沙变化研究现状与问题[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 1-7.
- [19] 蒋晓辉, 高昊祺, 雷宇昕. 近 40 年来窟野河流域土地利用类型变化及驱动因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 17-38.
- [20] 李慧娟, 师长兴, 马小晴, 等. 黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 499-507.
- [21] 郭巧玲, 韩振英, 丁斌, 等. 窟野河流域径流变化及其影响因素研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 75-80.
- [22] 赵激, 王向东, 张晓明, 等. 窟野河流域水沙演变的尺度效应驱动因素研究[J]. 水文, 2016, 36(2): 56-61.
- [23] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005 年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168.

(上接第 61 页)

- [25] Lü Z, Yan D, Qin T, et al. A system framework for spatial allocation of soil management practices (SMPs) in river basins[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104929.
- [26] 乔梅, 王继军, 李玥, 等. 水土保持技术选择的主要驱动要素分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 132-138.
- [27] Wang L, Yan H, Wang X W, et al. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, southern China[J]. Catena, 2020, 194: 104678.
- [28] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕, 等. 长江上游紫色土地区不同坡度坡耕地水保措施的适宜性分析[J]. 资源科学, 2009(12): 2157-2163.
- [29] Huang X, Fang N, Shi Z, et al. Decoupling the effects of vegetation dynamics and climate variability on watershed hydrological characteristics on a monthly scale from subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 279: 14-24.

(上接第 67 页)

- [18] 刘伟, 安伟, 杨敏, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大宁河流域产流产沙模拟及土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 49-56.
- [19] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169-1188.
- [20] 金鑫. 基于 SWAT 模型的土地利用/覆被变化对流域水文过程的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [21] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18.
- [22] 胡胜, 曹明明, 邱海军, 等. CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价: 以灞河流域为例[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1571-1586.
- [23] 田扬, 肖桂荣. 基于 CMADS 驱动下 SWAT 模型的敖江流域径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 27-32.
- [24] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33.
- [25] 李佳, 张小咏, 杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 119-124, 128, 301.