

基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究

王磊^{1,2}, 刘亭亭², 谢建治²

(1. 北京市农林科学院 植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2. 河北农业大学 资源与环境学院, 河北 保定 071000)

摘要:土地利用是区域气候和环境变化的重要影响因素。以 3S 技术为依托, 分析 25 年来张家口清水河流域土地利用类型变化特征, 建立了流域 SWAT 模型并评价了其在张家口清水河流域的适用性, 通过设置 5 种土地利用变化情景, 定量分析了张家口清水河流域主要土地利用类型对流域径流的影响。结果表明: SWAT 模型在张家口清水河流域具有很好的适用性。1990—2015 年, 张家口清水河流域的土地利用类型以林地、草地和耕地为主, 3 种土地利用类型面积总和均占流域总面积的 96% 以上。其中林地对径流量的影响系数为 $1.908 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, 草地对径流量的影响系数为 $1.836 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, 说明林地和草地都具有截留径流的作用, 且林地的作用大于草地; 耕地对径流量的影响系数为 $3.168 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, 说明耕地对径流起增加作用。因此, 合理开发耕地资源, 保护林草资源有利于促进张家口清水河流域生态环境质量的改善。

关键词: SWAT 模型; 土地利用情景变化; 张家口清水河流域; 径流

中图分类号: P333; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0245-07

Study on the Effect of Different Land Use Scenarios on Runoff in Qingshuihe Basin of Zhangjiakou Based on SWAT Model

WANG Lei^{1,2}, LIU Tingting², XIE Jianzhi²

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: Land use is an important factor affecting regional climate and environmental change. Based on 3S technology, we analyzed the characteristics of land use types change in Qingshuihe basin of Zhangjiakou over the past 25 years. The SWAT model was established and its applicability in the Qingshuihe basin of Zhangjiakou was evaluated. Five land use change scenarios were set up to quantitatively analyze the impact of main land use types on runoff in the Qingshuihe basin of Zhangjiakou. The results showed that SWAT model had good applicability in Zhangjiakou Qingshuihe basin. From 1990 to 2015, the main land use types of Qingshuihe basin in Zhangjiakou were woodland, grassland and cultivated land. In the meanwhile, the sum of the three types of land use area accounted for more than 96% of the total basin area. The influence coefficient of woodland on runoff was $1.908 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, and the influence coefficient of grassland on runoff was $1.836 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, showing that both woodland and grassland had the function of intercepting runoff, and the role of woodland was greater than that of grassland. The influence coefficient of cultivated land on runoff was $3.168 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$, indicating that cultivated land played an important role in increasing runoff. Therefore, reasonable development of cultivated land resources, protection of forestland and grassland resources are conducive to improving the ecological environment quality of Zhangjiakou Qingshui River basin.

Keywords: SWAT model; land use scenarios change; Zhangjiakou Qingshuihe basin; runoff

1990 年前后人们开始认识到土地利用/覆被变化对于研究全球变化特征与可持续发展战略上占据了举足轻重的地位^[1],因此“国际地圈与生物圈计划”(IGBP)^[2]与“全球环境变化的人文因素计划”(IHDP)在 1995 年首先共同提出了土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)这一跨越性的科学研究项目^[3],而土地利用变化下的水文响应研究一直是全世界的焦点问题之一。

大量的研究表明土地利用变化可直接导致水文要素发生改变。Santillan 等^[4]对菲律宾南部流域研究发现土地利用/覆被变化与地表径流具有直接关系。杨宏伟等^[5]的研究结果表明林地面积与年径流量呈负相关关系;一年内枯水期的径流量大,丰水期径流量小。Cuo 等^[6]研究结果表明流域内建设用地的大量增加导致年均径流量、总径流量和阶段性径流量都发生了变化。Guo 等^[7]研究果表明,鄱阳湖流域林地面积的大量增加导致雨季流量减小,旱季流量增大,从而减少了干旱、洪涝灾害的发生。

目前,利用 3S(Remote Sensing, Geographical Information System, Global Positioning System)技术支持的非点源污染模型可较好地评估土地利用变化对流域径流的影响,其中 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型的有效性已通过大量的研究证明。Nosetto 等^[8]使用 SWAT 模型分析南半球水循环的影响因素,发现土地利用变化是水循环影响的重要因子。Prokop 等^[9]发现引起喜马拉雅山 1930—2010 年水文变化的重要因素是土地利用变化。罗巧等^[10]应用 SWAT 模型研究不同土地利用方式对径流的影响程度,结果表明林地和草地面积与径流成反比,而耕地和建设用地面积与径流成正比。王学等^[11]在白马河流域应用 SWAT 模型分析了不同土地利用/覆被情景下的水文响应单元,结果表明不同的土地利用类型对流域产流的影响不同。陈引珍等^[12]应用 SWAT 模型对长江上游清港河流域进行了研究,设置了两种土地利用情景,得出年径流的变化与年降雨量的关系并不密切,而平均月径流的变化,则随着降雨量的不断增大而增大。李勇^[13]基于 SWAT 模型分析计算了汾河水库流域不同时期土地利用变化对径流的贡献率,结果表明汾河水库流域土地利用变化对汾河径流有一定的影响,虽然影响程度不大,却是径流变化的一个不可忽略的影响因素。

清水河是洋河的重要支流,上游地区位于河北省张家口市山西段造山运动的沉降带。本文选取张家口清水河上游流域作为研究区域,建立 SWAT 模型,就该模型在研究区域的适用性进行评价,分析其主要土地利用类型变化对径流的影响系数,了解张家口清

水河流域土地利用—径流机制,为该地区水资源保护利用和水土保持工作提供科学依据。

1 研究区概况

考虑到模型所需资料及流域监测数据的可获得性,本文将研究区域集中在张家口市崇礼区清水河流域上游。地理位置位于东经 114°27′—115°30′,北纬 40°46′—41°17′。东西长 64 km,南北宽 57 km,总面积为 2 334.1 km²。崇礼区是 2022 年冬季奥林匹克运动会主办城市之一,研究区内将有数座为冬奥会服务的大型室外滑雪场落成并投入使用。气候属东亚大陆性季风气候中温带亚干旱区。区域内土壤类型一般从山地到河谷依次为:山区上部为栗钙土、下部为淡栗钙土、山脚沟谷(包括洪积扇、残积台地)为淡栗钙土性土。植被资源主要分为暖温带落叶阔叶林区域和温带草原区域两种。该区域面临水资源匮乏,西沟区域土壤侵蚀严重等问题。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型模拟法

SWAT 模型是在 30 a 前由美国农业部(USDA)和农业研究中心(ARS)针对较大尺度流域开发的具有很强物理机制的长时间的分布式水文模型^[14]。SWAT 模型综合考虑了自然因素和社会因素,能够较好地模拟地表径流的过程^[15],其吸取了 CREAMS(Chemicals Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems), EPIC(Environmental Policy-Integrated Climate)等模型的主要特征,主要形成于 SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins)^[16]。主要运用在基础数据缺乏的区域,通过模拟预测流域内水、泥沙及农业管理措施所产生的响应分析,用于帮助进行水资源管理^[17]。

SWAT 模型主要由水文过程子模型、土壤侵蚀子模型(Epic)、污染负荷子模型 3 部分组成,其中水文过程子模型包括水文循环陆地阶段、水文循环演算和水文循环的汇流阶段^[18]。

水文主要包括降水、地下径流、入渗、疏散损失等过程^[19],SWAT 模型采用的水量平衡方程^[20]如下:

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

式中:HS_m为第 *n* 天的土壤含水量(mm);HS_n为第 *n* 天土壤的最初含水量(mm);*t* 为时间(d);R_n为第 *n* 天的降雨量(mm);Q_n为第 *n* 天的地表径流量(mm);E_n为第 *n* 天的蒸发蒸腾量(mm);W_n为第 *n* 天土壤剖面底层的渗透量和侧流量(mm);T_n为第 *n* 天的地下水回流量(mm)。

SWAT 模型采用修正之后的 MUSLE 模型来模

拟由降水和径流产生的土壤侵蚀^[21]。方程如下:

$$SED = 11.8 (Q_{surf} \cdot Q_{peak} \cdot AREA)^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFP (2)$$

式中:SED 表示产沙量(t); Q_{surf} 表示地表径流总量(mm/hm^2); Q_{peak} 表示洪峰流量(m^3/s);AREA 表示 HRU 面积(hm^2); K 表示水土流失方程中土壤可侵蚀因子 $[0.013 (t \cdot m^2 \cdot h)/(m^3 \cdot t \cdot cm)]$;C 表示土地覆盖与管理措施因子; P 表示水土保持措施因子;LS 表示地形因子;CFRG 为粗糙因子。

本文选取决定性系数 R^2 和纳什效率系数 NSE 来评价模型的模拟精度。

决定性系数 R^2 表示模型模拟值与实测值的变化趋势。计算公式^[22]如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum (M - \bar{M})(S - \bar{S})}{\sqrt{\sum (M - \bar{M})^2 \sum (S - \bar{S})^2}} \right]^2 (3)$$

纳什效率系数 NSE 表示模型的总体效率,NSE 越高,模型的可信度越高,计算公式^[23]如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S - M)^2}{\sum_{i=1}^n (S - \bar{S})^2} (4)$$

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 为实测值个数^[24-25]。

2.2 单一土地利用类型动态函数

本文采用单一土地利用动态度来表示土地利用类型变化速率。单一土地利用类型动态度是指在一定时间范围内研究区内一种土地利用类型速度变化,计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% (5)$$

式中: K 表示研究时段内某一土地利用类型动态度; U_a 表示研究期初某一种土地利用类型的数量; U_b 表示研究期末某一种土地利用类型的数量; T 表示研究时段长,当 T 的时段设定为年时, K 值为该研究区某种土地利用类型年变化率。

2.3 多目标决策函数法

通过 MATLAB(matrix & laboratory)软件建立多元一次线性方程组求解每个单元的某一土地利用类型对流域径流的影响^[26]。

年平均径流量是指时间步长内不同土地利用类型对于径流量影响之和,不同土地利用类型对于径流量的影响将其量化,可正可负,但意义不同,当为正时,代表土地利用类型与径流量变化呈正相关,为负时代表土地利用类型与径流量变化方向呈负相关。

年平均径流量 X_n 的计算方程如下:

$$X_n = M_a \times A_n + M_b \times F_n + M_c \times G_n (6)$$

式中: X_n 为年平均径流量; A_n 为林地面积; F_n 为草地面积; G_n 为耕地面积; M_a, M_b, M_c 分别为林地、草地、耕地土地利用类型单位面积(km^2)影响径流量,单位均为 $m^3/(km^2 \cdot h)$; n 为不同年份下的土地利用情况。

将不同土地利用分布情景下的径流量带入建立如下矩阵,计算可得到不同土地利用类型对径流的影响系数。

$$\begin{bmatrix} X_{2000} - X_{1990} \\ X_{2010} - X_{2000} \\ X_{2015} - X_{2010} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{2000} - A_{1990} & F_{2000} - F_{1990} & G_{2000} - G_{1990} \\ A_{2010} - A_{2000} & F_{2010} - F_{2000} & G_{2010} - G_{2000} \\ A_{2015} - A_{2010} & F_{2015} - F_{2010} & G_{2015} - G_{2010} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} (7)$$

3 模型应用

3.1 流域基础数据库的建立

SWAT 模型基础数据库的建立需要数据包括流域同一投影和空间坐标系统之下的 DEM((Digital Elevation Model, 90 m×90 m, 来源于地理空间数据云)、土壤数据、坡向、坡度、土地利用数据、气象水文数据。土壤数据与气象数据由寒区旱区科学数据中心提供。根据研究区域土壤中砂土、黏土等已知量,利用 SPAW (Soil-Plant-Air-Water) 软件计算得到土壤数据库中所需参数和土壤类型分布图(图 1)。气象数据采用 CMADS V1.1 (The China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model V1.1) 数据集^[27-30],本次研究区域空间范围为 $40^{\circ}46' - 41^{\circ}17'N, 114^{\circ}27' - 115^{\circ}30'E$ 。土地利用数据来自地理空间数据云 Landsat 影像数据,共有 4 期,分别为 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年,分辨率均为 30 m。在 ArcGIS 10.2 和 ERDAS IMAGINE 9.3 软件平台下,进行人工解译,得到 4 期张家口清水河流域土地利用图(图 2)。水文数据为张家口清水河流域水文站点 2008—2016 年的逐月径流实测数据。

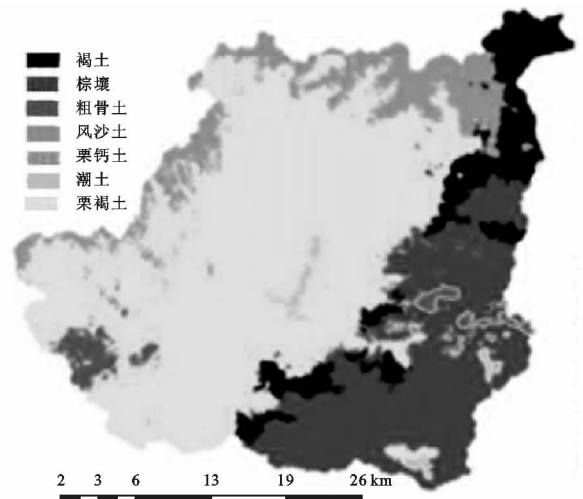


图 1 研究区域土壤类型

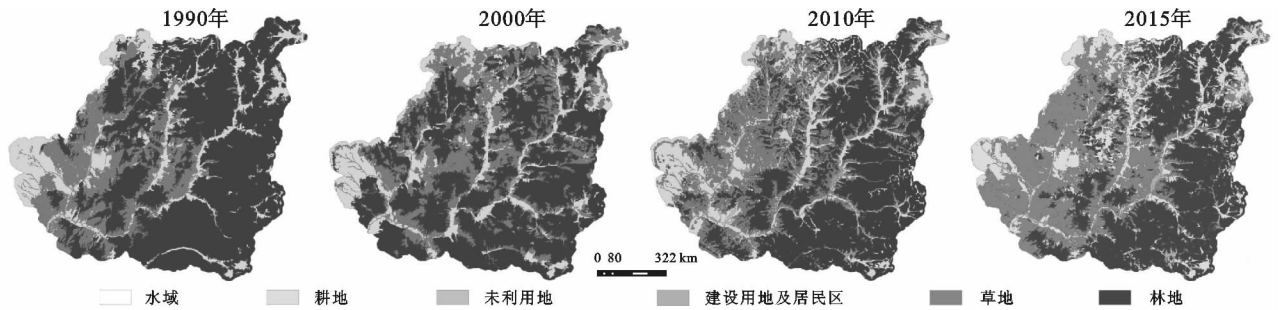


图 2 不同时期研究区域土地利用类型

3.2 子流域划分及水文响应单元(HRU)的生成

HRU(Hydrologic Research Unit)是 SWAT 模型所特有的地方。在子流域的基础上,根据土地利用数据、土壤类型和坡度,将流域划分为具有独特的土地利用和土壤组合的区域,使该模型能够反映不同土地利用/覆盖、土壤和其他水文条件的差异。根据 DEM 数据生成河网,并对研究流域总出口进行界定,以此为依据划分子流域,并计算其参数。最后在集水面积阈值为 42 km² 的尺度上将研究区共划分为 23 个子流域。为了保证模型的准确性,本文采用的面积阈值为土壤类型 15%、土地利用 10%、坡度类型 10%^[31],生成 99 个水文响应单元。

3.3 土地利用变化情景设置

当模型精度达到要求后,通过两种方法建立土地利用情景研究不同土地利用类型对径流的影响,并将 2015 年土地利用设置为基础情景(S₀)^[32-33]。第一种

方法是极端土地利用法,旨在排除其他干扰因素,仅探讨某一种土地利用类型对径流的影响;第 2 种方法是基于实际情况,根据退耕还林还草政策建立土地利用情景。建立如下 5 种情景,面积见表 1。

林地情景(S₁):保留建设用地及居民区和水域,将草地、耕地、未利用地全部设为林地;

草地情景(S₂):保留建设用地及居民区和水域,将林地、耕地、未利用地全部设为草地;

耕地情景(S₃):保留建设用地及居民区和水域,将草地、林地、未利用地全部设为耕地;

退耕还林情景(S₄):保留建设用地及居民区和水域、草地、林地、未利用地及 25°以内的耕地,将流域内坡度大于 25°的耕地设为林地。

退耕还草情景(S₅):保留建设用地及居民区和水域、草地、林地、未利用地及 25°以内的耕地,将流域内坡度大于 25°的耕地设为草地。

表 1 不同土地利用情景的面积统计

土地利用情景		林地	草地	耕地	建设用地及居民区	未利用地	水域
S ₁	面积/km ²	2263.41	0	0	70.55	0	0.16
	比例/%	96.97	0	0	3.02	0	0.01
S ₂	面积/km ²	0	2263.41	0	70.55	0	0.16
	比例/%	0	96.97	0	3.02	0	0.01
S ₃	面积/km ²	0	0	2263.41	70.55	0	0.16
	比例/%	0	0	96.97	3.02	0	0.01
S ₄	面积/km ²	1320.21	702.42	221.48	70.55	19.3	0.16
	比例/%	56.56	30.09	9.49	3.02	0.83	0.01
S ₅	面积/km ²	1029.18	993.45	221.48	70.55	19.3	0.16
	比例/%	44.09	42.56	9.49	3.02	0.83	0.01

4 结果与分析

4.1 流域土地利用变化分析

根据 2017 年发布的《土地利用现状分类》,并结合流域土地利用实际情况,制定张家口清水河流域的土地利用分类表,将流域土地利用类型划分为林地、草地、耕地、建设用地与居民区、未利用地、水域 6 大类^[34]。对 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年崇礼地区张家口清水河流域土地利用分类数据进行统计计算(表 2)。

由表 2 可知,林地、草地、耕地是崇礼地区张家口

清水河流域的主要土地利用类型,这 3 种土地利用类型面积总和所占比例均较大,1990 年为 98.58%,2000 年为 98.58%,2010 年为 97.49%,2015 年为 96.14%;而建设用地及居民区、水域、未利用地所占比例均较小。

从不同年份不同土地利用类型的面积变化趋势来看,林地、水域整体呈现下降趋势,草地、耕地、建设用地及居民区、未利用地整体均呈现上升趋势。就土地利用变化速率而言,在 1990—2015 年期间,各土地利用类型中未利用地年变化速率最快,这是因为 25 a

内土地受自然力(干旱、暴雨等)或人类不合理开发利用(不适当开垦、乱伐,不合理的种植制度和灌溉,不当使用化肥、农药等)导致土地质量下降、生产力衰退,从而使未利用地面积不断增大^[35]。

表 2 1990—2015 年张家口清水河流域土地利用变化

土地利用 类型	1990 年		2000 年		2010 年		2015 年		土地利用类型 变化速率/%
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
林地	1480.62	63.43	1302.96	55.82	1145.85	49.09	1029.18	44.09	−3.05
草地	423.71	18.15	575.04	24.64	649.22	27.81	702.42	30.09	6.58
耕地	396.79	17.00	422.90	18.12	480.61	20.59	512.51	21.96	2.92
建设用地与居民区	24.07	1.03	25.02	1.07	43.07	1.85	70.55	3.02	19.31
未利用地	5.81	0.26	7.59	0.33	14.90	0.64	19.30	0.83	23.22
水域	3.10	0.13	0.60	0.03	0.46	0.02	0.16	0.01	−9.48
合计	2334.10	100.00	2334.10	100.00	2334.10	100.00	2334.10	100.00	

4.2 模型校正、验证

本文使用 SWAT-CUP(SWAT-Calibration and Uncertainty Programs)软件进行自动率定,然后结合率定结果进行手动调错。最终筛选出对流域径流模拟结果影响较大的参数包括 CN2(径流曲线)、SOL_AWC(土层有效含水量,mm/mm)、SOL_K(表层土壤饱和水力传导率,mm/h)、CANMX(最大冠层截流量,mm)、ESCO(土壤蒸发补偿因子)、Alpha_BF(基流 α 系数,d)、

CH_K2(河道有效水力传导度,mm/h)、GW-DELAY(地下水延迟时间,d),其余参数影响较小^[36-37]。

分析清水河流域水文站点 2008—2016 年径流实测数据,将模型预热期设为 2008—2009 年,校准期设定为 2010—2013 年,验证期设定为 2014—2016 年,本研究中模型校准使用的手动调错的方式,通过不断调整的参数率定值,以期达到较好的模拟效果。得到的校正期和验证期的模拟效果见图 3。

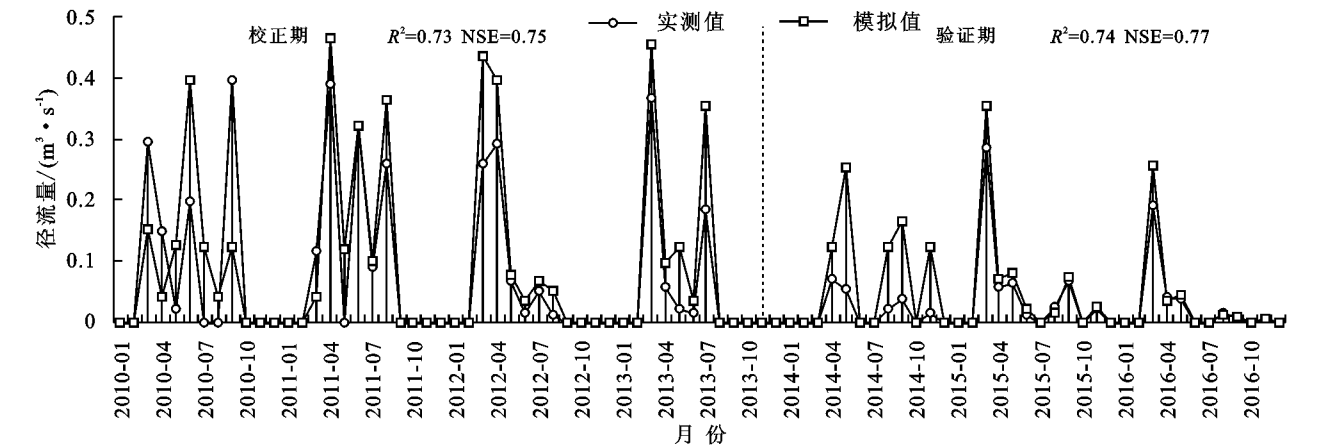


图 3 校正期与验证期模拟与实测月径流量数据对比

根据图 3,校准期和验证期月径流量模拟值与实测值变化趋势相对一致,模拟效果较好。且 NSE 与决定性系数 R^2 的值均高于 0.6,说明 SWAT 模型在张家口清水河流域具有很好的适用性,可信度高。

4.3 土地利用情景下的径流模拟

根据设定的 5 种土地利用情景,模拟张家口清水河流域径流量结果(表 3)。从表 3 可以看出,地表径流的大小顺序为 $S_3>S_0>S_4>S_5>S_2>S_1$ 。模拟结果表明,与基础情景(S_0)相比,随着地表草地和林地面积增加,流域年均径流量减少,随着耕地面积的增加,流域年均径流量也随着增加。这说明了耕地具有增加径流的作用,林地和草地具有截留径流的作用,且林地的截留作用更加明显。

表 3 不同土地利用情景下流域径流变化

土地利用 情景	年均径流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	径流 变化率/%
S ₀	210.15	0.00
S ₁	159.48	−24.11
S ₂	176.76	−15.88
S ₃	228.96	8.95
S ₄	193.32	−8.01
S ₅	187.68	−10.69

4.4 不同土地利用类型对流域产流的影响系数分析

根据前文可知,林地、草地、耕地是崇礼地区张家口清水河流域的主要土地利用类型,因此利用 MATLAB R2017b 进行计算,得到 M_a 、 M_b 、 M_c 的值即分别为林地、草地、耕地 3 种土地利用类型对流域径流量的影响系数(表 4)。

表 4 土地利用变化对径流量的影响系数

土地利用 类型	影响 系数	$\Delta_{1990-2000}$ / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$\Delta_{2000-2010}$ / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$\Delta_{2010-2015}$ / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$\Delta_{1990-2015}$ / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
林地	-1.908	-319.788	-282.798	-210.006	-812.592
草地	-1.836	-272.394	-133.524	-95.76	-501.678
耕地	3.168	-84.5964	-186.9804	-103.356	-374.9328

注： $\Delta_{1990-2000}$ 、 $\Delta_{2000-2010}$ 、 $\Delta_{2010-2015}$ 、 $\Delta_{1990-2015}$ 分别表示 1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2015 年、1990—2015 年各土地利用类型对径流总量的影响。

林地对径流的影响系数为 $1.908 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$,说明林地面积变化与径流量变化呈负相关;研究期内,1990—2015 年林地面积持续减少,被其他土地利用类型所占据,造成了径流量的不断增加。草地对径流的影响系数为 $1.836 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$,说明草地面积变化与径流量变化呈负相关;研究期内,1990—2015 年草地面积持续增加,造成了径流量的不断减少。耕地对径流的影响系数为 $3.168 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$,说明耕地具有促进径流的作用,耕地面积变化与径流量变化呈正相关;研究期内,1990—2015 年耕地面积持续增加,造成了径流的不断增加。

5 结 论

(1) 建立了张家口清水河流域的月均径流模拟模型,校准期和验证期的决定性系数 R^2 和 NSE 的值均高于 0.6,说明 SWAT 模型在张家口清水河流域具有很好的适用性。

(2) 林地、草地、耕地是崇礼地区张家口清水河流域的主要土地利用类型,随时间迁移,林地面积呈下降趋势,草地、耕地均呈现上升趋势,未利用地的年变化速率最快。

(3) 耕地对径流的影响系数为正值,表明耕地具有增加径流的作用;林地对径流的影响系数为负值,表明林地和草地具有截留径流的作用,且林地的截留作用更加明显。

张家口清水河流域的水资源及水土保持工作,要以保护生态作为基础,调整优化土地利用类型,科学合理布局,从而减少径流,加大流域出水量。

参考文献:

[1] 商颂. 基于分位数回归的降水、径流变化及响应分析[D]. 天津:天津大学,2016.

[2] 亢健. 湟水流域土地利用/覆被变化下的水文响应研究[D]. 西宁:青海师范大学,2010.

[3] 张冠华,张平仑,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.

[4] Santillan J, Makinano M, Paringit E. Integrated landsat

image analysis and hydrologic modeling to detect impacts of 25-year land-cover change on surface runoff in a philippine watershed remote sensing [J]. 2011, 3 (6):1067-1087.

[5] 杨宏伟,许崇育. 东江流域典型子流域土地利用/覆被变化对地表径流影响[J]. 湖泊科学,2011,23(6):991-996.

[6] Cuo L, Lettenmaier D P, Alberti M, et al. Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin[J]. Hydrological Processes, 2009,23(6):907-933.

[7] Guo H, Hu Q, Jiang T. Annual and seasonal stream-flow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2008,355(1/4):106-122.

[8] Noretto M D, Jobbagy E G, Paruelo J M. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina [J]. Global Change Biology, 2005,11(7):1101-1117.

[9] Prokop P, Sarkar S. Natural and human impact on land use change of the Sikkimese-Bhutanese Himalayan Piedmont, India[J]. Quaestiones Geographicae, 2012, 31 (3):63-75.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 陈引珍,程金花,张洪江,等. 清港河流域土地利用变化对径流的影响[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):38-43.

[13] 李勇. 汾河水库流域土地利用变化对径流影响研究[D]. 郑州:郑州大学,2014.

[14] 尹刚,王宁,袁星,等. 基于 SWAT 模型的图们江流域氮磷营养物非点源污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2011,30(4):704-710.

[15] 陈昌春. 变化环境下江西省干旱特征与径流变化研究[D]. 南京:南京大学,2013.

[16] 黄沛然,汤玲英. 基于 SWAT 模型的金华江上游土地利用变化对径流影响的研究[J]. 水资源开发与管理,

- 2017(4):64-69.
- [17] 王鑫杰. 基于 SWAT 模型的杭埠河流域农业非点源污染分析[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [18] 刘科家. 改进 SWAT 模型在铈矿区土水界面流铈污染负荷模拟中的应用研究[D]. 湖南湘潭:湖南科技大学, 2015.
- [19] 吕梦醒, 张展羽, 冯宝平, 等. 基于 SWAT 模型的浊漳河干流灌溉制度优化研究[J]. 节水灌溉, 2015(1):90-95.
- [20] 谢金红. 安徽省大别山区小流域水文响应模拟与分析[D]. 安徽芜湖:安徽师范大学, 2012.
- [21] 郭正鑫. 基于 GIS 流域水质水量联合调控系统的实现与应用[D]. 济南:山东师范大学, 2009.
- [22] 姚海芳, 师长兴, 邵文伟, 等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6):139-144.
- [23] 邵辉. 渭河流域水土流失变化对梯田措施响应的模拟研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [24] 张晶楠. AVSWAT 模型在河北省平原区的水文模拟研究[D]. 河北保定:河北农业大学, 2011.
- [25] 李鸿儒, 卢远, 何文. 钦江流域土地利用/覆被变化对径流产沙的影响[J]. 中国水土保持, 2016(4):40-43.
- [26] 赵素霞. 基于多目标决策的耕地保有量目标预测研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17):4219-4222, 4243.
- [27] 孟现勇, 师春香, 刘时银, 等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用:以黑河流域为例[J]. 人民珠江, 2016, 37(7):1-19.
- [28] 孟现勇, 吉晓楠, 刘志辉, 等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报, 2014(3):528-539.
- [29] Xianyong M, Danlin Y U, Zhihui L, et al. Energy balance-based SWAT model to simulate the mountain snowmelt and runoff-taking the application in juntanghu watershed(China) as an example[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(2):368-381.
- [30] 孟现勇, 王浩, 刘志辉, 等. 基于 CLDAS 强迫 CLM3. 5 模式的新疆区域土壤温度陆面过程模拟及验证[J]. 生态学报, 2017, 37(3):979-995.
- [31] 陈曼雨, 崔远来, 郑世宗, 等. 基于 SWAT 模型的农业面源污染尺度效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9):187-191.
- [32] 刘闻. 基于 SWAT 模型的水文模拟及径流响应分析[D]. 西安:西北大学, 2014.
- [33] 李晓娟. 基于 SWAT 模型的泔河流域土地利用变化对径流的影响[D]. 西安:西北大学, 2016.
- [34] 唐丽霞, 张志强, 王新杰, 等. 晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7):800-810.
- [35] 杜金龙, 朱记伟, 解建仓, 等. 近 25 a 关中地区土地利用及其景观格局变化[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1):217-226.
- [36] 黎明. 基于 SWAT 的北江流域土地覆盖及气象条件变化的水文响应模拟研究[D]. 广州:中国科学院研究生院, 2015.
- [37] 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.

(上接第 244 页)

- [16] 唐利华, 张永福, 刘小辉. 干旱区河谷城市土地利用生态风险动态预测:以新疆伊宁市为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):240-245.
- [17] 李玉珍, 张永福, 安放舟. 基于 GIS 的新和县土地利用生态风险分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1):172-175, 180.
- [18] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1):64-69.
- [19] 徐羽, 钟业喜, 冯兴华, 等. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J]. 生态学报, 2016, 36(23):7850-7857.
- [20] 梁发超, 刘黎明. 基于地形梯度的土地利用类型分布特征分析:以湖南省浏阳市为例[J]. 资源科学, 2010, 32(11):2138-2144.
- [21] 宋世雄, 梁小英, 陈海, 等. 基于多智能体和土地转换模型的耕地撂荒模拟研究:以陕西省米脂县为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3):515-525.
- [22] 毛南赵, 梁小英, 段宁, 等. 基于 ODD 框架的农户有限理性决策模型的构建及模拟:以陕西省米脂县马蹄洼村为例[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(5):164-171, 218.
- [23] 张月, 张飞, 周梅, 等. 干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1):233-242.
- [24] Liu D, Liang X Y, Chen H, et al. A quantitative assessment of comprehensive ecological risk for a loess erosion gully:a case study of Dujiashi Gully, northern Shaanxi Province, China[J]. Sustainability, 2018, 10(9). DOI: 10.3390/su10093239.
- [25] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2):157-160, 192.