

DOI: 10.5846/stxb201704190699

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): - .

ZUBAIDA · Muyibul, Shi Q D, POLAT · Muhtar, Zhang R. Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: a SWAT model based analysis. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): - .

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

祖拜代·木依布拉^{1,2}, 师庆东², 普拉提·莫合塔尔^{1,3,*}, 张 润⁴

1 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

2 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学旅游学院, 乌鲁木齐 830049

4 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101

摘要: 选用 SWAT 分布式水文模型, 定量分析了乌鲁木齐河流域土地利用与气候变化对径流的影响, 采用情景分析方法设置 3 类情景, 对变化环境下的流域径流进行了预测。以 R^2 、NSE 和 PBIAS 等 3 个参数评价了模拟的拟合度, 不确定性。结果表明: 1) 在模型校准期和验证期 R^2 分别为 0.89 和 0.75, NSE 分别为 0.84 和 0.74, PBIAS 在 18%—23% 范围内, 说明 SWAT 模型在乌鲁木齐河上游径流模拟中具有较好的适用性; 2) 综合型情景模拟分析得出, 研究区气候变化对径流的影响强度大于土地利用变化的影响强度。土地利用和气候共同引起流域年均径流量减少 1.41 m^3/s , 土地利用变化引起年均径流量减少 0.04 m^3/s , 气候变化引起年均径流量减少 1.37 m^3/s ; 3) 极端土地利用情景模拟分析得出, 草地情景的年均径流增加 0.1 m^3/s , 林地情景的年均径流量减少 0.58 m^3/s ; 4) 气候变化情景模拟分析得出, 流域径流量与降水变化呈正相关关系, 与气温变化呈负相关关系。降水量增加 10% 和 20% 时, 年均径流量增加 3.05 m^3/s 和 4.02 m^3/s 。当降水量减少 10% 和 20% 时, 年均径流量减少 0.93 m^3/s 和 2.25 m^3/s 。气温升高 1℃ 和 2℃ 时, 年均径流量减少 2.71 m^3/s 和 3.02 m^3/s 。在气候变化环境下, 需要重视降水和气温的预测, 应通过优化土地结构来减缓气候变化的水文效应。

关键词: SWAT 水文模型; 乌鲁木齐河上游; 径流模拟; 土地利用; 气候变化

Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: a SWAT model based analysis

ZUBAIDA · Muyibul^{1,2}, SHI Qingdong², POLAT · Muhtar^{1,3,*}, ZHANG Run⁴

1 College of Life and Environmental Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China

2 Institute of Arid Land Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 College of Tourism, Xinjiang University, Urumqi 830049, China

4 Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China

Abstract: To quantify the effects of land use and climate change on runoff in the upper Urumqi River watershed, the soil and water assessment tool (SWAT) was calibrated and validated using the correlation index (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and percent bias (PBIAS). In addition, the river runoffs under a changing environment were simulated by designing various land use and climate change scenarios. The results showed that values of R^2 and NSE for simulated

基金项目: 国家自然科学基金 (41461111)

收稿日期: 2017-04-19; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pulati_mo@xju.edu.cn

streamflow during the calibration period were 0.89 and 0.84, respectively. During the validation period, the value of R^2 was 0.75 and that of NSE was 0.74. Values of PBIAS were between 10% and 20% both during calibration and validation periods. Simulation results showed that the SWAT model was capable for simulating runoff responses in Urumqi River upstream. River runoff in the study area was more sensitive to climate change than land use change. The annual average runoff decreased by $1.41 \text{ m}^3/\text{s}$ under the scenario of land use and climate change. Meanwhile, land use change caused an annual streamflow reduction of $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, whereas climate change caused streamflow reduction of $1.37 \text{ m}^3/\text{s}$, indicating that the impact of climate change on streamflow was more obvious than that of land use change. The results of extreme land use scenario showed that the annual average runoff increased by $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ in the grassland scenario, and decreased $0.58 \text{ m}^3/\text{s}$ in the woodland scenario. The climate variability scenario analysis indicated that a 10% increase in annual precipitation could increase the annual streamflow by $3.05 \text{ m}^3/\text{s}$, and precipitation decrease of the same percentage could reduce the annual streamflow by $0.93 \text{ m}^3/\text{s}$. In addition, a 20% increase in annual precipitation could induce an increase in annual streamflow by $4.02 \text{ m}^3/\text{s}$, whereas a 20% decrease in annual precipitation could reduce annual streamflow by $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$. When the annual mean temperature increased by 1°C and 2°C , the annual streamflow decreased by $2.71 \text{ m}^3/\text{s}$ and $3.02 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively. Therefore, we concluded that the annual streamflow variation had the same change tendency as that of annual precipitation.

Key Words: SWAT model; upper Urumqi River watershed; runoff simulation; land use; climate change

地表径流的时空演变很大程度上受到土地利用和气候变化的影响^[1-2],这种影响并非是单项式的交互作用,而流域系统要素间的多项式交互作用所导致的^[3],模拟和预测两者的水文响应,有利于决策者提出合理的流域管理措施。目前所应用的水文模型种类较多,其中由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)与德克萨斯农工大学开发的 SWAT 分布式水文模型整合了多个水文模型的特征,具有很强的物理机制^[4]。该模型通过多种方式离散化流域,反映流域的空间异质性和水文物理过程^[5-6],能够较好的模拟人类活动对流域水文循环的影响^[7-8]。因此,SWAT 模型在国内外不同流域径流模拟中应用广泛,效率较高。

水资源是制约西北干旱区绿洲社会经济发展的主要因素。乌鲁木齐河是西北干旱区典型的内流河,也是新疆首府乌鲁木齐市的主要水源,不仅承载着首府社会经济发展所带来的日益增长的用水需求,而且作为丝绸之路经济带核心区中的枢纽城市支撑着国家向西开放的战略需求。随着人口的增加、城市规模的不断扩大以及气候的区域性变化,导致该流域水资源供需矛盾突出^[9-11]。因此,在气候变化和人类活动影响下,建立适合乌鲁木齐河流域的水文模型,模拟和预测乌鲁木齐河径流变化,对水资源的合理分配以及利用效率的提高具有极其重要的意义。相对于我国其他类型的河流径流变化,在西北典型河流对气候和土地利用变化的水文响应方面的研究中,SWAT 模型运用得仍为较少。尽管有学者对 SWAT 模型在乌鲁木齐河上游径流模拟的适用性进行了初步研究^[12-13],但在变化环境下的水文效应方面有必要进行系统研究。

基于以上背景,本研究考虑到数据的可获取性和代表性,选择乌鲁木齐河上游为研究区,探讨了 SWAT 模型在研究的适用性。在此基础上,通过设计不同的土地利用和气候变化情景,定量分析了二者对流域径流量的影响,并分别分析了单一土地利用类型和不同气候变化情景对流域径流的影响。研究结果可为乌鲁木齐河流域水资源管理和规划提供重要的科学依据。

1 研究区概况

乌鲁木齐河发源于天山中段北坡天格尔峰 II 北侧的 1 号冰川,流经乌鲁木齐市,流入到准葛尔盆地南缘沙漠中,流域全场 214 km 总面积 4684 km^2 。流域上游有 1958 年设立的英雄桥水文站,位于 $87^\circ 02' \text{E}$, $43^\circ 37' \text{N}$,海拔 1920 m。本文研究区为英雄桥水文站以上的山区,其集水面积为 921 km^2 ,冰川面积占集水面积的 4%。研究区多年平均气温 -1°C ,平均径流量为 $2.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,降水补给占河流年径流总量的 80% 以上。

图 1 为研究区示意图。根据联合国粮农组织 (FAO) 提供的世界协调土壤数据库 (HWSD), 研究区内主要的土壤类型有松软薄层土 (Mollic Leptosols), 永冻薄层土 (Gelic Leptosols), 钙积黑钙土 (Calicic Chernozems), 简育灰色土 (Haplic Greyzems), 冰川 (Glaciers) 和简育栗钙土 (Haplic Greyzems)。根据 SWAT 模型土地分类要求, 本文将土地利用类型分为林地、灌丛、草地、冰川水域、裸岩石砾地和未利用地 6 类。2000 年和 2011 年研究区土地利用类型以草地和林地为主 (图 2, 表 1)。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型数据准备

模型输入数据包括空间数据和属性数据, 数据详情为表 2 所示。此外, 为了连接数据库中属性数据与其对应的空间数据, 分别建立了土地利用和土壤类型索引表。为了填补气象数据中的缺失数据, 用 SWAT Weather 软件生成天气发生器 (WXGEN) 用于气象数据插值。

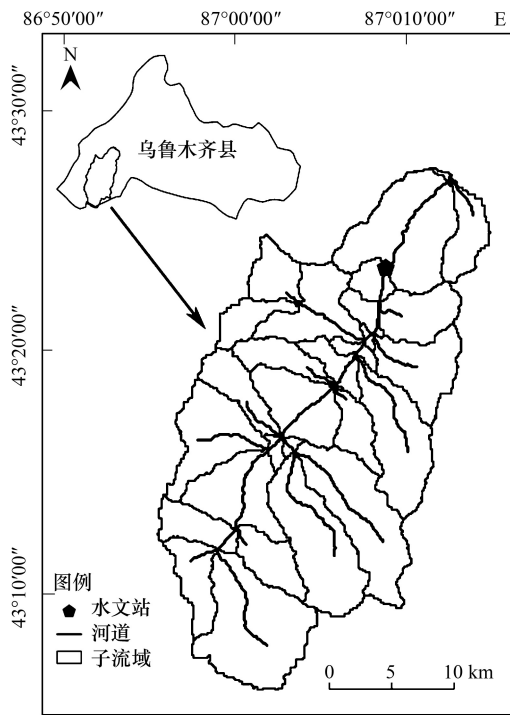


图 1 乌鲁木齐河上游示意图
Fig.1 Sketch map of Upper Urumqi Watershed

表 1 2000,2011 年乌鲁木齐河流域上游土地利用面积比例
Table 1 Land use percentage of Urumqi Upper Watershed in 2000 and 2011

年份 Year	面积比例 Area percentage/%					
	林地 Forest land	灌丛 Shrubs	草地 Grassland	冰川水域 Water body	裸岩石砾地 Bare land	未利用地 Unused land
2000	17.27	0.07	69.64	7.58	2.70	2.74
2010	18.36	0.12	65.61	9.84	3.81	2.27

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
数字高程模型 Digital elevation model	高程、坡度	中科院地理空间云数据	裁剪、投影变换
土地利用类型分布图 Land use map	2000,2011 年土地利用分布图	Landsat TM	ENVI 遥感解译、重分类、投影变换
土壤类型分布图 Soil distribution map	HWSD 数据库	世界粮农组织	裁剪、投影变换
气象数据 Meteorological data	1993—2012 年的逐日数据	乌鲁木齐气象局	建立天气发生器、按照一定格式整理数据 (用 SWATWeather 软件处理)
水文数据 Hydrological data	1993—2012 年月径流数据	乌鲁木齐水文局	
土壤属性数据 Soil attribution data	由 HWSD 数据库得到	世界粮农组织 (http://www.fao.org/home/en/)	直接从数据库获得、用 SPAW 软件进行计算

2.2 模型校准和验证

研究表明, ArcSWAT 模型自带的模型校准和验证工具功能较弱^[1], 因此选取 SWAT 官网提供的

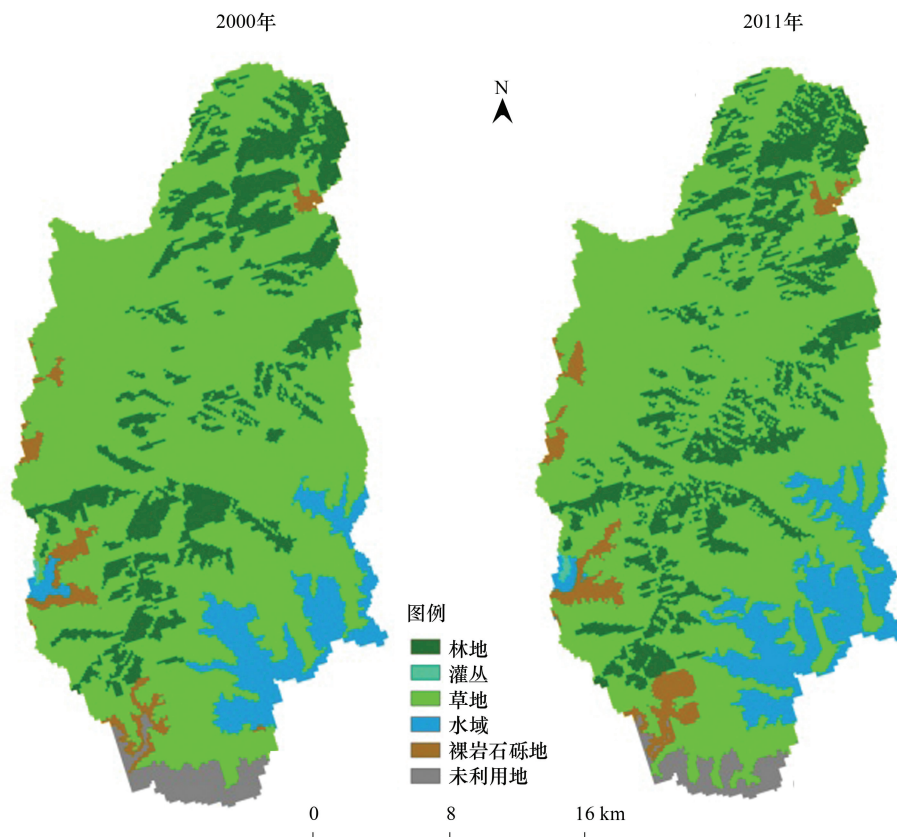


图2 乌鲁木齐河上游土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Upper Urumqi Watershed

SWATCUP 对模型进行校准和验证。为了减少模型运行前期一些变量对模拟结果的影响,将 1993—1994 年作为预热期,1994—2005 年为模型校准期,2006—2011 年为模型验证期。由于目前对 SWAT 模型校准期和验证期时间长短没有严格的要求,因此本研究中校正期和验证期的选择是随机的。

2.3 模型适用性评价:

模拟值与实测值的拟合度可以通过一系列统计指标来表征。本研究选用决定系数 R^2 、效率系数 NSE 和相对偏差系数 PBIAS 来衡量模拟值与实测值的拟合度,以此评价 SWAT 模型在乌鲁木齐河流域上游的适用性。其中,决定系数 R^2 的表达式^[14] 为如下:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{mean}})(Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{mean}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{sim}} - Q^{\text{smean}})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (1)$$

Nash-Sutcliffe 模型效率系数(NSE)和偏差系数(PBIAS)的表达式^[15] 为:

$$\text{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q^{\text{mean}})^2} \right] \quad (2)$$

$$\text{PBIAS} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2 \cdot 100}{\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{obs}}} \right] \quad (3)$$

式中, Q_i^{obs} Q_i^{sim} 为实测径流值, Q_i^{sim} 为模拟径流值, Q^{mean} 为实测径流平均值, Q^{smean} 为模拟径流平均值。

其中, R^2 表示模拟值与实测值的吻合程度,取值为 0—1,一般 $R^2 \geq 0.5$ 时模拟结果可以接受, $R^2 \geq 0.7$ 时

模拟比较准确, $R^2 = 1$ 时非常吻合。ENS 用来判断水文模型的模拟效果,取值为 0—1,当 $0.5 \leq \text{ENS} \leq 0.65$ 时为满意, $0.65 < \text{ENS} \leq 0.75$ 时为好, $\text{ENS} > 0.75$ 时很好。PBIAS 为偏差系数, $-25\% \leq \text{PBIAS} \leq 25\%$ 时,模拟结果可以接受。

2.4 情景设置

确定模型在研究区的适用性之后,通过设置如下 3 类情景来分析英雄桥水文站径流对土地利用和气候变化的响应:

1) 土地利用和气候变化共同影响下的径流模拟情景

为了区分气候和土地利用变化对径流的贡献大小,通过将各时段的土地利用和气象数据相互交叉,设计出四种子情景(表 3)。以此为基础,对比不同子情景下的径流响应,分别表征两种因子的单一和共同作用:

- a.情景 1 与情景 3 对比分析,获取气候变化下的流域径流量;
- b.情景 1 与情景 4 对比获取土地利用变化下的径流量;
- c.情景 1 与情景 2 对比分析获取土地利用和气候二者综合影响下的径流量。

表 3 模型模拟分析情景
Table 3 Scenarios for modeling analysis

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 Scenario1	2000 年	1993—2002 年	情景 3 Scenario3	2000 年	2003—2012 年
情景 2 Scenario2	2011 年	2003—2012 年	情景 4 Scenario4	2011 年	1993—2002 年

2) 极端土地利用变化情景

考虑到研究区主要的土地利用类型为草地和林地,剔除其他因素,以 2000 年土地利用数据和 1994—2008 年气象数据为基准,探讨土地利用类型变化对径流量的单一作用,从而设计出两种子情景:

- 情景 5:所有林地转为草地时的径流模拟情景;
- 情景 6:所有草地转为林地时的径流模拟情景。

3) 气候变化情景

根据 IPCC 第五次评估报告,在未来气候可能变化的范围内设计出如下子情景(以 2000 年土地利用和 1994—2002 年气象数据为基准期):

- a.气温不变,设置降水增加 10%/20%和减少 10%/20%的 4 种方案;
- b.降水不变,气温升高 1℃/2℃共两种方案;
- c.降水和气温两两组合下的 8 种方案

3 结果与分析

3.1 模型校准与验证

选择和径流有关的 15 个参数进行敏感性分析,经分析得出对研究区径流产生最敏感的参数有坡面漫流的曼宁系数(OV_N),基流系数(ALPHA_BF),降水递减率(PLAPS),SCS 径流曲线系数(CN2)和地下水滞后系数(GW_DELAY)等。可见,研究区径流产生受坡面、气象状况和地下水与地表水转换过程的影响较大。该结果与赵杰^[12]等在乌鲁木齐河流域的研究结果比较一致。英雄桥水文站敏感参数最佳值为表 4 所示。

经模型参数校准和验证得出,校准期 R^2 和 NSE 值分别为 0.89 和 0.84,PBIAS 为 18.9%;在验证期, R^2 和 NSE 分别为 0.75 和 0.74,PBIAS 为 22.2%,表明 SWAT 模型在乌鲁木齐河上游径流模拟中有较好的适用性,可以进行径流模拟和预测。图 3 和表 5 为乌鲁木齐河流域上游月径流模拟结果。

表 4 乌鲁木齐河流域上游英雄桥水文站径流敏感性参数

Table 4 Sensitive Parameters for Runoff in YingxiongQiao Station in Urumqi Upper Watershed					
参数名称 Parameter name	参数定义 Parameter definition	敏感排名 Sensitivity order	调参方法 Calibration method	取值范围 Value range	最佳值 Optimal value
OV_N	坡面漫流的曼宁系数	1	v	(0.01,30)	4.26
ALPHA_BF	基流系数	2	v	(0,1)	0.5
PLAPS	降水递减率	3	v	(-1000,1000)	412.34
CN2	SCS 径流曲线系数	4	v	(35,98)	56.71
GW_DELAY	地下水滞后系数	5	v	(0,500)	497.47
CH_K1	支流有效渗透系数	6	v	(0,300)	106.75
REVAPMN	发生再蒸发的浅层含水层水位 阈值	7	v	(0,500)	213.86
SOL_AWC	土壤可利用有效水	8	v	(0,1)	0.55
TLAPS	温度递减率	9	v	(-10,10)	-6.52
CH_N1	支流的曼宁系数	10	v	(0.01,30)	13.66
CANMX	最大冠层截留量	11	v	(0,100)	9.08
ESCO	土壤蒸发补偿系数	12	v	(0,1)	0.21
SLSUBBSN	平均坡长	13	v	(10,150)	94.63
SURLAG	地表径流滞后系数	14	v	(0.05,24)	10.11
GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	15	v	(0.02,0.2)	0.19

v:赋值,replace; OV_N: Manning's n value for overland flow; ALPHA_BF: Baseflow recession constant; PLAPS: Precipitation lapse rate; CN2: Curve number of moisture condition II; GW_DELAY: Groundwater delay time; CH_K1: Effective osmotic coefficient of tributaries; REVAPMN: Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap; SOL_AWC: Available water of the soil layer; TLAPS: Temperature laps rate; CH_N1: Manning's coefficient of tributary; CANMX: Maximum canopy storage; ESCO: Soil evaporation compensation factor; SLSUBBSN: Average runoff lag time; GW_REVAP: Groundwater revap coefficient

表 5 乌鲁木齐河流域上游 SWAT 模型月径流模拟校准和验证结果

Table 5 Calibration and validation results of SWAT model for monthly runoff in Urumqi Upper Watershed			
校准期/验证期 Period of calibration/validation	决定系数 R^2	效率系数 NSE coefficient	相对偏差系数 PBIAS
校准期 Calibration period	0.89	0.84	18.90%
验证期 Validation period	0.75	0.74	22.20%

3.2 情景模拟分析

1) 气候和土地利用共同影响下的径流模拟情景

该情景分析结果表明:情景 1、2、3、4 的年均径流量分别为 8.69、7.28、7.32、8.65 m³/s(表 6)。情景 1 与情景 2 对比得出,土地利用和气候变化综合影响引起年均径流量减少 1.41 m³/s。基于情景 1,情景 3 中气候变化引起年均径流量减少 1.37 m³/s,而情景 4 中,土地利用变化引起径流量减少 0.04 m³/s。情景 3 相对于情景 1,年平均气温降低了 8.5%,年平均降水量减少了 6.3%,气温增幅较降水的大。情景 4 相对于情景 1,林地面积增加了 1.09%,草地面积减少了 4.03%。可见,研究时段内气候变化对径流的影响强度较大。因此,在气候变化背景下,合理规划研究区土地利用类型,对水资源管理和规划有重要的意义。

2) 极端土地利用情景

当 17.27%的林地变草地时,年均径流量增加了 0.1m³/s(增幅为 1.18%);而当 69.64%的草地变林地时,年均径流量减少了 0.58m³/s(增幅为 6.82%)(表 7)。可见,林地对流域径流有截流作用,而草地具有增流作用。草地和林地面积的增加有利于提高研究区水源涵养、土壤保持和维护生物多样性功能。但是,不同面积的草地和林地又对流域产流产生不同的影响。因此,适当的规划流域草地和林地面积是乌鲁木齐河上游水资源合理配置的有效手段。

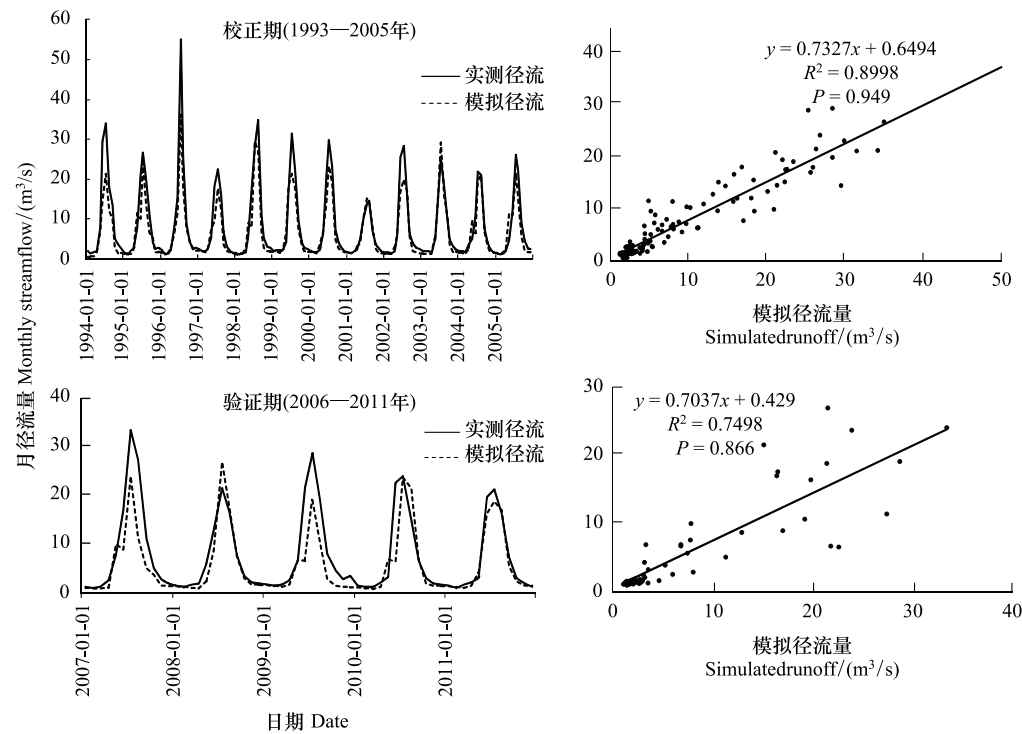


图 3 乌鲁木齐河上游英雄桥水文站径流校正常和验证期模拟结果
Fig.3 Simulation results of calibration and validation period of runoff in YingxiongQiao station in Urumqi Upper Watershed

表 6 综合情景模拟结果

Table 6 Simulation result of integrated scenarios

情景 Scenarios	年均降水 Mean annual precipitation/mm	年均气温 Mean annual temperature/(℃)	年均径流量 Annual runoff value/(m³/s)	土地利用变化对 径流量的影响 Effects of land use change on runoff/ (m³/s)	气候变化对径 流量的影响 Effects of climate change on runoff/ (m³/s)
1	526.16	-4.67	8.69	—	—
2	492.89	-4.21	7.28	-0.04	-1.37
3	—	—	7.32	—	-1.37
4	—	—	8.65	-0.04	—

表 7 乌鲁木齐河上游极端土地利用情景下的径流模拟结果

Table 7 Simulation result of the scenario of extreme land use type in the upper reaches of the Urumqi River

情景 Scenarios	土地利用类型变化情景设置 Land use change scenario	年均径流量/(m³/s) Annual runoff value	径流变化量/(m³/s) Runoff variation
情景 4 Scenario4	林地变成草地	8.6	0.1
情景 5 Scenario5	草地变成林地	7.91	-0.58

3) 气候变化情景

当气温不变,降水量增加 10%和 20%时,流域年均径流量分别增加了 3.85 m³/s(44.3%)和 4.83 m³/s(55.5%);当降水量减少 10%和 20%时,年均径流量减少了 0.93 m³/s(10.7%)和 2.25 m³/s(25.9%)。可见,流域内年均径流量随着降水的增加而增加,径流变化幅度与降水变化幅度成正比。保持降水不变,当气温升高 1℃和 2℃时,年均径流量减少了 2.71 m³/s(31.2%)和 3.02 m³/s(34.8%)(表 8)。出现此结果的原因可以解释为降水对径流的影响是直接的,而温度通过影响蒸发而影响流域径流。尤其在干旱区,不考虑冰川融水径

流的情况下,温度的升高会增加流域径流的蒸发量,从而减少流域总径流量。可见,在干旱区,人类活动较小的流域,径流对气候变化很敏感。

表 8 乌鲁木齐河上游气候变化情景设计表

Table 8 Climate change scenario design for the upper reaches of the Urumqi River

		降水变化 Precipitation variation/mm				
		P×(1+20%)	P×(1+10%)	P	P×(1-10%)	P×(1-20%)
气温变化/℃	T+2	4.02	3.05	-3.02	-1.44	-3.72
Temperature variation	T+1	4.43	3.45	-2.71	-1.06	-3
	T	4.83	3.85	0	-0.93	-2.25

P:降水,precipitation; T:气温,temperature

4 结论与讨论

本文应用 SWAT 分布式水文模型,通过校准和验证,证明了模型在典型干旱区高寒山区流域—乌鲁木齐河流域上游的适用性,通过设置 3 类情景定量分析了土地利用和气候变化对产流量的影响,结果表明:

1) SWAT 模型在英雄桥水文站径流模拟中具有较好的适用性。本研究参数敏感性分析结果表明,研究区产流受坡面、气象状况和地下水与地表水转换过程的影响较大,该结果与前人的研究结果较一致。但由于模型结构复杂,参数较多^[16],存在输入的不确定性^[17]、参数的不确定性等问题,因此模型评价结果与其他相关研究结果也存在一定的差异。为此,在以后的研究中需要对模型不确定性进行深入分析。

2) 定量分析土地利用与气候变化对径流的影响得出,气候变化和土地利用变化共同作用下年均径流减少了 1.41 m³/s。与基准期相比,土地利用变化引起径流量减少 0.04 m³/s,而气候变化引起径流量减少 1.37 m³/s。可见,气候变化对研究区径流的影响强度大于土地利用变化。另外,土地利用和气候两者共同影响下径流仍有减少趋势,这可能会导致下游用水形式更加严峻,也将对整个流域的生态环境造成较大影响。因此,合理规划土地利用结构,优化土地利用布局是对应气候变化带来的水文负效应的有效措施,也是实现下游合理分配水资源的有效手段。对于径流的年内和年际变化,以及突变点分析在下一步工作中需要重点讨论。

3) 极端土地利用变化模拟结果表明,林地变草地的情景下,年均径流量增加 1.18%;而当草地变林地时,年均径流量减少 6.852%。可见,在研究区林地对径流的减缓作用较强。草地和林地面积的增加有利于提高研究区水源涵养、土壤保持和维护生物多样性功能。但是,不同面积的草地和林地又对流域产流的影响不同,林地具有截留作用,而草地有增流作用。因此,适当的规划流域草地和林地面积是提高研究区生态系统服务功能,合理配置水资源的有效手段。

4) 气候变化模拟情景结果表明,在不考虑冰川融水径流的前提下,降水量增加 10% 和 20% 时,年均径流量增加了 44.3% 和 55.5%;当降水量减少 10% 和 20% 时,年均径流减少 10.7% 和 25.91%。气温升高 1℃ 和 2℃ 时,年均径流减少 31.2% 和 34.8%。可见以降水与融雪补给为主的高寒山区河流^[13-14]径流量受降水和温度的影响都比较大,其中降水增加对径流量的影响最显著。由于 SWAT 模型不能模拟冰川融水过程,本研究中现有较小面积的冰川统一归为水域来处理,这可能对模拟结果有一定的影响。因此,在后续的研究中,有必要在模型中添加冰川模块来提高模拟精度。

参考文献 (References):

- [1] Rahman K, da Silva A G, Tejeda E M, Gobiet A, Beniston M, Lehmann A. An independent and combined effect analysis of land use and climate change in the upper Rhone River watershed, Switzerland. *Applied Geography*, 2015, 63: 264-272.
- [2] Zhang L, Karthikeyan R, Bai Z K, Srinivasan R. Analysis of streamflow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China. *CATENA*, 2017, 154: 1-11.
- [3] 冯畅, 毛德华, 周慧, 曹艳敏, 胡光伟. 气候与土地利用变化对涟水流域径流的影响. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 395-406.

- [4] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. SWAT 2009 理论基础. 龙爱华, 邹松兵, 许宝荣, 陆志翔, 尹振良, 汪党献, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 2012: 68-152.
- [5] 袁宇志, 张正栋, 蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响. 应用生态学报, 2015, 26(4): 989-998.
- [6] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, Strauss P, 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] 赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 陈抒晨. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究. 地理科学, 2016, 36(4): 571-579.
- [8] 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.
- [9] 成鹏. 乌鲁木齐地区近 50a 降水特征分析. 干旱区地理, 2010, 33(4): 580-587.
- [10] 蓝永超, 钟英君, 吴素芬, 沈永平, 王国亚. 天山南、北坡河流出山径流对气候变化的敏感性分析——以开都河与乌鲁木齐河出山径流为例. 山地学报, 2009, 27(6): 712-718.
- [11] 李瑞雪, 张明军, 金爽, 熊友云, 刘园园. 乌鲁木齐河流域气候变化的区域差异特征及突变分析. 干旱区地理, 2010, 33(2): 243-250.
- [12] 赵杰, 徐长春, 高沈瞳, 李佳秀. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河流域径流模拟. 干旱区地理, 2015, 38(4): 666-674.
- [13] 刘曼, 师庆东, 张毓涛, 王智. 乌鲁木齐河上游水源涵养地径流模拟研究. 中国农村水利水电, 2015, (8): 113-117, 125-125.
- [14] Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, Nash M S, Jackson M, Erickson C. Assessing impacts of land use and land cover changes on hydrology for the upper san Pedro watershed. Journal of Hydrology, 2011, 407(1/4): 105-114.
- [15] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models Part I—a discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [16] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1988-1999.
- [17] 龙银平, 张耀南, 赵国辉, 严鹏, 李其江, 李润杰. SWAT 模型水文过程模拟的数据不确定性分析——以青海湖布哈河流域为例. 冰川冻土, 2012, 34(3): 660-667.