

基于 SWAT 模型的海拉尔河上游土地利用与 气候变化对径流的影响

闫宇会¹ 薛宝林^{1,2} 张路方¹

(1. 北京师范大学 水科学研究院,北京 100875;2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京 100875)

摘要 选用 SWAT 分布式水文模型,对海拉尔河上游的径流量进行了模拟分析,并采用情景分析方法定量分析了土地利用与气候变化对径流的影响.结果表明:(1) 在模型的校准期和验证期, R^2 分别为 0.85 和 0.84, E_{ns} 分别为 0.82 和 0.81, $PBIAS$ 在 10% 以内,说明 SWAT 模型在海拉尔河上游的径流模拟精度较好;(2) 由土地利用和气候变化共同影响下的综合型情景分析得出,气候变化对流域的径流量变化有更为显著的影响,以 2000 年土地利用数据、1992-2001 年气象数据模拟的径流数据为基准,在土地利用和气候变化的共同作用下,流域的年均径流量减少了 36.1 m^3/s ,其中由于气候变化因素减少了 27.67 m^3/s ,由于土地利用变化因素减少了 5.43 m^3/s ;(3) 由极端土地利用情景分析得出,林地变草地的情景下,年均径流量增加了 3.91 m^3/s ,草地变林地的情景下,年均径流量减少了 5.16 m^3/s .(4) 由气候变化情景分析得出,流域的径流量变化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%,流域的年均径流量增加了 31.99 m^3/s ,降水量减少 10%,年均径流量减少了 13.87 m^3/s ;气温升高 1 $^{\circ}C$,流域的年均径流量减少了 7.91 m^3/s ,气温减少 1 $^{\circ}C$,年平均径流量增加了 8.76 m^3/s .在气候变化的背景下,需要考虑降水量变化和气温变化的综合影响,通过合理优化土地利用布局来应对气候变化带来的种种问题.

关键词 SWAT 模型;海拉尔河上游;径流量变化;气候变化;土地利用变化

中图分类号 P339

文献标识码 A

0 引言

土地利用和气候变化是影响流域水文变化过程的最直接因素,也是流域水资源变化研究的热点^[1-3].短期内,土地利用变化通过影响流域截留、蒸散、入渗等水文循环的关键环节,进而影响流域水资源的量与质^[4-6],长期内,气候变化尤其是降水和温度的变化,影响着流域水循环,所以开展土地利用与气候变化对流域径流量影响的研究有利于进行流域的规划和治理^[7].目前,国内相关学者已经对土地利用变化和气候变化影响下的流域水文响应过程展开了研究,但国内相关研究主要集中在黄河流域^[8-11]、长江流域^[12-14]以及西北地区和华北地区,如梁婕等基于 SWAT 模型采用情景分析的方法探讨了浏阳河流域径流对土地利用和气候变化的协同响应^[15],祖拜代·木依布拉等探讨了乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响^[1],郭军庭等探讨了潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响^[5],但在典型的东北冻土区,很少有学者使用 SWAT 模型来进行流域内河流的径流模拟.

海拉尔河位于中国内蒙古自治区呼伦贝尔市境内,近些年来,在自然和人为因素的共同作用下,海拉尔河流域的生态平衡遭到破坏,生态环境不断恶化,生态功能日益减退,造成了草原退化、水域面积减少、湿地萎缩、土壤侵蚀等一系列生态环境问题^[16,17].在气候变化的大背景下,构建水文模型模拟海拉河流域的径流变化情况,并根据模拟结果对流域的径流变化情况做出合理预测,这有利于解决流域内的各种水文问题,减

收稿日期:收稿日期:2019-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31670451);中央高校基本科研业务费专项资金(2017NT18)资助

通讯作者:薛宝林,男,汉族,博士,副教授,研究方向:生态水文学,E-mail:xuebl@bnu.edu.cn.

少人类活动带来的水文负效应,维护生态环境的稳定性.任慧娟等使用 SWAT 模型对海拉尔河上游的径流情况进行了初步的模拟,并证明 SWAT 模型在海拉尔河上游流域具有较好的适用性^[16].本文基于前人的研究对海拉尔河上游的径流情况进行了进一步模拟,根据现有的资料和已经获取的相关数据,本文以海拉尔河的上游区域作为研究区,探讨了 SWAT 模型在海拉尔河的上游区域的径流适用情况,并采用情景分析的方法,分析了土地利用和气候变化背景下的流域径流量的变化情况.

1 研究区域概况

海拉尔河位于中国内蒙古自治区呼伦贝尔市境内,是额尔古纳河的上游河段.发源于大兴安岭西侧吉勒老奇山西坡,从东至西流向,在乌尔旗汉林场与库都尔河汇合后始称海拉尔河^[8],其地理位置位于东经 117°43′-122°27′,北纬 47°38′-50°16′.海拉尔河干流全长 714.9 km,流域面积 5.45 万 km²,主要有库都尔河、免渡河、伊敏河等支流.流域内积雪较厚,封冻期约 200 天,年中洪峰有两次,分别是 5 月的融雪期和 8 月的雨季^[17].本文的研究区域为坝后站水文站出口断面以上的区域,该区域的年平均气温约为 5℃,年平均降雨量约为 350 mm,且降水主要集中在 6-9 月,如图 1 为研究区简图.

根据国际应用系统分析研究所 (IIASA) 及联合国粮农组织 (FAO) 提供的土壤数据库 (HWSO),结合地理因素,研究区内的主要土壤类型包括筒育高活性淋溶土 (Haplic Luvisols),筒育灰色土 (Haplic Greyzems),筒育黑钙土 (Haplic Chernozems),钙积黑钙土 (Calcic Chernozems),粘化栗钙土 (Luvic Kastanozems),石灰性雏形土 (Calcaric Cambisols),石灰性砂性土 (Calcaric Arenosols),筒育黑土 (Haplic Phaeozems),松软潜育土 (Mollic Gleysols). SWAT 模型中建议土地利用类型不超过 10 种,如果拿到的数据类型超过 10 种,则需要进行分类,因为本文所获取的土地利用类型种类较多,根据模型的要求,将流域内的土地利用类型进行重分类,分为林地、草地、水域、城镇用地、未利用土地、耕地 6 类.如图 2,表 1 所示,2000 年海拉尔河上游的土地利用现状以草地为主(约占 51.69%),林地次之(约占 34.99%),其他类型的土地占比较少.2010 年海拉尔河上游仍以草地为主(约占 51.48%),林地次之(约占 35.23%),该流域仍以这两种土地利用类型为主.主要原因可能是该流域位于草原境内,近年来流域内城市化建设并没有对该地区的植被覆盖情况产生太大的影响.

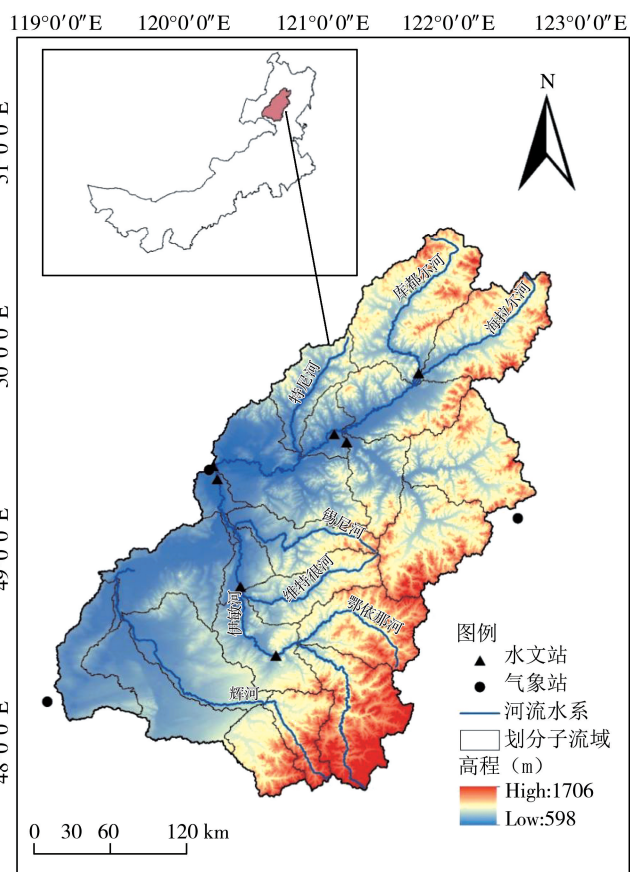


图 1 海拉尔河流域上游简图

表 1 2000、2010 年海拉尔河流域土地利用比例/%

年份	林地	草地	水域	城镇用地	未利用土地	耕地
2000	34.99	51.69	0.65	0.43	5.46	6.78
2010	35.23	51.48	0.64	0.43	5.34	6.88

2 研究方法

2.1 数据准备

SWAT 模型输入数据主要包括空间数据和属性数据.空间数据主要有高程数据、土地利用类型数据、土壤分布数据^[6]、水文站及气象站点的空间分布数据;属性数据主要有土壤类型数据、气象数据、水文数据^[18,19],数据详情如表 2 所示.同时,在建模过程中建立了土地利用类型和土壤类型索引表,保证模型中的

所需数据在各个数据库中有所对应. 另外,用 SWAT Weather 软件来进行气象数据的插值,以填补气象数据中的缺失数据.

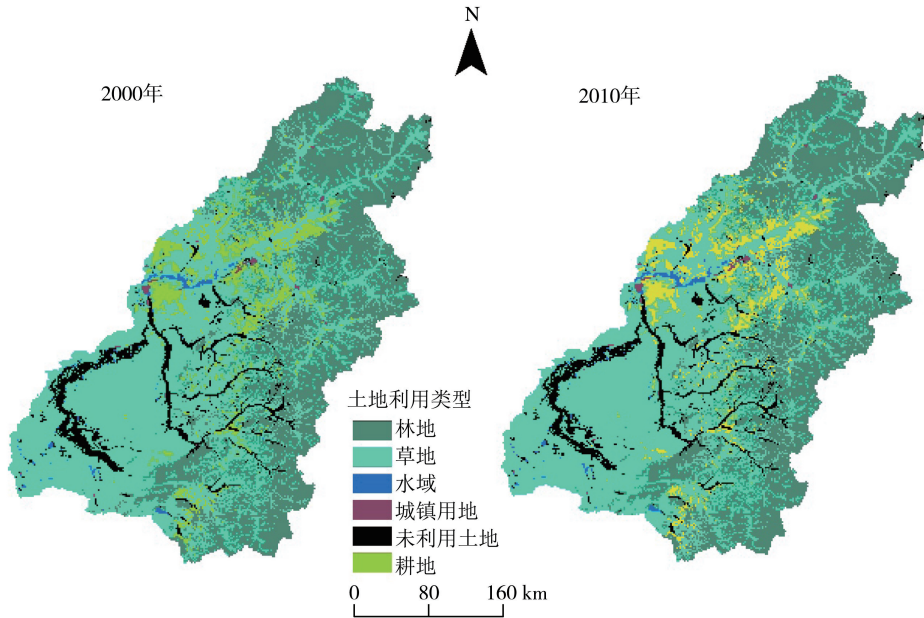


图 2 海拉尔河上游 2000、2010 年土地利用类型图

表 2 所使用数据列表

数据类型	数据来源	处理方法
高程数据	中科院地理空间数据云	ArcGIS 裁剪、投影变换
2000、2010 年的土地利用数据	中科院资源环境科学数据中心	重分类、投影变换
土壤类型数据	HWSD 数据库	裁剪、投影变换
土壤属性数据	HWSD 数据库	使用 SPAW 软件进行计算
1990-2012 年的逐日气象数据	水文统计年鉴	使用 SWATWeather 软件处理
1990-2012 年的月径流数据	水文统计年鉴	

数字高程模型数据:首先进行几何校正,再通过 ArcGIS 对其进行裁剪和投影变换. 土地利用数据:首先从中科院资源环境科学数据中心下载原始数据,并通过 ArcGIS 重分类、投影变换得到. 土壤类型数据和土壤属性数据:由 HWSD 数据库提供,HWSD 数据库包含大量土壤参数,数据格式为 grid 栅格格式,投影为 WGS84 坐标系统,采用的土壤分类系统主要为 FAO-90^[20],因数据库所提供的数据为国际标准,还需采用 SPAW 软件将数据由国际标准转换成美国国家地质调查局(USGS)标准的土壤参数.

2.2 模型构建

基于 ArcGIS 的 ArcSWAT 模型构建主要包括 3 个过程:(1) 流域划分:首先基于 DEM 数据进行流域定义,在加载 DEM 数据之后生成河网,可以对河网的面积阈值进行修改,该值越小生成的河网越详细. 在生成河网以后,定义海拉尔河上游坝后站水文站附近的某点作为流域总出口,进行子流域划分. 本文按照模型默认的面积阈值进行河网划分,最终流域被划分为 24 个子流域,如图 1 所示.(2) 水文响应单元分析:将土地利用数据、土壤数据进行重分类,输入模型后进行阈值设定,再进行水文响应单元划分. 土地利用数据处理参考相关的分类标准,土壤数据处理参考流域的地理位置因素,同时需要采用 SPAW 软件进行土壤相关参数的计算,并建立土壤数据库.(3) 输入数据:使用 SwatWeather 软件填补缺失或者失效的气象数据,按要求将降水、气温、风速、辐射和相对湿度等数据导入 SWAT 输入数据库,模型构建完成后即可运行模拟^[18-20].

2.3 模型校准与验证

本次研究使用的模型校准验证工具为 SWATCUP 软件,本研究把预热期设为 1990-1991 年,把校准期设为 1992-2005 年,把验证期设为 2006-2012 年,使用 2000 年的土地利用数据和 1992-2005 年的气象数据进行校准期的径流模拟,使用 2010 年的土地利用数据和 2006-2012 年的气象数据进行验证期的径流模拟. 运行模型前需要设置敏感性分析方法,本次采用 LH-OAT 方法^[21]. 确定参数后要使用 SWATCUP 来调整参

数,并确定参数的最佳取值范围和最优值^[22,23],最后将参数的最优值带入模型进行模拟并对模拟结果进行验证.

2.4 模型评价指标

采用了决定系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 系数 Ens 和相对误差 $PBIAS$ ^[23] 评价 SWAT 模型在海拉尔河流域上游的模拟精度. 其中,决定系数 R^2 的表达式如

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{ave}^{obs})(Q_i^{sim} - Q_{ave}^{sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{ave}^{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_{ave}^{sim})^2}, \quad (1)$$

Nash-Sutcliffe 效率系数 Ens 的表达式如

$$Ens = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{ave}^{obs})^2} \right], \quad (2)$$

相对误差 $PBIAS$ 的表达式如

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}}, \quad (3)$$

式中 Q_i^{obs} 为实测径流值, Q_i^{sim} 为模拟径流值, Q_{ave}^{obs} 为实测径流平均值, Q_{ave}^{sim} 为模拟径流平均值^[1]. 其中, R^2 取值范围为 0-1, 用来表示模型模拟值与实测值的拟合程度. Ens 用来判断水文模型模拟结果的好坏, 取值范围为 0-1. 只有当 $Ens > 0.5$ 时, 模拟结果才可以接受. Ens 接近 1, 表示模型模拟的质量好, 可信度高. $PBIAS$ 为相对误差, 若相对误差控制在 20% 以内, 则模型的模拟结果在可接受的范围内^[1].

2.5 情景设置

在模型模拟结果的精度达到可接受的范围时, 本研究设置了 3 类情景分析土地利用变化和气候变化对海拉尔河上游径流的影响.

(1) 土地利用和气候变化共同影响下的综合型情景. 此综合型情景使用了不同年份的土地利用数据和气象数据, 探究了海拉尔河上游流域径流量对土地利用变化和气候变化的响应情况. 在此综合型情景下设置出四种种子情景, 并以情景 1 为基准, 对不同子情景下的径流模拟情况进行分析比较, 研究两种因素对径流的影响作用, 各种子情景设置如表 3 所示. 对比情况: 首先, 情景 1 与情景 3 对比, 分析了流

表 3 模型模拟情景设置

	土地利用数据	气象数据
情景 1	2000 年	1992-2001 年
情景 2	2010 年	2002-2012 年
情景 3	2000 年	2002-2012 年
情景 4	2010 年	1992-2001 年

域径流量对气候变化的响应情况; 情景 1 与情景 4 对比, 分析了流域径流量对土地利用变化的响应情况; 最后, 情景 1 与情景 2 作对比, 分析了径流量对土地利用和气候共同变化的响应情况.

(2) 极端土地利用变化情景. 因为研究区的土地利用类型以林地和草地为主, 可以在不考虑其他土地利用类型变化的情况下, 只考虑林地和草地变化对径流量变化的影响. 本次研究以 2000 年土地利用数据和 1995-2005 年气象数据模拟的结果为基准, 设置两种子情景, 探讨土地利用类型变化对流域径流量的影响, 两种情景: 林地变成草地情景, 保留除草地和林地以外的其他土地利用类型, 将所有林地转化为草地; 草地变成林地情景, 保留除草地和林地以外的其他土地利用类型, 将所有草地转为林地.

(3) 气候变化情景. 分析气候变化对流域径流量的影响, 以 2000 年土地利用数据和 1990-2002 年气象数据模拟的结果为基准, 分别设置降水不变气温变化和气温不变降水变化的情景, 探讨气候变化对流域径流量的影响. 四种情景: 气温不变, 设置降水增加 10% 和减少 10% 的两种情景; 降水不变, 气温升高 1 °C 和降低 1 °C 的两种情景.

3 结果分析

3.1 参数敏感性分析

SWAT 模型主要包括水文过程、土壤侵蚀、污染负荷三个子模型, 因本文只进行降水径流模拟, 所以只用了水文过程模型. 其中 SWAT 模型运用 SCS 曲线数法计算地表径流, 使用运动储蓄模型计算壤中流,

使用 Penman-Monteith 法计算潜在蒸散发. 由于 SWAT 模型运行模拟所涉及的参数众多,首先要对各个参数进行敏感性分析,筛选出合适的参数,并选择了对模拟结果影响较大的 10 个参数进行敏感性分析,主要有土壤可利用有效水,土壤蒸发补偿系数,浅层地下水径流系数等,由此可见,研究区径流产生受土壤水、气象、融雪情况的影响较大. 坝后站敏感参数分析如表 4 所示.

3.2 模型校准验证分析

如表 5 所示,通过参数校准和验证,校准期的决定系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 系数 Ens 和相对误差 $PBIAS$ 分别为 0.85%、0.82% 和 6.2%,验证期的决定系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 系数 Ens 和相对误差 $PBIAS$ 分别为 0.84%、0.81% 和 1.3%,图 3 和图 4 表示了 SWAT 模型在海拉尔河上游的月径流模拟情况,这表明 SWAT 模型在海拉尔河流域上游具有很好的适用性,可以考虑使用该模型在该流域进行径流模拟.

表 4 海拉尔河流域上游坝后站径流敏感性参数

参数名称	参数定义	敏感性排序	调参方法	取值范围	最佳值
SOL_AWC	土壤可利用有效水	1	r	0,1	0.85
ESCO	土壤蒸发补偿系数	2	r	0,1	0.01
GWQMN	浅层地下水径流系数	3	r	500,1700	1200
ALPHA_BF	基流分割系数	4	v	0,1	0.2
CN2	SCS 径流曲线系数	5	r	30,100	48
CANMX	最大冠层截留量	6	r	0,100	25
SFTMP	降雪温度	7	r	-5,5	4.8
SMTMP	融雪基温	8	r	-5,5	4.8
SMFMX	6 月 21 日的融雪因子	9	r	0,10	2
SMFMN	12 月 21 日的融雪因子	10	r	0,10	5

表 5 海拉尔河流域上游月径流量模拟校准和验证结果

校准期/验证期	站点	相关系数 R^2	效率系数 Ens	相对误差 $PBIAS$
校准期	坝后站	0.85	0.82	6.2%
验证期	坝后站	0.84	0.81	1.3%

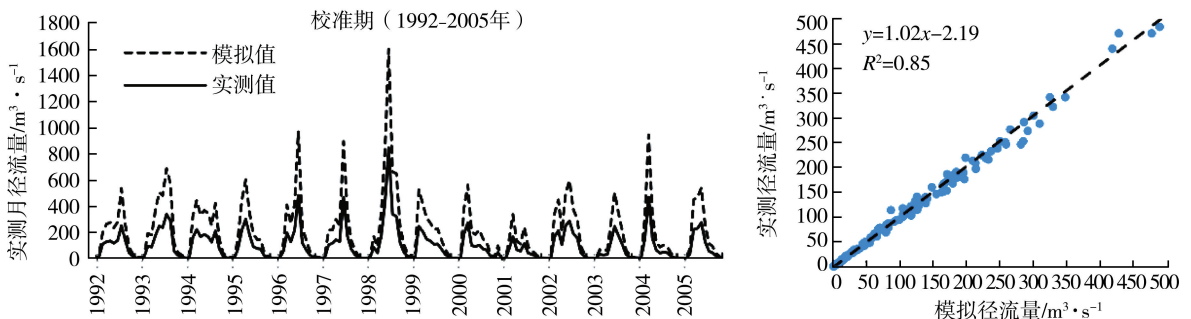


图 3 海拉尔河上游坝后站水文站径流校准期的模拟结果

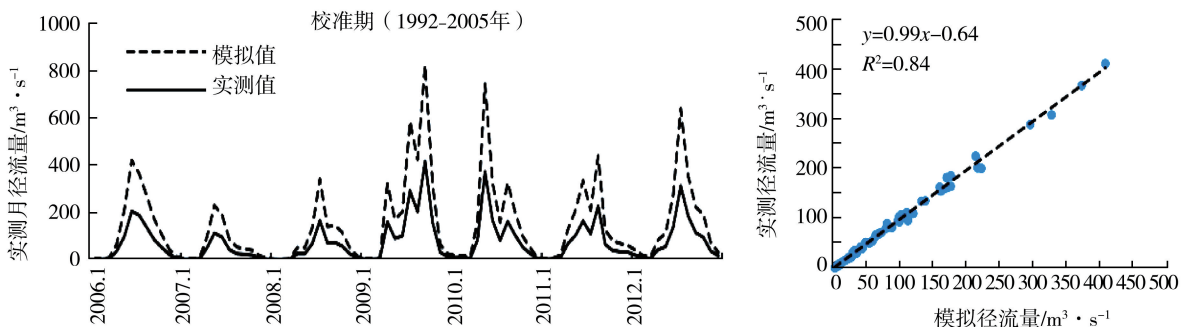


图 4 海拉尔河上游坝后站水文站径流验证期的模拟结果

3.3 情景模拟分析

(1) 土地利用和气候变化共同影响下的综合型情景. 如表 6 所示,情景 1、2、3、4 的年均径流量分别为

113.16、80.06、88.49、110.73 m^3/s 。通过分析情景 1 与情景 2, 可以得出在土地利用和气候变化的共同影响下, 流域的年均径流量减少了 36.1 m^3/s 。基于情景 1, 情景 3 中气候变化影响下, 流域的年均径流量减少了 27.67 m^3/s , 相比情景 1, 情景 3 中年平均气温增加了 0.03 $^{\circ}\text{C}$, 增加幅度为 4.0%, 年平均降水量减少了 46.41 mm, 减少幅度为 12.8%, 降水量变化幅度更大。基于情景 1, 情景 4 中土地利用变化影响下, 流域的年平均径流量减少了 5.43 m^3/s , 相比情景 1, 情景 4 中林地所占比例增加了 0.24%, 草地所占比例减少了 0.21%。通过各种情景的对比分析可知, 气候变化对流域的径流量变化有更为显著的影响。可以看出, 进行土地利用的合理规划有利于应对气候变化下的水资源管理问题。

表 6 综合情景模拟结果

情景	年均降水 /mm	年均气温/ $^{\circ}\text{C}$	年均径流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	土地利用变化对径流量 的影响/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	气候变化对径流量 的影响/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	362.57	-0.75	113.16	-	-
2	316.16	-0.72	80.06	-5.43	-27.67
3	-	-	85.49	-	-27.67
4	-	-	107.73	-5.43	-

(2) 极端土地利用情景. 保持除草地和林地以外的其他土地利用类型不变, 将 34.99% 的林地变草地时, 流域的年均径流量增加了 3.91 m^3/s , 增加幅度为 3.72%; 将 51.69% 的草地变林地时, 流域的年均径流量减少了 5.16 m^3/s , 减少幅度为 4.91%, 如表 7 所示。通过对此情景的分析可知, 林地增加的情况下, 流域的径流量有减少的趋势; 草地增加的情况下, 流域的径流量有增加的趋势。草地和林地的存在有利于维护流域生态环境的稳定性, 保持生态系统的多元性, 所以适当维持草地和林地的面积对流域水资源的合理分配具有一定的作用。

表 7 海拉尔河流域上游极端土地利用情景下的径流模拟结果

情景	年均径流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	径流变化量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	径流变化率/%
基准期	105.19	-	-
林地变成草地情景	109.10	+3.91	+3.72
草地变成林地情景	100.03	-5.16	-4.91

(3) 气候变化情景. 在保持气温不变的情景下, 降水量增加了 10%, 流域的年均径流量增加了 31.99 m^3/s , 增加幅度为 26.3%; 降水量减少了 10%, 流域的年均径流量减少了 13.87 m^3/s , 减少幅度为 11.4%, 如表 8 所示。通过对此情景的分析可知, 流域的降水量变化与流域的年均径流量变化成正相关的关系。在保持降水不变的情景下, 气温升高了 1 $^{\circ}\text{C}$, 流域的年均径流量减少了 7.91 m^3/s , 减少幅度为 6.5%; 气温减少了 1 $^{\circ}\text{C}$, 流域的年平均径流量增加了 8.76 m^3/s , 增加幅度为 7.2%。通过对此情景的分析可知, 流域的气温变化与流域的年均径流量变化成负相关的关系。降水量变化对径流量变化的影响是直接的, 而温度变化对径流量变化的影响是间接的^[24,25]。在北方典型寒旱区域, 不仅要考虑降水的影响, 还要考虑融雪径流的影响, 因为流域温度升高会加大河流的蒸发量, 但是也会加大融雪径流量^[24]。当分析温度变化对流域径流量的影响时, 需要同时考虑河流蒸发量和融雪径流量两种因素的作用, 后续的研究中可能会进一步探析温度变化引起的河流蒸发量和融雪径流量变化与流域径流量变化的关系。

表 8 海拉尔河流域上游气候变化情景下的径流模拟结果

情景	年平均径流/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	径流变化量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	径流变化百分比/%	
降水	+10%	153.62	+31.99	+26.3
	0	121.63	-	-
	-10%	107.76	-13.87	-11.4
温度	+1 $^{\circ}\text{C}$	113.72	-7.91	-6.5
	0	121.63	-	-
	-1 $^{\circ}\text{C}$	130.39	+8.76	+7.2

4 结果与讨论

4.1 结论

(1) SWAT 模型在海拉尔河上游流域径流模拟中具有很好的适用性,校准期的三个评级指标 R^2 、 Ens 、 $PBIAS$ 分别为 0.85、0.82、6.2%,验证期的三个评价指标 R^2 、 Ens 、 $PBIAS$ 分别为 0.84%、0.81%、1.3%,所以可以使用 SWAT 模型来进行该流域的径流模拟。

(2) 气候和土地利用变化共同影响下的综合型情景中,相比于综合型情景下的情景 1,气候变化和土地利用变化共同作用下流域的年均径流量减少了 36.1 m³/s,土地利用变化下流域的年均径流量减少了 5.43 m³/s,气候变化下流域的年均径流量减少了 27.67 m³/s,流域径流量的变化受气候变化的影响更大一些。

(3) 极端土地利用情景中,林地变草地的情景下流域的年均径流量增加了 3.72%,草地变林地的情景下流域的年均径流量减少了 4.91%。林地增加的情况下,流域的径流量有减少的趋势;草地增加的情况下,流域的径流量有增加的趋势。

(4) 气候变化情景中,在气温不变的情景下,降水量增加 10%,流域的年均径流量增加 26.3%,降水量减少 10%,流域的年均径流量减少 11.4%,可见流域径流量变化与降水量变化呈正相关关系。在降水量不变的情景下,气温升高 1℃,流域的年均径流量减少 6.5%,气温降低 1℃,流域的年均径流量增加 7.2%,可见流域径流量变化与气温变化呈负相关关系。

4.2 讨论

随着人类活动对自然环境影响的加剧,人类活动通过改变地表覆盖对径流的影响越来越大,同时由于气候变化引起的水热条件改变也会对流域径流产生重要的影响^[26,27]。从研究结果来看,土地利用和气候变化共同影响下流域径流有减少趋势,这可能会对流域的水资源配置产生一定影响,因此应当合理优化土地利用布局来应对气候变化带来的挑战^[28];极端土地利用情景下,由于不同比例的林地和草地对流域的径流有不同的影响,因此应当考虑改变林地和草地的比例对流域的径流进行一定的调控^[28];气候变化情景下,降水量变化相比气温变化对流域径流有着更为显著的影响,后续研究将参考 IPCC6 的报告,对流域径流进行更加详细的模拟。此外,本文下一步考虑从年内的丰、枯水期细化对径流变化的分析,并从泥沙、水质和非点源污染等水文效应展开研究,土地利用变化从土地利用类型角度转换到景观格局角度进行分析。

参 考 文 献

- [1] 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):230-238.
- [2] 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[J].生态学报,2017,37(23):8107-8116.
- [3] 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.
- [4] 庄晓雯.逐步聚类与随机分析方法用于流域水资源管理[D].北京:华北电力大学,2017.
- [5] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.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[J].生态学报,2014,34(6):1559-1567.
- [6] 袁宇志,张正栋,蒙金华,等.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[J].应用生态学报,2015,26(4):989-998.
- [7] 蒙海花,王腊春.岩溶地区土地利用变化的水文响应研究—以贵州后寨河流域为例[J].中国岩溶,2009(3):1-6.
- [8] 郑培龙,李云霞,赵阳,等.黄土高原泾河流域气候和土地利用变化对径流产沙的影响[J].水土保持研究,2015,22(5):20-24.
- [9] 刘昌明,李道峰,田英,等.基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J].地理科学进展,2003,22(5):437-445.
- [10] 晁丽君,李致家,李巧玲,等.基于物理基础的分布式水文模型应用研究[J].水力发电,2013,39(9):13-16.
- [11] 李道峰,田英,刘昌明.黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J].地理学报,2004,59(4):565-573.
- [12] 李佳,张小咏.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.
- [13] 陈军锋,李秀彬.土地覆被变化的水文响应模拟研究[J].应用生态学报,2004,15(5):833-836.
- [14] 夏智宏,周月华,许红梅.基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2010(2):70-81.
- [15] 梁婕,曾光明,等.基于 SWAT 模型的浏阳河流域径流对土地利用和气候变化的协同响应[J].水资源与水工程学报,2019,30(2):91-97.
- [16] 任娟慧,李卫平,任波,等. SWAT 模型在海拉尔河流域径流模拟中的应用研究[J].水文,2016,36(2):51-55.
- [17] 李攀.海拉尔河流域景观分布格局变化及其驱动因子分析[D].内蒙古:内蒙古大学,2011.
- [18] 杨明智,肖伟华,鲁帆,等.气候变化对我国华南沿海地区水资源的影响—以南流江流域为例[J].广西大学学报(自然科学版),

2017(05):331-339.

- [19] 张静, 杨明祥, 雷晓辉, 等. 基于 HEC-HMS 的青狮潭水库入库洪水预报研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 225-229.
- [20] 王怀志, 高玉琴, 袁玉, 等. 基于 SWAT 模型的秦淮河流域气候变化水文响应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017(1): 84-90.
- [21] 李慧, 靳晟, 雷晓云, 等. SWAT 模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究—以玛纳斯河径流模拟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 79-82.
- [22] 朱瑶, 梁志伟, 李伟, 等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3012-3018.
- [23] 张余庆, 陈昌春, 杨绪红, 等. 基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在修水流域径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013(9): 24-28.
- [24] Xue B L, Wang L, Li X P, et al. Evaluation of evapotranspiration estimates for two river basins on the Tibetan Plateau by a water balance method[J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 290-297.
- [25] 王伟, 方青青, 王国强, 等. 呼伦贝尔草原区 CO₂ 源、汇及时空分布模拟研究[J]. 生态学报, 2018(20): 230-251.
- [26] Hu T Y, Su Y J, Xue B L, et al. Mapping Global Forest Aboveground Biomass with Spaceborne LiDAR, Optical Imagery, and Forest Inventory Data[J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 565.
- [27] 傅致远, 姜宏, 王国强, 等. 半干旱草原区土壤性质对植物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 12: 1255-1263.
- [28] Xue B L, Guo Y W, Gong Y W, et al. The influence of meteorology and phenology on net ecosystem exchange in an eastern Siberian boreal larch forest[J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(5): 520-530.

Impact of Land Use and Climate Change on Runoff in the Upper Reaches of Hailaer River based on SWAT Model

YAN Yu-hui¹ XUE Bao-lin^{1,2} ZHANG Lu-fang¹

(1. School of Wate Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract The SWAT distributed hydrological model was used to simulate the runoff in the upper reaches of the Hailaer River, and the impact analysis of land use and climate change on runoff was quantitatively analyzed. The results show that: (1) In the calibration and verification periods of the model, R² is 0.85 and 0.84, Ens are 0.82 and 0.81, respectively, and PBIAS is within 10%, indicating that the SWAT model has better runoff simulation accuracy in the upper reaches of the Hailaer River; (2) A comprehensive scenario analysis under the combined influence of land use and climate change shows that climate change has a more significant impact on runoff changes in the basin. Based on the land use data of 2000 and the runoff data simulated by meteorological data in 1992-2001, the annual average runoff of the basin decreased by 36.1 m³/s under the combined effect of land use and climate change, which was reduced due to climate change factors. 27.67 m³/s, the land use change factor decreased by 5.43 m³/s; (3) According to the extreme land use scenario analysis, the annual average runoff increased by 3.91 m³/s under the scenario of forest land change, grassland change. In the case of woodland, annual average runoff decreased by 5.16 m³/s. (4) According to the climate change scenario analysis, the runoff change of the basin is positively correlated with the precipitation change and negatively correlated with the temperature change. The precipitation increased by 10%, the annual average runoff of the basin increased by 31.99 m³/s, the precipitation decreased by 10%, the annual average runoff decreased by 13.87 m³/s; the temperature increased by 1 °C, and the annual average runoff of the basin decreased. At 7.91 m³/s, the temperature decreased by 1 °C, and the annual average runoff increased by 8.76 m³/s. In the context of climate change, it is necessary to consider the combined effects of precipitation changes and temperature changes, and to rationally optimize the land use layout to address the various problems brought about by climate change.

Key words SWAT model; upstream of Hailaer River; runoff change; climate change; land use change