

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0071

杨沫霞, 马文林, 张质明, 等. 土地利用变化和气候变化对温榆河上游流域径流变化的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 72-78. YANG M X, MA W L, ZHANG Z M, et al. Impacts of changes in land use and climate on runoff variation in the upper reaches of Wenyu River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 72-78. (in Chinese)

土地利用变化和气候变化对温榆河上游 流域径流变化的影响

杨沫霞^{1,2}, 马文林^{1,2}, 张质明^{1,2}, 张君枝^{1,2}

(1. 北京建筑大学 环境与能源工程学院 环境科学与工程系, 北京 100044;

2. 北京建筑大学 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044)

摘要: 土地利用和气候是直接影响流域水文水资源两个主要因素, 其影响分离的研究对流域的土地利用规划和水资源管理具有重要意义。以温榆河上游流域为研究对象, 在统计分析 1980–2014 年流域气象因子、土地利用变化趋势的基础上, 通过 SWAT 模型模拟与情景设计相结合的方法, 评估了气候变化和土地利用变化对温榆河上游径流变化的影响。结果表明, SWAT 模型在温榆河上游流域模拟效果良好, 率定期和验证期的决定系数 R^2 分别为 0.80、0.77, 纳什系数 Ens 分别为 0.79、0.74。流域降雨量和气温呈递增趋势, 林地和耕地减少, 城乡及工矿和居民用地增加, 草地在 1995 年到 2005 年间增加, 这些变化综合影响了流域的径流变化, 使得径流先增加后减少。其中气候变化的贡献率为 100.46%, 土地利用变化的贡献率为 2.09%, 气候变化的影响远远大于土地利用变化的影响。因此, 如何应对气候变化在温榆河上游流域水资源管理工作中值得重视。

关键词: 土地利用变化; 气候变化; 温榆河上游; 径流模拟; SWAT 模型

中图分类号: P334.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0072-07

Impacts of changes in land use and climate on runoff variation in the upper reaches of Wenyu River

YANG Moxia^{1,2}, MA Wenlin^{1,2}, ZHANG Zhiming^{1,2}, ZHANG Junzhi^{1,2}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing 100044, China)

Abstract: Land use and climate are two main factors directly influencing catchment hydrology and water resources. The separation of their effects is of great importance for land use planning and water resources management. On the basis of statistical analysis of the change trend of meteorological factors and land use from 1980 to 2014, we assessed the impacts of climate change and land use change on the runoff change in the upper reaches of Wenyu river by combining SWAT model simulation and scenarios designing. Results indicated that the SWAT model is a powerful tool to simulate the effect of environmental change on runoff in the upper reaches of Wenyu River. The correlation coefficient R^2 and Nash coefficient Ens were 0.80 and 0.79 respectively during the calibration period, and were 0.77 and 0.74 respectively during the validation period. The rainfall and temperature gradually increased; the forest land and cultivated land decreased gradually; the urban and rural areas increased gradually;

收稿日期: 2017-08-13 修回日期: 2017-11-29 网络出版时间: 2018-01-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180110.0910.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408022); 中国清洁发展机制基金赠款项目(2013027); 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2015ZX07406001)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51408022); China Clean Development Mechanism Fund Grant Project (2013027); National Water Pollution Control and Treatment Technology Major Projects (2015ZX07406001)

作者简介: 杨沫霞(1992), 女, 山西运城人, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 18310753499@163.com

通讯作者: 张质明(1984), 男, 北京人, 讲师, 博士, 主要从事水文水环境方面的研究。E-mail: zhangzhiming@bucea.edu.cn

and the grassland gradually increased during 1995 to 2005. These changes synthetically affected the runoff and caused the runoff to increase first and then decrease. The contribution rate of climate change to runoff was 100.46%, and the contribution rate of land use change to runoff was 2.09%. The climate change had greater influence on the runoff than the land use change in the upper reaches of Wenyu River during 1980-2014. Therefore, how to cope with climate change is worthy of attention in the water resources management.

Key words: land use change; climate change; upper reaches of Wenyu river; runoff simulation; SWAT model

流域径流的变化是水文过程的综合反映,受气候变化、土地利用、人类活动等因素的综合驱动。在国内外关于土地利用变化和气候变化的水文响应的研究成果中,影响地表径流的决定性因素并不完全相同,例如:黄土高原黑河流域 1981-2000 年气候变化对地表径流的影响比土地利用变化更为显著(土地利用变化和气候变化分别对径流量产生了 9.6%、95.8% 的下降影响)^[1];潮白河流域 1961-2001 年人类活动对径流的影响占主导地位(1961-1966 年和 1973-1979 年内气候变化和人类活动对径流减少分别贡献了 35%、68%,1980-2001 年二者分别贡献了 31%、70%)^[2]。并且,即便在同一流域内,对径流产生影响的主导因素也会发生变化^[3,4],如黄河上游流域 1961-2013 年唐乃亥(TNH)水文站以上区域以气候变化为主导,而 TNH 水文站以下区域则以土地利用变化和水库调度为主导^[5]。在大部分研究中,土地利用变化和气候变化对流域的径流都产生衰退的影响,而在另一些较少的研究中,两者对径流表现为增加的作用^[6,7]。总体而言,已有的定量研究表明,土地利用方式的改变和气候变化都会在很大程度上影响水文过程,但其具体作用仍需要根据研究区域的实际情况来具体分析。

本文基于 SWAT 模型模拟温榆河上游流域的水文循环过程,对流域内沙河闸水文站 1980-2014 年的逐月径流进行模拟、率定和验证,在此基础上设置不同的情景分别进行模拟,结合流域内气象因子和土地利用的变化趋势,定量分析土地利用变化和气候变化对温榆河上游流域径流变化的影响,为气候变化背景下温榆河上游流域的水资源管理提供基础依据。

1 研究区概况

温榆河上游流域位于北纬 40°00' - 40°30' 和东经 115°50' - 116°20' 之间,临近北京城区北部(图 1),由东沙河、北沙河、南沙河三条支流汇合而成,于沙河闸形成沙河水库,流域面积 1 099 km²。流域属大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,雨雪稀少^[8]。流域年内降水分配不均,全年降水量集中在 6 月-9 月,占全年降水量的 80% 以上,由于降

水相对集中,且流域调蓄能力严重不足,流域地表水资源的利用率不足 15%^[9]。流域内土地利用类型以林地和耕地为主,土壤类型以石灰性锥形土、高活性淋溶土、石灰性冲积土、疏松岩性土等为主。

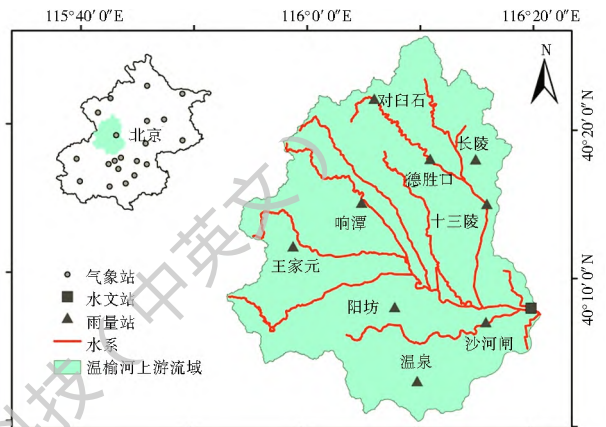


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

建立 SWAT 模型需要用到的流域数据包括:DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、气象数据、水文数据。各类数据的来源和预处理方法见表 1。

表 1 数据来源与预处理

Tab. 1 Data source and preprocessing

数据类型	来源与预处理
DEM	分辨率为 30 m, 来自地理空间数据云网站 (http://www.gsccloud.cn/), 经拼接、坐标系转换、裁剪后得到。
土地利用	根据 TM 遥感影像数据(来自 USGS, 精度 30 m) 解译得到, 包括 1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年共 6 期土地利用分布图。
土壤类型	根据 HWSO 数据库(来自联合国粮农组织 FAO 官方网站 http://www.fao.org/home/en/) 进行裁剪、重分类得到。
气象数据	1980 年到 2014 年的逐日降雨资料采用北京市水文总站 9 个雨量站的数据, 逐日气温、风速、相对湿度数据采用北京市气象局 20 个气象站的数据, 太阳辐射数据及各类气象数据的缺失数据由气象数据库生成, 研究区的气象数据库采用全球气象发生数据库 ArcSWAT CFSR_World Weather Database (https://globalweather.tamu.edu/)。
水文数据	研究区径流资料(1980-2014 年, 逐日流量数据) 来自于北京市水文总站。

此外,流域气象因子的变化分析需要采用流域平均气象数据序列,本文基于已获取的各气象站点的数据采用泰森多边形法^[10]求得。

2.2 研究方法

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型 20 世纪 90 年代由美国农业部农业研究局(ARS)与德克萨斯农工大学在 CREAMS、GLEAM、EPIC、SWRRB 等模型的基础上研制开发而成,具有很强的物理机制,以日尺度数据为运行步长,以子流域为单元进行水文模拟,适合模拟连续长时间段的复杂流域^[11]。作为基于过程的模型,SWAT 近年来被广泛应用于径流模拟、蒸腾蒸发模拟、土地利用和覆被变化对径流的影响、气候变化对区域水循环的影响等方面^[12-17]。在已有的针对温榆河的研究中,SWAT 模型也用来模拟非点源污染以及闸坝影响下流域的水量水质演变过程^[18-21]。本研究采用 SWAT 模型进行研究区径流模拟,通过控制变量设计不同的情景,进行模拟结果的对比,得出 1980-2014 年土地利用变化和气候变化对温榆河上游流域径流变化的贡献率,并结合各因子的变化情况分析其中的影响机理。

2.2.1 影响因子变化分析

气象因子 1980-2014 年的变化情况采用线性趋势的方法来进行分析。对各气象因子以时间为自变量建立一元线性回归方程:

$$y = a + b \cdot t \quad (1)$$

式中: y 为某气象因子; t 为时间(本文为年); a 为回归常数; b 为回归系数, $b > 0$ 表示气象因子呈上升趋势, $b < 0$ 表示气象因子呈下降趋势, $10b$ 称为气候倾向率,倾向率绝对值大小表征变化幅度^[22]。

2.2.2 SWAT 模型构建

采用沙河闸水文站的实测月径流数据来进行模型的率定和验证,率定期 1990-2002 年,验证期 2003-2014 年,采用 2000 年的土地利用资料。选取敏感性参数是在模型校准之前的关键任务,本研究在 SWAT-CUP 软件中采用 SUFI-2 优化算法,通过单个参数的敏感性分析(One at a time)来选取需要率定的敏感参数。

本文采用决定系数 R^2 和纳什系数 Ens 评价模型的模拟效果。决定系数 R^2 的计算公式如式(2):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_m)(Q_{s,i} - Q_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_m)^2 (Q_{s,i} - Q_s)^2} \quad (2)$$

式中: Q_m 为 SWAT 模型径流模拟值; Q_s 为径流实

测值。 R^2 的取值在 0~1 之间,越接近 1 表明模型的模拟值与实测值越吻合,模型模拟效果越好。

纳什系数 Ens 的计算公式如式(3):

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ds,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ds,i} - Q_{obs})^2} \quad (3)$$

式中: Q_{sim} 为 SWAT 模型径流模拟值; Q_{ds} 为径流实测值; n 为观测值的个数。 Ens 的取值在 0~1 之间,越接近 1 表明模型的模拟值与实测值越接近,模型模拟效果越好。如果 Ens 为负,说明模型的模拟效果特别差,比实测值的算术平均值更不具有代表性。

2.2.3 情景设计

基于建立好的 SWAT 模型,本文分 S1(1980-1989 年)、S2(1990-1999 年)、S3(2000-2009 年)、S4(2010-2014 年)四个时期来进行温榆河上游流域的径流模拟,分别用 1985 年、1995 年、2005 年、2010 年的土地利用图来代表 S1、S2、S3、S4 时期的土地利用格局。为了评估土地利用变化和气候变化对流域径流的影响,采用控制变量法对四个时段和四期土地利用数据进行组合,设置如下变化情景。

表 2 不同的模拟情景

情景	气象数据	土地利用数据
A	1980-1989	1985
AB1	1990-1999	1985
AB2	1980-1989	1995
B	1990-1999	1995
BC1	2000-2009	1995
BC2	1990-1999	2005
C	2000-2009	2005
CD1	2010-2014	2005
CD2	2000-2009	2010
D	2010-2014	2010

AB1 情景是在 A 情景的基础上不改变其他模型输入,将气候变化数据替换为 B 情景的气候变化数据;AB2 是在 A 情景的基础上不改变其他模型输入,将土地利用资料替换为 B 情景的土地利用资料。对比 A、AB1、AB2、B 这四个情景的 SWAT 输出,可以计算得到从 S1 时期到 S2 时期气候变化和土地利用变化分别对流域径流变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 气象因子、土地利用的变化特征分析

3.1.1 气象因子变化趋势

本研究中气象因子主要考虑降雨和气温。温榆

河上游流域 1980– 2014 年年平均降雨量为 505.25 mm, 总体呈缓慢增加趋势, 变化倾向率为 13.71 mm/(10a)。相邻年间降雨量变化波动较大, 其中 1998 年降雨量最大, 年降雨 721.9 mm, 1997 年降雨量最小, 年降雨 315.17 mm; 1997– 1998 年的降雨波动最大; 1999– 2007 年间降雨变化趋势较平缓, 降雨量普遍较小, 除 2004 年降雨 576 mm 外, 其余年份在 433 mm 到 498 mm 区间内变化。详见图 2。

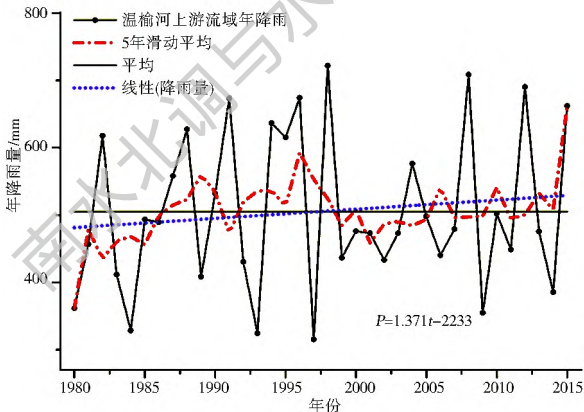


图 2 研究区年降雨变化趋势
Fig. 2 Variation trend of annual rainfall

温榆河上游流域 1980– 2014 年年平均气温为 12.26 °C, 呈明显上升趋势, 变化倾向率为 0.4221 °C/(10a), 相邻年间年均气温变化波动较大。其中 2014 年年均气温最高, 为 13.72 °C, 1985 年年均气温最低, 为 11.04 °C; 1980– 1993 年间大多年份的年均气温低于 12.26 °C, 1994– 2014 年间大多年份的年均气温高于 12.26 °C; 35 年间温榆河上游流域的年均气温升高了约 1.48 °C。详见图 3。

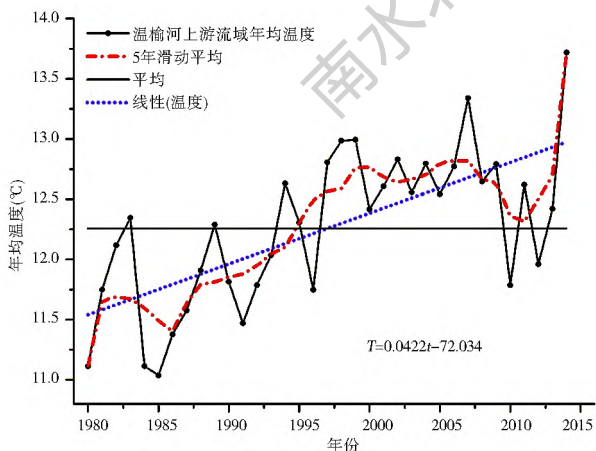


图 3 研究区年均温度变化趋势
Fig. 3 Variation trend of annual average temperature

3.1.2 土地利用变化趋势

温榆河上游流域的主要土地利用类型是林地, 占流域总面积的 75.78%; 其次是耕地和城乡工矿居民用地, 占流域总面积的 10.46%、9.08%; 草地、

水域和未利用裸地平均占地面积最少, 占流域总面积的 2.25%、1.59%、0.84% (表 3)。1985– 2010 年土地利用变化主要有三个变化趋势: 林地和耕地减少, 城乡及工矿和居民用地增加, 草地在 1995 年 (S2 时期采用的土地利用格局) 到 2005 年 (S3 时期采用的土地利用格局) 间增加。与 1985 年相比, 2010 年林地面积减少了 87.7 km², 耕地面积减少了 34.9 km², 城乡及工矿和居民用地增加了 112.2 km², 草地增加了 23 km²。

表 3 土地利用情况统计
Tab. 3 Land use statistics

不同时期的土地利用	林地	耕地	草地	水域	城乡未利用用地	裸地
1985	面积/km ² 908.1	132.9	12.5	21.1	53.4	11.1
	百分比(%) 79.73	11.67	1.1	1.85	4.69	0.97
1995	面积/km ² 894.7	134.2	12.2	21.3	61.7	14.8
	百分比(%) 78.55	11.78	1.07	1.87	5.42	1.3
2005	面积/km ² 829.1	111.3	42.3	13.4	133.1	9.8
	百分比(%) 72.79	9.77	3.71	1.18	11.69	0.86
2010	面积/km ² 820.4	98	35.5	16.7	165.6	2.6
	百分比(%) 72.03	8.6	3.12	1.47	14.54	0.23
平均	面积/km ² 863.1	119.1	25.6	18.1	103.5	9.6
	百分比(%) 75.78	10.46	2.25	1.59	9.08	0.84

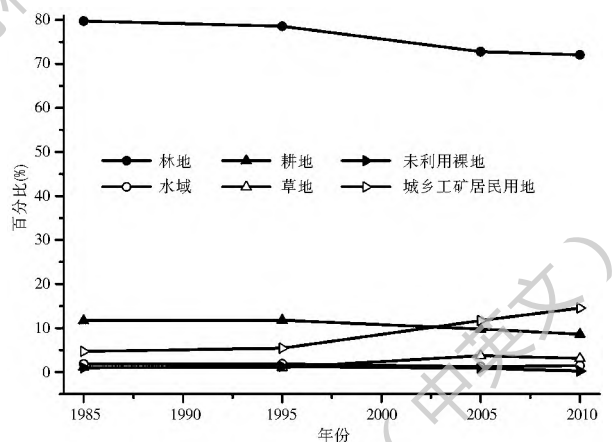


图 4 研究区各土地利用类型变化趋势
Fig. 4 Variation trend of different types of land use

3.2 模型的校准与验证

基于 SUF2 优化算法的参数敏感性分析最终选出 16 个重要参数来进行率定: ALPHA_BF.gw (基流消退系数)、GW_DELAY.gw (地下水延迟天数)、GWQMN.gw (水的阈值深度 mm)、CN2.mgt (SCS 径流曲线数)、SOL_AWC.sol (土壤有效含水量)、ESCO.bsn (土壤有效含水量)、GW_REVAP.gw (浅层地下水再蒸发系数)、EPCO.bsn (植物蒸发补偿系数)、SOL_K.sol (饱和渗透系数)、SURLAG.bsn (地表径流滞后系数)、REVAPMN.gw (地下水再蒸发系数)、

CANMX.hru(最大叶冠指数)、RCHRG_DP.gw(深层含水层渗流分数)、CH_K2.rte(主要通道冲积层有效渗透系数)、CH_N2.rte(主河道的曼宁 n 值)、SFTMP.bsn(降雨温度)。

研究区的径流模拟最终划分了 38 个子流域和 356 个水文响应单元。模型率定过程共进行了 11 次迭代,即 5 500 次模拟,得到最佳参数值,见表 4。其中“v_”表示现有的参数值将被给定的值取代,“r_”表示现有的参数值将乘以(1+ 给定的值)。

表 4 研究区径流参数率定结果

Tab. 4 Calibration results of runoff parameters

序号	参数名称	参数变更方法	最佳参数值
1	ALPHA_BF.gw	v_	0.878 1
2	CW_DELAY.gw	v_	39.906 9
3	GWQMN.gw	v_	553.992 6
4	CN2.mgt	r_	-0.458 7
5	SOL_AWC.sol	r_	0.145 7
6	ESCO.bsn	v_	0.243 6
7	GW_REVAP.gw	v_	0.096 6
8	EPCO.bsn	v_	0.579 3
9	SOL_K.sol	r_	-0.321 5
10	SURLAG.bsn	v_	2.942 5
11	REVAPMN.gw	v_	355.292 5
12	CANMX.hru	v_	42.289 6
13	RCHRG_DP.gw	v_	0.054 2
14	CH_K2.rte	v_	28.003 1
15	CH_N2.rte	v_	0.203 9
16	SFTMP.bsn	v_	2.327 8

温榆河上游流域月尺度径流模拟在率定期和验证期的相关系数 R^2 分别为 0.80、0.77, 纳什系数 E_{ns} 分别为 0.79、0.74, 说明 SWAT 模型在温榆河上游流域模拟效果良好(见图 5、图 6)。

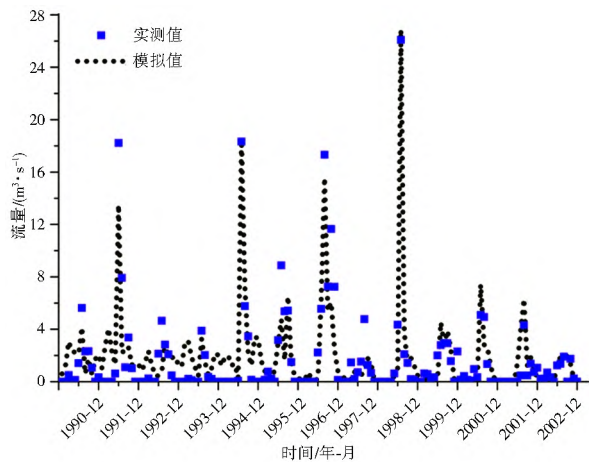


图 5 率定期月径流实测值和模拟值

Fig. 5 Measured and simulated values of monthly runoff in calibration period

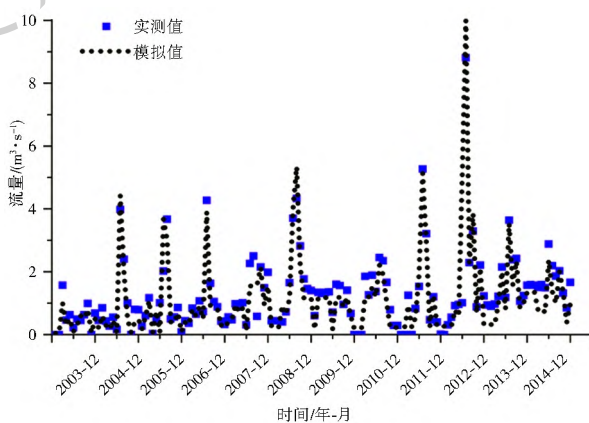


图 6 验证期月径流实测值和模拟值

Fig. 6 Measured and simulated values of monthly runoff in verification period

3.3 土地利用变化和气候变化对流域径流量的影响

将 10 种情景组合为 3 组(A、AB1、AB2、B 为一组, B、BC1、BC2、C 为一组, C、CD1、CD2、D 为一组), 进行各组组内对比研究(表 5- 表 7)。如第一组内, 与 A 情景相比, B 情景模拟径流量增加了 $1.034 1 \text{ m}^3/\text{s}$, 代表了 S1 时期(1980- 1989 年)到 S2 时期(1990- 1999 年)气候变化、土地利用变化的综合影响。AB1 与 A 相比模拟流量增加了 $1.022 4 \text{ m}^3/\text{s}$, 占总变化的 98.87%, 代表了气候变化的影响。AB2 与 A 相比模拟流量增加了 $0.018 2 \text{ m}^3/\text{s}$, 占总变化的 1.76%, 代表了土地利用变化的影响。需要指出的是, 由于气候变化与土地利用变化之间存在相互作用, 二者的贡献率之和大于 1。

表 5 S1 时期到 S2 时期径流变化情况

Tab. 5 Runoff changes from S1 period to S2 period

情景	A	AB1	AB2	B
流量模拟值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	3.451 1	4.473 5	3.469 3	4.485 2
变化量		+ 1.022 4	+ 0.018 2	+ 1.034 1
变化占比(%)		98.87	1.76	

据表 5, S1 时期到 S2 时期气候变化和土地利用变化都使得流域的径流量增加, 且气候变化对流域的径流变化的贡献远大于土地利用变化。由前文的气象因子统计分析可知, 近 35 年降雨和气温均呈上升趋势, 由此推测从 S1 时期到 S2 时期气候变化使得径流量增加, 可能原因是降雨增加对径流的正驱动大于蒸散发对径流的负驱动。根据前文的土地利用变化趋势分析, 从 S1 时期到 S2 时期, 林地耕地面积减少, 城乡建设用地增加, 也许可以这样解释土地利用变化使得径流增加: 林地耕地面积减少, 使得土壤蒸腾和植被蒸散发减少, 森林冠层及其枯落

叶层的截留作用而导致的降水损失也减少,从而导致径流增加;相关研究指出,城乡建设用地的增加使得不透水地面增加,透水地面减少,截断了雨水通过地表下渗土壤的途径,导致地表径流和径流产流系数的增加^[23]。

表 6 S2 时期到 S3 时期径流变化情况

Tab. 6 Runoff changes from S2 period to S3 period

情景	B	BC1	BC2	C
流量模拟值/(m ³ ·s ⁻¹)	4.485 2	3.016 1	4.462 3	3.029 5
变化量		- 1.469 1	- 0.022 9	- 1.455 7
变化占比(%)		100.92	1.57	

据表 6, S2 时期(1990-1999 年)到 S3 时期(2000-2009 年)温榆河上游流域径流量减少,气候变化和土地利用的变化都使得流域的径流量减少,其中气候变化的贡献率为 100.92%,土地利用变化的贡献率为 1.57%,气候变化对流域的径流变化起主导作用。从 S2 时期到 S3 时期气候变化使得径流量减少,可能原因是降雨增加对径流的正驱动小于蒸散发对径流的负驱动。从 S2 时期到 S3 时期草地面积有明显的增加趋势,草地对雨水具有很好的持水性,使地表产流有所减少,从而使得径流量减少。

表 7 S3 时期到 S4 时期径流变化情况

Tab. 7 Runoff changes from S3 period to S4 period

情景	C	CD1	CD2	D
流量模拟值/(m ³ ·s ⁻¹)	3.029 5	3.119 7	3.032 1	3.118 3
模拟值变化量		+ 0.090 2	+ 0.002 6	+ 0.088 8
变化占比(%)		101.58	2.93	

据表 7, S3 时期(2000-2009 年)到 S4 时期(2010-2014 年)温榆河上游流域径流量增加,气候变化和土地利用的变化都使得流域的径流增加,其中气候变化的贡献率为 101.58%,土地利用变化的贡献率为 2.93%,气候变化对流域的径流变化起主导作用。综上,可以得出 1980-2014 年这 35 年来,气候变化对温榆河上游径流量变化的贡献率为 100.46%,土地利用变化对径流变化的贡献率为 2.09%,气候变化的影响远远大于土地利用变化的影响,也从侧面反映了温榆河上游流域的水文循环过程受人类活动干扰较小。

4 结论

SWAT 模型被证明是评估温榆河上游流域环境变化(包括土地利用变化和气候变化)水文响应的有力工具,模型率定期的纳什系数 *Ens*、相关系数 *R²* 分别为 0.79、0.80,验证期为 0.74、0.77,表明

SWAT 模型在温榆河上游模拟效果良好。1980-2014 年流域年降雨量以 13.71 mm/(10a) 的速率逐渐增加,年平均气温以 0.422 1 °C/(10a) 的速率递增,1985-2010 年林地和耕地减少,城乡及工矿和居民用地增加,草地在 1995 年到 2005 年间增加。这些变化综合影响了流域的径流变化,使得 1980-2014 年 35 年来,流域径流先增加后减少,其中气候变化的贡献率为 100.46%,土地利用变化的贡献率为 2.09%,气候变化的影响远远大于土地利用变化的影响,因此温榆河上游流域的水资源管理中要切实做好应对气候变化对策。土地利用变化在本研究中对径流变化略有影响,可能是因为上游流域土地利用变化的程度相对较小。由于获取的资料有限,本研究只研究了温榆河上游流域,温榆河中下游流域有待进一步研究,中下游地区土地利用格局变化较大,土地利用变化的影响值得更多关注。

参考文献(References):

- [1] LI Z, LIU W Z, ZHANG X C, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1-2): 35-42.
- [2] WANG G S, XIA J, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai River basin in northern China[J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 206-216.
- [3] 莫淑红, 王学风, 勾奎, 等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流情势的影响分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9): 7-17. (MO S H, WANG X F, GOU K, et al. Impacts of climate changes and human activities on annual runoff of Bahe River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(9): 7-17. (in Chinese))
- [4] YE X C, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 494(12): 83-95.
- [5] CUO L, ZHANG Y X, GAO Y H, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 502(2): 37-52.
- [6] BAKER T J, MILLER S N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed[J]. Journal of Hydrology, 2013, 486(8): 100-111.
- [7] GAWITH D, KINGSTON D G., MCMILLAN H. The effects of climate change on runoff in the Lindis and Matukituki catchments, Otago, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 2012, 51(2): 121-135.
- [8] 廖日红, 李其军, 孟庆义, 等. 温榆河流域水资源利用保障体系

- 研究[M]. 中国水利水电出版社, 2011. (LIAO R H, LI Q J, MENG Q Y, et al. Study on Water Resources Utilization Guarantee System in Wenyu River Basin[M]. China Water and Power Press, 2011. (in Chinese))
- [9] 马东春, 王亚华. 温榆河流域管理与政策研究[M]. 中国水利水电出版社, 2013. (MA D C, WANG Y H. Study on Management and Policy of Wenyu River Basin[M]. China Water and Power Press, 2013. (in Chinese))
- [10] 张德伟, 崔永生. 在计算机上应用泰森多边形法计算流域平均面雨量[J]. 水文, 1991, (1): 52-53. (ZHANG D W, CUI Y S. The Calculation of the Average Surface Rainfall in the Basin Using the Tyson Polygon Method on the Computer[J]. Journal of China Hydrology, 1991, (1): 52-53. (in Chinese))
- [11] ARNOLD J, ALLEN P M, BERNHARDT G. A Comprehensive Surface groundwater Flow Model[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142(1-4): 47-69.
- [12] 梁小军, 江洪, 朱求安, 等. 岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 30-33. (LIANG X J, JIANG H, ZHU Q A, et al. Modelling Hydrological Response to Different Land use and Climate Change Scenarios in the Upper Reach of Minjiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(5): 30-33. (in Chinese))
- [13] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. 气候变化研究进展, 2013 (6): 391-397. (ZHANG L P, YU S Y, DUAN Y B, et al. Quantitative Assessment of the Effects of Climate Change and Human Activities on Runoff in the Yongding River Basin [J]. Advances in Climate Change Research, 2013(6): 391-397. (in Chinese))
- [14] 张利平, 曾思栋, 夏军, 等. 漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2011 (7): 1217-1226. (ZHANG L P, ZENG S D, XIA J, et al. Simulated Hydrological Responses to Climate Change of the Zhangweihe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2011(7): 1217-1226. (in Chinese))
- [15] 李胜坤. 基于 SWAT 模型的潮河流域径流模拟[D]. 华中师范大学, 2015. (LI S K. Research of Runoff Simulation in Chaohe Basin Using SWAT Model[D]. Central China Normal University, 2015. (in Chinese))
- [16] LEE J M, KIM Y D, KANG B, et al. Impact of Climate Change on Runoff in Namgang Dam Watershed[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2012, 45(6): 517-529.
- [17] NOBERT J, JEREMIAH J. Hydrological response of watershed systems to land use/cover change. A case of Wami river basin[J]. Open Hydrology Journal, 2012, 6(1): 78-87.
- [18] 唐莉华, 林文婧, 张思聪, 等. 基于 SWAT 模型的温榆河流域非点源污染模拟与分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 6-13. (TANGL H, LIN W J, ZHANG S C, et al. Simulation and analysis of non point source pollution based on SWAT model for the Wenyu river basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 6-13. (in Chinese))
- [19] 刘博, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 52-61. (LIU B, XU Z X. Simulation of non point source pollution in the Shahe Reservoir catchment in Beijing by using SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 52-61. (in Chinese))
- [20] 张永勇, 夏军, 陈军锋, 等. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5): 159-164. (ZHANG Y Y, XIA J, CHEN J F, et al. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 159-164. (in Chinese))
- [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]. 山东师范大学, 2009. (GUO Z Y. Implementation and application of the United control system of water quality and quantity operation based on GIS[D]. Shandong Normal University, 2009. (in Chinese))
- [22] 张莉秋, 张红, 李皎, 等. 晋北沙漠化地区 1980-2014 年的气候变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1116-1125. (ZHANG L Q, ZHANG H, LI J, et al. Climate Change in Sandy Desertification Area of the Northern Shanxi from 1980 to 2014[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1116-1125. (in Chinese))
- [23] LIN Y P, LIN Y B, WANG Y T, et al. Monitoring and Predicting Land use Changes and the Hydrology of the Urbanized Paochiao Watershed in Taiwan Using Remote Sensing Data, Urban Growth Models and a Hydrological Model[J]. Sensors, 2008, 8(2): 658-680.