

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.002

变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析

李发文,陶仁杰

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:构建添加水库及取用水模块的SWAT模型,在考虑人类活动影响的基础上,分析土地利用类型及气候变化对子牙河流域水文要素的影响,并利用统合还原法计算人类活动及气候变化对研究区的径流变化的贡献率。结果表明:1980—2020年草地、耕地及水域面积呈减少趋势,建设用地呈增加趋势,其他土地利用类型变化趋势不明显;土地利用类型变化使得流域地表产流增加3.5 mm,地下水补给和蒸散发分别减少0.15 mm和2.93 mm;1980—2020年研究区年降水量呈不显著上升趋势,年气温呈显著上升趋势,气候变化使得流域地表产流、地下水补给及蒸散发有不同程度的增加;人类活动和气候变化对流域径流减少的贡献率分别为66.36%和33.64%,人类活动占据相对主导地位。

关键词:人类活动;气候变化;土地利用类型;SWAT模型;子牙河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0009-09

Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment// Li Fawen, TAO Renjie (*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: A SWAT model with added reservoir and water intake modules was constructed. On the basis of considering the impact of human activities, the impact of land use types and climate change on hydrological elements in the Ziya River Basin was analyzed. And the integrated reduction method was used to calculate the contribution rate of human activities and climate change to the runoff changes in the study area. The results show that from 1980 to 2020, the area of grassland, arable land, and water showed a decreasing trend, while the area of construction land showed an increasing trend. The change trend of other land use types was not significant. The change in land use type has led to an increase of 3.5 mm in surface runoff in the basin, and a decrease of 0.15 mm and 2.93 mm in groundwater recharge and evaporation, respectively. From 1980 to 2020, the annual precipitation in the research area showed an insignificant upward trend, while the annual temperature showed a significant upward trend. Climate change has led to varying degrees of increase in surface runoff, groundwater recharge, and evapotranspiration in the basin. The contribution rates of human activities and climate change to the reduction of watershed runoff are 66.36% and 33.64%, respectively, with human activities occupying a relatively dominant position.

Key words: human activity; climate change; land use type; SWAT model; Ziya River Basin

气候变化和人类活动在不同程度上影响着流域水文循环过程^[1-3],气候变化主要包括温度、湿度、气压、风速及降水量等气象要素的变化^[4],这些气象要素的改变直接影响流域水量输入、输出等水文过程;人类活动主要包括土地利用类型的改变、水利工程建设及用水部门的取用水等,这些活动主要影响流域的水量输送及地表径流的时空分

布^[5]。定量分析人类活动及气候变化对流域水文过程影响的主要方法有长序列资料对比法、试验对比分析及水文模型法等^[6]。其中水文模型法具有一定的物理基础,可以保证人类活动影响期间的天然径流量与基准时期的实测天然径流量在成因上具有一致性,并且不需要大量详细的人类活动资料^[7-8]。而在众多水文模型当中,SWAT(soil and

基金项目:国家自然科学基金项目(52179020,52239004)

作者简介:李发文(1976—),男,教授,博士,主要从事水文学水资源研究。E-mail:lifawen@tju.edu.cn

通信作者:陶仁杰(1996—),男,硕士研究生,主要从事水文过程研究。E-mail:taorenjie_tju@qq.com

water assessment tool) 模型具有建模灵活、计算效率高优点,因此在水文领域得到了广泛应用和认可。李泽君等^[9]基于 SWAT 模型,以未来土地利用情景和气候变化情景为变量进行水文模拟,对韩江生态流量演变特征进行了分析。魏潇娜等^[10]通过利用嵌入冰川模块的 SWAT 模型对和田河流域的径流进行了模拟分析。李文婷等^[11]利用 SWAT 模型对典型年份赣江流域蓝绿水的时空分布进行了研究分析。林若兰等^[12]基于 SWAT 模型评估了北江流域生态径流调节效果并对径流调节量的时空变化进行了分析。王博威等^[13]从人类活动对径流影响的角度,利用 SWAT 模型研究了土地利用变化对潘家口水库控制流域径流影响,认为单纯土地利用变化对潘家口入库径流影响并不大,上游中小水库、塘坝等工程的修建及工农业和城市用水量的增加等是影响径流变化的主要原因。张利平等^[14]基于 SWAT 模型,研究了气候变化及人类活动对于永定河流域的径流变化的影响,发现气候变化是 20 世纪 80 年代后期研究区流域径流减少的主要原因。郭军庭等^[15]以潮河流域为研究区域,分析了径流对土地利用和气候变化的响应。Yang 等^[16]基于 SWAT 模型量化了气候变化和当地人类活动对青海湖水量变化的贡献率,并发现气候变化对青海湖水量变化的影响占主导地位。Onyutha 等^[17]利用 SWAT 模型对气候变化和人类活动对 Rwizi 河的影响进行了分析,发现人类活动对河流枯水期流量变化的贡献率为 14.7%,对丰水期流量变化的贡献率为 5.8%。

目前研究人类活动和气候变化对流域径流影响通常采用基于 SWAT 模型的径流还原法,利用突变点检验方法,以突变点为界,将研究序列划分为天然时期和人类活动影响时期^[18-20]。本文选取子牙河流域为研究对象,该流域受人类活动影响较早,难以通过常规方法还原天然径流。因此,本文将研究序列看作一个整体,且均受到人类活动的影响,采用统合还原法进行天然径流的还原,在此基础上,进行土地利用类型变化及气候变化对流域水文要素的影响研究,以期为子牙河流域的水资源管理提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

子牙河流域位于海河流域中南部,为海河流域第二大流域(图 1)。该流域面积 46 868 km²,多年平均降水量约为 540 mm^[21-22],地区分布差异较大,降雨年内分配极不均匀,80% 的降雨集中在 7—9 月。子牙河水系由滹沱河和滏阳河两大河系构成,其中

滹沱河发源于山西省繁峙县,上游山区流域雨型兼具山地型和夏雨型的双重特性^[23],主要支流有峨河、阳武河、云中河、牧马河、清水河、龙华河和险溢河^[24],山区多年平均降水量约为 620 mm,滹沱河平原平均降水量约为 508 mm^[25-26]。滹沱河中游平山县和鹿泉区境内建有岗南与黄壁庄两个大(I)型水库,下游流经衡水市安平县、饶阳县、武强县,最后于河北沧州市献县与滏阳河交汇形成子牙河。滏阳河发源于太行山东麓邯郸市峰峰矿区滏山南麓,横跨河北省的邯郸、石家庄、邢台、衡水和沧州 5 个地区^[27],主要支流有沙河、洺河、牛尾河、北澧河等,流域内建有东武仕、朱庄、临城 3 个大(II)型水库,同时还建有莲花口、艾辛庄水利枢纽。滏阳流域取用水量较大,据 Huang 等^[28]构建的取用水数据集,子牙河流域 1971—2010 年灌溉、生活、发电、畜牧、采矿和制造业 6 个部门多年平均取用水量为 295.28 mm,其中灌溉为主要用水部门,多年平均取用水量占总取用水量 84.03%。

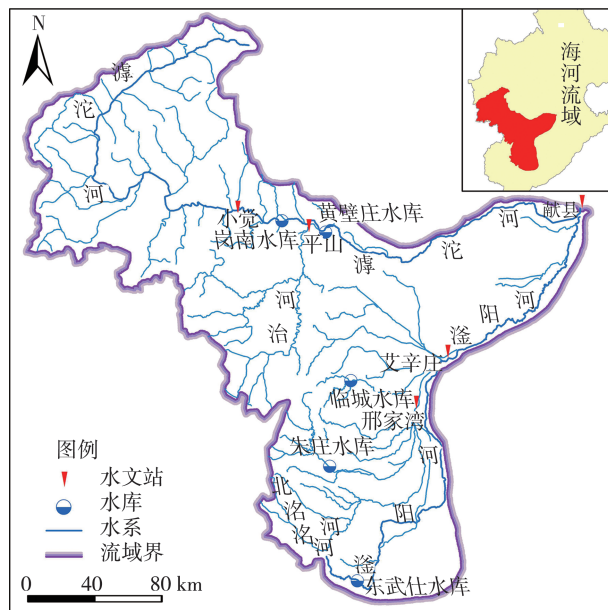


图 1 子牙河流域概况

Fig. 1 Overview of the Ziya River Basin

1.2 数据来源

构建 SWAT 模型需要的数字高程模型来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>); 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期土地利用类型数据来源于地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn/>); 土壤数据来源于世界土壤数据库 (<http://www.fao.org/home/en>); 气象数据(1980—2019 年)来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>); 水库出流数据来源于《海河流域水文年鉴》,水库特性参数来源于《河北省大型水库防洪资料手册》;径流数据(1972—2019 年)来源于《海河流域

水文年鉴》,共获取小觉、平山、邢家湾、艾辛庄和献县 5 个水文站的实测径流数据(1972—2016 年);目前获取长系列的取用水数据相对较难,本文取用水数据来源于由 Huang 等^[28]基于多个数据来源所重建的 1971—2010 年全球月尺度网格化各部门用水数据集 (<https://zenodo.org/record/1209296#.YqvtokJByUk>),空间分辨率为 0.5°,数据集包含灌溉、生活、发电、畜牧、采矿和制造业 6 个部门的取用水数据,目前已有部分学者应用该数据集进行研究,结果表明该数据集可靠^[29-31]。模型取用水模块需要输入各子流域多年平均逐月取用水数据,将取用水数据以子流域为基本单元,按时段进行整理,用于模型后续的输出。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型构建与适用性分析

2.1.1 模型构建

集水面积阈值取 23 112 hm²,添加岗南水库、黄壁庄水库、临城水库、朱庄水库、东武仕水库共 5 个水库点及小觉、平山、邢家湾、艾辛庄、献县共 5 个水文站点,生成 119 个子流域;土地利用类型数据采用 1980 年土地利用数据,坡度按照 5°及 15°划分为 3 级,土地利用类型、土壤、坡度阈值均设置为 0%,生成 4 110 个水文响应单元。在模型构建阶段添加水库模块及取用水模块进行率定与验证,其中水库模块所需数据包括 5 个水库的特征参数及出流数据,取用水模块则是整理并输入了 1974—1979 年各子流域多年平均逐月取用水数据。

2.1.2 模型适用性分析

在进行 SWAT 模型率定与验证时,尽量选择径流较为平稳的时期^[32]。相关研究^[14,18,33-34]表明,海河流域的其他子流域径流突变点多分布于 20 世纪 70 年代末至 90 年代。而子牙河流域受人类活动影响较早,且人类活动影响剧烈,流域内水库、渠道等水利设施多始建于 20 世纪 50 年代末,如东武仕、岗南、黄壁庄等水库始建于 1958 年,石津干渠、绵右渠等始建于 1948—1958 年。同时流域部分水文站点 1980 年后存在较多断流情况,如献县站 1980 年径流量为 0 的时间达 350 d 以上。故本文选择 1972—1973 年为模型预热期,1974—1976 年为率定期,1977—1979 年为验证期。采用从上游到下游的顺序对小觉、平山、邢家湾、艾辛庄、献县等水文站逐日径流进行参数率定与验证。选取 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)和决定性系数(R^2)对模型率定期和验证期模拟精度进行评价,得到各水文站模拟结果评价(表 1)。由表 1 可见,各水文站率定

期及验证期的 R^2 均在 0.6 以上,其中邢家湾站的率定期及艾辛庄站的验证期的 R^2 达 0.8 以上。献县站率定期的 NSE 为 0.49,除此之外其余水文站率定期及验证期的 NSE 均在 0.5 以上,说明模型拟合程度较好,适用于研究流域。

表 1 各水文站模拟结果评价

Table 1 Evaluation of simulation results of each hydrological station

水文站	R^2		NSE	
	率定期	验证期	率定期	验证期
小觉	0.69	0.77	0.69	0.74
平山	0.70	0.70	0.70	0.59
邢家湾	0.80	0.75	0.80	0.75
艾辛庄	0.76	0.84	0.75	0.81
献县	0.63	0.64	0.49	0.63

2.2 综合还原法

传统径流还原法常被用来计算人类活动及气候变化对径流影响的贡献,采用该方法的前提是假定人类活动和气候变化是影响径流变化的两个相互独立的因子^[8]。计算原理是利用无人类活动影响或者人类活动影响较小时期的实测水文气象资料率定 SWAT 模型参数,认为这些参数基本上反映流域的天然状况;采用率定好的模型参数,将人类活动影响显著期间的气象数据输入 SWAT 模型,模拟该时期的天然径流;最后通过对比人类活动影响时期的实测径流、天然径流与天然时期的实测径流来区分人类活动影响时期各因子对径流的影响程度^[4]。在进行贡献率的计算时,通常是将天然时期作为基准期,并认为天然时期的实测径流是天然径流,将人类活动影响显著时期作为变化期。本文将传统径流还原法改进为综合还原法,将整个研究时段统合为一个完整系列。1980 年之前,子牙河流域径流变化主要受水利工程修建和河道外取用水的影响,1980 年后还受到流域土地利用开发的影响。因此将 1974—1979 年作为变化期 I,将 1980—2019 年作为变化期 II,尽量还原变化期 I 及变化期 II 的天然径流,在模型率定验证完成后,将构建的模型中水库模块及取用水模块删去,并在此基础上进行模拟,变化期 I 及变化期 II 的天然径流均为模型模拟所得。另外,由于模型模拟存在误差,还需要对模拟得到的天然径流进行调整。计算公式为

$$\Delta R_{\text{hum}} = \Delta R - \Delta R_{\text{clim}} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \Delta R = R_{\text{mc}} - R_{\text{nb}} \quad \Delta R_{\text{clim}} = R_{\text{nc}} - R_{\text{nb}}$$

$$\eta_{\text{clim}} = \frac{\Delta R_{\text{clim}}}{\Delta R} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{\text{hum}} = \frac{\Delta R_{\text{hum}}}{\Delta R} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{nl} = R_n \frac{R_{mb}}{R_{sb}} = R_n(1 - e) \quad (4)$$

式中： ΔR 为径流总变化量， m^3 ； R_{mc} 为变化期 II 的实测径流， m^3 ； R_{nb} 为变化期 I 的天然径流， m^3 ； ΔR_{clim} 为气候变化对径流变化的贡献量， m^3 ； R_{nc} 为模拟得到的变化期 II 的天然径流， m^3 ； ΔR_{hum} 为人类活动对径流变化的贡献量， m^3 ； η_{clim} 为气候变化对径流变化的贡献率，%； η_{hum} 为人类活动对径流变化的贡献率，%； R_{nl} 为修正后的天然径流， m^3 ； R_n 为模型模拟的天然径流， m^3 ； R_{mb} 为变化期 I 的实测值， m^3 ； R_{sb} 为去除水库模块及取用水模块前的模型变化期 I 的模拟结果， m^3 ； e 为模型相对误差，%。

2.3 情景设置

应用 SWAT 模型模拟不同情景下的地表产流、地下水补给及蒸散发，通过对比模拟结果来分析土地利用类型变化、气候变化对流域水文要素的影响。气象数据为 1980—1989 年条件下，土地利用类型数据分别为 1980 年、1990 年、2010 年、2020 年的情况设置为情景 1、情景 2、情景 3、情景 4，用以对比分析土地利用类型变化对水文要素的影响；土地利用类型数据为 1980 年的条件下，气象数据分别为 1990—1999 年、2000—2009 年、2010—2019 年的情况设置为情景 5、情景 6、情景 7，与情景 1 一起，用以对比分析气候变化对水文要素的影响。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型变化及其对水文要素的影响

3.1.1 土地利用类型变化

图 2 为子牙河流域 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期土地利用类型空间分布。由图 2 可见，子牙河流域 5 期的土地利用类型空间分布较为一致，林地、草地多分布于流域西部，草地、耕地多分布于流域东部，而建设用地则是除小觉站上游山区流域及冶河流域分布较少以外，其余平原地区均有所分布。通过叠加行政区划县发现，研究期内建设用地在石家庄市（新华、桥西、长安、裕华区）、邢台市辖区、邯郸市辖区及衡水市桃城区有一定的集聚情况，其中石家庄市（新华、桥西、长安、裕华区）在 1980—2020 年增加最多，增幅达 127.5%，占研究期内总建设用地增加的 4.93%。各期土地利用类型以耕地、草地、林地为主，其中耕地 5 期平均占比达 50% 以上，流域内未利用土地、水域、建设用地较少，其中未利用土地 5 期平均占比仅为 0.03%。

表 2 为子牙河流域不同时期土地利用类型变化情况。由表 2 可见，草地、耕地及水域面积虽然在 1980—1990 年有所增加，但总体上呈不断减少的趋势；建设用地虽然在 1980—1990 年有所减少，但总体上呈不断增加的趋势，其中 2010—2020 年建设用地有较大的增长；其他两种土地利用类型的变化趋势不显著。

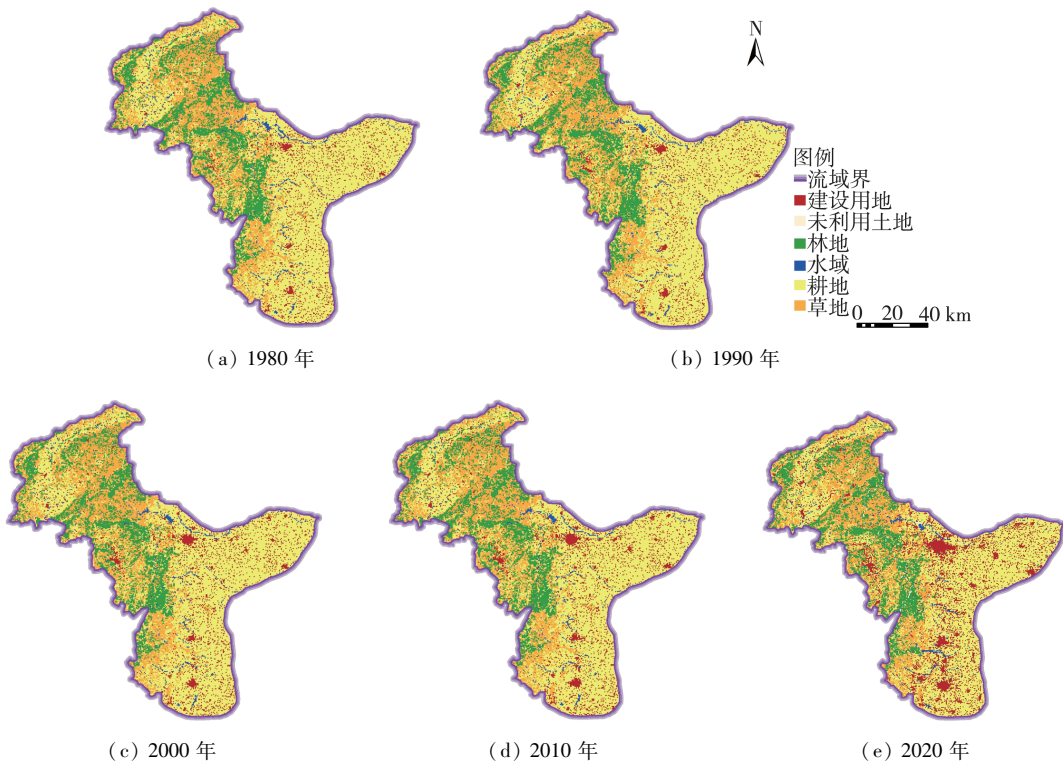


图 2 子牙河流域 5 期土地利用类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use types in five years of the Ziya River Basin

表2 子牙河流域不同时期土地利用类型变化情况

Table 2 Changes in land use types during different periods in the Ziya River Basin

时期	面积变化量/km ²					
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用土地
1980—1990年	179	185	-132	-21	7	-9
1990—2000年	-102	-614	760	23	-60	1
2000—2010年	-62	-285	339	-2	10	0
2010—2020年	-473	-2025	2371	-66	-33	62

3.1.2 土地利用类型变化对流域水文要素的影响

利用 SWAT 模型模拟情景 1、情景 2、情景 3、情景 4 的径流过程,得到不同情景下流域地表产流、地下水补给量、蒸散发量的多年平均值,结果见表 3。由表 3 可见,情景 2 与情景 1 相比,流域地表产流减少了 0.15 mm,地下水补给增加了 0.01 mm,引起这一变化的原因主要是草地及耕地的增加使得流域作物植被增多,植被的滞水作用增加了地表水下渗时间,从而减少了地表径流,增加了下渗量^[35],同时由于这一时期建设用地减少,使得硬化地面减少,也会增加一定的下渗量;这一时期流域蒸散发减少了 0.05 mm,主要受林地变化的影响,林地较其他植被具有更大的蒸腾量。情景 3 与情景 2 相比,流域地表产流增加 1.11 mm,使流域地下水补给减少 0.12 mm,引起这一变化的原因可能是由于草地及耕地的减少以及建设用地的增加,使得地表径流有所增加,同时下渗量减少;这一时期流域蒸散发减少了 1.09 mm,原因是林地面积虽然有所增加,但草地和耕地的减小程度要远大于林地的增加程度,并且由于建设用地在这一时期有较大程度的增加,硬化路面阻隔了土壤及潜水蒸发的通道,使得蒸散发减少,另外这一时期水域面积的减少也对蒸散发有一定程度的影响。情景 4 与情景 3 相比,土地利用类型变化情况及水文要素变化规律与前一阶段变化一致,在这一期间,土地利用类型变化使得地表产流增加 2.54 mm,地下水补给和蒸散发分别减少 0.04 mm 及 1.79 mm。

表3 不同情景下子牙河流域水文要素均值

Table 3 Mean value of hydrological elements in the Ziya River Basin under different scenarios

情景	地表产流量/mm	地下水补给量/mm	蒸散发量/mm
情景 1	6.90	4.08	430.50
情景 2	6.75	4.09	430.45
情景 3	7.86	3.97	429.36
情景 4	10.40	3.93	427.57

总体来看,研究期内子牙河流域土地利用类型的变化使流域地表产流增加了 3.50 mm,地下水补给和蒸散发分别减少了 0.15 mm 和 2.93 mm,引起这一变化的原因主要在于耕地、草地及水域面积的减少以及建设用地的增加。

3.1.3 水文要素空间分析差异性

图 3、图 4、图 5 分别为不同时期子牙河流域地表产流、地下水补给、蒸散发的空间分布。由图 3 可见,1980—2020 年子牙河流域土地利用类型变化使得大部分子流域的地表产流增加,且增量多在 0 ~ 10 mm 范围内。在子牙河流域中部及东部地区有 4 处区域的地表径流增量超过 10 mm,而这 4 处区域均为建设用地增加较为集中的区域,主要分布于石家庄、邯郸及邢台。仅有小分子流域的地表产流出现 -10 ~ 0 mm 的减少,这些子流域在研究时段内草地和耕地分别减少了 12% 和 7%,主要分布于忻府区、定襄县及沙河市等区域。由图 4 可见,1980—2020 年子牙河流域土地利用类型变化对流域内大部分区域地下水补给量没有影响,影响较大的区域分布在冶河流域及滹沱河下游流域。冶河上游的地下水补给量减少量超过 10 mm,出现这一现象的主要原因是该时期建设用地出现了较大幅度的增加,增幅达 172%。由图 5 可见,1980—2020 年子牙河流域土地利用类型变化使大部分区域蒸散发减少,仅滹沱河和滏阳河上游部分区域有增加。在岗南水库及黄壁庄水库处蒸散发减少超过了 25 mm,主要是由该区域水域面积的减少导致。

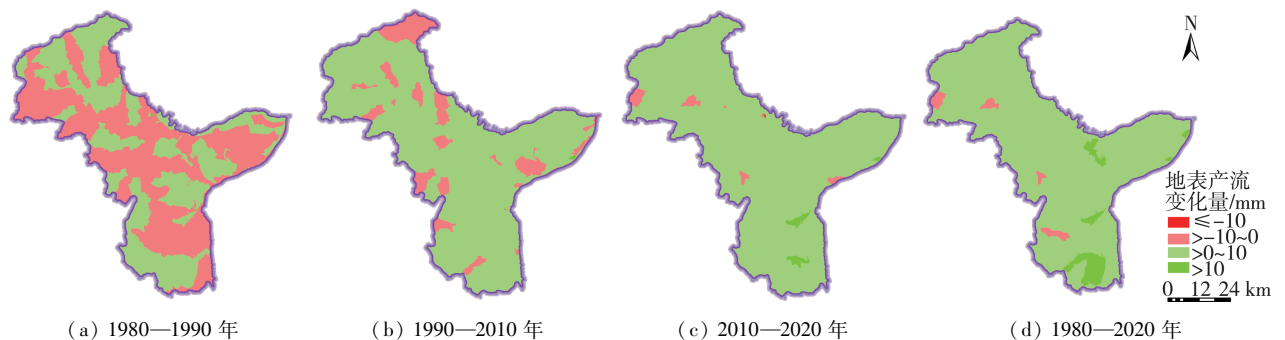


图3 不同时期子牙河流域地表产流空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of surface runoff in the Ziya River Basin during different periods

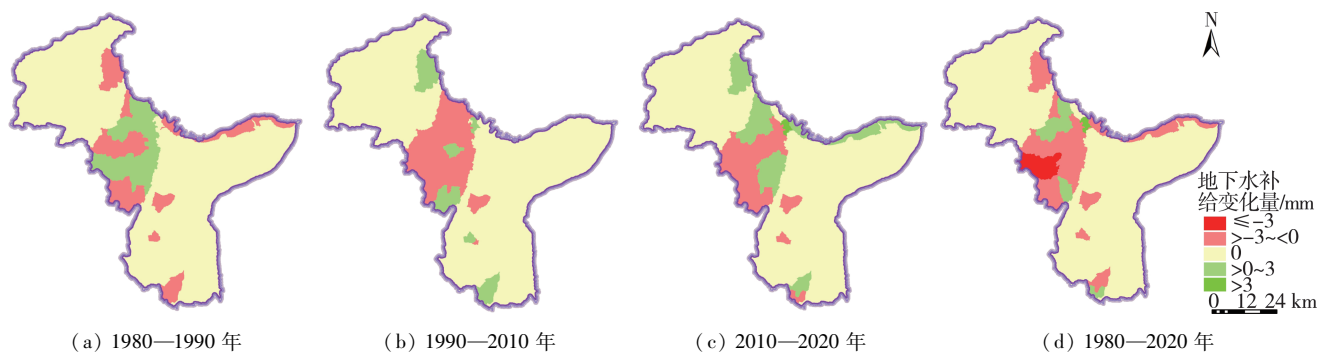


图4 不同时期子牙河流域地下水补给空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of groundwater recharge in the Ziya River Basin during different periods

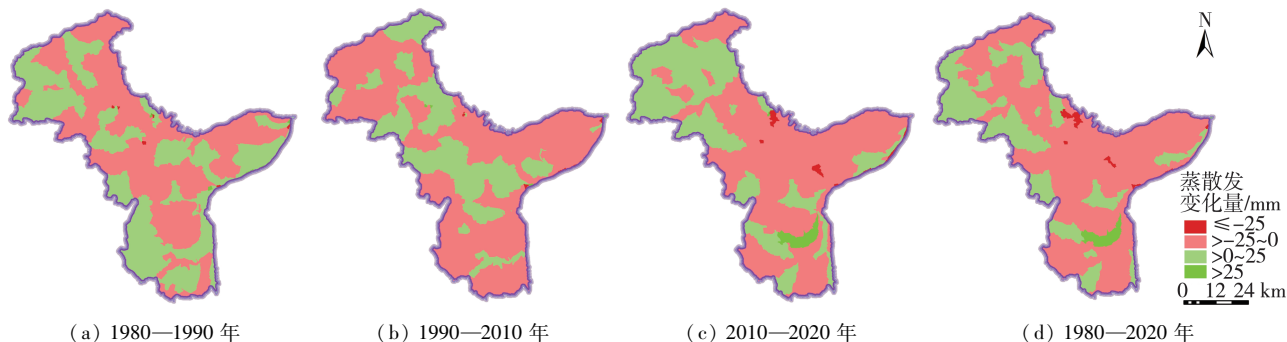


图5 不同时期子牙河流域蒸散发空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of evapotranspiration in the Ziya River basin at different periods

3.2 气候变化及其对水文要素的影响

3.2.1 气候变化

图6为1980—2019年子牙河流域各气象要素变化情况。由图6可见,1980—2019年子牙河流域降水量年际变化较大,流域最大年降水量达697.83 mm,发生于1996年,最小年降水量仅有319.56 mm,发生于1997年,多年平均降水量为498.94 mm;流域最高平均气温为12.91℃,发生于1998年,最低平均气温为10.23℃,发生于1984年;流域最大及最小日照时数为7.58 h和5.60 h,分别发生于1986年及2014年;流域最大及最小风速为2.95 m/s和1.83 m/s;流域最大及最小相对湿度为68.02%和52.57%。年平均气温呈显著上升趋势;年平均日照时长与相对湿度呈显著下降趋势,且均通过了95%显著性检验;年降水量及平均风速呈不显著上升趋势。

3.2.2 气候变化对流域水文要素的影响

利用SWAT模型模拟情景1、情景5、情景6、情景7的径流过程,得到不同情景下流域地表产流、地下水补给量、蒸散发量的多年平均值,结果见表4。由表4可见,研究时段内地表产流量及地下水补给量均呈现“增-减-增”的变化规律,这主要是受降水量变化的影响。与情景1相比,情景5的地表产流

和地下水补给有较大幅度的增加,其中地表产流增幅达83.48%,这主要受1996年子牙河流域强降雨的影响,1996年全流域的降水量达697.83 mm,为1980—2019年最高;“96·8”暴雨导致山区山洪暴发,部分河道出现历史最大洪峰流量,水库出现历史最高蓄水位,1996年8月部分子流域地表产流达到200 mm以上,是这一时段地表产流量及地下水补给量出现激增的主要原因。蒸散发在研究时段内呈现递增的趋势,增幅为26.67 mm,出现这种现象主要由气温不断升高导致。

表4 气候变化影响下流域水文要素变化

Table 4 Changes in hydrological factors of basin under influence of climate change

情景	地表产流量/ mm	地下水补给量/ mm	蒸散发量/ mm
情景1	6.90	4.08	430.50
情景5	12.66	5.05	432.58
情景6	6.42	4.39	446.84
情景7	10.31	4.61	457.17

总体来看,1980—2019年子牙河流域气候变化使流域地表产流量增加3.41 mm,地下水补给量增加0.53 mm,蒸散发量增加26.67 mm,3个水文要素均呈不同程度的增加,引起这一现象的主要原因是流域降水量的变化及气温的增加。

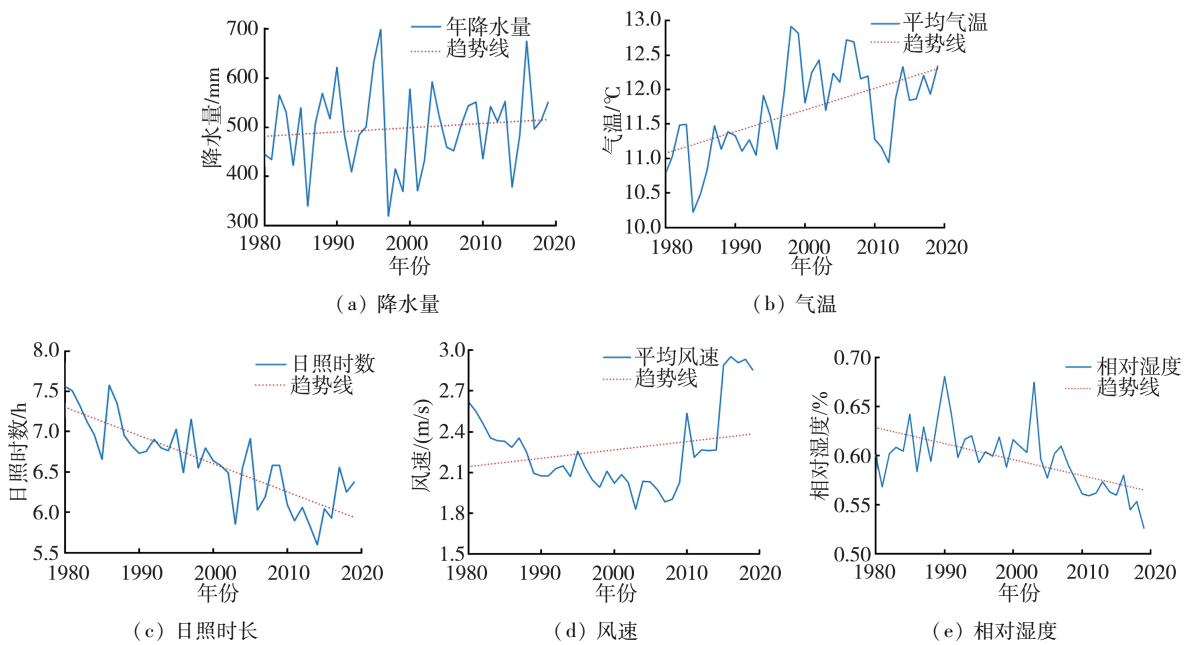


图 6 1980—2019 年子牙河流域各气象要素变化

Fig. 6 Changes in meteorological elements in the Ziya River Basin from 1980 to 2019

3.3 人类活动及气候变化对径流变化的贡献

献县站为研究流域出口处水文站,选取该站进行研究能够代表全流域的情况。表 5 为人类活动及气候变化对献县站的年径流影响的定量分析结果。由表 5 可见,相较于变化期 I (1974—1979 年),变化 II 期中 1980—1989 年人类活动与气候变化对献县站径流减少的贡献率分别为 54.09% 与 45.91%; 1990—1999 年人类活动对径流的影响有所提高,贡献率达 74.95%,气候变化对径流变化的贡献率为 25.05%; 2000—2009 年人类活动与气候变化对径流减少的贡献率与 1980—1989 年的较为一致,分别

为 53.27% 与 46.73%; 2010—2019 年人类活动与气候变化对于径流减少的贡献率分别为 65.31% 与 34.69%。总体来看,1974—2019 年人类活动与气候变化对献县站的径流减少的贡献率分别为 66.36% 与 33.64%,人类活动占据相对主导地位。

表 5 人类活动及气候变化对献县站的年径流影响的定量分析结果

Table 5 Quantitative analysis of impact of human activities and climate change on annual runoff of Xianxian Station

时间段	实测径流/亿 m ³	修正后的天然径流/亿 m ³	$\Delta R /$ 亿 m ³	
1974—1979 年	6.45	49.84		
1980—1989 年	0.46	27.17	-49.38	
1990—1999 年	2.85	38.07	-46.99	
2000—2009 年	1.91	27.43	-47.93	
2010—2019 年	3.20	33.66	-46.64	
1974—2019 年	2.67	33.97	-47.17	
时间段	$\Delta R_{\text{hum}} /$ 亿 m ³	$\eta_{\text{hum}} / \%$	$\Delta R_{\text{clim}} /$ 亿 m ³	$\eta_{\text{clim}} / \%$
1974—1979 年				
1980—1989 年	-26.71	54.09	-22.67	45.91
1990—1999 年	-35.22	74.95	-11.77	25.05
2000—2009 年	-25.52	53.24	-22.41	46.76
2010—2019 年	-30.46	65.31	-16.18	34.69
1974—2019 年	-31.30	66.36	-15.87	33.64

4 结论

a. 构建了子牙河流域 SWAT 模型,并对模型进行率定和验证,结果表明 SWAT 模型拟合程度较好,适用于研究流域。

b. 对 1980、1990、2000、2010、2020 年 5 期土地利用数据进行分析,发现各期土地利用类型均以耕地、草地、林地为主,流域内未利用土地、水域、建设用地较少。总体上草地、耕地及水域面积呈不断减少趋势,建设用地呈不断增加趋势,且在 2010—2020 年有较大的增长,其余类型的变化趋势不明显。1980—2020 年子牙河流域土地利用类型的变化使流域地表产流量增加了 3.50 mm,地下水补给量和蒸散发量分别减少了 0.15 mm 和 2.93 mm,引起这一变化的原因主要在于耕地、草地及水域面积的减少以及建设用地的增加,通过分析水文要素在空间上的变化情况也得出了相同的结论。

c. 对 1980—2019 年子牙河流域的气象数据进行分析,发现流域年降水量年际变化较大,且与年平均风速呈不显著上升趋势;年平均气温呈显著上升的趋势;年平均日照时长与相对湿度均呈显著下降趋势。1980—2019 年子牙河流域气候变化使得流域的地表产流量、地下水补给量及蒸散发量有不同

程度的增加,主要原因在于研究时段内流域降水量变化及气温的增加。

d. 采用基于 SWAT 模型的统合还原法计算人类活动及气候变化对径流影响的贡献,结果表明人类活动与气候变化对猷县站的径流减少的贡献率分别为 66.36% 与 33.64%,人类活动占据相对主导地位。

参考文献:

[1] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (7): 779-790. (in Chinese))

[2] ALLEN M R, INGRAM W J. Constrains on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419:224-232.

[3] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. 中国水利,2008(2):20-27. (DING Yihui. Human activity and the global climate change and its impact on water resources [J]. China Water Resources, 2008(2):20-27. (in Chinese))

[4] 张爱静. 东北地区流域径流对气候变化与人类活动的响应特征研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.

[5] 黄斌斌,郝成元,李若男,等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报,2018,33(5):899-910. (HUANG Binbin, HAO Chengyuan, LI Ruonan, et al. Research progress on the quantitative methods of calculating contribution rates of climate change and human activities to surface runoff changes [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(5): 899-910. (in Chinese))

[6] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究 [M]. 北京:科学出版社,2007.

[7] 李镇洋,李国芳,高倩雨,等. 变化环境下嫩江富拉尔基站径流响应[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):35-40. (LI Zhenyang, LI Guofang, GAO Qianyu, et al. Runoff response of Fulaerji station in Nenjiang River under changing environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):35-40. (in Chinese))

[8] 王国庆,张建云,贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展,2006,17(6):853-858. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruiming. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River Basin of the middle Yellow River [J]. Advances in Water Science,2006,17(6):853-858. (in Chinese))

[9] 李泽君,黄本胜,邱静,等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J]. 水资源保护,2021,37(5):22-29. (LI

Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):22-29. (in Chinese))

[10] 魏潇娜,龙爱华,尹振良,等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):137-144. (WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 137-144. (in Chinese))

[11] 李文婷,杨肖丽,任立良. 赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):166-173. (LI Wenting, YANG Xiaoli, REN Liliang. Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River Basin [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):166-173. (in Chinese))

[12] 林若兰,卓文珊,高延康,等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估[J]. 水资源保护,2020,36(6):131-136. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, GAO Yankang, et al. Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):131-136. (in Chinese))

[13] 王博威,李建柱,冯平. 土地利用变化对潘家口水库控制流域径流影响[J]. 水利学报,2018,49(3):379-386. (WANG Bowei, LI Jianzhu, FENG Ping. Impacts of land use change on runoff in Panjiakou Reservoir watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(3):379-386. (in Chinese))

[14] 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,2013,9(6):391-397. (ZHANG Liping, YU Songyan, DUAN Yaobin, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on runoff in the Yongding River Basin [J]. Climate Change Research, 2013,9(6):391-397. (in Chinese))

[15] 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. (GUO Juntao, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (6): 1559-1567. (in Chinese))

[16] YANG G Q, ZHAO M, XIE Z H, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to water volume in Lake Qinghai, China [J]. Remote Sensing,2021,14(1):99-99.

[17] ONYUTHA C, NYESIGIRE R, NAKAGIRI A. Contributions of human activities and climatic variability to

- changes in River Rwizi Flows in Uganda, East Africa[J]. Hydrology,2021,8(4):145.
- [18] 崔豪,肖伟华,周毓彦,等.气候变化与人类活动影响下大清河流域上游河流径流响应研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):54-62. (CUI Hao, XIAO Weihua, ZHOU Yuyan, et al. Runoff responses to climate change and human activities in the upper Daqing River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019, 17(4):54-62. (in Chinese))
- [19] 李任之,黄河清,余国安,等.气候变化和人类活动对澜沧江:湄公河流域径流变化的影响[J].资源科学,2021,43(12):2428-2441. (LI Renzhi,HUANG Heqing, YU Guoan, et al. Contributions of climatic variation and human activities to streamflow changes in the Lancang-Mekong River Basin [J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2428-2441. (in Chinese))
- [20] 吴丽,张爱静.气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J].水利水电科技进展,2016,36(2):10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2):10-15. (in Chinese))
- [21] 赵希岭.子牙河系涉河项目管理有关问题的探析[J].河北水利,2011(6):2. (ZHAO Xiling. An analysis on the management of river-related projects in Ziya River System[J]. Hebei Water Resources, 2011(6):2. (in Chinese))
- [22] 褚益清.子牙河流域平原河流生态现状及治理方法[J].河北水利,2014(4):38-39. (ZHU Yiqing. River ecology status and management methods in Ziya River Basin Plain [J]. Hebei Water Resources, 2014(4):38-39. (in Chinese))
- [23] 崔炳玉.气候变化和人类活动对滦沱河区水资源变化的影响[D].南京:河海大学,2004.
- [24] 张瑞钢,莫兴国,林忠辉.滦沱河上游山区近50年蒸散变化及主要影响因素分析[J].地理科学,2012,32(5):628-634. (ZHANG Ruigang, MO Xingguo, LIN Zhonghui. The trend and the principal influence factors of evapotranspiration in Hutuo River Basin during last 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica,2012,32(5):628-634. (in Chinese))
- [25] 马若燕,马海铭.子牙河平原区供水结构变化情况分析[J].海河水利,2018(5):2. (MA Ruoyan, MA Haiming. Analysis on the change of water supply structure in Ziya River Plain [J]. Haihe Water Resources, 2018(5):2. (in Chinese))
- [26] 穆冬靖.基于生态水文理念下的流域水资源评价研究[D].天津:天津大学,2014.
- [27] 李珊珊,单保庆,张洪.滏阳河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J].环境科学学报,2013,33(8):2277-2284. (LI Shanshan, SHAN Baoqing, ZHANG Hong. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Fuyang River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(8): 2277-2284. (in Chinese))
- [28] HUANG Z W, HEJAZI M, LI X Y, et al. Reconstruction of global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971-2010 and analysis of their spatiotemporal patterns [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2018, 22(4): 1-30.
- [29] TANG X P, FU G B, ZHANG S L, et al. Attribution of climate change and human activities to streamflow variations with a posterior distribution of hydrological simulations [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2022, 26(20):5315-5339.
- [30] LI D H, LIU K, WANG S D, et al. Four decades of hydrological response to vegetation dynamics and anthropogenic factors in the Three-North Region of China and Mongolia [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857(2):159546.
- [31] LIU Y W, WU G P, FAN X W, et al. Hydrological impacts of land use/cover changes in the Lake Victoria basin [J]. Ecological Indicators, 2022, 145(1):109580.
- [32] KANNAN N, WHITE S M, WORRALL F, et al. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000 [J]. Journal of Hydrology, 2007, 332(3):456-466.
- [33] 赵阳,余新晓,郑江坤,等.气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J].农业工程学报,2012,28(22):252-260. (ZHAO Yang, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al. Quantitative effects of climate variations and land-use changes on annual streamflow in Chaobai river basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 252-260. (in Chinese))
- [34] 陈鑫,刘艳丽,刁艳芳,等.基于SWAT模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):9-18. (CHENG Xin, LIU Yanli, DIAO Yanfang, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in Haihe River Basin with SWAT model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019,17(4):9-18. (in Chinese))
- [35] 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. (DONG Guoqiang, YANG Zhiyong, YU Yingdong. Research progress on effects of variations of underlying surface on runoff yield and concentration in the river basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(3):111-117. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-18 编辑:王芳)