

变化环境下洮河流域径流变化归因

刘酌希^{1,2}, 陈鑫^{2,3}, 管晓祥^{1,2}, 舒章康^{2,3}, 杨晓甜^{1,2}, 王国庆^{1,2,3}

(1.河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2.水利部 应对气候变化研究中心,
南京 210029; 3.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘 要:变化环境下干旱区河川径流锐减,定量分析不同驱动要素对河川径流的影响对流域治理具有重要意义。以黄河上游洮河流域为例,采用水文模拟途径,定量分析了气候变化和人类活动对径流变化的贡献。结果表明:(1)近 60 年来,洮河流域径流下降趋势显著,平均线性递减率为 -1.38 mm/a ,实测径流系列在 1986 年产生突变,1986 年以来实测径流量较前期减少 28.5%;(2) SWAT 模型可以较好地模拟洮河流域的天然径流过程,纳什效率系数 NSE 和决定系数 R^2 均超过 80%,相对误差 RE 小于 7%;(3)气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为 58.9% 和 41.1%,气候变化是径流减少的主要原因,但人类活动的绝对影响有增大趋势。

关键词:水利工程基础学科; 径流变化; 归因分析; SWAT 模型; 洮河流域; 变化环境

中图分类号:TV11

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0087-06

Attribution of Runoff Change in the Taohe River Basin Under a Changing Environment

LIU Zhuoxi^{1,2}, CHEN Xin^{2,3}, GUAN Xiaoxiang^{1,2}, SHU Zhangkang^{2,3},
YANG Xiaotian^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2,3}

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.Research Center for Climate Change, ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;

3.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: The recorded runoff in arid region presented a dramatically decline trend induced by environment change. It is of significance to quantitatively analyze the influences induced by different drivers for supporting river basin management. Taking the Taohe River basin in the upper reaches of the Yellow River basin as an example, the influences of climate change and human activities on runoff change were investigated by using hydrological simulation approach. The results show that: (1) in the past 60 years, the runoff in the Taohe River basin has had a significant decline trend with an average linear decreasing rate of $-1.38 \text{ mm per year}$; runoff series presented an abrupt change in 1986, the measured runoff after 1986 decreased by 28.5% compared with the previous mean; (2) the SWAT model performs well for simulating the natural runoff process of the Taohe River with the Nash efficiency coefficient NSE and the coefficient of determination R^2 both exceeding 80%, and the relative error RE less than 11%; (3) climate change and human activities contributed to 58.9% and 41.4% of the total runoff reduction, respectively; climate change is the main reason for runoff decrease, while the impact of human activities on runoff has an increasing trend.

Keywords: basic discipline of water conservancy engineering; runoff change; attribution analysis; SWAT model; the Taohe River basin; environment change

收稿日期:2019-08-13

修回日期:2019-11-20

资助项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFA0601501);国家自然科学基金(41830863,51879162,51779145)

第一作者:刘酌希(1996—),女(满族),河北承德人,硕士研究生,从事变化环境下水文模拟的影响研究。E-mail:328024754@qq.com

通信作者:王国庆(1971—),男,山东成人,博士,教授级高级工程师,从事流域水文模拟、气候变化影响评价等方面的研究。E-mail:qqwang@nhri.cn

水是人类社会和自然环境得以维持的必备要素,水资源又是联系人类社会和自然环境的纽带。近年来,全球的水资源问题日益突出。日益增长的用水量和引水量使世界 200 条较大河流的径流量减少了 22%^[1]。20 世纪 50 年代以来,黄河等中国北方典型流域实测值减少显著^[2-4]。气候变化和人类活动被认为是影响各种尺度水文循环和水资源演变规律最主要的驱动力。在气候变化和人类活动的影响下,流域径流呈现特异性和变化性。气候变化(水文、气象等要素的改变)会导致流域径流量以及流域产汇流过程的变化;人类活动则主要通过改变下垫面土地利用/覆被变化以及取用水的变化,影响水文循环^[5]。进行气候变化和人类活动对径流的贡献率的量化分析对水资源管理和水文科学研究有重要意义。当前径流变化的归因分析主要包括配对流域试验法^[6]、个人用水调查法^[7]、基于水平衡和 Budyko 假设的气候弹性方法^[8]、统计学方法^[9]以及水文模型模拟法^[10]等方法,随着计算机的发展,物理意义明确、所需人力物力少的水文模型模拟法被广泛运用。美国农业部开发的分布式水文模型(SWAT 模型)较为常见,该模型可直接输入流域内的气象、土壤特性、地形、植被和土地管理措施等信息,并直接模拟水流等物理过程。也可进行长期的流域模拟并可模拟无观测数据的流域,因而被广泛使用。

洮河作为黄河上游右岸第二大支流,是甘肃省中部干旱地区最重要的水源区,其水资源的变化可牵动黄河流域的社会经济等的发展。但是,目前针对洮河流域的水文研究主要在分析其水文气象要素变化特征方面^[11-14],而对其径流变化归因分析也只停留在气候变化或者土地利用变化较为单一的层面^[15-16]。因此,本文以洮河流域为研究对象,采用基于 SWAT 模型的径流归因识别方法,定量辨识气候变化和人类活动这两种影响因素对径流的贡献率,有益于洮河流域的水资源规划研究。

1 资料与方法

1.1 基本资料

洮河是黄河上游右岸最大的一级支流,发源于青海省西倾山北麓的勒尔当,于甘肃省永靖县汇入黄河刘家峡水库区,由西向东流经碌曲、卓尼,在岷县急转北流,穿九甸峡和海甸峡,涉及两个省 15 个县市。洮河流域(101°36′—104°20′E, 34°06′—36°01′N)地跨甘南高原和陇西黄土高原两大地貌单元,上游斜坡陡峭,山谷很深,山脉起伏,河流侵蚀薄弱,除了森林覆

盖,大部分是平坦的草地和丘陵牧场。下游地表起伏较大,沟谷纵横,地形破碎,区域内大部分面积被黄土覆盖,呈典型的黄土丘陵地貌。流域面积 25,527 km²,海拔 1,748~4,569 m,流域气候虽属大陆性气候,但因受青藏高原和蒙古高原气候交绥的影响,大部地区湿润多雨,降水量较大,年平均径流量约 53 亿 m³(红旗水文站),径流模数约 20.8 万 m³/(s·km²)。多年平均气温从上游的 1℃增至下游的 9℃,多年平均降水量从 650 mm 减少至 300 mm^[15]。

洮河流域控制站红旗水文站 1955—2015 年的逐日径流资料摘录于水文年鉴,降水、日最高/最低气温以及风速、相对湿度、太阳辐射等气象数据由中国气象数据共享服务网提供(<http://data.cma.cn/>),洮河流域内及周边气象站点分布如图 1 所示。90 m 空间分辨率的数字高程模型来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);洮河流域土地利用类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所,空间分辨率为 1 km。土壤数据采用世界土壤数据库 HWSD 数据,分辨率为 1 km。

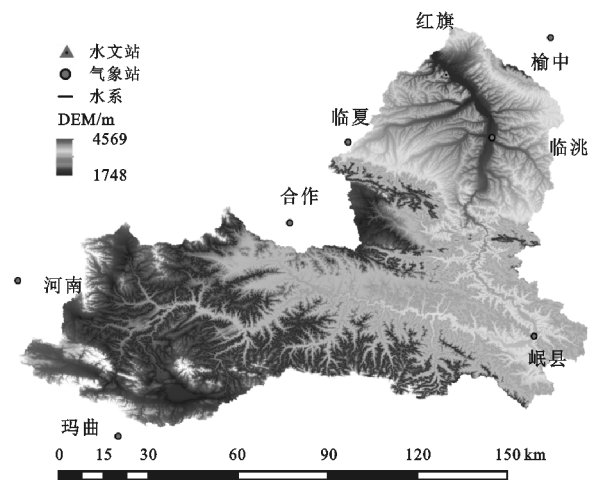


图 1 洮河水系及水文气象站点分布

1.2 SWAT 模型及目标函数

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部农业研究中心 Jeff Arnold 博士所开发的流域尺度模型。模型开发的最初目的是在具有不同下垫面条件的大尺度复杂流域内,预测土地管理措施对汇流、产沙和农业化学污染物负荷等的长期影响。SWAT 模型主要分为 3 个模块,水文模型、土壤侵蚀和污染负荷^[17],本文使用水文模型模块。流域水文建模可分为两个阶段:水文循环的陆地阶段和水文循环的汇合阶段。陆相控制着水流、沉积物、养分和农药负荷等向每个子流域的主河道的输入;汇流阶段是指河网中的水流、沉积物等向出水口的运移过程。

水量平衡原理是流域内所有过程的理论支撑。SWAT 通过细分流域来反映不同作物和土壤类型的蒸

散发差异,分别预测出各水文响应单元(HUR)的径流量,然后演算得到流域的总径流量。水量平衡方程为:

$$W_t = W_0 + \sum_{i=1}^t (P_d - Q_s - E_a - W_s - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中: W_t 表示土壤的最终含水量(mm); W_0 表示土壤在第 i 时刻的初始含水量(mm); P_d 表示第 i 时刻的降水量(mm); Q_s 表示第 i 时刻的地表径流量(mm); E_a 表示第 i 时刻的蒸散发量(mm); W_s 表示第 i 时刻从土壤剖面进入包气带的水量(mm); Q_{gw} 表示第 i 时刻地下水流出(mm)。

本文采用3个指标评价 SWAT 模型的适用性:纳什效率系数(NSE)、决定系数(R^2)和相对误差(RE)。这3个指标最具代表性。

(1) 纳什效率系数(NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (Q_s - Q_m)^2}{\sum_{i=1}^t (Q_s - \overline{Q_s})^2} \quad (2)$$

式中: Q_m , Q_s , $\overline{Q_s}$ 分别为模型模拟值,实际观测值,实际观测平均值(mm); n 为观测数据个数。NSE 取值范围在 $(-\infty, 1)$ 之间,NSE 越接近1时,模拟效果越好,可信度越高。

(2) 决定系数(R^2)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^t (Q_s - \overline{Q_s})(Q_m - \overline{Q_m})]^2}{\sum_{i=1}^t (Q_s - \overline{Q_s})^2 \sum_{i=1}^t (Q_m - \overline{Q_m})^2} \quad (3)$$

式中: Q_s , $\overline{Q_s}$, Q_m , $\overline{Q_m}$ 分别为实际观测值,实际观测平均值,模型模拟值,模拟平均值(mm); n 代表实际观测个数。 R^2 越趋近于1,说明回归方程拟合的越好, R^2 越趋近于0,说明回归方程拟合的越差, $R^2 > 0.6$ 时,表明模拟效果较好。

(3) 相对误差(RE)

$$RE = \frac{\overline{Q_m} - \overline{Q_s}}{\overline{Q_s}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\overline{Q_m}$, $\overline{Q_s}$ 分别为模拟平均值,实测平均值;当 $|RE| < 20\%$ 时,模拟效果较好, $|RE|$ 越小,模拟效果越好,反之, $|RE|$ 越大,模拟效果越差。

1.3 河川径流归因定量识别方法

利用统计分析方法,寻找降水,径流改变特征,趋势以及突变点,划分流域人类活动稳定期和人类活动剧烈期,本文采用 MK 突变检验法^[18-20] 和有序聚类分析法^[21-23] 来进行突变诊断。突变点之前为人类活动稳定期,之后为人类活动剧烈期,突变点之后的径流与基准期的径流差异包括两部分:气候变化引起的径流变化和人类活动引起的径流变化。选取流域水文模型,将人类活动稳定期的气象、水文资料输入模

型,对模型进行参数率定并验证其的适用性。为保证水文模型模拟值和人类活动稳定期的径流量在物理成因上具有一致性,保持模型参数不变,模型输入人类活动剧烈期的气象资料,模拟此时的径流。

具体表达式如下所示:

$$\Delta Q = Q_a - Q_b \quad (5)$$

$$\Delta Q_c = Q_c - Q_b \quad (6)$$

$$\Delta Q_b = Q_a - Q_c \quad (7)$$

$$W_c = \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q} \quad (8)$$

$$W_b = \frac{\Delta Q_b}{\Delta Q} \quad (9)$$

式中:突变点之前的径流均值为 Q_b ;突变点之后模拟径流的均值为 Q_c ;实际径流为 Q_a ;径流总变化为 ΔQ ;气候变化引起的均值变化度为 ΔQ_c ;贡献率为 W_c ;人类活动引起的均值变化度为 ΔQ_b ;贡献率为 W_b 。

2 结果与分析

2.1 径流的阶段性变化

由洮河流域出口断面红旗水文站 1955—2015 年的年径流深过程(图 2)可以看出:(1) 径流的线性递减率为 1.38 mm/a,实测径流量在 170 mm 上下波动,且总体趋势下降;(2) 径流量年代际变化显著,从 1960s 末到 1980s 中期,再从 1980s 中期到 21 世纪初,径流量持续下降,尤其是 1980s 中期到 21 世纪初,有明显的下降趋势,较 1980s 前减少了 28.5%;(3) 从年径流 5 a 滑动平均过程来看,径流量起伏变化较明显,首尾滑动平均值相差较大,趋势变化较实测数据一致。

由洮河流域年径流量序列 MK 检验图(图 3)可以看出, UF_k 和 UB_k 过程线在 1986 年发生交叉,相交点位于置信区间 (± 1.96) 以内,说明在 0.05 检验水平内突变不显著。且根据洮河流域年径流量时序离差平方和过程(图 4)可知实测年径流量的时序离差平方和在 1986 年达到最小,出现了明显的跳跃式突变。综上可以判断,1986 年为年径流量的突变年。

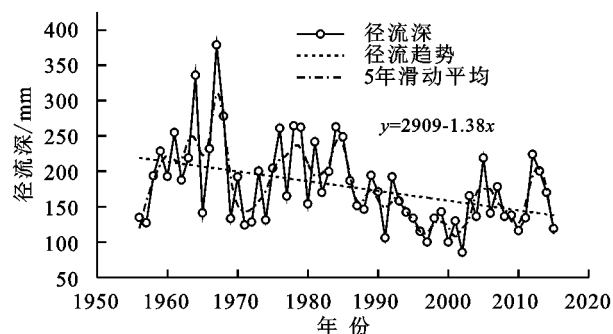


图2 洮河流域径流量年际变化过程

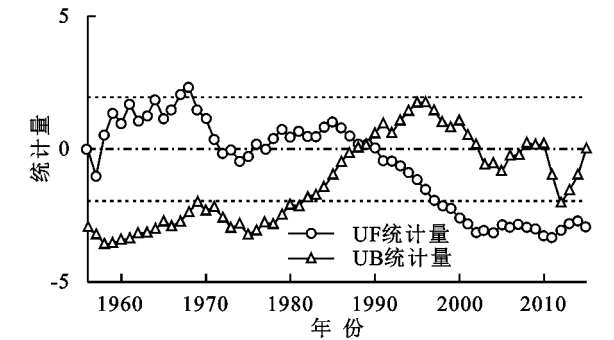


图 3 洮河流域年径流量序列 M-K 检验

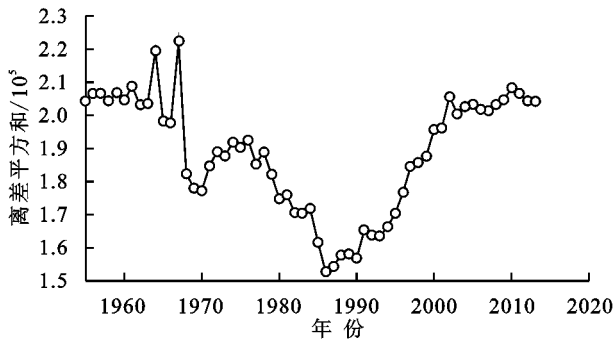


图 4 洮河流域年径流时序离差平方和

2.2 基于 SWAT 模型的径流模拟

2.2.1 参数敏感性分析 SWAT 模型参数共有 200 多个,且都具有一定的物理意义,参数的大小对模型的结果会产生一定的影响。但是参数众多,调节起来

工作量大,因此采用 SWAT-CUP 对模型进行敏感性分析,筛选掉影响不大的参数,减小模型的不确定性,提高模型的率定效率。

根据洮河流域的特性和已有研究成果,本文选取了 12 个参数,选取洮河流域 1956—1985 年的月径流资料,初始数据可能会受到变量的影响产生误差,故设置两年预热期,为 1956—1957 年,率定期为 1958—1976 年,验证期为 1977—1985 年。经过多次调试,得到参数校准值见表 1。参数的敏感性见图 5。

表 1 洮河流域率定参数范围与校准值

参数	参数意义	取值范围	校准值
v_SOL_K(1) .sol	土壤饱和导水率	0~2000	60.16
v_CN2.mgt	SCS 径流曲线数	35~98	66.38
v_SOL_BD(1) .sol	土壤容重	0.9~2.5	1.74
v_ALPHA_BF.gw	基流系数	0~1	0.39
v_GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	0~500	150.45
v_SOL_AWC(1) .sol	土壤持水系数	0~1	0.64
v_ALPHA_BNK.rte	河岸基流因子	0~1	0.97
v_SFTMP.bsn	降雪气温	-20~20	-19.86
v_GW_REVAP.gw	地下水蒸发系数	0.02~0.2	0.10
v_GWQMN.gw	浅层地下水再蒸发系数	0~5000	717.06
v_CH_N2.rte	主河道曼宁系数	-0.01~0.3	0.09
v_ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.81

注:v 代表代替经验值。

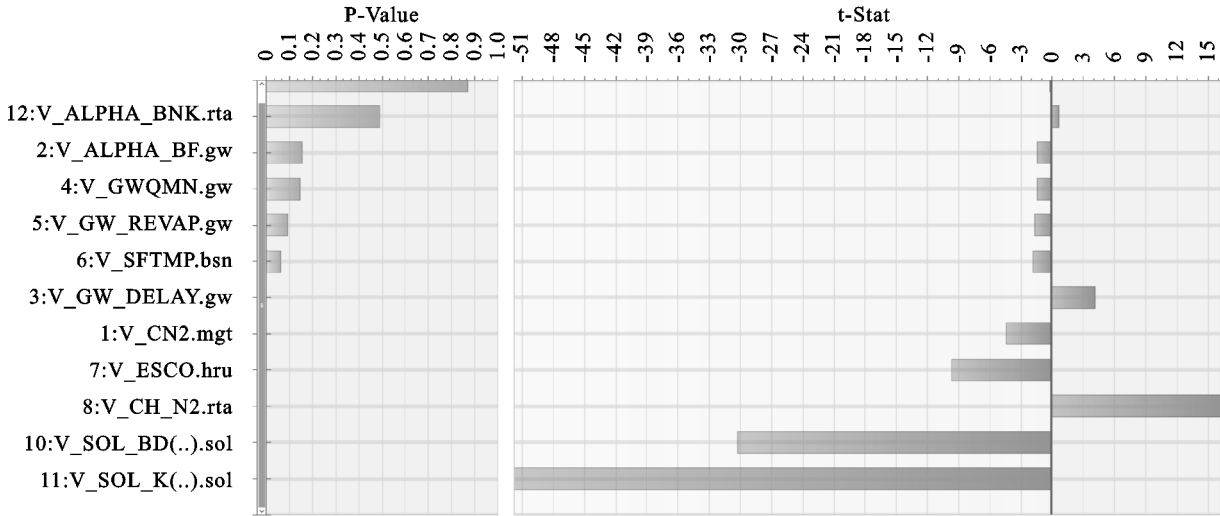


图 5 参数敏感性分析

结合表 1 以及图 5 可知,土壤饱和导水率 SOL_K,土壤容重 SOL_BD,主河道曼宁系数 v_CH_N2.rte,土壤蒸发补偿系数 v_ESCO.hru,SCS 径流曲线系数 CN2,地下水滞后系数 GW_DELAY 的 t-Stat 绝对值都较高,分别代表了模型最为敏感的 6 个参数。由表中 P-Value 值可以看出,SCS 径流曲线系数 CN2 敏感显著性很高。土壤饱和导水率敏感性最高,它与土壤性质密切相关,直接影响流域地下水量;SCS 径流曲线数敏感显著性很高,它直接影响径流量的大小。

2.2.2 模拟结果与分析 流域出口站红旗站实测月径流值与模型模拟出来的径流值如图 6—7 所示。率定期和验证期的径流模拟精度结果(包括效率系数,决定系数和相对误差)见表 2。

由图 6—7 可以看出,模拟的径流曲线与实测的径流曲线变化趋势一致。由表 2 可以看出,在率定期和验证期,效率系数和决定系数均大于 0.8,相对误差均小于 20%,表明洮河流域径流的实测值和模拟值均具有较好的拟合度。率定期和验证期均存在早期

实测值高于模拟值的现象,表明 SWAT 模型对偏枯水年的模拟精度较低。而以上雨季少数极端径流量的峰值模拟值较小的现象,表现出模型对于极端径流的模拟参数有待改善。综上可见,采用 SWAT 模型来模拟径流的结果良好,表明运用该模型在洮河流域

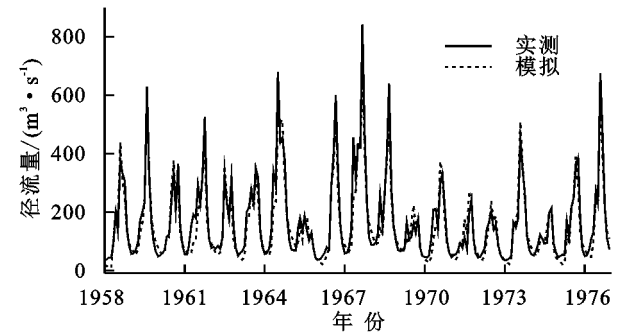


图 6 率定期实测与模拟径流量过程

2.3 径流变化归因分析

依据 2.1 部分分析结果,实测径流突变点可定为 1986 年,突变点之前为人类活动稳定期,突变点之后为人类活动剧烈期,基于 SWAT 模型对天然径流过程的模拟过程与实测径流过程对比如图 8 所示,突变后模拟平均径流深与突变前实测平均径流深的差值为气候变化的影响值,突变后实测的平均径流深与突变后模拟的平均径流深的差值为人类活动的影响值,由此得出人类活动与气候变化对突变点前后径流变化的贡献率(表 3)。由图 8 及表 3 可知:(1) 1986 年以后的变化期的模拟年均径流量比 1986 年以前的基准期的年均径流量下降了 19%,说明气候要素变化引起了径流量的减少,气候变化对径流减少的贡献率为 59%;(2) 变化期的实测年均径流量比基准期的年均径流量明显降低,减少了 32.7%,说明人类活动也

有较好的适用性。

表 2 月径流模拟评价指标

时期	NSE	R ²	RE/%
率定期(1958—1976 年)	0.91	0.91	6.6
验证期(1977—1985 年)	0.88	0.86	1.0

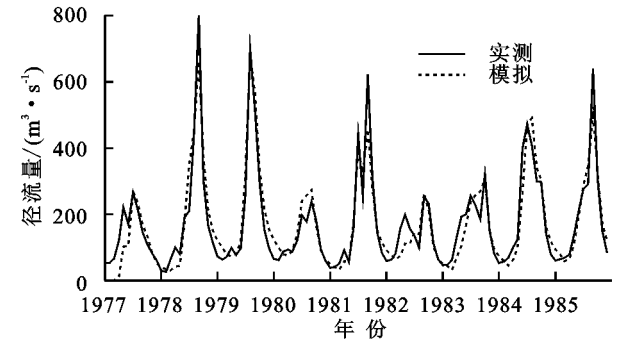


图 7 验证期实测与模拟径流量过程

引起了径流量的减少。人类活动对径流减少的贡献率为 41%;(3) 在人类活动稳定期,模拟径流与实测径流基本一致,模拟与实测径流的差距可视为数据观测误差或模型参数选择造成的结果。

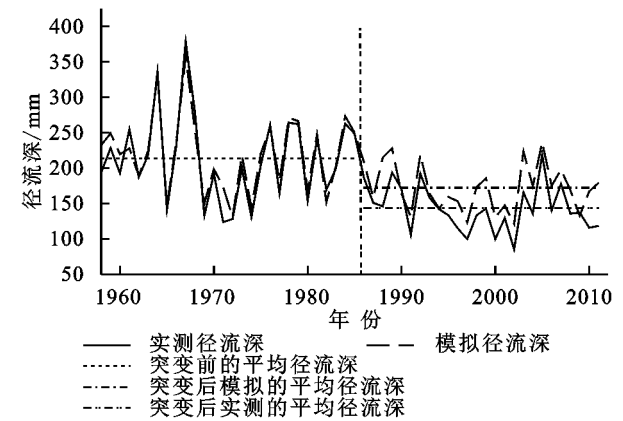


图 8 洮河流域 1958—2011 年实测与模拟年径流量过程

表 3 人类活动和气候变化对径流量影响定量分析

时期	实测值/ mm	模拟值/ mm	总变化量/ mm	人类活动		气候变化	
				影响量/mm	占比/%	影响量/mm	占比/%
1958—1985	213.6	220.6					
1986—2000	144.8	170.5	−68.8	−25.7	37.4	−43.1	62.6
2001—2011	138.5	175.0	−75.1	−36.5	48.6	−38.6	51.4
1986—2011	143.6	172.4	−70	−28.8	41.1	−41.2	58.9

表 4 统计了不同阶段气温、降水和径流量统计值及其与人类活动稳定期的相对变化情况。由表 4 可知:(1) 洮河流域自基准期之后气温持续增加,降水量减少,径流量减少。(2) 1986—2000 年较基准期气温升高了 0.46℃,降水减少了 6.89%,径流量减少了 30.42%;2001—2015 年较基准期气温升高了 0.98℃,降水减少了 2.53%,径流量减少了 26.62%。人类活动剧烈期和人类活动稳定期相比,气温升高了 0.72℃,降水减少了 4.72%,径流量减少了 28.50%。(3) 气温

升高,降水减少,导致产流量减少,使得径流减少,但是上述降水、径流变化并不完全对应,多年平均径流深的相对变化是降水的 5 倍以上,凸显了人类活动对河川径流的影响。

从 1980s 到 2000s 这 3 个不同时期的土地利用情况见表 5,可以看出土地利用类型变化不大,草地占比最大,占 56.8%,林地占比第二,为 23.3%,再次为耕地,占比 13.3%。3 个时期耕地先减再增后减,林地草地变化趋势与之相反,与洮河从毁林毁草开荒

到实行退耕还林还草措施的进程相对应;且 1980s 水域减少,2000s 水域增加且居住地增加,这与城市化的发展与水利工程的建设密切相关。

表 4 洮河流域不同时期气温、降水、径流及其变化

时期	气温/ ℃	气温 变化/℃	降水/ mm	降水 变化/%	径流/ mm	径流 变化/%
1956—1985	6.42		580.9		208.1	
1986—2000	6.88	0.46	540.9	−6.89	144.8	−30.42
2001—2015	7.40	0.98	566.2	−2.53	152.7	−26.62
1986—2015	7.14	0.72	553.5	−4.72	148.8	−28.50

表 5 不同时期土地利用变化

年代	耕地	林地	草地	水域	居住地	未利用土地
1980s	−1%	1.4%	—	−4%	—	—
1990s	5%	−1.8%	−0.7%	—	—	—
2000s	−4.2%	—	1%	19.6%	12.2%	—

洮河地形复杂,自 20 世纪 90 年代以来,草原牧民长期放牧,毁林毁草开荒,使得植被被严重破坏,草场消失严重且大片的草场的水源涵养能力下降,森林大面积减少,多被开垦为耕地,水土流失严重,生态被破坏现象仍然严重。而对于植被稀少的黄土覆被区来说,人类活动给本就水土流失严重的地区带来了沉重打击,植被退化现象严重,蓄水能力减弱。湟济渠灌区和洮惠渠灌区两大灌区均从 20 世纪 80 年代末修建完成,大规模引水调水也发生在这一时期,与径流变化相对应。20 世纪 90 年代以来,水利工程的兴建使得水资源大量消耗,以及下泄流量不足,枯水期甚至可能不会排水,使得一些河道断流。

3 结论

(1) 近 60 a 来,洮河流域径流下降趋势显著,平均线性递减率为−1.38 mm/a,1986 年以来实测径流量较前期减少 28.5%。

(2) 验证期和率定期 SWAT 模型径流模拟精度较高,纳什效率系数 NSE 和决定系数 R^2 均超过 80%,相对误差 RE 均小于 7%,表明 SWAT 模型可以较好地模拟洮河流域的天然径流过程。

(3) 变化期的径流量相比于基准期的径流量减少了 70 mm,其中气候变化使径流减少了 41.2 mm,对径流变化的贡献率为 58.9%;人类活动使径流减少了 28.8 mm,对径流变化的贡献率为 41.1%,且人类活动的影响有增大趋势。

不同的时间尺度模拟结果会有一定的差距,月尺度的径流模拟有待研究。SWAT 模型的不确定性分析需进一步研究,如输入、参数、结构和处理方法会产生的影响。

参考文献:

[1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003,39(1/2):111-126.

[2] Wang G Q, Yan X L, Zhang J Y, et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950-2010[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013,4(3):252-264.

[3] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.

[4] 王金星,张建云,李岩,等.近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-661.

[5] 杨林山.气候变化与人类活动对洮河流域水文过程的影响[D].兰州:兰州大学,2015.

[6] Chappell N A, Tych W, Chotai A, et al. Barumodel: Combined data based mechanistic models of runoff response in a managed rainforest catchment[J]. Forest Ecology&Management, 2006,224(1):58-80.

[7] Ismaiyllov G K, Fedorov V M. Analysis of long-term variations in the volga annual runoff [J]. Water Resources, 2001,28(5):469-477.

[8] Li F, Zhang G, Xu YJ. Separating the impacts of climate variation and human activities on runoff in the Songhua River Basin, Northeast China. [J]. Water, 2014,6(11):3320-3338.

[9] Thodsen H. The influence of climate change on stream flow in Danish rivers[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/4):226-238.

[10] Wang G Q, Zhang J Y, Pagano T C, et al. Using hydrological simulation to detect human-disturbed epoch in runoff series[J]. Water Science & Technology, 2015,71(5).

[11] 罗颖,张钰,路阳,等.近 50 年洮河干流径流量分布特征及变化趋势分析[J].兰州大学学报:自然科学版, 2015,51(2):153-158.

[12] 段炳文.洮河流域降水量的多时间尺度特征及趋势分析[J].人民黄河,2015,37(11):11-14.

[13] 刘红兵,王汉卿.洮河流域近 36 a 主要水文要素时空分布特征研究[J].地下水,2017,39(3):103-106.

[14] 熊雅丽.洮河流域近 20 年径流量偏枯原因分析[J].地下水,2018,40(5):192-195.

[15] 李常斌,杨林山,杨文瑾,等.洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[J].地理科学,2014,34(7):848-855.

[16] 王莺,张强,王劲松,等.基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J].中国沙漠,2017,37(1):175-185.

回归模型,目前的研究未能很好解决的这个问题,今后将对其进一步的研究。

参考文献:

[1] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.

[2] 鲍丽然,周皎,李瑜,等.渝西北土壤有机质空间变异及影响因素分析[J].西南农业学报,2017,30(11):2541-2547.

[3] 朱阿兴.精细数字土壤普查模型与方法[M].北京:科学出版社,2008.1-50.

[4] 朱阿兴,杨琳,樊乃卿,等.数字土壤制图研究综述与展望[J].地理科学进展,2018,37(1):66-78.

[5] 赵永存,史学正,于东升,等.不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J].土壤学报,2005,42(3):379-385.

[6] 席江勇,郭瑛,禅忠祥.基于 GIS 的土壤有机质含量空间插值方法比较研究[J].科技论坛,2008,11(4):81-82.

[7] 文雯,周宝同,汪亚峰,等.基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值:以黄土丘陵区小流域为例[J].生态学报,2013,33(19):6389-6397.

[8] 顾成军,史学正,于东升.结合土地利用与克里格插值的区域土壤有机碳空间表征方法[J].水土保持研究,2014,21(2):39-46.

[9] 赵建华.基于 GIS 的兰州市土壤全氮和有机质空间变异性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.

[10] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's soil organic carbon baseline:The undervalued role of land-management[J]. Geoderma, 2009,152(1/2):74-84.

[11] 黄安,杨联安,杜挺,等.基于不同协变量 Cokriging 土壤养分空间预测精度研究:以陕西省蓝田县为例[J].水土保持研究,2014,30(10):133-142.

[12] 张仁铎.空间变异理论及应用[M].北京:科学出版社,2005:10-20.

[13] 杨顺华.基于空间回归模型的土壤有机质区域分布特征研究[D].武汉:华中农业大学,2016.

[14] 代子俊,赵霞,李德成,等.近 30 年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素[J].土壤学报,2018,55(2):338-350.

[15] 郭武.湟水流域水文特征[J].水文,1995(6):52-55.

[16] 李冠稳.基于可见—近红外光谱与回归技术的土壤有机质含量估算研究[D].西宁:青海师范大学,2018.

[17] 马慧娟,高小红,谷晓天.随机森林方法支持的复杂地形区土地利用/土地覆被分类研究[J].地球信息科学,2019,21(3):359-371.

[18] Dai J H, Yuan J. Comparison of univariate analysis of variance and multiple linear regression analysis [J]. Statistics and Decision, 2016(9):23-26.

[19] 吴子豪,刘艳芳,陈奕云,等.综合土地利用及空间异质性的土壤有机碳空间插值模型[J].应用生态学报,2018,29(1):238-246.

[20] 陈慕松,范晓晖,吴寿华.基于不同空间插值类型的耕地土壤有机质空间变异性分析[J].江西农业学报,2018,21(4):55-59.

[21] 薛晓娟,李英年,杜明远,等.祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况[J].冰川冻土,2009,31(4):642-649.

[22] 董旭,张胜邦,张更权.青海土壤[M].北京:中国农业出版社,2008:64-169.

[23] 辛玉春.青海省温性草原类草地的分布特征[J].青海草原,2014,23(1):35-43.

[24] 江叶枫,郭熙.基于协同克里格的耕层土壤速效钾空间异质性研究[J].浙江农业学报,2019,31(1):139-148.



(上接第 92 页)

[17] 唐雄朋,刘艳丽,张建云,等.气候变化下雅鲁藏布江拉孜以上流域径流过程模拟与预测[J].水文,2018,38(6):24-30.

[18] 张洪波,李哲浩,席秋义,等.基于改进过白化的 Mann-Kendall 趋势检验法[J].水力发电学报,2018,37(6):34-46.

[19] 韩熠哲,马伟强,王炳赞,等.青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J].高原气象,2017,36(6):1477-1486.

[20] 管晓祥,刘悦,金君良,等.中国不同气候区典型流域的水文变化特性[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2018,39(3):13-17.

[21] 王国庆,唐雄朋,刘佩瑶,等.山西省岚河流域水文气象要素演变及响应关系[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2017,38(4):67-70,83.

[22] 王国庆,金君良,林锦,等.山西省中西河流域降水径流演变特征及响应关系[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):1-4.

[23] 管晓祥,张建云,鞠琴,等.多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2018,39(2):51-56.