

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0084

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 H, XIAO W H, ZHOU Y Y, 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)

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

崔豪^{1,2},肖伟华²,周毓彦²,陈琰³,鲁帆²

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 广州珠江工程勘察设计有限公司, 广州 510611)

摘要:河北雄安新区的设立,引起了各界对雄安新区所在的大清河流域的广泛关注,特别是其水资源的变化特征与影响因素是了解雄安新区水资源情势的重要参考。研究解析了人类活动和气候变化对大清河流域上游径流过程的相对影响,采用SWAT模型模拟了大清河流域上游径流过程,并结合弹性系数法验证比对,分离了人类活动与气候变化对大清河流域上游径流过程的贡献率。结果表明,1981—2015年,大清河流域上游山区倒马关站及紫荆关站径流量均呈减少趋势,倒马关站及紫荆关站年径流量递减速率分别为 $0.10\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $0.07\text{ m}^3/\text{s}$ 。人类活动为影响径流的主导因子,其贡献率为53.4%~60.8%;气候变化较人类活动影响径流稍小,其贡献率为39.2%~46.6%。研究结果可为支撑未来雄安新区建设区域水资源规划和管理提供依据。

关键词:径流响应;气候变化;人类活动;SWAT;弹性系数法;大清河流域

中图分类号:P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Runoff responses to climate change and human activities in the upper Daqing River basin

CUI Hao^{1,2}, XIAO Weihua², ZHOU Yuyan², CHEN Yan³, LU Fan²

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. The Pearl River Hydraulic Research Institute Surveying & Designing Co., LTD, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The establishment of Xiong'an New Area in Hebei Province has attracted wide attentions from the whole scientific community. The Daqing River basin, where the New Area is located, becomes a new focus for hydrological scientists. Particularly, the changing characteristics and causes of its water resources were of great importance to understanding the water resources situation of Xiong'an New Area. The relative influences of human activities and climate change on the runoff processes in the upper reaches of Daqing River basin have been investigated with SWAT model. Elasticity method was also applied to compare the simulation results about the relative contributions of human activities and climate change to the runoff variations. Results showed that the runoff showed a generally decreasing trend from 1981 to 2015, with magnitudes of $-0.10\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ and $-0.07\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ at Daomaguan and Zijingguan stations, respectively. Human activities served as the leading factor, which contributed to 53.4% to 60.8% of the runoff variation, while climate change and variability contributed 39.2% to 46.6%. The research results

收稿日期:2018-12-12 修回日期:2019-04-12 网络出版时间:2019-04-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190419.1556.004.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406501)

作者简介:崔豪(1992—),男,河南新乡人,主要从事气候变化对水资源的影响及其响应方面研究。E-mail:chiwhr@163.com

通信作者:肖伟华(1981—),男,湖南永兴人,教授级高级工程师,博士,主要从事气候变化对水资源的影响及其响应方面研究。E-mail: xwsen998@163.com

are useful to understand the hydrological fluctuations in the upper reaches of the Daqing River, and can also be used as a reference for the future planning and management of regional water resources for the construction of Xiong'an New Area.

Key words: runoff response; climate change; human activities; SWAT; elasticity coefficient method; Daqing River basin

变化环境下流域水资源演变研究已成为国内外研究热点^[1-2],在人类活动与气候变化的共同作用下,流域的径流过程呈现不同的变化特征^[3-4]和空间差异性^[5-8],从而进一步影响了流域水资源的时空分布及演化特征。因此,为进一步掌握流域水资源的演变规律,有必要研究径流过程的变化规律及其对气候变化与人类活动的响应。

当前径流过程的变化及其归因分析的主要研究方法包括水文模拟法^[6-9]、弹性系数法^[10-14]等。水文模拟方法一般具有较好的物理基础,但模型结构和参数等存在一定的不确定性^[15]。需要对模型参数进行验证,得到气候变化对径流的影响结果评价^[16];弹性系数方法相对结构简单、所需参数较少,针对年尺度径流过程变化归因来说是一种简单有效的方法,需要注意长序列数据中噪声对评估结果造成的干扰^[17-18]。夏智宏等^[7]采用 SWAT 模型定量辨识了洪湖流域气候变化和人类活动对径流的影响程度。张强等^[11]采用水量平衡和多元回归分析鄱阳湖流域径流减少的驱动因素。许翔宇等^[14]使用弹性系数方法分析了海河流域水流减少的主要原因。目前,定量评估径流对气候变化与人类活动的响应研究多采用单一归因方法,采用两种或多种归因方法相互校验的归因分析研究还有待加强。

2017年4月1日,中共中央、国务院决定设立河北雄安新区,将其定位为千年大计、国家大事^[19]。雄安新区地处大清河流域,研究大清河流域上游的径流变化特征及气候变化与人类活动的影响,对雄安新区水资源规划管理、防灾减灾具有重要的现实意义。大清河流域现状水资源严重超载,水资源条件极为脆弱,人均水资源量为 172 m³,仅为全国平均水资源量的 8.2%。大清河流域上游山区在 20 世纪 90 年代末期发展迅速,人类活动对山区水循环影响逐步增加^[20-21],如何解析迅速发展下的山区流域径流改变的因素显得尤为重要。本文以大清河流域上游为研究对象,评估唐河倒马关站和拒马河紫荆关站断面上游流域的径流变化特征,解析其对气候变化和人类活动的响应,利用水文模拟和弹性系数法定量估计人类活动和气候变化对径流的贡献并分析影响流域径流减少的因素。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

研究区位于大清河流域西部,东起河北冀中平原,西止于太行山脉,位于 113°50′~116°20′E, 38°20′~40°10′N,研究区面积约为 18 560 km²。地形由东南至西北逐渐增高,平均海拔 1 374 m,最高点为 2 761 m。本文以大清河流域上游山区的倒马关站和紫荆关站控制流域为例,研究气候变化和人类活动对大清河流域上游的径流演变影响。倒马关水文站位于河北省唐县倒马关乡倒马关村,东经 114°38′,北纬 39°05′,为大清河水系唐河上游控制站,控制面积 2 804.3 km²。紫荆关水文站位于河北省易县紫荆关镇,东经 115°10′,北纬 39°26′,系大清河水系拒马河控制站,控制面积 1 785.5 km²(图 1)。

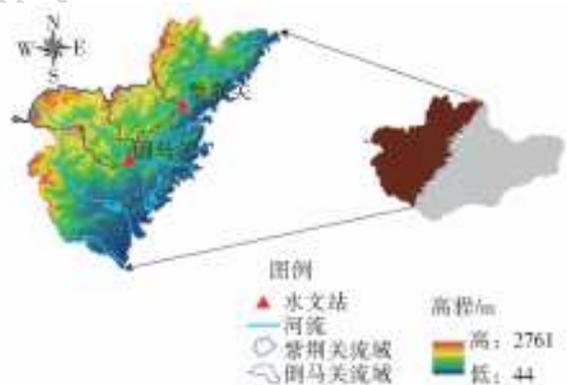


图 1 大清河流域上游位置及水文站分布

Fig. 1 Locations of the upper reaches of the Daqing River basin and hydrological stations

1.2 数据来源

研究区气象数据来源于中国气象局国家气候中心(NCC)的流域内及流域周边 12 个格点的 1981—2015 年 0.5°×0.5°分辨率的气象站点的格点降水、气温、相对湿度、日照时数和风速的插值数据。土地利用数据来源于地理国情监测云平台^[22],包括 1980 年、2015 年两期土地利用数据。从寒区旱区科学数据中心获取 HWSO 土壤数据。中国科学院地理空间数据云平台^[23]获取的 DEM 数据,空间分辨率为 90 m。从地方水行政主管部门获得了 1981—2015 年倒马关、紫荆关水文站的观测径流数据,以及 1998—2015 年大清河流域取水数据(表 1)。

表 1 数据列表

Tab. 1 Datasets used in this study

数据类型	数据名称	分辨率	数据源
气象数据	气温、降雨、相对湿度、太阳辐射、风速格网插值数据	0.5°×0.5°	中国气象局国家气候中心(NCC)
DEM 数字高程数据	SPTMDEM 数据	90 m×90 m	中国科学院地理空间数据云平台
土地利用数据	1980/2015 全国土地利用数据	100 000	地理国情监测云平台
土壤数据	土壤类型数据	1:1 000 000	寒区旱区科学数据中心
水文数据	径流、取用水数据	—	河北省水利厅、水文局

2 研究方法

2.1 突变检验

本文选取 Mann-Kendall 非参数检验法对气象、径流数据序列突变时间进行检验。Mann-Kendall 突变检验能够客观地反映样本时间序列的变化趋势,通过选定一定的显著性水平确定临界值对水文气象序列进行突变分析(本文的显著性水平为 95%),计算并绘制 UF 和 UB 曲线。通过分析 UF 和 UB 曲线可明确突变点的时间,若在置信区间内有交点,可认为该点为突变点,表明从该点时间开始突变^[24]。

2.2 水文模型法

采用突变分析的结果,本文将研究时段划分为两个时期:基准期和变化期,认为基准期时期人类活动对径流影响较小;变化期径流受气候变化与人类活动共同作用。

研究气候变化和人类活动影响时,丰枯变化可能会影响各项量化结果,当基准期和变化期拥有长序列资料,认为降雨丰枯变化对个项量化结果影响较小。综合影响下的径流变化量 R_C 可认为是变化期实测径流量与基准期还原径流量之差,包括气候变化影响部分 C_C ,人工取用水影响部分 W_C ,下垫面变化影响部分 L_C ,表达式为

$$R_C = C_C + W_C + L_C \quad (1)$$

式中: R_C 表示各驱动因子综合影响下径流变化量(mm); C_C 表示气候变化下径流变化量(mm); W_C 表示人工取用水变化下径流变化量(mm); L_C 表示下垫面变化下径流变化量(mm)。

为区分气候因子与人类活动因子对径流变化的影响,构建 4 种情景(表 2)分别描述未受气候变化和人类活动影响的初始情景 1、气候变化影响下的情景 2、人工取用水影响下的情景 3 以及综合环境影响下的情景 4。情景 1 采用数据均为基准期数据,认为受气候变化和人类活动影响较小;情景 2 输入变化期气象数据,其他条件与情景 1 一致;情景 3

输入变化期人工取用水数据,其他条件与情景 1 一致;情景 4 为综合影响下情景,采用变化期的实测径流,认为该情景受到气候变化与人类活动共同影响。

表 2 情景模式

Tab. 2 Simulation scenarios

编号	情景	土地利用数据	气象数据	人工取用水数据
1	初始情景	基准期	基准期	—
2	气候变化情景	基准期	变化期	基准期
3	人工取用水变化情景	基准期	基准期	变化期
4	综合影响情景	变化期径流数据		

情景 1:构建水文模型(SWAT),选取基准期实测径流数据 Q_0 对模型敏感性参数选择率定。通过 SWAT 模拟计算得到模拟径流 Q_1 ,若模型率定期决定系数 R^2 和效率系数 NSE 结果较好,则可认为径流量 $Q_0 \approx Q_1$ 。

情景 2:选取变化期气象数据代入情景 1 中进行模拟,模拟率定参数为情景 1 中所得,模型模拟得到模拟气候因子变化条件下径流 Q_2 。

情景 3:选取变化期人工取用水数据代入情景 1 中进行模拟,模拟率定参数仍为情景 1 中所得,模型模拟得到模拟气候因子变化条件下径流 Q_3 。

情景 4:选取变化期实测径流 Q_4 无需建模, Q_4 为气候变化、人类活动综合影响下的径流。

由此可得到不同驱动因子对径流变化的贡献量

$$R_C = Q_4 - Q_0 \quad (2)$$

$$C_C = Q_2 - Q_1 \quad (3)$$

$$W_C = Q_3 - Q_2 \quad (4)$$

$$L_C = R_C - C_C - W_C \quad (5)$$

计算不同驱动因子对径流变化的贡献率

$$\eta_c = \left| \frac{C_C}{R_C} \right| \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta_w = \left| \frac{W_C}{R_C} \right| \times 100\% \quad (7)$$

$$\eta_l = \left| \frac{L_C}{R_C} \right| \times 100\% \quad (8)$$

2.3 弹性系数法

采用基于傅抱璞公式的 Budyko 假设构建的水

热耦合平衡模型,估算气候变化对径流的影响。水量平衡可由以下公式估算

$$R = P - E + \Delta W \quad (9)$$

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{-1/\omega} \quad (10)$$

$$R = E_0 \left\{ \left[1 + \left(\frac{P}{E_0} \right)^\omega \right]^{-1/\omega} - 1 \right\} \quad (11)$$

式中: R 为径流量(mm); P 为降水量(mm); E 为实际蒸散发量(mm); ΔW 为土壤含水量蓄变量(mm),在长时间序列的情况下可以认为其值为0; E_0 为潜在蒸散发量(mm);式中 ω 为土壤参数,与植被覆盖度、土壤特性及地形密切相关。一般地,植被覆盖度高、土壤透水性良好、地形坡度较缓, ω 值较大,反之则小^[25]。

对式(11)分别求偏导数求得 $\frac{\partial R}{\partial E_0}$ 、 $\frac{\partial R}{\partial P}$ 、 $\frac{\partial R}{\partial \omega}$,即为蒸发、降雨、下垫面变化对径流造成影响的敏感系数。

总径流变化及各个因子引起的径流变化贡献率可近似为^[26-27]

$$\Delta R = \Delta P \times \frac{\partial R}{\partial P} + \Delta E \times \frac{\partial R}{\partial E} + \Delta \omega \times \frac{\partial R}{\partial \omega} \quad (12)$$

$$\eta_P = \frac{\Delta E}{\Delta R} \times \frac{\partial R}{\partial P} \quad (13)$$

$$\eta_E = \frac{\Delta E}{\Delta R} \times \frac{\partial R}{\partial E} \quad (14)$$

$$\eta_\omega = \frac{\Delta \omega}{\Delta R} \times \frac{\partial R}{\partial \omega} \quad (15)$$

式中: ΔR 是径流变化量(mm); $\Delta P \times \frac{\partial R}{\partial P}$ 、 $\Delta E \times \frac{\partial R}{\partial E}$ 、 $\Delta \omega \times \frac{\partial R}{\partial \omega}$ 分别为降水、蒸发、土地利用变化对径流变化的贡献量(mm); η_P 、 η_E 、 η_ω 分别为降水、蒸发、土地利用变化对径流变化的贡献率(%)。人工取用水对径流变化的贡献量通过实测径流变化量减去降水、蒸发和下垫面变化的贡献量可得。

3 结果与分析

3.1 变化趋势与突变检验

大河流域上游典型研究区年径流量变化曲线(图2)可知,1981—2015年倒马关、紫荆关站径流量均呈减少趋势,两站年径流量递减速度分别为 $-0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ 及 $-0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流量年际变化在 $0.17 \sim 12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围,径流量年际过程呈显著的丰枯变化,且丰枯差异较大,其中最大流量为1988年的 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量为2015年的 $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ 。采用Mann-Kendall突变诊断法对倒马关和紫荆关径流进行突变分析(图3),两曲线在置信区间内均有交点,根据交点可知两站径流序列突变年份均为1998年。故将基准期设定为1981—1998年,变化期设定为1999—2015年。

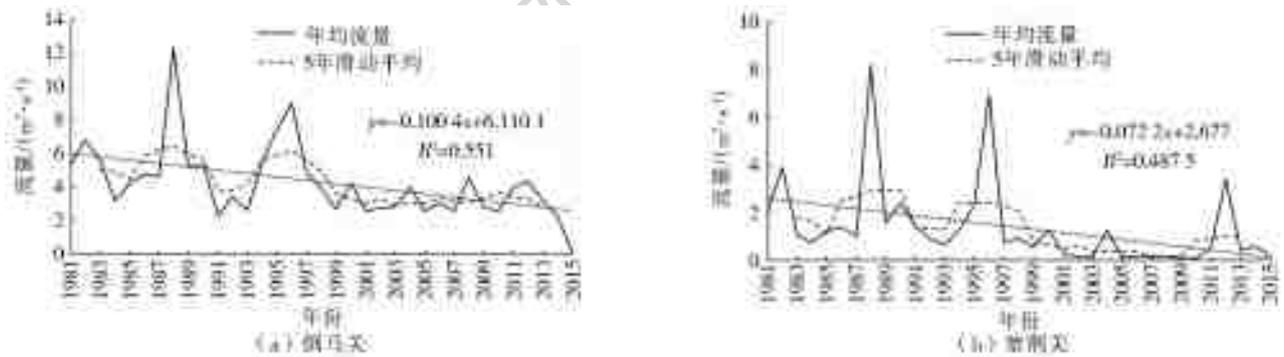


图2 大河流域上游控制站年径流量变化趋势

Fig. 2 Temporal variations of annual runoff in the upper Daqing River basin

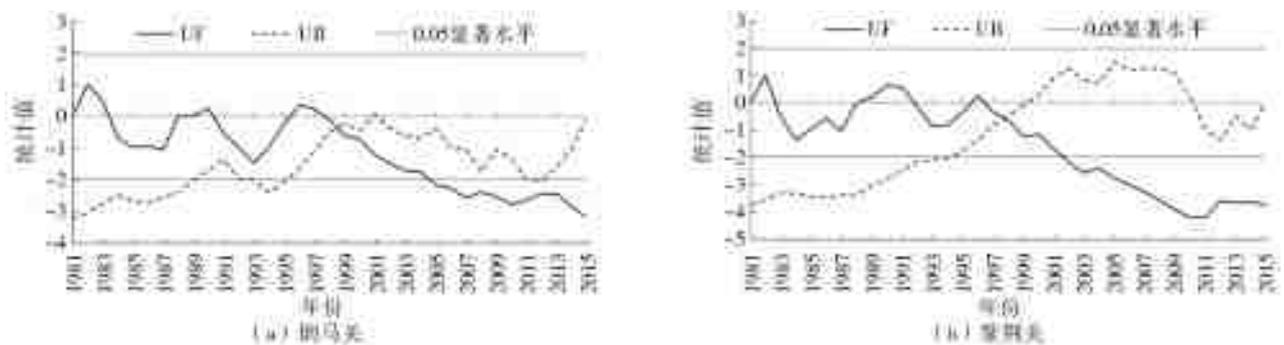


图3 大河流域上游控制站径流 M-K 统计曲线

Fig. 3 M-K test results of runoff in the upper Daqing River basin

3.2 SWAT 模型参数校准和验证

选取 20 个常用敏感性参数在模型规定的值域内进行敏感性分析试验,通过 SWAT-CUP 软件的

敏感性分析,确定了敏感性最高的 6 个参数,率定后得到模型参数结果见表 3。

表 3 SWAT 模型率定的主要参数
Tab.3 Main calibration parameters in SWAT model

校准参数	参数含义(单位)	参数值	
		紫荆关	倒马关
v_ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	0.41	0.38
v_CH_K2. rte	主河道河床有效水力传导度/(mm·h ⁻¹)	447.50	413.00
v_GW_DELAY. gw	地下水延迟时间/d	447.50	490.00
r_SOL_K. sol	土壤饱和水力传导度/(mm·h ⁻¹)	-0.21	-0.01
r_CN2. mgt	湿润条件 II 下的初始 SCS 径流曲线数	-0.14	-0.31
v_ALPHA_BF. gw	基流 alpha 因子/d	0.81	0.56

通过对大清河流域上游两典型站点径流进行模拟,图 4 显示了月尺度下率定期(1980—1991 年)和验证期(1992—1998 年)的模拟和实测的径流量。从表 4 可以看出,模型在率定期和验证期模拟流量月过程变化时能够取得较高的 NSE 系数和 R² 值,认为模型能较好地拟合模拟流量值和实测流量值,并能较好地模拟流量过程的变化趋势。从相对偏差系数 PBIAS 来看,模型模拟流量对实测大流量峰值有所高估,倒马关站率定期内对流量模拟有所低估,验证期流量模拟有所高估。总体而言,综合三项指标,

认为该模型模拟径流过程可以较好适用于大清河流域上游径流分析。

结合当地实际情况进行分析,模型在构建时采用土地利用数据为 1980 年的数据,而 1980—1990 年耕地面积处于减少的情况,模型在期间模拟高估了灌溉用水量,导致模拟流量比观测流量小;而在 1990 年之后,随着经济的迅速发展以及现代化的灌溉用水量增大,减少了河川径流量,造成了模型高估出口断面径流量,使模型的模拟流量比观测流量大。

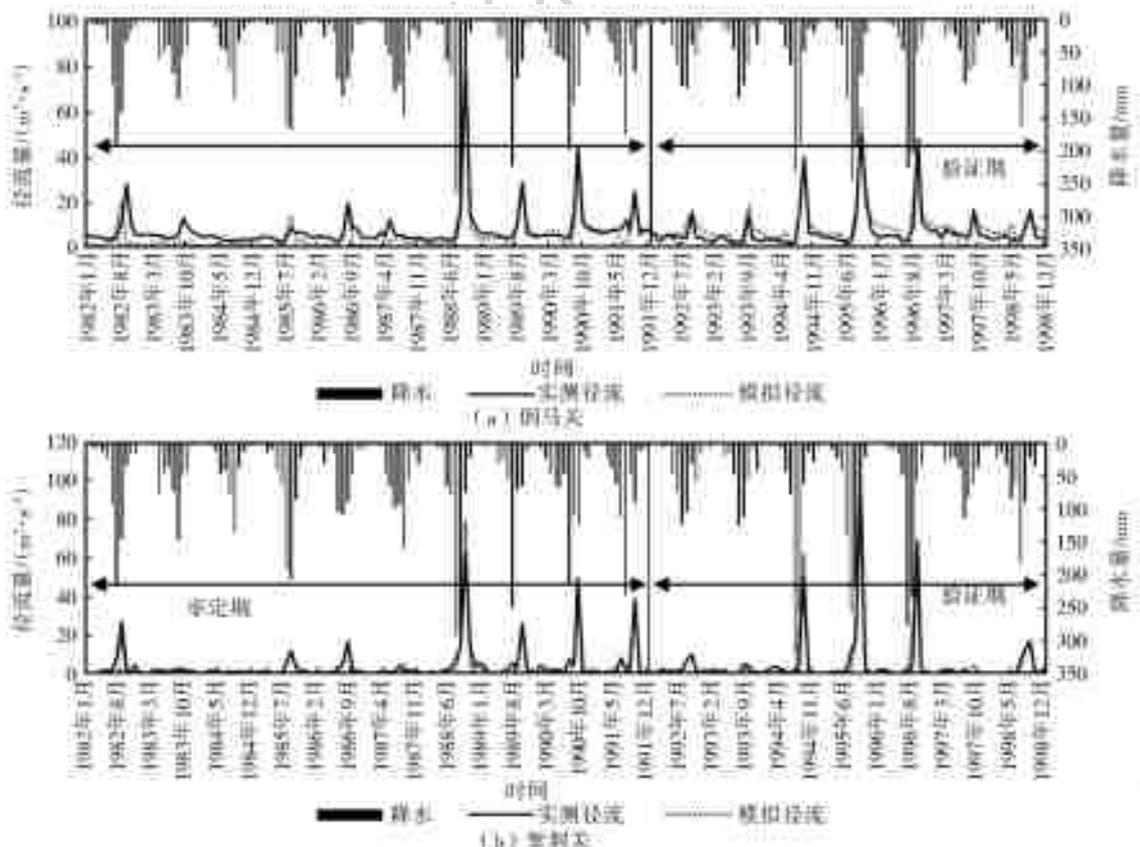


图 4 率定期和验证期间水文站月实测和模拟流量

Fig. 4 Observed and simulated monthly streamflow during calibration and validation periods

表 4 大河流域上游月径流模拟 SWAT 模型的性能
Tab. 4 Performance of the SWAT model for monthly runoff simulation in the upper reaches of Daqing River basin

评估指标	倒马关		紫荆关	
	率定期	验证期	率定期	验证期
R ²	0.73	0.81	0.88	0.85
NSE	0.84	0.73	0.86	0.84
PBIAS/%	26.85	-25.74	16.92	12.77

3.3 气候变化和人类活动对径流影响

本文通过采用水文模型法和弹性系数法,对人类活动和气候对径流的影响进行定量计算。气候变化影响因子包括降水和蒸发,人类活动影响因子包括土地利用和人工取用水,从结果(表 5)可以看出气候变化与人类活动两种驱动因子的影响均造成径流减小,其中人类活动是主要影响因子,表现在:紫荆关站气候变化造成的径流减少的贡献率在 40.4%~43.3%,而人类活动的贡献率在 56.7%~59.6%变化;气候变化与人类活动对倒马关站径流减少的贡献率分别为 39.2%~46.6%和 53.4%~60.8%。

表 5 大河流域上游主要驱动因子对径流变化贡献量及贡献率

Tab. 5 The contributions and their ratios of main driving factors to runoff change in the upper reaches of Daqing River

方法	站点	径流减少贡献量/mm		贡献率/%	
		气候变化	人类活动	气候变化	人类活动
水文模型法	紫荆关	19.1	28.2	40.4	59.6
	倒马关	17.5	27.1	39.2	60.8
弹性系数法	紫荆关	20.5	26.8	43.3	56.7
	倒马关	20.8	23.8	46.6	53.4

从研究区 1981—2015 年年降水、温度和潜在蒸散发的长期变化,以及 5 年滑动平均和 M-K 检验结果(图 5)可知:1981—2015 年降水量呈微弱下降趋势,年降水量序列存在多个突变点,无明显的突变规律;年平均气温呈显著上升趋势,平均上升速度为 0.443 °C/(10a),1994 年为大清河山区年平均气温序列突变开始的时刻;年 ET₀ 蒸发量呈显著上升趋势,平均上升速度为 19.5 mm/(10a),1997 年为大清河山区年潜在蒸散发序列突变开始的时刻。

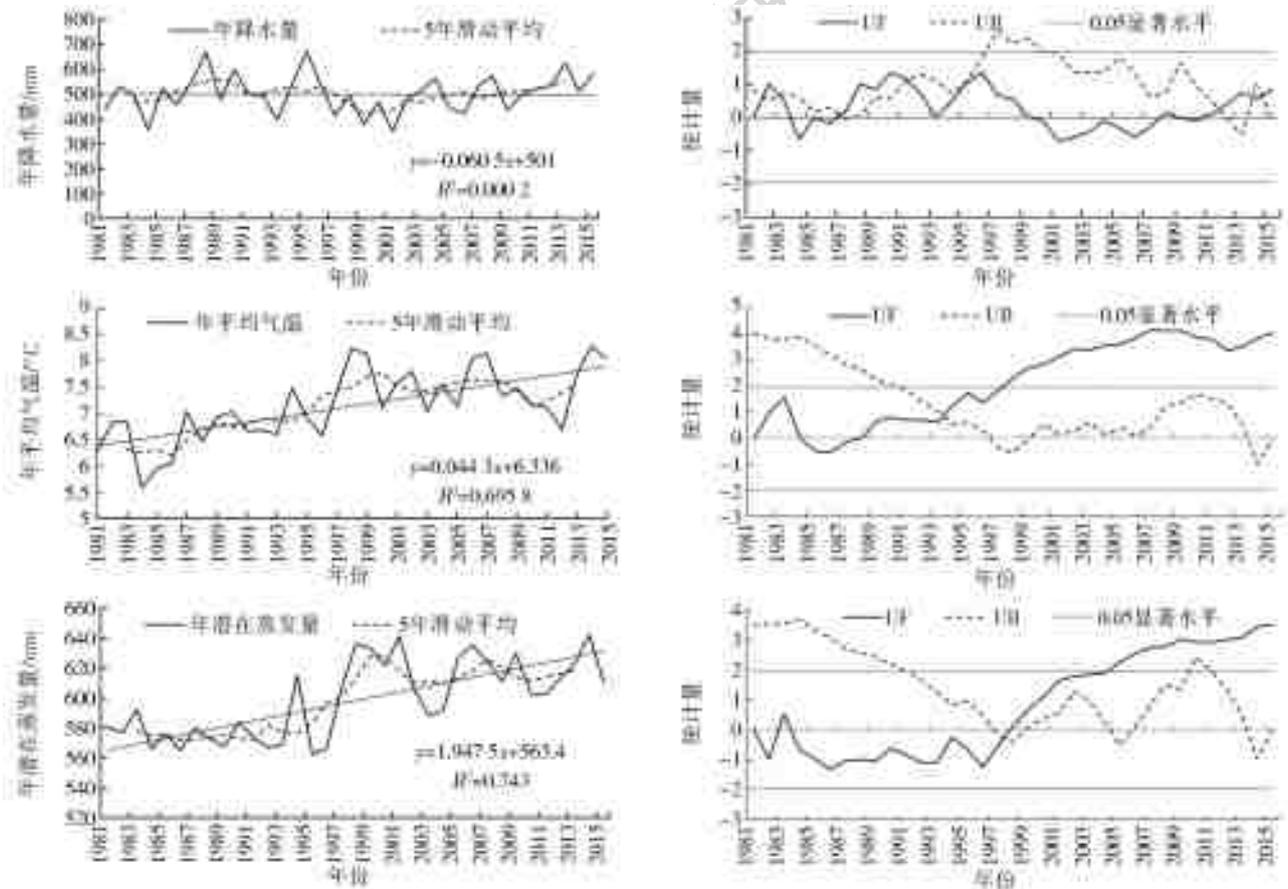


图 5 大河流域上游降水、气温和潜在蒸散发的变化趋势

Fig. 5 Temporal variation of precipitation, air temperature and potential evapotranspiration in the upper reaches of Daqing River basin

根据弹性系数法式(13)、(14)和计算所得的 η_p 和 η_e ,可以分离出气候变化因子对径流的影响

(表 6)。在气候因子对径流影响的贡献上,降水对径流减少贡献率为 63.9%~68.8%,蒸发对流域内

径流减少的贡献率为 31.2%~36.1%。这与上游两水文站控制流域降水减少、气温升高和蒸发增加所导致气候驱动因子变化而导致径流减少的结论相一致。

表 6 大清河流域上游气候因子对径流变化贡献量及贡献率
Tab. 6 Climatic contribution and its ratio to runoff change in the upper reaches of Daqing River basin

站点	径流减少贡献量/mm		贡献率/%	
	降水	蒸发	降水	蒸发
紫荆关	14.1	6.4	68.8	31.2
倒马关	13.3	7.5	63.9	36.1

本文通过近 35 a(1980—2015 年)的土地利用/覆盖数据来反映大清河流域人类活动的影响,结果表明,1980—2015 年倒马关、紫荆关上游控制流域耕地面积出现了先减少后增多的趋势,其中 1980—1995 年,耕地面积减少了 86 km²,草地面积增加了 130 km²;而 1995—2015 年,耕地面积增加了 60 km²,草地面积减少了 187 km²。总体上来看,1980—2015 年耕地面积减少了 26 km²,草地面积减少了 57 km²。对比各个阶段,林地和城镇建设用地整体呈上升的趋势(表 7),表明草地的减少主要转变为林地和城镇建设用地。从土地利用情况的变化可以看出,一方面,城镇居民地及建设用地的增加说明了大清河上游地区城镇化进度加快,城镇发展和人口的增加会导致取用水量增加,从而造成河流径流量的减少。并且,随着 21 世纪经济快速发展,以及山区流域地区现代化的灌溉方式,大量的抽取地下水会导致地下漏斗,使更多的地表水补充地下水,从而导致地表径流减小的情况;另一方面林地面积的增加可能增加了流域上游山区的滞水性,这也是径流减少的另一影响因素。

表 7 1980—2015 年倒马关、紫荆关上游控制流域主要土地利用类型变化

Tab. 7 Land use change in different periods in the basins of Daomagan and Zijingguan from 1980 to 2015

时段	单位: km ²			
	耕地	林地	草地	城镇建设用地
1995 年相对于 1980 年	-86	7	130	-2
2005 年相对于 1995 年	31	22	-18	8
2015 年相对于 2005 年	29	19	-169	29
2015 年相对于 1980 年	-26	48	-57	35

3.4 不确定性分析

在模拟气候变化和人类活动对径流影响时存在一定的不确定性,本文构建的 SWAT 模型在研究领域具有良好的适用性,但仍然存在模拟误差。水文

气象数据的精度有限,可能会降低用水文模拟的实际蒸发量、潜在蒸发量、径流等水文气候变量的可靠性和准确性。此外,水文模拟方法是基于人类活动与气候变化相互独立的假设^[28],但是人类活动如造林、城市化的发展可能导致气候变化,而气候变化可能影响人类活动,如气候变化改变农业种植的类型等。

人类活动和气候对水循环过程的影响是复杂的,各影响因素的相关联系与反馈,将气候变化及人类活动与水文循环间的相互作用影响耦合在一起。不同类型的人类活动对水循环可能有积极或消极的影响,人类活动和气候变化都影响着土地利用的变化,反之亦然。虽然不同模拟方法存在一些不确定性和局限性,但本研究通过水文模拟和弹性系数两种方法进行相互校验,定量分离了大清河上游人类活动和气候变化的贡献率,探讨了水资源演变的成因。在未来的研究将侧重于这些不确定性以提高量化的结果,通过进一步的研究以充分了解水资源系统对人类活动和气候变化对大清河上游的响应。

4 结论

本文采用统计方法揭示了大清河上游山区气候要素的变化特征,并采用水文模型与弹性系数法相结合的方法,分离了气候变化与人类活动对径流的影响,得到了如下结论。

(1)通过趋势分析,大清河上游典型区唐河和拒马河 1981—2015 年多年径流量均成减少趋势,倒马关站及紫荆关站年径流量递减速率分别为 0.10 m³/s 及 0.07 m³/s。采用 Mann-Kendall 突变检测方法检测径流突变时间,两条河流的结果表明,突变发生在 1998 年,径流量的减少在 1999—2015 年更为明显。

(2)利用水文模拟和弹性系数法,定量计算了各因素影响大清河上游地区径流变化的贡献。两种方法得到了一致的结果,人类活动是导致径流减少的主要原因,1981—2015 年整个研究期间人类活动对径流的贡献占 53.4%~60.8%。对比两种模拟方法,水文模型(SWAT)方法在模拟山区水循环精度上较高,弹性系数法虽模拟精度不及水文模型法,但其可分离出不同气候因子的贡献度,提供更详细的气候因子影响因素。

参考文献(References):

- [1] BARNETT T P, PIERCE D W, HIDALGO H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the west-

- ern United States[J]. Science, 2008(319): 1080-1083. DOI:10.1126/science.1152538.
- [2] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010(467): 43-51. DOI:10.1038/nature09364.
- [3] ZHANG Q, ZHOU Y, SINGH V P, et al. The influence of dam and lakes on the Yangtze River streamflow: long-range correlation and complexity analyses [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(3): 436-444. DOI:10.1002/hyp.8148.
- [4] TU X J, SINGH V P, CHEN X H, et al. Intra-annual distribution of streamflow and individual impacts of climate change and human activities in the Dongjiang River basin, China [J]. Water Resources Management, 2015, 29(8): 2677-2695. DOI: 10.1007/s11269-015-0963-5.
- [5] GUO Y, LI Z J, AMO-BOATENG M, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes for the upper reaches of Weihe River[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(2): 333-346. DOI:10.1007/s00477-013-0752-8.
- [6] DONG W, CUI B S, LIU Z H, et al. Relative effects of human activities and climate change on the river runoff in an arid basin in northwest China[J]. Hydrological Processes, 2015, 28(18): 4854-4864. DOI: 10.1002/hyp.9982.
- [7] 夏智宏, 刘敏, 王苗, 等. 1990s 以来气候变化和人类活动对洪湖流域径流影响的定量辨识[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 515-521. (XIA Z H, LIU M, WANG M, et al. Quantitative identification of the impact of climate change and human activity on runoff in Lake Honghu basin since 1990s[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(4): 515-521. (in Chinese))
- [8] CHANG J X, WANG Y M, ISTANBULLUOGLU E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River basin, China[J]. Quaternary International, 2015(380): 169-179. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.03.048.
- [9] OMER A, WANG W G, BASHEER A K, et al. Integrated assessment of the impacts of climate variability and anthropogenic activities on river runoff: a case study in the Hutuo River basin, China[J]. Hydrology Research, 2016, 48(2): 416-430. DOI: 10.2166/nh.2016.229.
- [10] KONG D X, MIAO C Y, WU J W, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River basin from 1951 to 2012[J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 566-573. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.02.023.
- [11] CHEN Z S, CHEN Y N, LI B F. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River basin in arid region of northwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 111(3-4): 537-545. DOI: 10.1007/s00704-012-0680-4.
- [12] ZHANG Q, LIU J Y, SINGH V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(14): 2562-2576. DOI:10.1002/hyp.10814.
- [13] LIU D D, CHEN X H, LIAN Y Q, et al. Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang River basin of China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(11): 1487-1495. DOI: 10.1002/hyp.7609.
- [14] XU X Y, YANG D W, YANG H B, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin [J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.12.052.
- [15] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017. (XU Z X, CHEN L. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1009-1017. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.09.001.
- [16] 姜姗姗, 占车生, 贾仰文, 等. 近 50 年渭河关中地区地表径流变化及其归因分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 80-84. (JIANG S S, ZHAN C S, JIA Y W, et al. Streamflow changes of Weihe River in Guanzhong area in the past 50 years [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(1): 80-84. (in Chinese)) DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2015.01.018.
- [17] LI L J, ZHANG L, WANG H, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(25): 3485-3491. DOI:10.1002/hyp.6485.
- [18] GAO G Y, FU B J, WANG S, et al. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budy-

- ko framework[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557: 331-342. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2016. 03. 019.
- [19] 河北省人民政府. 河北雄安新区规划纲要[R]. 2018. (The People's Government of Hebei Province, Hebei Xiongan New Area Planning Outline[R]. 2018. (in Chinese))
- [20] 穆文彬, 李传哲, 刘佳, 等. 大清河流域水循环影响因素演变特征分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 4-11, 21. (MU W B, LI C Z, LIU J, et al. Analysis on evolution characteristics of water cycle impacting factors of Daqing River watershed[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 4-11, 21. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2017. 02. 002.
- [21] 尹军. 流域干旱还原理论与方法研究——以白洋淀流域为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017. (YIN J. Research on drought reduction theory and method in basin-with baiyangdian River basin as the case study[D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2017. (in Chinese))
- [22] 地理国情监测云平台[EB/OL]http://www. dsac. cn/. (Geographical Information Monitoring Cloud Platform[EB/OL]http://www. dsac. cn/ (in Chinese))
- [23] 地理空间数据云[EB/OL]http://www. gscloud. cn. (Geospatial data Cloud [EB/OL] http://www. gscloud. cn. (in Chinese))
- [24] 蔡霞, 蔡琳, 李春华, 等. 晋北地区降水量时空变化及突变分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 247-254. (CAI X, CAI L, LI C H, et al. Analysis of characteristics of precipitation variation and mutation in northern Shanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 247-254. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7601. 2012. 02. 042.
- [25] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31. (FU B P. On the calculation of surface evaporation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese))
- [26] MILLY P C D, DUNNE K A. Macroscale water fluxes 2. Water and energy supply control of their inter-annual variability[J]. Water Resources Research, 2002, 38(10): 24-1-24-9. DOI: 10. 1029/2001WR000760.
- [27] 方宏阳, 袁喆, 严登华, 等. 黄河流域径流演变归因研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(4): 1-6. (FANG H Y, YUAN Z, YAN D H. Study on attribution of runoff evolution of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(4): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2014. 04. 004.
- [28] ZHENG H X, ZHANG L, ZHU R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River basin[J]. Water Resources Research, 2009, 45: 641-648. DOI: 10. 1029/2007WR006665.