

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.014

北大沙河流域径流变化归因分析

何玉芬^{1,2}, 杨汉波^{1,2}, 唐莉华^{1,2}, 雷慧闽^{1,2}, 杨大文^{1,2}

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:基于 ABCD 模型, 提出了分离气候变化和人类活动对径流影响的分析框架, 结合弹性系数法, 在不同时间尺度上对北大沙河流域径流变化进行了归因分析。结果表明: 从基准期(1980—1990 年)到扰动期(2006—2018 年), 年尺度上 ABCD 模型和弹性系数法得到的气候变化导致径流的增加量分别为 43.0 mm 和 32.0 mm, 人类活动导致径流的减少量同气候变化导致的增加量相当, 弹性系数法未考虑气象要素年内分配的变化, 可能低估气候变化的影响; 月尺度上, 气候变化使径流在汛期增加了 4.4~18.1 mm, 非汛期增加了 1.3~2.2 mm, 在夏、秋两季占主导地位, 人类活动使径流 9 月增加了 11.3 mm, 其他月份减少了 1.9~10.1 mm, 在春、冬两季占主导地位。

关键词:径流变化; ABCD 模型; 弹性系数法; 气候季节性; 归因分析; 北大沙河流域

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0095-07

Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin//HE Yufen^{1,2}, YANG Hanbo^{1,2}, TANG Lihua^{1,2}, LEI Huimin^{1,2}, YANG Dawen^{1,2} (1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the ABCD model, this study proposed an analysis framework to quantify the impacts of climate change and human activities on runoff change, and carried out an attribution analysis in the Beidasha River Basin on different time scales with this framework and the elastic coefficient method. The results show that, on an annual scale, the contributions of climate change to runoff increase from the base period (from 1980 to 1990) to the disturbed period (from 2006 to 2018) are 43.0 mm and 32.0 mm by the ABCD model and the elastic coefficient method, respectively, and the impact of human activities on runoff is comparable to that of climate change. The elastic coefficient method does not consider the intra-annual variation of meteorological forcings, which may underestimate the impact of climate change. On a monthly scale, climate change increases the runoff by 4.4 to 18.1 mm and 1.3 to 2.2 mm during flood season and nonflood season, respectively, which is dominant in summer and autumn; human activities increase runoff by 11.3 mm in September and decrease runoff by 1.9 to 10.1 mm in other months, which are dominant in spring and winter.

Key words: runoff change; ABCD model; elastic coefficient method; climate seasonality; attribution analysis; the Beidasha River Basin

径流是人类可利用水的主要来源之一。我国多个地区观测到径流发生了显著的变化^[1-2], 越来越多的研究关注径流变化的驱动因子, 其中, 气候变化和人类活动被认为是两大主要因素^[3]。气候变化通过降水、温度和日照等气象因子影响径流过程, 人类活动的影响主要体现在土地利用和覆被变化、水库运行和地表水、地下水的直接取水^[4]。研究气候变化和人类活动对径流的影响, 分离和量化二者的

贡献, 一方面有助于认识水文过程与气候和环境变化的相互关系, 另一方面可为水资源管理等问题提供科学依据。

量化气候变化和人类活动对径流的影响主要有 3 种方法: 一是流域试验法, 但局限于小流域的研究, 需要大量的人力物力, 代价昂贵; 另外两种方法分别基于水文模型和统计分析^[5]。常见的水文模型有集总式水文模型和分布式水文模型。Chang

基金项目: 国家自然科学基金(51979140, 42041004); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题(2021-KY-04)

作者简介: 何玉芬(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: heyf20@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 杨汉波(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yanghanbo@tsinghua.edu.cn

等^[4]分别用 TOPMODEL 和可变渗透能力 (variable infiltration capacity, VIC) 模型分析了泾河流域径流变化的原因,并比较了水文模型法和气候弹性法归因结果的差异;付晓花等^[6]基于 SWAT 模型分析了气候变化和人类活动对漳卫南运河流域径流变化的影响,尤其量化了水土保持、城镇化等不同人类活动因素对径流变化的贡献率。基于统计分析的方法常采用基于 Budyko 框架的弹性系数法^[7]。薛联青等^[8]基于 Budyko 框架,对塔里木河流域径流变化对气候变化和人类活动的响应进行了敏感性分析;Wang 等^[9]通过 Budyko 框架量化分析了黄河源地区径流对气候变化的响应,认为该地区的径流下降主要受冻土退化的间接影响。

在量化归因分析时,过去的研究多集中于年尺度,而水资源季节分布不均直接导致了不同月份用水的差异,因此,探讨气候变化和人类活动对月径流的影响至关重要。Thomas^[10]提出的 ABCD 模型由 4 个参数(a 、 b 、 c 、 d)控制,明确地包含了主要水文过程,近年来被广泛用于年尺度和月尺度的水文过程分析中。Li 等^[11]利用 ABCD 模型模拟汉江上游土壤蓄水量和实际蒸散发的变化,定量评估了气候变化和人类活动对不同时期径流的影响;Wang 等^[12]通过考虑地下水蒸发对 ABCD 模型进行了修正,研究了鄂尔多斯高原干旱到半干旱地区的年径流变化。此外,还有不少学者开展了 ABCD 模型的应用研究^[5,13-14]。

目前针对径流变化归因分析的研究主要存在两个问题:一是对月径流变化的归因分析较少;二是对人类活动的分析不够深入,许多研究将总径流变化量与气候变化影响量的余项作为人类活动影响量。因此,本文采用 ABCD 模型建立分离气候变化和人类活动对径流影响的分析框架,结合基于 Budyko 框架的弹性系数法,开展北大沙河流域径流变化原因研究,分析人类活动影响下的径流季节性变化。

1 研究区概况和数据来源

北大沙河流域(36.24°N~36.51°N,116.83°E~117.09°E)位于山东省济南市长清区,河流发源于武家庄乡摩天岭西麓,属于黄河下游右岸支流,全长 54.3 km,流域面积 584 km²,多年平均年径流量为 0.76 亿 m³。流域海拔 30~1 000 m,地势东南高、西北低,呈现山地-丘陵-平原的地形变化。该流域为温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,多年平均气温 13.7℃,多年平均降水量 845 mm,降水量年内分布不均,汛期降水占全年的 76%,多年平均蒸发皿(直径为 20 cm)蒸发量达 2 300 mm。

流域土壤类型以棕壤土和褐土类为主,植被类型以温带落叶阔叶林为主。作为济南市重要的地下水补给区、饮用水源地和生态走廊,北大沙河在改善当地生态环境、保障城市用水安全等方面具有重要作用。

同海河流域、黄河中下游等流域类似,北大沙河流域受人类活动干扰较大。流域上游段(张夏大桥以上)建有中型水库 1 座(石店水库)、小(1)型水库 7 座、小(2)型水库 14 座、塘坝 105 座,总拦蓄库容为 3 295 万 m³。统计资料显示,截至 2018 年,山东省共建成大型灌区 50 处、中型灌区 444 处、小型灌区 14.77 万处,相比于 1980 年,有效灌溉面积增加了 78 万 hm²,人类活动逐渐加强,对水资源的需求逐渐加大。在水资源短缺、供需矛盾加剧的大背景下,水库的调蓄作用越发突显。

本研究中,径流数据采用崮山水文站(36.48°N,116.87°E)记录数据,来自《中华人民共和国水文年鉴》。崮山水文站 1979 年建站,1980 年起有数据记录,1991—2005 年没有数据记录。因此,提取 1980—1990 年和 2006—2018 年两个时期的数据,并以前者为基准期,后者为扰动期。

降水数据和 20 cm 小型蒸发皿观测数据采用济南站(36.36°N,117.03°E,高程为 170 m)和泰山站(36.15°N,117.06°E,高程为 1 534 m)的实测数据,来源于国家气象科学数据中心。潜在蒸散发量为蒸发皿蒸发量与蒸发皿系数的乘积,参考刘波^[15]在全国范围内确定的蒸发皿系数分布图,取山东省的蒸发皿系数为 0.65。对各站点降水量和潜在蒸散发量取算术平均作为流域面平均降水量和潜在蒸散发量。

2 研究方法

2.1 基于 ABCD 模型的归因分析

ABCD 模型是一个非线性水量平衡模型,以潜在蒸散发和降水数据作为输入,可用于模拟基流、地下水、土壤水以及实际蒸散发量的变化^[16]。模型结构如图 1 所示。

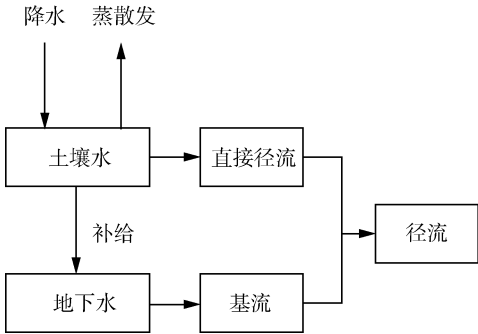


图 1 ABCD 模型结构

Fig.1 Structure of ABCD model

模型将流域分为土壤水和地下水两层,设时间步长为 t ,定义可用水量 W_t 和可能蒸散发量 Y_t 两个状态变量,假设 Y_t 是 W_t 的非线性函数:

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}} \quad (1)$$

式中: a 为土壤饱和前形成径流的概率; b 为流域实际总蒸散发与土壤水分储量之和的上限, mm。

可用于产生径流的水量 $W_t - Y_t$ 被分为直接径流和地下水补给:

$$D_t = (1 - c)(W_t - Y_t) \quad (2)$$

$$R_t = c(W_t - Y_t) \quad (3)$$

式中: D_t 为直接径流, mm; R_t 为地下水补给量, mm; c 为地下水补给系数。

假设地下水层为一个线性水库,通过参数 d 进行控制:

$$F_t = dG_t \quad (4)$$

式中: F_t 为基流, mm; G_t 为地下水储量, mm; d 为地下水储放系数。

总径流为直接径流与基流之和:

$$Q_t = D_t + F_t \quad (5)$$

式中 Q_t 为总径流, mm。

采用遗传算法率定 ABCD 模型的参数,选取年水量平衡误差作为率定的目标函数,计算公式为

$$e = \left| \frac{\sum_{i=1}^m Q_{\text{sim},i} - \sum_{i=1}^m Q_{\text{obs},i}}{\sum_{i=1}^m Q_{\text{obs},i}} \right| \quad (6)$$

式中: e 为年水量平衡误差; $Q_{\text{obs},i}$ 、 $Q_{\text{sim},i}$ 分别为第 i 个观测和模拟的径流值, mm; m 为数据序列长度。通过多次迭代与模型预热,确定初始土壤水和地下水储量。

在 ABCD 模型的基础上,提出以下归因分析的框架:利用基准期率定的参数重建扰动期的径流过程,总径流变化为两个时期的观测径流之差,气候变化导致的径流变化为两个时期的模拟径流之差,人类活动影响量为总径流变化减去气候变化影响量,即:

$$\Delta Q = Q_{\text{obs2}} - Q_{\text{obs1}} \quad (7)$$

$$\Delta Q_c = Q_{\text{sim2}} - Q_{\text{sim1}} \quad (8)$$

$$\Delta Q_h = \Delta Q - \Delta Q_c \quad (9)$$

式中: ΔQ 为总径流变化, mm; ΔQ_c 、 ΔQ_h 分别为气候变化和人类活动引起的径流变化, mm; Q_{obs1} 、 Q_{obs2} 分别为基准期和扰动期的观测径流, mm; Q_{sim1} 、 Q_{sim2} 分别为基准期和扰动期的模拟径流, mm。

气候变化和人类活动的贡献率为

$$\eta_c = \frac{\Delta Q_c}{|\Delta Q_c| + |\Delta Q_h|} \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta_h = \frac{\Delta Q_h}{|\Delta Q_c| + |\Delta Q_h|} \times 100\% \quad (11)$$

式中 η_c 、 η_h 分别为气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。

2.2 基于 Budyko 框架的弹性系数法

与水文模型法相比,基于 Budyko 框架的弹性系数法不仅具有清晰的物理意义,且对参数选择和模型构建的要求相对较低。Budyko 框架经过多年的发展,衍生出了许多改进的模型,本研究采用 Choudhury 等^[17-18]提出的方程,并结合水量平衡方程,得到:

$$Q = P - E = P - \frac{E_0 P}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \quad (12)$$

式中: Q 为多年平均径流深, mm; P 为多年平均降水量, mm; E 、 E_0 分别为多年平均实际蒸散发量和潜在蒸散发量, mm; n 为反映流域特征的下垫面参数。

为方便起见,式(12)可以表示为

$$f(E_0, P, n) = P - \frac{E_0 P}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \quad (13)$$

根据 Milly 等^[19]的研究,气候变化的影响量可以表示为

$$\Delta Q_c = \frac{\partial f}{\partial E_0} \Delta E_0 + \frac{\partial f}{\partial P} \Delta P \quad (14)$$

式中: $\frac{\partial f}{\partial E_0}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial P}$ 分别为径流对潜在蒸散发量和降水量的弹性系数,计算方法可参考文献[20]; ΔE_0 为基准期和扰动期多年平均潜在蒸散发量之差; ΔP 为基准期和扰动期多年平均降水量之差。

3 结果与分析

3.1 气候和径流变化

图2为流域1980—1990年和2006—2018年径流深和降水量变化。基准期和扰动期的多年平均降水量分别为830 mm和870 mm,均呈现较大的年际波动,但未发生显著趋势变化(显著性水平0.05)。同基准期相比,扰动期的降水量呈现相对明显的增加趋势。基准期和扰动期的多年平均蒸散发量分别为1218 mm和1136 mm。

1980—1990年北大沙河流域年径流深在0~270 mm之间,多年平均径流深为101 mm;2006—2018年年径流深在5~258 mm之间,多年平均径流深为103 mm。两个时期的径流总量接近,且由Mann-Kendall趋势检验发现径流均未发生显著增加或减少的趋势,说明在气候变化和人类活动的共同

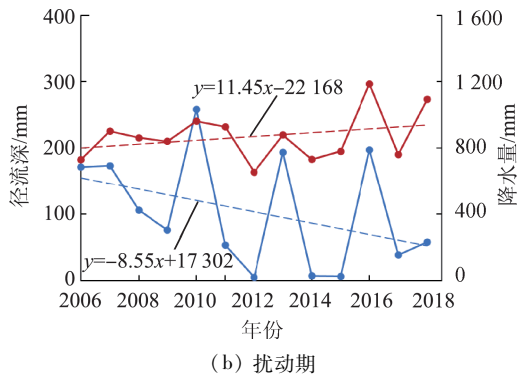
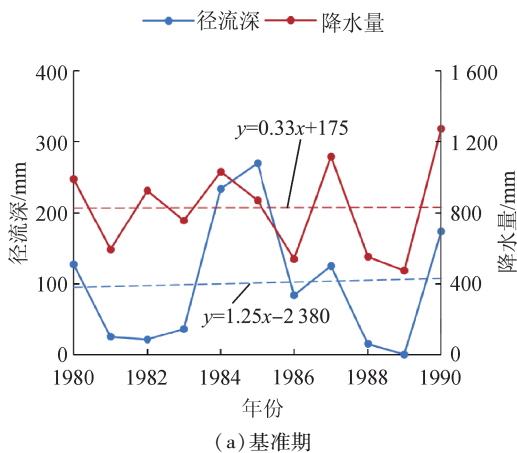


图2 基准期和扰动期年径流深和降水量变化
Fig. 2 Annual runoff depth and precipitation changes in base period and disturbed period

作用下,径流呈现较大的年际波动,但未发生显著的趋势变化。在月尺度上,北大沙河流域径流具有较大的季节变异性,集中在汛期7—9月;基准期汛期径流占全年径流的60%以上,扰动期汛期径流占全年径流的90%以上。非汛期径流量较小,2006—2018年出现了断流现象,来水几乎全部为汛期径流。

ABCD模型预热得到的初始地下水和土壤含水量分别取190 mm和400 mm。得到的 a 、 b 、 c 、 d 参数的取值如表1所示,符合类似研究给出的参数范围。计算得到的年水量平衡误差为4.5%,意味着模拟结果较为可靠。

表1 ABCD模型参数取值
Table 1 Parameter values of ABCD model

数据来源	a	b/mm	c	d
Xin等 ^[13]	0.98	457	0.01	0.98
韩鹏飞等 ^[14]	0.95	692	0.91	0.07
Alley ^[16]	0.98~1.00	14~50	0.01~0.46	0.07~1.00
Vandewiele等 ^[21]	0.96~1.00	260~1 900	0.04~0.70	0~0.42
本文	0.99	1 000	0.22	0.01

3.2 气候变化和人类活动对径流的贡献

利用弹性系数法评估径流对降水和潜在蒸散发的敏感性,由式(12)得到的下垫面参数 n 为2.49。

径流对降水和潜在蒸散发的敏感性分别为0.40和-0.19,表明径流对降水的变化更为敏感。年尺度上,弹性系数法得到的气候变化和人类活动对径流变化的贡献量分别为32.0 mm和-30.0 mm。

表2给出了利用ABCD模型分析年尺度、季节(春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12—2月)尺度和月尺度上径流对气候变化和人类活动响应的结果。无论在年尺度还是季节尺度上,气候变化导致径流增加,而人类活动导致径流减少。年尺度上,气候变化和人类活动对径流变化的贡献量分别为43.0 mm和-41.0 mm;季节尺度上,春、冬两季的径流变化受人类活动的主导,夏、秋两季的径流变化则受气候变化的主导。

表2 不同时间尺度ABCD模型归因分析结果
Table 2 Results of ABCD model for attribution analysis on different time scales

时间尺度	$\Delta Q_c/\text{mm}$	$\Delta Q_h/\text{mm}$	时间尺度	$\Delta Q_c/\text{mm}$	$\Delta Q_h/\text{mm}$
1月	1.7	-3.7	10月	2.0	-10.1
2月	1.7	-3.6	11月	2.2	-7.5
3月	1.4	-2.7	12月	1.9	-5.5
4月	1.4	-2.9	春季	4.5	-8.8
5月	1.7	-3.2	夏季	23.9	-13.1
6月	1.3	-1.9	秋季	9.2	-6.3
7月	4.4	-8.0	冬季	5.4	-12.8
8月	18.1	-3.2	年	43.0	-41.0
9月	5.0	11.3			

月尺度上,气候变化使月径流增加了1.3~18.1 mm,在1—6月的贡献率较低,8月最高。扰动期与基准期相比,8月平均降水量增加了49 mm,平均潜在蒸散发量减少了21 mm(图3),二者的共同作用使气候变化在这一阶段的贡献尤为突出。人类活动在1—6月的贡献率较低,7—12月较高,说明水库的调蓄主要发生在7—12月。值得注意的是,除9月外,人类活动均导致径流的减少(1.9~10.1 mm),而9月人类活动使得径流增加了11.3 mm。

在年尺度上,两种方法的归因分析结果较为一致。气候变化导致年径流增加,而人类活动导致年径流减少,增加和减少量相当,即径流对气候变化和人类活动的响应程度相当。

4 讨论

4.1 结果对比

在年尺度的归因分析中,ABCD模型和弹性系数法计算得到的气候变化对径流变化的贡献量分别是43.0 mm和32.0 mm,二者相差较大,可能的原因是弹性系数法未考虑降水等因子的年内分配过程(即季节性)的变化,而不少研究指出气候季节性变化对流域水量平衡有显著影响^[22]。图3反映了两

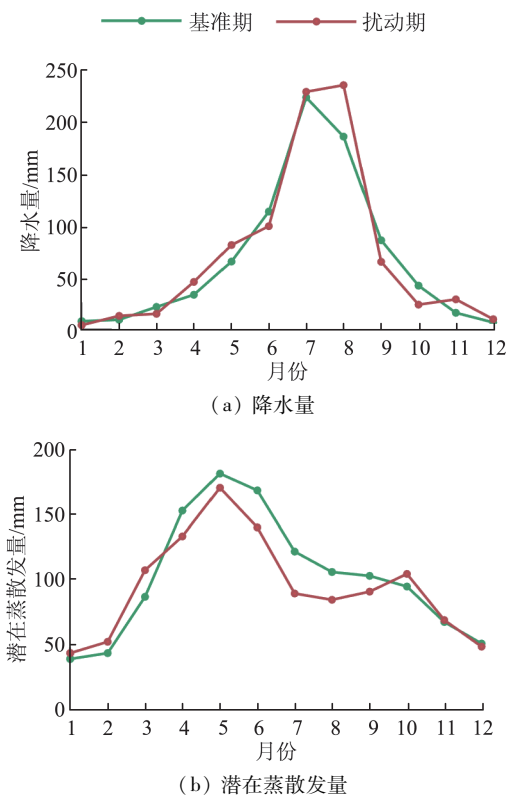


图3 降水量与潜在蒸散发量年内分配过程

Fig. 3 Intra-annual distributions of precipitation and potential evapotranspiration

个时期的降水量和潜在蒸散发量季节性变化,从基准期到扰动期,降水量和潜在蒸散发量的季节变异性较大,尤其是8月,平均降水量增加了49 mm,平均潜在蒸散发量减少了21 mm,二者的共同作用使夏季径流增加。采用 Woods 定义的气候季节性指数来量化降水量和潜在蒸散发量差值的季节性波动^[23],其值越大说明两者差值的季节性波动越大,即水分和能量的匹配性越差。本文计算得到两个时期的气候季节性指数分别为0.33和0.43,根据杨汉波等^[22]的结论,气候季节性指数的增加将导致参数 n 的减小,而式(13)反映出径流量是 n 的减函数,因此气候季节性指数的增加将导致径流增加。常用的弹性系数法,由于没有考虑气象因子季节性变化的影响,可能低估了气候变化的影响;而 ABCD 模型以月过程为输入,包括了气候季节性变化的影响,可能得到更为合理的结果。

本文利用 ABCD 模型分离气候变化和人类活动的影响,气候变化导致的径流变化量为两个时期的模拟径流之差(式(8)),人类活动导致的径流变化量为总的径流变化减去气候变化导致的径流变化量(式(9))。此前不少研究采用 ABCD 模型进行径流变化归因分析时^[13,24],将扰动期的模拟径流量和观测径流量之差作为人类活动的影响,没有考虑到模型本身可能产生的系统误差。事实上,扰动期的模

拟径流量与观测径流量间的差异包括了人类活动影响和模型误差,因此,本文提出的框架分析结果更为合理。

4.2 人类活动对北大沙河流域径流变化的影响

由表2可知北大沙河流域夏、秋两季的径流主要受气候变化的影响,体现为夏季降水量的增加和潜在蒸散发量的减少;而春、冬两季人类活动的影响占主导地位,主要体现在水库调蓄上。流域上游段建成的水库通过调节流量的大小和持续时间来改变自然流动状态,使月径流分配发生变化,汛期径流占年径流总量的比例减少,枯季时被用于农田灌溉,洪峰被削弱,月径流过程坦化。

人类活动对径流的影响表现出明显的动态和季节性特征,枯季降水量和蒸发量均较少,人类的直接取水使其调蓄作用被突显,由表2可知,水库在下半年的调蓄量更大。汛期(7—9月)石店、武家庄水库和小崗山水库发挥蓄水功能,导致出口段夏季径流减少。9月人类活动导致径流增加,可能有两方面原因:一是人类通过河道或渠道取用水库水进行灌溉,二是上游水库陆续向下游河道供水,两种方式均可能导致河道断面观测到的径流在短期内增加。

研究发现北大沙河在扰动期出现了枯水期断流现象。1960年以来,多个拦水大坝的兴建以及引黄灌溉规模的扩大,使得实测黄河年径流量远低于天然径流量,导致下游山东等地长时间断流。Liu等^[25]重建了黄河中游过去500多年天然径流量变化过程,并定量计算出人类活动耗水量,说明在研究径流变化时有必要考虑人类活动的大量耗水。王乐扬等^[26]也指出人类活动已成为我国北方主要河流径流变化的重要原因。

本文研究结果表明,除9月外,人类活动导致径流减少,而观测径流仍能维持不变,这得益于降水量的增加和蒸发能力的下降。王国庆等^[27-28]基于未来气候情景分析得出,未来黄河下游可利用水资源量有减少趋势,且华东地区北部表现出水资源对气候变化的高度脆弱性,如果人类活动的负面影响持续,流域水资源供需矛盾可能进一步加剧^[29]。因此,相关部门需加强可持续的水资源管理,进行更加合理的规划配置。

4.3 研究存在的不足

弹性系数法中,人类活动影响为观测到的径流变化与气候变化影响量的余项,包括流域蓄水量、植被等因素变化的影响,难以单独分离出每个因子的变化对径流产生的影响;气候季节性指数变化的影响被归结到人类活动影响中,低估了气候变化的影响。此外,弹性系数法忽略了径流对气象要素的高

阶段导^[30],在气候年内变异性较大的地区可能会产生较大的误差。

本研究利用 ABCD 模型进行归因分析时,将人类活动视为总径流变化与气候变化影响量的余项,没有考虑流域土地利用类型、植被的覆盖度等因素,认为流域下垫面特征在两个时期保持一致,会带来一定的误差^[31];ABCD 模型中地下水和土壤水的初始值设置等因素也会带来一定的不确定性。此外,由于水库分布的空间复杂性和调度的时间复杂性,本文没有研究小型水库对径流的时空影响,也没有考虑详细的水库规模和运作方式,若要进行更加细致的归因分析,需分离水库的影响。

5 结 论

a. 在气候变化和人类活动的共同作用下,北大沙河流域径流呈现较大年际波动,但未发生显著趋势变化,年内具有较大的季节变异性,径流集中在汛期 7—9 月,2006—2018 年出现了枯水期断流的现象。

b. 从基准期(1980—1990 年)到扰动期(2006—2018 年),年尺度上,ABCD 模型和弹性系数法得到的气候变化导致径流的增加量分别为 43.0 mm 和 32.0 mm,弹性系数法由于未考虑气象要素年内分配变化的影响,可能低估了气候变化的影响;月尺度上,气候变化使径流在汛期增加了 4.4 ~ 18.1 mm,非汛期增加了 1.3 ~ 2.2 mm,在夏、秋两季占主导地位,人类活动使径流 9 月增加了 11.3 mm,其他月份减少了 1.9 ~ 10.1 mm,在春、冬两季占主导地位。

c. 人类活动主要体现在水库对月径流过程的调蓄上,在下半年的调蓄量更大。水库的修建为解决水资源时空分布不均问题提供了解决方案,但改变了天然水循环过程,在未来降水有减少趋势的情形下,应对水资源进行可持续规划与配置。

d. ABCD 模型在小流域径流变化归因分析中具有适用性,为年、月尺度的径流变化研究提供了一种更为合理、灵活的手段。

参考文献:

[1] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展,2020,31(3):313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020,31(3): 313-323. (in Chinese))

[2] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展,2020,31(2):153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN

Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science,2020,31(2): 153-161. (in Chinese))

[3] MA Yuecun, FRIEDLINGSTEIN P, LIU Chunzhen, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467 (7311): 43-51.

[4] CHANG Jianxia, ZHANG Hongxue, WANG Yimin, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(4):1547-1560.

[5] SHAHID M, CONG Z T, ZHANG D W. Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow;a case study of the Soan River basin, Pakistan [J]. Theoretical and Applied Climatology,2018,134(1/2):205-219.

[6] 付晓花,董增川,刘晨,等. 不同驱动因子对漳卫南运河流域径流变化的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(6):555-561. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, LIU Chen, et al. Impact of different driving factors on runoff in Zhangweinan River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(6): 555-561. (in Chinese))

[7] SANKARASUBRAMANIAN A, VOGEL R M, LIMBRUNNER J F. Climate elasticity of streamflow in the United States [J]. Water Resources Research, 2001, 37(6): 1771-1781.

[8] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):1-6. (in Chinese))

[9] WANG Taihua, YANG Hanbo, YANG Dawen, et al. Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the source region of the Yellow River within the Budyko framework [J]. Journal of Hydrology,2018, 558:301-313.

[10] THOMAS H. Improved methods for national water assessment [R]. Washington, D. C.: Water Resource Council,1981.

[11] LI Ziyang, HUANG Shengzhi, LIU Dengfeng, et al. Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2020,34(3/4):575-592.

[12] WANG Xusheng, ZHOU Yangxiao. Shift of annual water balance in the Budyko space for catchments with

- groundwater-dependent evapotranspiration [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(9): 3673-3690.
- [13] XIN Zhuohang, LI Yu, ZHANG Lu, et al. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal streamflow [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 936-945.
- [14] 韩鹏飞, 王旭升. 利用 ABCD 模型预测流域水文对极端气候的响应 [J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 16-22. (HAN Pengfei, WANG Xusheng. Forecasting the response of a catchment on extreme climate change with ABCD model [J]. Yellow River, 2016, 38(11): 16-22. (in Chinese))
- [15] 刘波. 近四十年中国蒸发皿蒸发变化与气候变化的关系及潜在蒸散的估算 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [16] ALLEY W M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models [J]. Water Resources Research, 1984, 20(8): 1137-1149.
- [17] CHOUDHURY B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model [J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [18] YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 1-9.
- [19] MILLY P C D, DUNNE K A. Macroscale water fluxes: 2. water and energy supply control of their interannual variability [J]. Water Resources Research, 2002, 38(10): 1206.
- [20] LIU Ziwei, YANG Hanbo, WANG Taihua. A simple framework for estimating the annual runoff frequency distribution under a non-stationarity condition [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125550.
- [21] VANDEWIELE G L, XU Chongyu, LARWIN N. Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China, and Burma [J]. Journal of Hydrology, 1992, 134(1/2/3/4): 315-347.
- [22] 杨汉波, 吕华芳, 杨大文, 等. 水热同步性对流域水热耦合平衡的影响 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 54-59. (YANG Hanbo, LYU Huafang, YANG Dawen, et al. Seasonality of precipitation and potential evaporation and its impact on catchment water-energy balance [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 54-59. (in Chinese))
- [23] WOODS R. The relative roles of climate, soil, vegetation and topography in determining seasonal and long-term catchment dynamics [J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(3): 295-309.
- [24] MUHAMMAD W, MUHAMMAD S, KHAN N M, et al. Hydrological drought indexing approach in response to climate and anthropogenic activities [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 141(3/4): 1401-1413.
- [25] LIU Yu, SONG Huiming, AN Zhisheng, et al. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 years [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(31): 18251-18257.
- [26] 王乐扬, 李清洲, 王金星, 等. 变化环境下近 60 年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 36-42. (WANG Leyang, LI Qingzhou, WANG Jinxing, et al. The variation characteristics of recorded runoff and its annual distribution in north China during the recent 60 years in the context of environment change [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Powder (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 36-42. (in Chinese))
- [27] 王国庆, 张建云, 金君良, 等. 基于 RCP 情景的黄河流域未来气候变化趋势 [J]. 水文, 2014, 34(2): 8-13. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, JIN Junliang, et al. Variation trend of RCP-based climatic scenarios for Yellow River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(2): 8-13. (in Chinese))
- [28] 赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应 [J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))
- [29] 赵昀皓, 邢万秋, 傅健宇. 基于概率性 Budyko 方程的我国可利用水资源量脆弱性评估 [J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 47-52. (ZHAO Yunhao, XING Wanqiu, FU Jianyu. Evaluation of vulnerability of water availability in China based on probabilistic Budyko equation [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 47-52. (in Chinese))
- [30] YANG Hanbo, YANG Dawen, HU Qingfang. An error analysis of the Budyko hypothesis for assessing the contribution of climate change to runoff [J]. Water Resources Research, 2014, 50(12): 9620-9629.
- [31] 王卫光, 陆文君, 邢万秋, 等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究 [J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-04-23 编辑: 施业)