

黄土高原沟壑区典型小流域径流变化趋势及归因分析

王陇¹, 宋孝玉¹, 李蓝君¹, 张玲¹, 刘雨¹, 李怀有², 李焱林²

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2.黄委会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000)

摘要:为了探究黄土高原小流域径流变化的驱动因素,改进流域治理规划,实现黄河流域生态保护和高质量发展。以黄土高原水土保持治理的典型小流域——南小河流域为研究对象,基于 1958—2017 年实测的水文及土地利用资料,采用 Mann-Kendall 趋势检验法对降雨、径流资料进行了趋势分析及突变点检验;基于双累积曲线法和弹性系数法对该流域的径流变化进行了归因分析,定量揭示了气候变化和人类活动对于径流变化的贡献率,并对不同方法计算结果进行了比较。结果表明:(1)径流的突变点出现在 1985 年,在 0.05 的显著性水平之下,降水量和径流量在基准期呈波动趋势,降水量在变化期则呈不显著减少趋势,径流量在变化期则呈现显著的减少趋势;(2)双累积曲线法计算得到气候变化和人类活动对于径流减少的贡献率分别为 7%、93%;弹性系数法计算得出气候变化和人类活动对于径流减少的贡献率分别为 42.6%、57.4%。综上,人类活动是径流变化的主要影响因素;相比双累积曲线法,在对黄土高原小流域径流变化进行归因分析时更推荐采用弹性系数法。

关键词:径流变化;双累积曲线法;弹性系数法;Mann-Kendall 趋势检验;南小河流域

中图分类号:P333.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0048-06

Variation Trend and Attribution Analysis of Runoff in Typical Small Watershed in Gully Region of the Loess Plateau

WANG Long¹, SONG Xiaoyu¹, LI Lanjun¹, ZHANG Ling¹, LIU Yu¹, LI Huaiyou², LI Yaolin²

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Xifeng Experiment Station of

Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: In order to explore the driving factors of runoff change in small watershed of the Loess Plateau, improve watershed management, and realize ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin, Nanxiaohogou watershed, a typical small watershed for soil and water conservation on the Loess Plateau was taken as the research object. Based on the measured hydrological and land use data from 1958 to 2017, the trend analysis and abrupt change point test of precipitation and runoff data were conducted by using Mann-Kendall trend test method. Then, the attribution analysis and quantitative analysis of runoff change were conducted to explore the contribution rates of climate change and human activities to runoff change by adopting the double cumulative curve method and the elastic coefficient method. The calculation results of different methods were compared. The results show that: (1) the abrupt change point of runoff occurred in 1985; in the base period, both the precipitation and runoff showed a fluctuating trend, while the precipitation did not show a significant decrease trend in the change period; however, the runoff showed a significant decrease trend; (2) the contribution rates of climate change and human activities to runoff reduction were 7% and 93%, respectively, by the double cumulative curve method, and 42.6% and 57.4%, respectively, by the elastic coefficient method. Above all, Human activities were the main influencing factors of runoff change. Compared with the double cumulative curve method, the elastic coefficient method is more recommended for attribution analysis of runoff variation in small watershed of Loess Plateau.

收稿日期:2020-08-12

修回日期:2020-09-03

资助项目:国家自然科学基金(41771259,411171034);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JZ-45)

第一作者:王陇(1996—),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:651552972@qq.com

通信作者:宋孝玉(1971—),女,陕西安康人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail:songxy@xaut.edu.cn

Keywords: runoff change; double cumulative curve method; elastic coefficient method; Mann-Kendall trend test; Nanxiaohegou watershed

黄河流域是我国重要的粮食、能源和化工聚集地,但自古以来黄河水旱灾害频发、水少沙多以及治理困难等问题始终存在。且20世纪80年代末以来,黄河干流实际来水量逐年减少,下游河道连年断流^[1]。这些问题产生的原因,表象似在黄河,根子实在流域^[2]。地处黄河中游的黄土高原是我国四大高原之一,也是中华文明的发源地之一,总面积达64万km²,是地球上分布最为集中且面积最大的黄土区域^[3],也是世界上水土流失最为严重、生态环境最为脆弱的区域之一^[2]。为治理水土流失,我国自1999年以来实施了退耕还林(草)工程,使黄河的多年平均输沙量从20世纪的16亿t减少到了21世纪的3亿t左右^[4],降幅达80%;但多年平均径流量也从580亿m³减少到了470亿m³左右^[4];工业发展、农业生活用水和生态恢复用水矛盾进一步凸显。因此,研究黄土高原水文循环的基本单元——小流域,探究其径流变化趋势及其归因分析十分必要。

夏露等^[5]以砚瓦川流域为研究对象,对该流域1981—2012年的径流变化进行了演变特征和驱动因素的分析,定量评价了降水和水土保持措施对于径流变化的贡献程度;蒋观滔等^[6]基于1971—2010年北洛河上游水文数据,定量分析了气候因素和人类活动对径流变化的贡献率;李志等^[7]研究了1972—2000年黑河流域气候和人类活动对于径流的影响。上述研究都揭示了研究流域在特定研究时段内径流变化归因。但是,由于水文资料的限制,目前大部分对于小流域径流的研究资料序列都较短,且数据系列多在我国第12个五年规划之前,难以跟踪最新的径流变化情势,匹配其他相关研究成果。而南小河沟作为黄委会于1952年确立的黄土沟壑区典型小流域,截至目前已经进行了近70a的流域综合治理探索实践,拥有较为完整的水文实测资料。科技工作者们基于该流域进行了较多研究,但对其径流变化趋势及其归因分析的研究却未见报道。

因此,本文以南小河沟流域为研究区域,在分析流域水文要素的变化趋势及其径流变化与气候因子和人类活动关系的基础上,通过不同方法定量揭示气候及人类活动对径流变化的贡献率,综合分析黄土高原沟壑区径流变化归因,为下一步小流域治理规划的改进、黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据和研究参考。

1 研究区概况

南小河沟流域(107°30′—107°37′E, 35°41′—35°44′N)地处甘肃省庆阳市后官寨乡境内^[8],系泾河二级支流。流域总面积38.9km²。多年平均降水量为546.8mm,年内分配极为不均,5—9月份降水量占全年降水量的76.9%,年平均气温为9.3℃^[9]。

流域自1951年开始进行水土保持治理,1954年开始进行水土流失观测。流域主沟道沟口设置有流域控制站——十八亩台径流泥沙观测站(107°32′09″E, 35°42′02″N)。流域内有两条支沟,即杨家沟与董庄沟。其中,董庄沟作为对照观测支沟,未进行任何治理。在以生物固沟措施为主的杨家沟和非治理的董庄沟分别布设了杨家沟径流站、董庄沟径流站,在流域中游花果山水库出口布设了花果山水库出口径流站。十八亩台径流站集水面积30.6km²,主要进行流域水土流失规律观测和水土保持综合治理效益观测^[10];杨家沟径流站集水面积0.87km²,董庄沟径流站集水面积1.15km²,是生物固沟(杨家沟)与非治理沟(董庄沟)对比观测站。1954年开始布设径流场,主要进行不同地形部位即不同下垫面径流泥沙来源观测、单项水土保持措施效益观测和水土流失规律观测,分为农地、林地、人工牧草和天然荒坡4大类,数量一百余个。在观测径流泥沙的同时,南小河沟流域也设有雨量观测站,包括十八亩台、杨家沟、下寺肴(107°33′26″E, 35°41′14″N)、南佐(107°35′19″E, 35°41′37″N)、方家沟畎(107°36′01″E, 35°42′56″N)、马家集(107°34′14″E, 35°43′37″N)、路家堡(107°33′08″E, 35°43′15″N)等^[10]。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

研究所用的数据来自于流域内所设相关测站,包括:(1)水文资料:南小河沟流域典型时期1958—2017年流域控制测站十八亩台测站的年径流量及十八亩台、下寺肴、南佐、方家沟畎、马家集、路家堡6个雨量站的年降雨量,面降雨量采用泰森多边形法计算得到,十八亩台测站的控制面积是30.6km²;(2)下垫面资料:1958—2017年,黄委会西峰水保站对南小河沟流域历年植被恢复和土地利用面积的统计数据,包括林地、草地恢复面积及农地、未利用地和建筑用地面积的动态变化。

2.2 研究方法

目前关于径流问题的研究,研究者采用的方法各有

特点,但都着眼于将资料序列分为两个时期,一是基准期,二是变化期^[11]。基准期一般为未大规模治理或者治理措施有限的时期,变化期为进行了大规模人类活动或者增加了新的水土保持措施之后,对研究区的径流情况产生了明显改变的时期。本文首先对年降雨、径流数据进行趋势分析及突变点检验,划分出两个时期。之后采用双累积曲线法和弹性系数法定量分析气候因子和人类活动对于径流变化的贡献率,并引入土地利用面积,探讨人类活动的具体表现及其影响。

2.2.1 变化趋势分析及突变点确定 进行水文资料趋势分析和突变点检验经常采用的方法可分为两类:一是基于原始数据的参数统计分析,如距平累积法、滑动 t 检验法和线性回归法;二是非参数秩检验统计法,如斯波尔曼秩检验和曼肯德尔秩和检验^[12]。本文选用了应用广泛的 Mann-Kendall(M-K)检验法。M-K 法是一种非参数统计检验方法^[5]。该方法的优点是不要样本遵从一定的分布,也不受少数特别值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算也比较方便^[5]。

2.2.2 径流变化归因分析 对于黄河流域径流变化归因分析,研究方法主要有 5 类:弹性系数法^[13]、模型模拟法^[14]、双累积曲线法、累积量斜率变化率比较法^[15]。其中双累积曲线法使用简单,应用最为广泛,而弹性系数法则能系统考虑气候变化与植物生长的互馈关系,使径流变化与各个因素关系更加明晰。因此,本文采用了双累积曲线法和弹性系数法来进行径流变化的归因分析:

(1) 双累积曲线法。双累积曲线法对于时间序列进行分析的一种常用方法^[16]。本文采用年降雨—径流深累积值,按照相同的时间步长绘制双累积曲线。根据曲线和基准期的实测资料,经过回归分析可以得出基准期的累积降雨量与累积径流深的关系方程。将变化期的实测降雨累积值代入上述方程中,计算对应的径流深累积值,与变化期的实测资料进行对比,相差部分即为人类活动影响下的径流量变化量。

(2) 弹性系数法。径流的气候(下垫面)弹性系数的定义是:单位的气候(下垫面)要素变化所导致的流域径流量的变化^[17]。本研究中,气候变化主要考虑降水和潜在蒸散发的变化,而下垫面因素主要考虑人类活动,即修建水土保持工程措施和植树、种草等植被恢复措施^[18]。弹性系数法以流域的水量平衡方程[公式(1)]和傅抱璞水热耦合平衡方程[公式(2)]为基础,具体表示为:

$$P = E + R \quad (1)$$

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^n\right]^{1/n} \quad (2)$$

式中: E, P, R 分别为多年平均的年实际蒸散发量(mm)、多年平均的年降水量(mm)、多年平均的年径流深(mm); E_0 是多年平均潜在蒸发量(mm); n 是下垫面参数,由试算法计算得出。

根据公式(1)–(2),径流量对各 P, E_0 以及 n 的偏导结果如下:

$$\frac{\partial R}{\partial P} = \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}-1} \quad (3)$$

$$\frac{\partial R}{\partial E_0} = \left[E_0^n + P^n\right]^{\frac{1}{n}-1} \cdot E_0^{n-1} - 1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial n} = \left[E_0^n + P^n\right]^{\frac{1}{n}} \cdot \left[-\frac{\ln(E_0^n + P^n)}{n^2} + \frac{1}{n} \cdot \frac{E_0^n \ln E_0 + P^n \ln P}{E_0^n + P^n}\right] \quad (5)$$

根据 schaaake^[19]对弹性系数的定义,径流的降水弹性系数(ϵ_p)和径流的潜在蒸散发弹性系数(ϵ_{E_0})以及下垫面的弹性系数(ϵ_n)可分别表示如下:

$$\epsilon_p = \frac{\partial R}{\partial P} \cdot \frac{P}{R} \quad (6)$$

$$\epsilon_{E_0} = \frac{\partial R}{\partial E_0} \cdot \frac{E_0}{R} \quad (7)$$

$$\epsilon_n = \frac{\partial R}{\partial n} \cdot \frac{n}{R} \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 流域降雨径流变化趋势及突变点分析

采用 M-K 检验法对南小河流域 1958—2017 年降雨量与径流量序列进行趋势分析及突变检验,结果分别如图 1—2 所示。

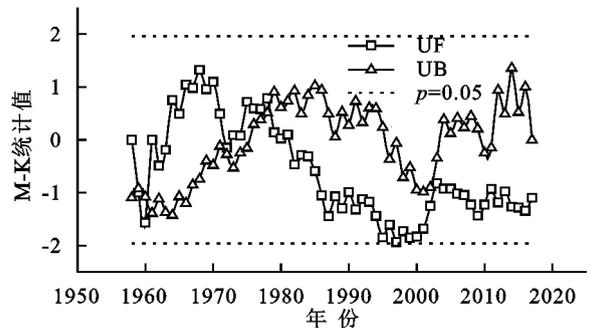


图 1 南小河流域年降雨量 M-K 趋势及突变检验结果

由图 1 可以看出,年降雨的 M-K 统计值在 1958—1963 年和 1982—2017 年都小于 0,表明降雨呈减小趋势,但趋势并不显著;1964—1981 年则是大于 0,呈增加趋势,增加趋势同样不显著;年降雨量 M-K 统计值并未超出 95% 置信区间,表明南小河流域降雨并未发生突变。由图 2 可以看出,径流的 M-K 值在 1958—1959 年和 1964—1973 年大于 0,径流呈增大趋势,但并未超出置信上界,增加趋势不显

著;其余年份径流的 M-K 值均小于 0,且超出了置信下界,减小趋势显著。UF 和 UB 相交 3 次,且交点在突变区域和临界线内,因此需要使用双累积曲线法来进一步确定径流的突变点,结果见图 3。

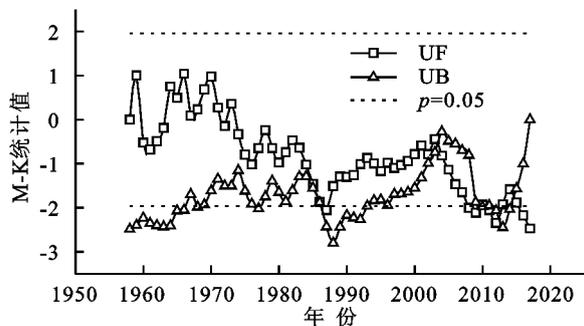


图 2 南小河流域年径流量 M-K 趋势及突变检验结果

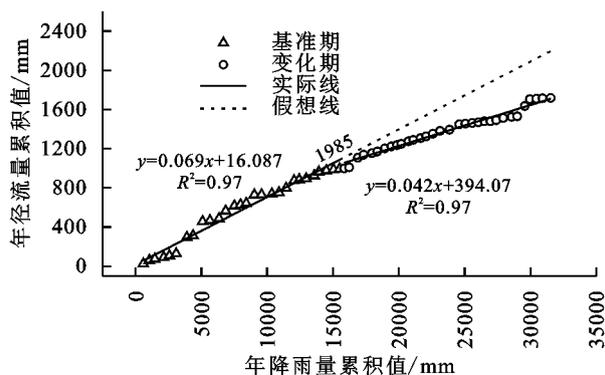


图 3 南小河流域降雨径流双累积曲线

由图 3 可以看出,降雨—径流双累积曲线在 1985 年之后直线斜率发生了明显变化,在 2012 年也出现了一定变化,这也与 20 世纪 80 年代初南小河流域大规模造林,林木减水作用期以及 2010 年补充造林的作用期相吻合,结合图 2 可以判断出径流的突变点在 1985 年。根据突变检验结果,本研究将资料序列分为两个时期,以 1958—1985 年作为基准期,以 1986—2017 年作为变化期,对这两个时期内气候和人类活动对于径流变化的贡献率进行定量评估。

3.2 气候和人类活动对于流域径流变化贡献的定量分析

3.2.1 基于双累积曲线法的径流变化归因分析 根据突变检验的结果,分别统计南小河流域基准期、变化期的降雨量、径流量变化情况,结果见表 1。

表 3 南小河流域径流弹性系数

时期	多年平均		多年平均 潜在蒸散发量/mm	下垫面 参数 n	多年平均径流弹性系数/%		
	降雨量/mm	实际蒸散发量/mm			ϵ_p	ϵ_{E_0}	ϵ_n
基准期	553.5	518.0	849.9	4.00	3.03	-1.82	-2.85
变化期	501.1	478.5	1172.1	3.24	4.32	-3.94	-3.64
全序列	525.6	496.9	957.0	3.60	3.57	-2.54	-3.19

由表 3 可以看出,下垫面参数从基准期的 4.00 减小到了 3.24;由于研究时段内流域的地形和土壤条

表 1 南小河流域降雨径流变化

指标	基准期			变化期		
	均值/mm	标准差	变差系数	均值/mm	标准差	变差系数
降雨量	553.5	78.0	0.14	501.1	76.8	0.15
径流量	35.5	27.5	0.77	22.6	18.5	0.82

比较基准期和变化期降雨和径流的均值、标准差和变差系数可知,变化期降雨的均值、标准差和变差系数分别为 501.1 mm,76.8,0.15,均值比基准期减少了 9.47%,标准差和变差系数与基准期相比变化微弱,与趋势分析及突变检验结果相吻合;变化期径流量的均值、标准差和变差系数分别为 22.6 mm,18.5,0.82,相比基准期,均值减少了 36.34%,标准差减少了 32.73%,变差系数增大了 6.49%,径流的均值和标准差下降幅度较大,符合上文的结果。

降雨径流双累积曲线图(图 3)结果显示,变化期的降雨径流累积曲线的斜率明显小于基准期,经过回归分析可以得到变化期和基准期的线性拟合方程,将变化期的累积降雨量代入基准期的回归方程中,即可计算出单纯气候因素影响下的径流量变化量,与实测值进行比较差值部分即为人类活动影响下的径流变化量,进而可以求得二者的贡献率,结果见表 2。

表 2 基于双累积曲线法的径流归因分析结果

时间 序列	径流/ mm	变化量/ mm	气候条件		人类活动	
			变化量/ mm	贡献率/ %	变化量/ mm	贡献率/ %
基准期	35.5					
变化期	22.6	-12.9	-0.9	7.0	-12.0	93.0

由表 2 可知,变化期的多年平均径流量较基准期减少 12.9 mm,其中,在气候条件(多年平均降雨量减少)作用下,会减少 0.9 mm,贡献率为 7.0%;人类活动作用下,多年平均径流量减少 12.0 mm,贡献率为 93.0%。可以看出,在 1958—2017 年人类活动是南小河流域径流变化的主要原因。

3.2.2 基于弹性系数法的径流变化归因分析 由水量平衡公式计算出年均实际蒸散发 E ,依关系式反算出下垫面参数 n 。将 E, n 和潜在蒸散发 E_0 [20-21] 代入公式(2)—(8)中计算得到径流的降雨、潜在蒸散发和下垫面弹性系数 [17],结果见表 3。

件处于稳态,因此, n 的减小主要是由于人类活动引起。气候条件通过改变降水和潜在蒸散量来影响

径流量,而人类活动主要通过改变实际蒸散发来影响径流量^[22]。根据 1958—2017 年南小河口流域径流的弹性评估结果(表 3)来看,当降水、潜在蒸散发、下垫面每变化 1%时,径流分别变化 3.57%, -2.54%, -3.19%。3 个弹性系数中,径流的降雨弹性系数最大、下垫面弹性系数次之、潜在蒸散发弹性系数最小。说明南小河口流域径流变化对于降雨的敏感性最高、

表 4 南小河口流域径流变化贡献率结果

多年平均 降雨变化值/mm	多年平均潜在蒸散发量 变化值/mm	下垫面参数 变化值	对多年平均径流量减少的贡献率/%		
			多年平均	多年平均潜在	下垫面
			降雨量	蒸散发量	参数
52.4	322.2	0.76	-30.4	73.0	57.4

4 讨论

本文通过双累积曲线法和弹性系数法两种方法分别进行了南小河口流域径流的归因分析,得出了一致的结论,即南小河口流域 1958—2017 年内径流变化的主要影响因素为人类活动。夏露等^[5]使用双累积曲线法研究黄土高原沟壑区砚瓦川流域径流变化驱动力发现,降水对于径流减少的贡献率为-37.9%,水土保持措施对于径流减少的贡献率为 137.9%,水土保持为主要驱动力;张凯等^[23]使用双累积曲线法对汾河上中游研究显示,降水和人类活动对于径流降低的贡献率分别为 29%,71%,人类活动为主要影响因素;杨大文等^[24]基于流域水热耦合平衡方程,对黄河流域 38 个典型流域的径流变化成因分析发现,人类活动为主要驱动力;党素珍等^[25]采用弹性系数法分析了泾河上游 1973—2010 年水沙变化,发现气候变化对泾河上游流域径流减少的贡献率为 36.8%~43.8%,而人类活动的贡献率为 56.2%~63.2%。综上所述,表明本文应用双累积曲线法和弹性系数法对于黄土高原典型小流域——南小河口径流变化的归因分析结论与其他研究人员的已有研究成果一致。这是由于 20 世纪 90 年代末,我国开展了大规模的退耕还林(草)工程,植被覆盖率大幅提高、水土保持效果显著;经济发展迅速,工农业机械化、规模化等产生了大量的需水和耗水,之后人类活动便成为了径流变化的主要影响因素。

相比而言,南小河口流域地处水土流失最为严重的区域,也是进行系统治理探索最早的流域之一,径流的影响也更为复杂,更有研究价值。根据实际的治理情况和收集到的 1954 年、1969 年、1980 年、2000 年和 2012 年 5 期的土地利用数据(表 5)^[21]可以发现:南小河口流域的土地主要分为林地、草地、农地、未利用地和建筑用地这 5 类。林地的面积除在 2000 年时出现了减少以外,一直在不断的增长,从治理初

其次是下垫面,对潜在蒸散发的敏感性最弱。

由表 4 可知,对于径流减少的贡献中,降雨为-30.4%,潜在蒸散发为 73.0%,下垫面变化为 57.4%。由此可知,气候变化对于径流减少的总贡献率为 42.6%,下垫面变化对于径流减少的贡献率为 57.4%,可见下垫面即人类活动对于径流变化的影响仍然占据主导地位。

期的 83.5 hm² 到 2012 年的 974.4 hm²,增幅达到 1 066.9%;草地面积则从 1 161.1 hm² 一直减少到了 384.6 hm²,降幅达到 201.9%;农地面积则是从 1954—2000 年一直在稳定增长,到 2000 年时,增长了近一倍,但在 2012 年又回落到了治理初期的水平;未利用地从 610 hm²,下降到 2012 年的 326.1 hm²,减少了 46.5%;建筑用地从 2.3 hm² 增加到了 159.1 hm²,增幅最大,但所占面积最小。南小河口流域这一系列土地利用过程体现了人类活动在干预水文循环过程中的波动性、生态治理与经济民生发展的相互需要和妥协。结合本研究得出的结果,可以看出,流域变绿会增加耗水,使得径流量显著减少,或是会使得潜在蒸散发增大导致径流的减少;同时,随着开垦土地、发展经济也会使得径流减少,用水矛盾将进一步显现。

表 5 南小河口流域 5 期土地利用类型及其面积

年份	土地利用类型及其面积				
	林地	草地	农地	未利用地	建筑用地
1954	83.5	1161.1	1173.1	610.0	2.3
1969	164.0	983.3	1960.0	512.0	10.7
1980	482.0	756.0	1926.8	436.6	28.6
2000	362.0	609.0	2146.0	408.0	105.0
2012	974.4	384.6	1785.8	326.1	159.1

研究结果的相互验证,也表明了两种研究方法在该区域的适用性和可靠性。同时,研究结果显示,双累积曲线法计算得到的气候变化和人类活动对于径流变化贡献率的绝对值与弹性系数法得到结果的绝对值相差较大,这是由于双累积曲线法只是构建了降雨与径流的相关关系,忽略了气候因素中潜在蒸散发对于径流变化的影响,将被忽略的部分归入了人类活动之中,结果显示便偏大,郑培龙等^[26]对泾河流域径流归因分析结果显示人类活动对于径流变化占绝对主导地位,而气候变化影响很小,与本文研究结果一致;而弹性系数法则充分考虑了水热关系及下垫面变

化对于径流的作用,分离出了气候条件中降雨和潜在蒸散发以及下垫面变化即人类活动各自对于径流变化的贡献率。这便是上述差异产生的原因,二者的结果都是合理的,但根据计算结果,对于黄土沟壑区小流域径流归因分析的方法使用较之于双累积曲线法,更推荐弹性系数法。

流域中,气候条件和人类活动对于径流变化的作用事实上是复杂且相互交织的,研究发现,双累积曲线法虽然能够分离出气候变化和人类活动对于径流变化的贡献率,但是弹性系数法较之于双累积曲线法的优势在于能够适当描述植被不同生长阶段与水文过程的互馈关系,因此能直接考虑植被生长程度对径流变化的影响。通过基于该类方法的数据分析,可以进一步分离出气候变化导致的下垫面变化(不同植被生长情况)、人类活动导致的下垫面变化(地貌与土地利用动态变化)^[27]。因此结果分析也更加全面。但本研究假设流域在研究时段内降雨都转化为蒸发和径流,未考虑土壤含水量的变化,下一步应该结合水文模型模拟流域水文循环过程对径流的归因分析开展深入研究。

5 结论

(1) 通过 M-K 秩次检验和双累积曲线法可以得知,南小河流域年径流量的突变点出现在 1985 年,而降雨并未发生突变。因而将资料序列分为基准期(1958—1985 年)和变化期(1986—2017 年),M-K 值显示,降雨的变化在基准期存在波动,但在变化期则表现为不显著的下降趋势;径流在基准期也存在波动变化,但在变化期则表现为显著的下降趋势。

(2) 南小河流域径流归因分析结果表明:双累积曲线法计算得到气候变化和人类活动对于径流减少的贡献率分别为 7.0%,93.0%;弹性系数法计算出气候变化和人类活动对于径流减少的贡献率分别为 42.6%,57.4%;人类活动为南小河流域径流变化的主要影响因素。

(3) 相比于双累积曲线法,对于黄土高原沟壑区典型小流域的径流变化归因分析更推荐弹性系数法。

参考文献:

[1] 刘昌明,张学成.黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J].地理学报,2004,59(3):323-330.

[2] 河南省社科院.推动黄河流域生态保护和高质量发展,谱写新时代中原更加出彩的绚丽篇章[N].河南日报,2019-10-10(8).

[3] 陕西卷编委会.中国西部开发信息百科:陕西卷[M].西安:陕西科学技术出版社,2003.

[4] 王鸿翔,赵颖异,刘静航,等.近 50 年黄河下游水沙情势演

变及其影响因素分析[J].水力发电,2020,46(09):48-54.

- [5] 夏露,宋孝玉,李怀有,等.砚瓦川流域水沙演变特征及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2016,30(1):89-95.
- [6] 蒋观滔,高鹏,穆兴民,等.退耕还林(草)对北洛河上游水沙变化的影响[J].水土保持研究,2015,22(6):1-6.
- [7] 李志,刘文兆,郑粉莉,等.黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J].生态学报,2010,30(9):2379-2386.
- [8] 李蓝君,宋孝玉,夏露,等.黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J].农业工程学报,2018,34(20):148-159.
- [9] 夏露,宋孝玉,符娜,等.陇东黄土塬区不同下垫面条件下侵蚀产沙的降雨阈值[J].水科学进展,2018,29(6):828-838.
- [10] 寇权.黄土高原沟壑区典型小流域水土流失规律分析研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [11] 王明玉,王百田.不同水土保持措施对黄土高原小流域年径流和产沙的影响:以平凉纸坊沟为例[J].林业科学,2016,52(8):10-20.
- [12] 张应华,宋献方.水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J].干旱区地理,2015,38(4):652-665.
- [13] Fu G, Charles S P, Chiew F. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow [J]. Water Resources Research, 2007,43(11):2578-2584.
- [14] Montenegro A, Ragab R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study [J]. Hydrological Processes, 2010,24(19):2705-2723.
- [15] 何旭强,张勃,孙力炜,等.气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J].生态学杂志,2012,31(11):2884-2890.
- [16] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [17] 张树磊,杨大文,杨汉波,等.1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J].水科学进展,2015,26(5):605-613.
- [18] 曹巍,张洪波,任冲锋,等.陕北榆林地区河川径流变异类型的识别方法[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2019,47(3):138-154.
- [19] Schaake J C. From climate to flow, in climate change and US water resources [M]. New York: John Wiley,1990.
- [20] 刘普幸,卓玛兰草.甘肃省 1960—2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子[J].自然资源学报,2012,27(9):1561-1571.
- [21] 夏露,宋孝玉,符娜,等.黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究:以南小河流域为例[J].水利学报,2017,48(6):678-688.