

近80年来北洛河流域径流变化特征及其归因分析

谢剑¹, 高鹏^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 吴常雪¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探究北洛河流域径流变化特征及其驱动因子,对流域治理规划和生态环境建设提供科学依据,基于北洛河流域1937—2018年径流数据,采用现代数理统计方法对径流特征进行了分析,并结合1952—2019年气象资料分析了气候变化对径流的影响。通过降水—径流双累积曲线法定量分析了气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。结果表明:北洛河流域1937—2018年年均径流量显著减少($p < 0.01$),在1970年、1994年发生突变,且存在54 a的主周期变化。1956—2019年北洛河流域降水变化趋势不显著($p > 0.05$),气温显著增加($p < 0.01$),气候变化对北洛河径流量起到减小作用。与1957—1970年相比,1971—1994、1995—2018年人类活动对于径流减少的贡献率分别高达92%和97%,人类活动是使北洛河径流量发生减少和突变的关键因子。

关键词:径流变化; 气候变化; 人类活动; 双累积曲线; 北洛河流域

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0122-07

Variation Characteristics of Runoff in Beiluo River Basin over the Past 80 Years and Its Attribution Analysis

XIE Jian¹, GAO Peng^{1,2}, MU Xingmin^{1,2}, WU Changxue¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Studying the variation characteristics of runoff change and its driving factors in the Beiluo River Basin can provide a scientific basis for the governance planning and ecological environment construction in the basin. Based on the runoff data of the Beiluo River Basin from 1937 to 2018, this study analyzed the characteristics of runoff by using modern mathematical statistics, and assessed the influence of climate change on runoff in combination with meteorological data from 1952 to 2019. The contribution rates of climate change and human activities to runoff change were quantitatively analyzed by using the precipitation-runoff double cumulative curve method. The results showed that the average annual runoff in the Beiluo River Basin decreased significantly from 1937 to 2018 ($p < 0.01$), and suddenly changed in 1970 and 1994, with a main cycle change of 54 years. From 1956 to 2019, the precipitation in the Beiluo River Basin had no significant change trend ($p > 0.05$), but the temperature had increased significantly ($p < 0.01$). Climate change had reduced the runoff of the Beiluo River. Compared with the period from 1957 to 1970, the contribution rates of human activities to runoff reduction in the periods of 1971—1994 and 1995—2018 were as high as 92% and 97%, respectively, which were the key factors for reduction and mutation of runoff in the Beiluo River Basin.

Keywords: runoff change; climate change; human activities; double cumulative curve; the Beiluo River Basin

收稿日期: 2021-11-12

修回日期: 2022-01-16

资助项目: 国家重点研发计划专题计划“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707)

第一作者: 谢剑(1997—), 男, 江西赣州人, 在读硕士研究生, 研究方向为生态水文及水土保持。E-mail: 2284184269@qq.com

通信作者: 高鹏(1976—), 男, 陕西扶风人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

IPCC 第五次评估报告中指出,全球地表平均温度不断升高,1880—2012 年期间大约升温 0.85°C ,中国同期升温约 0.65°C ^[1]。全球变暖将加快区域的水循环,使水循环要素关系改变,水资源重新分配,径流时序规律发生显著变化,引起洪涝和干旱等一系列灾害^[2-3]。气候变化是引起河川径流变化的重要因子,同时大规模的人类活动,包括农业、工业和生活用水的增加以及一系列水土保持措施的实施,对流域下垫面的改造等,直接或间接对流域的水文过程产生了重要的影响。因此,如何区分以及定量气候变化和人类活动对径流特征变化的影响成为了当前水文领域研究热点。其中,黄土高原地区水土流失严重,径流变化显著,更是受到众多学者的关注^[4-6]。赵广举等^[7]系统分析了黄河中游近 60 年水沙变化趋势以及驱动因素,认为气候变化、降雨、水土保持措施(如退耕还林草、梯田建设、水库淤地坝等工程)等人类活动是水沙变化的主要影响因素。胡春宏等^[8]探究了不同时期黄河水沙空间分布的变化,发现由于自然条件的变化和人类活动的影响,黄河年平均水沙总量明显减少,引水耗水量明显增加,径流显著减少。冯家豪等^[9]研究了 1957—2018 年黄河中游区的径流变化特征,坝库工程、引水灌溉及梯田林草等水利水保工程措施是黄河中游径流锐减的主要驱动力。

北洛河为黄河二级支流,渭河一级支流,流域内能源资源丰富,承担着重要的社会经济作用^[10]。同时,北洛河流域也是黄土高原退耕还林和水土保持措施实施的重点区域,流域水沙形势发生巨大转变。董起广等^[11]通过 Mann-Kendall 趋势检验法和多年滑动平均法分析了年际径流量的变化趋势,认为北洛河年径流量呈明显减小趋势。古明兴^[12]发现北洛河流域降水各年代间呈丰枯交替状,径流变化与降水显示出一致性,均有减小趋势。蒋观涛等^[13]发现以退耕还林(草)为主的人类活动是北洛河上游泥沙减少的主要驱动力。但是目前研究径流时序往往较短,本文以北洛河流域(状头水文站以上流域)为研究对象,基于北洛河流域 1937—2018 年近 80 a 径流资料,采用累积距平法、Mann-Kendall 检验法、Morlet 小波分析等研究方法分析北洛河流域径流的变化特征,并结合 1956—2019 年气象数据分析气候变化对北洛河径流的影响,运用双累积曲线法定量区分气候及人类活动对径流变化的影响,综合分析北洛河流域径流变化原因,以期对北洛河流域水土流失治理和生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

北洛河流域地处 $34^{\circ}40'—37^{\circ}19' \text{N}$, $107^{\circ}35'—110^{\circ}20' \text{E}$,发源于陕西省定边县白于山的魏梁山,流经陕西省,甘肃省,在大荔县东南汇入渭河,全长 680 km,平均比降 1.79% ,总落差 1 175 m,总面积 $26\,900 \text{ km}^2$,出口控制性水文站为状头水文站,集水面积 $25\,645 \text{ km}^2$ ^[14]。流域内梁峁起伏、沟谷纵横,地形支离破碎,流域从上游到下游,横跨黄土丘陵沟壑区、黄土丘陵林区、黄土高原沟壑区和黄土阶地平原区等地貌区。大陆性季风气候显著,年均气温 7.5°C ,年均降雨量少,为 514.9 mm ,且年内分布不均,主要集中在 7—9 月,径流量年内变化较大^[15]。流域周边气象站、水文站分布见图 1。

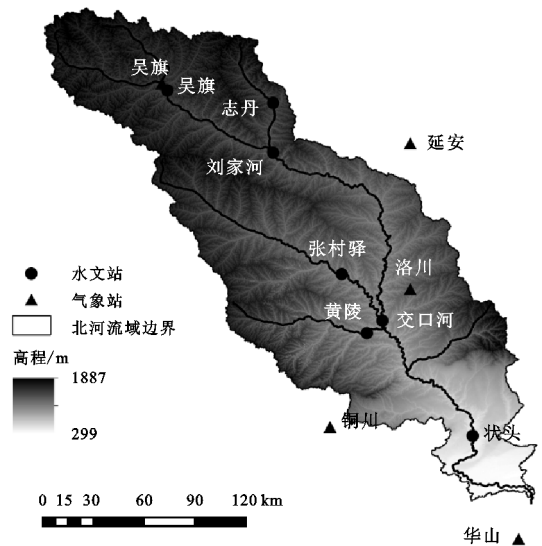


图1 北洛河流域及站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源和整理

本文选用吴旗、刘家河、状头等 7 个水文站点径流数据(表 1),均来源于《中国河流泥沙公报》和《黄河流域水文年鉴》等。采用北洛河流域内及周边的吴旗、洛川、铜川、延安和华山 5 个气象站点的降雨和气温资料,通过泰森多边形计算流域的面降雨量,算术平均法得到流域温度,以上气象数据均来源于中国国家气象数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn>)。

2.2 研究方法

2.2.1 累积距平法 累积距平法是基于均值的检验方法,用于反映数据的变化趋势,常用于检验长时间序列的阶段性^[16]。若曲线某一时间值左右分别有明显增大和减小的趋势,则可把该点作为变化趋势的突变点。

2.2.2 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验

法^[17-18] (M-K 检验) 既不要求样本遵从一定的分布, 也可以排除少数异常值的干扰, 适用性范围广, 定量化程度高, 理论意义明确, 常被用于水文气象研究中的时间序列检验。利用 M-K 法检验趋势性时, 得出的 Z 若为正值则表示序列有增加趋势, 负值则为减少趋势, 而 p 大于 0.05 表示该序列增加或者减少不显著, 而 p 小于 0.05 表示增加或者减少趋势显著。用 M-K 法检验突变性时, 将得出的 UF_k 和 UB_k 值绘制 UF 和 UB 曲线图; 若 UF 大于 0, 则序列呈上升趋势, 反之则呈下降趋势; 若 UF 和 UB 曲线相交且交点在临界线之间 ($\alpha=0.05$, 临界值 $U_\alpha=\pm 1.96$), 则交点对应的时刻即为变异开始的时间^[19]。

表 1 北洛河水文站地理位置和时间序列					
河名	水文站名	控制面积/ km ²	东经/ (°)	北纬/ (°)	时间序列
北洛河	吴旗	3408	108.20	36.88	1963—2018
周河	志丹	774	108.77	36.82	1964—2018
北洛河	刘家河	7325	108.77	36.55	1959—2018
葫芦河	张村驿	4715	109.13	35.90	1958—2018
北洛河	交口河	17180	109.35	35.65	1952—2018
沮河	黄陵	2266	109.27	35.58	1967—2018
北洛河	状头	25645	109.83	35.03	1937—2018

2.2.3 Morlet 小波分析法 小波分析是一种信号时频局部化分析方法, 并且具有自适应变化的时频窗口, 常被用于长时间序列中的周期分析^[20-21]。Morlet 小波是复数形式的小波, 在应用中比实数形式的小波更具优势, 可以消除实数形式小波在变换过程中系数模带来的振荡, 而且从其小波系数中可以分离出模和位相, 被广泛运用于水文、气候研究等学科中^[22], 故本研究选用 Morlet 作为基小波的小波分析来进行北洛河径流的周期分析。

2.2.4 双累积曲线法 双累积曲线法是进行检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法, 具有对数据要求少, 使用方法简单, 结果直观等优点^[23-24]。本研究将年降水量与径流量逐年累加得到降水—径流双累积曲线。以突变年份作为基准期和研究期划分依据。通过基准期和研究期的降水—径流关系, 以及模拟出的未受人类活动影响的研究期降水—径流关系, 计算出降水和人类活动引起的径流变化。

3 结果与分析

3.1 径流变化特征

3.1.1 径流特征及趋势分析 1937—2018 年北洛河流域多年平均径流量呈减少趋势, 速率为 -0.04 亿

m^3/a (图 2), 结合不同年代径流量变化特征(表 2)可知, 不同年代流域径流量的变化情况不同。1937—2018 年流域多年平均径流量为 7.48 亿 m^3 , 最低径流量出现在 1974 年的 3.09 亿 m^3 , 最大径流量出现在 1964 年的 20.15 亿 m^3 , 年最大径流量为年平均流量的 2.69 倍, 极差比为 6.52, 变差系数 C_v 值高达 0.40, 说明北洛河流域径流量年际变化较大。其中, 20 世纪 70 年代以前径流量呈波动性变化, 进入 20 世纪 80 年代后径流量呈逐年代递减变化。

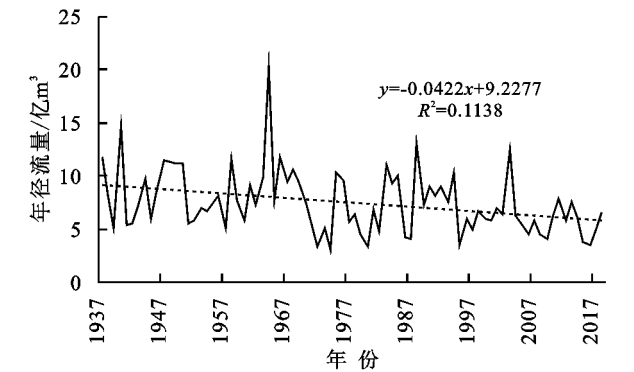


图 2 北洛河流域径流量线性趋势变化

表 2 北洛河流域不同年代径流量变化特征

年代	平均值/ 亿 m^3	极大值/ 亿 m^3	极小值/ 亿 m^3	极值比	变差 系数 C_v
1937—1949	8.92	14.70(1940)	5.15(1939)	2.85	0.33
1950—1959	7.60	11.65(1958)	5.15(1957)	2.26	0.28
1960—1969	10.12	20.15(1964)	5.83(1960)	3.46	0.37
1970—1979	6.08	10.33(1975)	3.09(1974)	3.34	0.38
1980—1989	7.39	13.09(1988)	3.29(1980)	3.98	0.43
1990—1999	7.11	10.3(1994)	3.5(1995)	2.94	0.28
2000—2009	6.22	12.47(2003)	4.04(2009)	3.09	0.47
2010—2018	5.78	7.81(2011)	3.47(2016)	2.25	0.25
1937—2018	7.48	20.15(1964)	3.09(1974)	6.52	0.40

通过 M-K 趋势检验(表 3)对 1937—2018 年状头站径流量进行分析, 得到 Z 值为 -3.10 ($p<0.01$), 北洛河流域径流显著减少。其中, 1967—2018 年吴旗站以上径流量 Z 值为 -5.75 ($p<0.01$), 志丹站以上径流量 Z 值为 -5.47 ($p<0.01$), 吴旗、志丹站—刘家河段径流量 Z 值为 -1.98 ($p<0.05$), 刘家河以下水文区间趋势检验得到 p 值均大于 0.05, 说明刘家河以上水文区间径流量均呈显著减小趋势, 刘家河以下水文区间则无显著变化趋势。

3.1.2 径流突变点分析 累积距平法对径流进行检验(图 3A), 显示 1937—1969 年北洛河径流量持续增加, 在 1970—1993 年进入平台期, 1994—2018 年径流持续减少, 具有明显丰平枯周期, 表明 1970 年和 1994 年可能

为径流突变点。通过 M-K 突变检验(图 3B)可知,在 1947—1952 年、1964—1971 年 $UF>0$,北洛河流域径流处于增长阶段;在 1937—1946 年、1953—1963 年、1972—2018 年 $UF<0$,径流处于减小阶段, UF 曲线与 UB 曲线相交于 1994 年,且位于信度线之间,表明径流在 1994 年发生了突变。在北洛河流域运用不同突变检验方法得出多个径流突变点已有先例^[25],并结合其他已有研究成果^[19,26],将 1970 年和 1994 年同时作为北洛河径流突变点合理。

3.1.3 径流周期分析 根据径流小波实部系数等值线图(图 4A)可知,1937—2018 年北洛河流域年均径流量存在 5 a、14 a 及 34 a 和 54 a 尺度的周期变化。结合小波方差图(图 4B)可知,54 a 尺度的周期变化占据主周期,1937—2018 年共经历了 2 个正相位,分

别为 1952—1970 年、1987—2005 年;3 个负相位,分别为 1937—1951 年、1971—1986 年、2006—2018 年。34 a 尺度的周期也在整个研究时段内正负交替震荡。

表 3 北洛河流域降水量、温度和径流量 M-K 趋势分析			
水文年份	水文要素	Z 值	p 值
1957—2019	全流域降水量	0.08	0.09
1957—2019	全流域温度	5.61	0.00
1937—2018	全流域(状头站以上)径流量	-3.10	0.00
	吴旗站以上径流量	-5.75	0.00
	志丹站以上径流量	-5.47	0.00
1967—2018	吴旗、志丹站—刘家河段径流量	-1.98	0.05
	张村驿站以上径流量	0.11	0.91
	刘家河、张村驿站—交口河段径流量	-1.27	0.20
	黄陵站以上径流量	0.05	0.96
	交口河、黄陵站—状头段径流量	-1.03	0.30

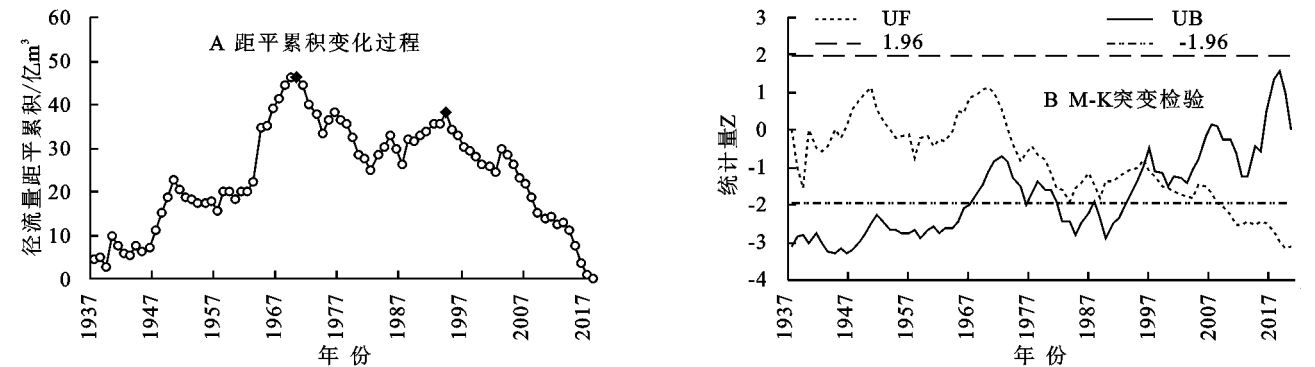


图 3 北洛河流域径流突变检验

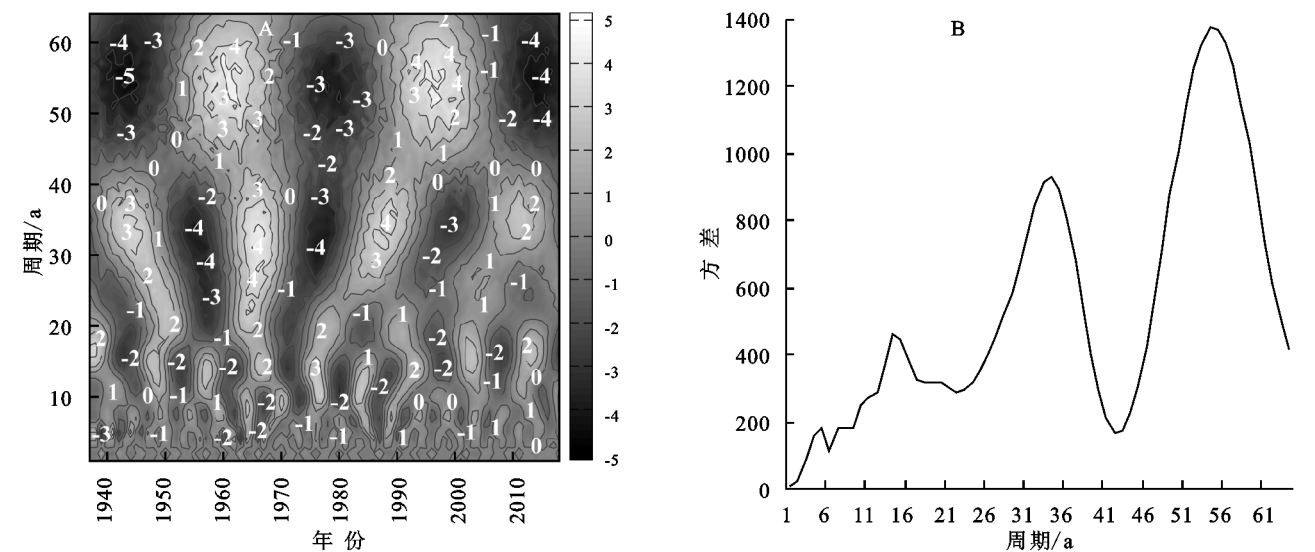


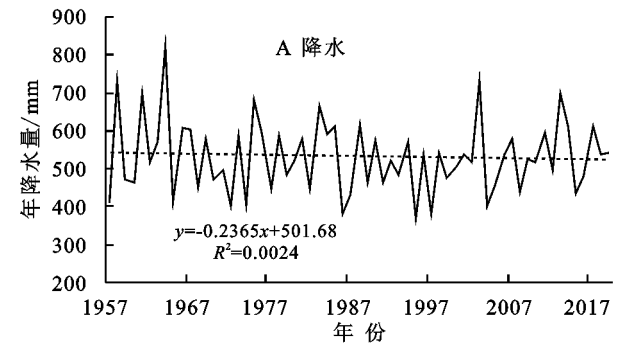
图 4 北洛河流域径流小波系数和小波方差

3.2 径流对降水 and 气温的响应分析

1957—2019 年北洛河流域多年平均降水量为 494.12 mm,多年平均气温为 9.26℃。其中,最高降水量出现在 1964 年,高达 757.79 mm,与径流量的极大值同期,气温的极低值出现在 1968 年,但 1964 年的气温也低于时段 92% 的温度值,径流量极大值是在降水量的

大量增加与气温降低的共同作用下出现的(图 5)。对气候因子进行 M-K 趋势检验(表 3)得到降水 Z 值为 0.08,变化趋势不显著,可以看出尽管降水是黄河中游支流径流补给源,直接影响径流,但在北洛河流域降水量的变化不足以导致径流量显著减少;气温检验出 Z 值为 5.61 ($p<0.01$),呈显著增加趋势,研究表明不同流域不同季

节气温对径流量的增减作用不一致^[27-28],其中,北洛河流域气温的上升可能会导致蒸发/蒸腾作用增加,使径流减少。UF 曲线(图 6)显示径流受人类影响较小时期的 1964—1970 年,降水量的增加和气温的降低共同导致了径流量的增加;在径流显著减少的 2006—2018 年,降水量减少,气温正负震荡。



降水 UF 曲线与 UB 曲线在 1968 年以及 2010—2017 年存在多个突变点;气温 UF 曲线与 UB 曲线相交于 1989 年,显示 1989 年为气温唯一突变点,无论是降水还是气温的突变点都与径流突变点偏离,无明显规律,表明人类活动才是造成北洛河径流发生突变的关键因素。

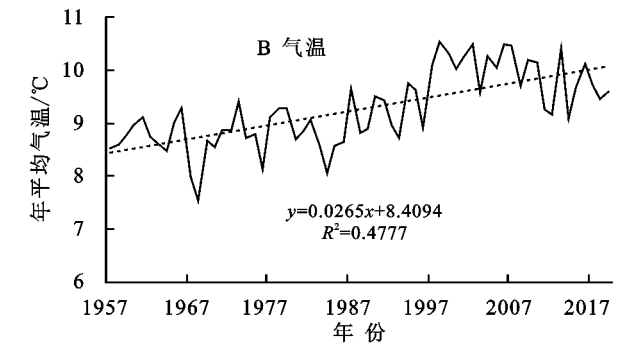


图 5 北洛河流域降水和气温线性趋势变化

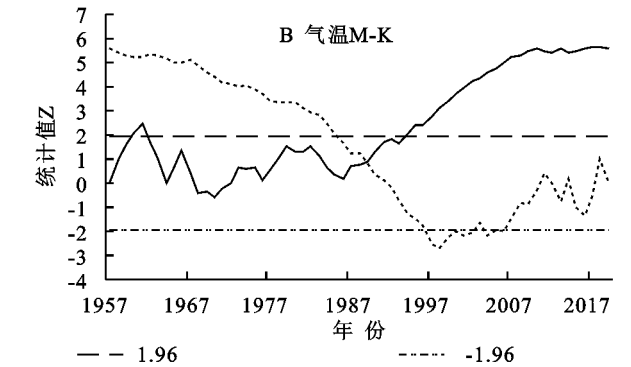
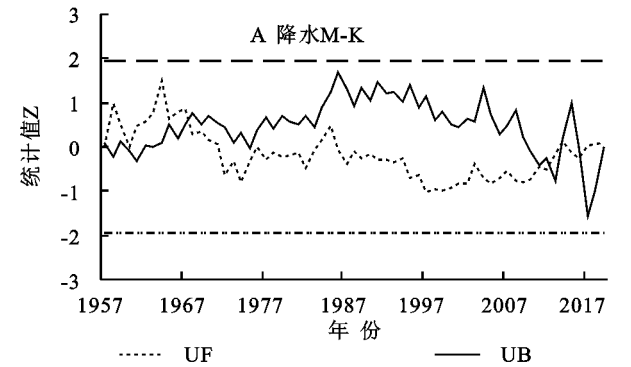


图 6 北洛河流域降水和气温 M-K 突变检验

3.3 降水和人类活动对径流影响的定量分析

根据前文突变检验结果,将 1970 年和 1994 年作为划分时期的临界点。以 1957—1970 年作为基准期,1971—1994 年为变化期 I,1995—2018 年为变化期 II,分别建立累积降水—累积径流关系式,分析降水及其他人类活动对径流变异的贡献,基准期和变化期降水—径流关系式相关性很好,均达到 0.99(图 7),基准期关系式斜率明显大于变化期 I,研究期 I 斜率也大于变化期 II。

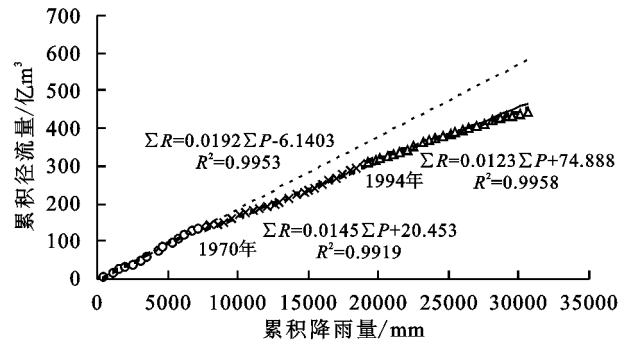


图 7 北洛河流域降水—径流双累积曲线

对比基准期,变化期 I 年径流量减小了 2.37 亿 m³,

降幅达到 24.88%;变化期 II 比基准期径流量减少 3.62 亿 m³,降幅达到 38.12%(表 4)。通过计算得到变化期 I 降水影响量和贡献率分别为-0.18 亿 m³,0.08,人类活动影响量和贡献率分别为-2.18 亿 m³,0.92(表 5),说明 20 世纪 70 年代以来,北洛河流域实施的大规模水土保持工程措施(淤地坝、梯田、造林种草等)极大改变了流域径流情势;而变化期 II 降水影响量和贡献率分别为-0.13 亿 m³,0.03,人类活动影响量和贡献率达到了-3.50 亿 m³,0.97,20 世纪 90 年代我国开展大规模的退耕还林(草),封山育林以及荒山造林工程在 20 世纪 70 年代水土保持工程措施的基础上,继续加强了减流效应。变化期 II 年径流量与变化期 I 相比,径流量减小了 1.26 亿 m³,降幅达到 17.62%,降水影响量和贡献率只有 0.04 亿 m³,-0.03,人类活动影响量和贡献率只有 0.04 亿 m³,-0.03,人类活动影响量和贡献率达到了-1.3 亿 m³,1.03,退耕还林(草)的减流效应远远大于降水量增长所产生的增流效应。而相邻时段的人类活动影响量也从 1971—1994 年的-2.18 亿 m³(-0.09 亿 m³/a)降到 1995—2018 年的-1.3 亿 m³(-0.05 亿 m³/a),说明在原有水土保持措施的基础

上,人类活动仍然是径流减少的主要驱动因素,但是其所产生的减流效益已逐渐趋于稳定。

4 讨论

北洛河流域多年平均需水量 7.09 亿 m³,多年平均供水量 6.27 亿 m³,多年平均缺水量 0.83 亿 m³,缺水率达到 11.6%,流域水资源匮乏^[29]。从对 1956—2019 年北洛河流域气象资料的分析来看,年降水量变化趋势不显著($p>0.05$),年均温呈显著上升趋势($p<0.01$)。张建云等^[30]通过基于网格的黄河水量平衡模型模拟黄河中游地区天然径流量过程研究发现,若气温升高 1℃,年

径流量将减少 3.7%~6.6%。北洛河流域年均温在突变点前后上升 1.01℃,气温对径流量变化的影响较小。北洛河径流量的减少除去受到气候变化的影响,主要还是受到人类活动所造成的影响。

表 4 北洛河流域不同时段降水和径流的变化

时段	降水/mm	年径流量			降幅/%
		实测值/ 亿 m ³	理论值/ 亿 m ³	变化量/ 亿 m ³	
1957—1970	515.20	9.51	9.51		
1971—1994	487.23	7.14	9.32	-2.37	24.88
1995—2018	488.55	5.88	9.38	-3.62	38.12

表 5 北洛河流域不同时段降降水 and 人类活动对径流的影响

时段	变化期 I, II 与基准期相比				变化期 II 与变化期 I 相比			
	降水因子		人类活动因子		降水因子		人类活动因子	
	变化量/亿 m ³	贡献率/%	变化量/亿 m ³	贡献率/%	变化量/亿 m ³	贡献率/%	变化量/亿 m ³	贡献率/%
1957—1970								
1971—1994	-0.18	7.73	-2.18	92.26				
1995—2018	-0.13	3.49	-3.50	96.51	0.04	-3.19	-1.30	103.19

一方面,人类对径流减少起到了直接作用:流域内随着人口的增加,城镇化的发展,生活用水与日俱增。刘家河至状头区间煤炭资源丰富,能源化工业发展迅速,建设了杨舒化工园区、交口河工业园区等工业园区,需要大量的工业用水,水资源供需矛盾突出。另一方面,人类对径流减少起到了间接作用:随着 20 世纪 70 年代以来,北洛河流域实施的大规模水土保持工程措施(淤地坝、梯田、造林种草等)与 90 年代末开展大规模的退耕还林(草),封山育林以及荒山造林工程成为了径流量减少的主要原因。其中,刘家河以上流域植被盖度增加最为显著,且因水利工程滞后等原因成为了北洛河流域的主要缺水分区^[29]。何亮等^[31]通过对 1980—2019 年北洛河土地利用数据解译,发现该时段内流域持续发生耕地转草地、耕地转林地和草地转林地的土地利用类型转移。随着流域内草地、林地面积大幅上升,草地、林地持水性能持续变大,截留量不断上升,导致流域内径流量逐渐减小。秦伟等^[32]研究发现在 2001—2004 年,北洛河上游单位面积退耕还林工程的年均减水能力达 4.7 万 m³/(km²·a)。陈玫君等^[33]认为退耕还林(草)对北洛河径流的减少作用主要体现在汛期的蓄洪作用,并且随着退耕还林时间的延长,北洛河径流不会持续减少,未来将维持在相对低而稳定的水平。

5 结论

(1) 1937—2018 年北洛河流域多年平均径流量为 7.48 亿 m³,径流呈显著减少趋势($p<0.01$),并在

1970 年和 1994 年发生了突变,主周期为 54 a。1956—2019 年北洛河流域降水变化趋势不显著($p>0.05$),气温显著增加($p<0.01$),气候对径流极大值的出现产生直接作用,气温与降水突变点与径流突变点偏离,无明显规律。20 世纪 70 年代与 90 年代,北洛河流域实施的大规模水土保持工程措施才是径流发生突变的关键因子。

(2) 北洛河域径流归因分析结果表明:相较于基准期(1957—1970 年),1971—1994 年和 1995—2018 年人类活动对于径流减少的贡献率分别高达 92%和 97%,人类活动通过直接或者间接作用成为径流减少的主要驱动因子。

参考文献:

[1] Ofipcc W. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [J]. Contribution of Working, 2013,43(22):866-871.

[2] 夏军,刘春泰,任国玉.气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J].地球科学进展,2011,26(1):1-12.

[3] 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.

[4] Mu X, Zhang L, McVicar T R, et al. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2007,21(16):2124-2134.

[5] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(1):1-10.

[6] 姚文艺,徐宗学,王云璋.气候变化背景下黄河流域径流

- 变化情势分析[J].气象与环境科学,2009,32(2):1-6.
- [7] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [8] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.
- [9] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J].水力发电学报,2020,39(8):90-103.
- [10] 薛彩琴.北洛河流域水资源管理调度工作形势与对策[J].陕西水利,2011(5):40-42.
- [11] 董起广,周维博,刘雷,等.北洛河径流量变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(2):20-29.
- [12] 古明兴.北洛河流域水沙演变情势分析[J].水资源与水利工程学报,2008,19(5):120-122.
- [13] 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.
- [14] 张亨亭,张建军,郭敏杰,等.北洛河流域不同地貌和植被类型区径流演变特征及控制因素[J].水土保持学报,2014,28(4):78-84.
- [15] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的影响[J].地理学报,2014,69(1):54-63.
- [16] Weber, Kenneth, Stewart, et al. A critical analysis of the cumulative rainfall departure concept[J]. Ground Water, 2004,42(6):935-938.
- [17] Mann H B. Nonparametric test against trend [J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [18] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [19] 樊晶晶,黄强,刘登峰,等.人类活动和气候变化对北洛河径流变化的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2):221-234.
- [20] Morlet J. Wave propagation and sampling theory[J]. Geophysics, 1982,47:203-236.
- [21] 王文圣,丁晶,向红莲.水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J].四川大学:学报工程科学版,2002,34(6):14-17.
- [22] 衡彤.小波分析及其应用研究[D].成都:四川大学,2003.
- [23] 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.
- [24] 冉大川,刘斌,付良勇,等.双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J].人民黄河,1996,18(6):24-25.
- [25] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,等.气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J].水力发电学报,2016,35(7):55-66.
- [26] 赫晓慧,郑紫瑞,高亚军.降水和人类活动对北洛河径流变化的定量化研究[J].水土保持研究,2017,24(3):125-129.
- [27] Tang C, Crosby B T, Wheaton J M, et al. Assessing streamflow sensitivity to temperature increases in the Salmon River Basin, Idaho[J]. Global & Planetary Change, 2012,88/89:32-44.
- [28] 邓振镛,张强,王润元,等.河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J].冰川冻土,2013,35(5):1267-1275.
- [29] 黄河水资源保护科学研究院.北洛河流域综合规划环境影响报告书[R].郑州:黄河水资源保护科学研究院,2015.
- [30] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [31] 何亮.1980—2019年北洛河流域土地利用和土地覆被变化分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [32] 秦伟,朱清科,刘广全,等.北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J].水利学报,2010,41(11):1325-1332.
- [33] 陈攻君,穆兴民,高鹏,等.北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J].中国水土保持科学,2018,16(6):1-8.

~~~~~

(上接第121页)

- [12] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [13] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [14] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.
- [15] 孟铖铖.嘉陵江流域径流时空变化特征及其驱动因素研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [16] 刘孝盈.嘉陵江流域不同尺度水土保持减沙效果研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [17] 黄双喜,石国钰,许全喜.嘉陵江流域水保措施蓄水减蚀指标研究[J].水土保持学报,2002,16(5):38-42.
- [18] 雷孝章,曹叔尤,戴华龙,等.川中丘陵区“长治”工程的减沙效益研究[J].泥沙研究,2003(1):52-58.
- [19] 戴明龙,张明波,叶莉莉.长江流域典型河流水沙过程变异研究[J].水文,2009,29(2):55-58.
- [20] 白桦,穆兴民,高鹏,等.嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J].水土保持研究,2012,19(1):102-106.
- [21] 刘洪鹄,张平仑,刘宪春,等.嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):111-115.
- [22] 刘尚武,张鹏,苗蔚,等.嘉陵江不同区域场次洪水输沙规律[J].水科学进展,2022,33(1):38-47.