DOI: 10.20103/j.stxb.202308161774

夏露,杨晶,马耘秀,宋孝玉,秦秋雨,吕春娟,李云霄.植被恢复和气候变化对汾河源区径流及其组分的影响.生态学报,2024,44(11):4597-4608. Xia L, Yang J, Ma Y X, Song X Y, Qin Q Y, Lü C J, Li Y X.Impacts of vegetation restoration and climate change on runoff and its components in the source area of the Fenhe. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11):4597-4608.

植被恢复和气候变化对汾河源区径流及其组分的影响

夏 露^{1,*},杨 晶²,马耘秀¹,宋孝玉³,秦秋雨¹,吕春娟¹,李云霄¹

1山西农业大学资源环境学院,太谷 030801

2 山西省榆次区气象局,榆次 030600

3 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

摘要:近年来,黄河中游许多流域径流量呈现减少的趋势,这与区域大规模的植被恢复密切相关。但是,汾河源区径流量却呈现 了增加的相反趋势,有关变化环境对该区域径流及其组分的影响机制尚不明晰。因此,研究选取汾河源区北石河流域为研究区 域,利用9种数值模拟法对1962—2018年河川径流进行分割并分析其适用性,采用 Mann-Kendall 检验法和累积距平法对径流、 地表径流及基流进行了趋势分析和突变检验,评价了植被恢复和气候变化对径流及其组分的影响。结果表明:(1)在9种数值 模拟法中,Lyne-Hollick 滤波法的估算精度相对较高,其日基流过程线能较好地反映基流的滞后性和稳定性,因此更适用于研究 区的基流估算;(2)流域多年平均径流深、地表径流深、基流深和基流指数分别为181.2 mm、67.4 mm、113.8 mm 和 0.68,基流是 径流的主要组成部分。流域年径流和年地表径流均呈现不显著的增加趋势,而年基流呈现显著的增加趋势,基流的增加是径流 变化的主要直接原因,三者的突变时间均出现在1994年左右;(3)降水的变化引起了径流、地表径流及基流的增加,降水增加是 径流变化的主导因素(贡献率为78.1%—79.4%),而植被恢复引起了径流和基流的增加的降水人渗量更多地形成了基流,植被 恢复的基流增加效应超过了地表径流减少效应,从而最终增加了径流总量。研究结果可为汾河源区植被合理恢复及水资源可 持续利用提供科学依据。

关键词:径流组分;基流分割;植被恢复;归因分析;汾河源区

Impacts of vegetation restoration and climate change on runoff and its components in the source area of the Fenhe

XIA Lu^{1,*}, YANG Jing², MA Yunxiu¹, SONG Xiaoyu³, QIN Qiuyu¹, LÜ Chunjuan¹, LI Yunxiao¹

1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2 Yuci Meteorological Bureau, Yuci 030600, China

3 State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: In recent decades, large-scale vegetation restoration has been carried out in the middle reaches of the Yellow River, which is a significant factor leading to the reduction of runoff in many watersheds. Since 1988, the source area of the Fenhe has continuously carried out three phases of comprehensive soil and water conservation management, and the forest vegetation coverage in this area has significantly increased. However, the runoff in the Fenhe source area has shown an opposite increasing trend. The impact mechanism of changing environment on runoff and its components in the area is not yet clear. Beishihe is an important tributary of the Fenhe source area, and the runoff change in this watershed is mainly caused by the impacts of vegetation restoration and climate change. Therefore, this study selected the Beishihe watershed as the study

收稿日期:2023-08-16; 网络出版日期:2024-03-18

基金项目:山西省基础研究计划面上基金项目(202303021211107);山西省水利科学技术研究与推广项目(2022GM040)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xialuxiaochen@ 163.com

area, and used 9 numerical simulation methods to separate the baseflow from 1962 to 2018. The trend of runoff, surface runoff and baseflow and their mutation years were analyzed using the Mann Kendall test and cumulative anomaly method. The impacts of vegetation restoration and climate change on runoff and its components were evaluated by the double cumulative curve method, regression analysis method, and elastic coefficient method. Results show that: (1) among the nine numerical simulation methods, the Lyne-Hollick filtering method had relatively higher estimation accuracy, and its daily baseflow process line could better reflect the hysteresis and stability of the baseflow. Thus, it was more suitable for baseflow estimation in the study area. (2) The average annual runoff depth, surface runoff depth, baseflow depth, and baseflow index of the watershed were 181.2 mm, 67.4 mm, 113.8 mm, and 0.68, respectively, which indicated the baseflow was the main component of runoff. The annual runoff and annual surface runoff showed an insignificantly increasing trend, while the annual baseflow showed a significantly increasing trend. The increase of baseflow was the main direct cause of runoff change. In addition, the results of mutation test showed that the abrupt changes in annual runoff and its components all occurred around 1994. (3) The precipitation change led to an increase in runoff, surface runoff, and baseflow, which played a key role on runoff change (the contribution rate was 78.1%-79.4%). Vegetation restoration led to an increase in runoff and baseflow, as well as a decrease in surface runoff. The main reason is that vegetation restoration could promote precipitation infiltration, thereby reducing surface runoff. At the same time, the soil and landform conditions of the Beishihe watershed made the increased precipitation infiltration more likely to form baseflow. The increase in baseflow caused by vegetation restoration exceeded the decrease in surface runoff caused by vegetation restoration, ultimately increasing the total amount of runoff. The study can provide scientific basis for the reasonable restoration of vegetation and sustainable utilization of water resources in the source area of the Fenhe.

Key Words: runoff components; baseflow separation; vegetation restoration; attribution analysis; Fenhe source

黄土高原地区土壤侵蚀严重,生态环境脆弱,植被建设已成为区域生态治理的重要手段。自1999年国家实施退耕还林(草)政策以来,黄土高原已成为我国植被覆盖增加最为明显的地区之一,植被覆盖度已由1999年的32%增加到2018年的63%,植被"变绿"趋势尤为明显^[1-3]。大规模的植被恢复改善了当地生态环境质量,也在一定程度上地控制了土壤侵蚀问题,使入黄河泥沙量大幅度减少^[4-5]。然而,黄土高原各大小支流在输沙量大幅度减少的同时,也普遍出现了径流量明显减少的现象,例如与历史时期(1960—2000年)相比,2001—2014年河龙(河口镇-龙门)区间、汾河和渭河的年平均径流量分别减少了为56.4%、57.5%和24.1%^[6]。不少研究表明,黄土高原的植被建设和气候变化深刻地影响了区域的径流过程^[7-10],而径流的变化对于流域水资源开发利用与管理有着至关重要的作用。因此,正确揭示径流过程对植被和气候变化的的响应规律,是现阶段黄土高原生态建设成果保护和流域水安全保障的现实需要。

目前,有关气候变化对径流的影响主要集中在探究气候要素包括降水、气温、潜在蒸散发、二氧化碳浓度等的改变对径流的影响上,不同气候要素对径流的影响效应已达到一定的共识^[11-12]。黄土高原在过去 60 年内大部分流域降水量呈现降低的趋势,这直接导致流域径流量的减少;潜在蒸散发增加和降低的流域约各占一半,但非汛期的潜在蒸散发在绝大部分流域均显著增加,这使得潜在蒸散发对非汛期径流降低的作用明显^[13]。与此同时,大规模的人类活动,包括水利工程、人类取用水、煤炭开采和植被恢复等,对黄土高原径流过程也产生了重要的影响,但是有关植被变化对径流的影响却出现了植被会减少、增加或不影响径流三种截然不同的结论^[14-17]。 植被通过自身生理特征影响人渗、蒸散发等径流形成过程,改变径流运动路径,调节径流组分^[17-18]。从径流形成过程上来说,植被对径流的影响实际上是对各径流组分的影响作用,笼统说植被变化对径流的影响,不仅难以揭示植被与径流的关系,更有可能掩盖其真实的作用机制。因此,从径流组分入手,通过识别植被变化对各径流

汾河源区是山西省重要的水源涵养地和生态恢复区,从1988年开始,区域持续开展了三期的水土保持综合

治理,森林植被覆盖度明显提高,土壤侵蚀程度有效降低,但同时对区域的径流量也产生了一定的影响。黄河中游地区植被恢复通常会减少流域的产流量^[19],但是通过对汾河源区北石河流域1962—2018 年径流深进行初步分析,流域年径流深呈现增加趋势,那么植被恢复对该流域径流产生了怎样的影响?这种径流效应到底是如何造成的?不同径流成分又发生了怎样的变化?这是亟待回答的科学问题,同时对于区域植被恢复建设也具重要的指导意义。因此,本文以汾河源区北石河流域为研究区域,分析流域多年径流、植被和气候变化特征,明晰径流组分构成及其变化规律,阐明植被恢复和气候变化对径流及其组分的影响机制,研究结果有望为汾河源区生态恢复和水资源可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

北石河流域地处山西省宁武县涔山乡,位于东经111°56′12″—112°1′56″,北纬38°50′39″—38°53′46″,是汾河 源头从西北方向发源的一条重要支沟,与源自东北方向的涔山沟和源自正西方向的大庙沟一起构成了汾河源区 水系。流域总面积为31.95 km²,海拔高度为1182—2798 m(图1),干流河长8 km,平均纵坡4.72%,流域平均宽 度4 km。该区属温带大陆性气候,多年平均降水量为666.0 mm,主要集中在6—9月份(占全年降水量的 70.5%),年平均气温为5.9℃。北石河流域出口断面控制站为岔上水文站,设立于1958年8月1日,控制面积为 31.70 km²。

该流域属于典型的黄土高原土石山区,地质条件属石灰岩,土壤类型主要为棕壤,土壤稀薄,土层厚度一般 为 30—100 cm。在 20 世纪 80 年代前,流域分布有小面积的天然林,森林覆盖率较低,自 1988 年开始,汾河源区 持续开展了三期的水土保持综合治理,流域森林植被覆盖度明显提高,目前森林植被覆盖度达到了 70%以上,主 要林分为云杉和华北落叶松。此外,整个流域内其他人类活动影响较小,径流的变化主要是由植被恢复和气候 变化的影响所造成的。综上可见,北石河流域为研究汾河源区植被恢复和气候变化对径流的影响提供了得天独 厚的研究场所。



Fig.1 Geographical location of the Beishihe watershed and hydrological stations in the watershed

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

(1)水文资料:径流数据采用北石河流域出口控制站——岔上水文站 1962—2018 年实测逐日径流资料;降 水数据采用流域内1个长期观测的雨量站(宋家崖)和岔上水文站 1962—2018 年实测逐日降水资料,流域面降 水量采用泰森多边形法求得。

(2)气象资料:采用靠近流域的五寨国家气象观测站 1962—2018 年的逐日气象资料,并利用 Penman-

(3) 植被资料:利用 NDVI 指标表征流域植被覆盖情况, NDVI 数据来源于中国 30 m 逐年 NDVI 最大值数据 集(http://www.resdc.cn), 它是基于 Google Earth Engine(GEE) 遥感云计算平台并利用美国陆地卫星 Landsat 5/8 遥感影像计算的,数据年限为 1986 年至今, 空间分辨率为 30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 径流组分的计算

本研究中将总径流分为地表径流和基流两种径流组分,先通过基流分割计算出基流,再利用总径流减去基流得到地表径流。采用数字滤波法(Lyne-Hollick、Chapman、Chapman-Maxwell和Boughton-Chapman滤波法)、平滑最小值法(标准平滑最小值法BFI(f)和改进平滑最小值法BFI(k))、时间步长法(固定步长法FI、滑动步长法SI和局部最小值法LM)共3类9种数值模拟法^[21]对河川基流进行分割,同时采用枯水指数法^[22]来近似估计实际基流,将基流分割估算结果与实际年基流进行对比,并利用纳什效率系数(NSE)和平均绝对相对误差(*R_e*)来评价不同数值模拟法的合理性。

2.2.2 水文气象变化趋势及突变分析

本研究利用 Mann-Kendall 检验法对水文气象要素进行变化趋势及突变检验,同时采用累积距平法对 Mann-Kendall 法突变检验的结果进行验证,从而提高识别突变点位置的准确性。由于两种方法在水文研究中已被广泛使用,因此相关方法原理并不在此详述,具体方法介绍见相关文献^[23-24]。

2.2.3 植被恢复和气候变化对径流及其组分的定量影响

常用的径流归因方法包括水文统计法、弹性系数法、水文模型法等,虽然不同方法计算过程有所差异,但是 其总体思路基本一致:先通过突变检验将整个径流序列划分为基准期(人类活动干扰较小)和变化期(人类活动 干扰较大)两个时期,然后利用各种方法计算气候变化和人类活动对径流变化的贡献率^[25]。由于北石河流域内 其他人类活动影响较小,人类活动的影响主要体现在植被恢复上,可以认为流域径流的变化主要是由植被恢复 和气候变化的影响所造成的。

本研究最终选用应用广泛、结果较为可靠的双累积曲线法、回归分析法和弹性系数法这3种方法进行径流 归因计算,将不同方法进行对比分析,降低评价结果的不确定性,3种方法的计算原理如下:

(1) 双累积曲线法。先统计历年的累积降水量和累积径流深(累积地表径流深、累积基流深),建立起基准期 的累积降水量与累积径流深(累积地表径流深、累积基流深)之间的线性回归方程,然后将变化期的累积降水量 值代入方程中,计算出还原后的累积径流深(累积地表径流深、累积基流深),再与基准期进行比较,即可求出气 候变化对径流(地表径流、基流)变化的贡献率,最终推求出植被恢复对径流(地表径流、基流)变化的贡献率^[26]。

(2)回归分析法。先建立起基准期的降水量—径流深(地表径流深、基流深)最优回归方程,之后的计算步骤与双累计曲线法大致相同^[26]。

(3)弹性系数法。该方法是基于 Budyko 水热耦合平衡理论进行径流变化归因的一种方法^[26],本研究利用 傅抱璞解析表达式来计算降雨、潜在蒸散发和下垫面的径流弹性系数,从而量化径流变化的贡献率。对于径流 内部组分,本研究采用最小二乘法估算径流组分的气候弹性系数^[27],以基流为例,计算基流的降水和潜在蒸散发 弹性系数 ε_p 和 ε_{ετo}:

$$\varepsilon_P = \frac{\rho_{BP} C_B}{C_P} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{\rho_{BP} C_B}{C_P} \tag{2}$$

式中: ρ_{BP} 为年基流深和年降水量之间的相关系数; C_{B} 和 C_{p} 分别为年基流深和年降水量的变异系数。

在此基础上,计算降水和潜在蒸散发引起的基流深变化量 ΔB_P 和 ΔB_{ET_o} :

$$\Delta B_P = \varepsilon_P \frac{B}{P} \Delta P \tag{3}$$

式中:B、P和 ET_0 分别为多年平均基流深、降水量和潜在蒸散发量(mm); ΔP 和 ΔET_0 分别为变化期相较于基准期的多年平均降水量之差和多年平均潜在蒸散发量之差(mm)。

最后,再利用基流深总变化量减去 $\Delta B_p = \Delta B_{ET_0}$ 之和,即可求得植被恢复引起的基流深变化量,从而推求出 各驱动因素的贡献率。同理,也可以推求出地表径流变化的贡献率结果。

3 结果与分析

3.1 基流分割方法适宜性分析

将9种基流分割方法和枯水指数法的计算结果进行对比,其评价结果见表1。当枯水指数采用 Q_{90}/Q_{50} 时, 计算出来的多年平均基流指数基流深与径流深之比(BFI)值为0.58,该值与大部分基流分割方法的结果差异较 大,除了 Chapman 和 Chapman-Maxwell 滤波法的值低于0.58之外,其他7种方法的BFI均值在0.66—0.89之间, 明显高于枯水指数法的计算结果。另外,在该枯水指数下,所有方法的NSE都低于0.5, R_e 也均超过了30%,特别 是除了 Chapman 和 Chapman-Maxwell 滤波法之外的其他7种方法,评价效果非常不理想,与枯水指数法的计算结 果差异很大。当枯水指数采用 Q_{75}/Q_{50} 时,枯水指数法与9种基流分割方法计算出的年均BFI值相对吻合,评价 效果也有所提升,这说明对于汾河源区枯水指数采用 Q_{75}/Q_{50} 比 Q_{90}/Q_{50} 更为合适,可能是因为研究区河川径流中 基流的占比较大, Q_{75} 比 Q_{90} 更能代表基流的补给程度。在该枯水指数下,Lyne-Hollick 滤波法、Boughton-Chapman 滤波法、标准平滑最小值法、改进平滑最小值法和局部最小值法的估算精度较高,其中,Lyne-Hollick 滤波法的估 算精度最优。

		Table 1 Baseflo	w index esti	imated by dif	ferent separ	ating method	s and their ev	aluation res	sults	
			数字	滤波法		平滑最	小值法		时间步长法	
枯水指数	指标		Digital fil	ter method		Minimum smo	oothing method	Hydro	ograph separation	1 program
Low flow index	Index	Lyne-Hollick	Chapman	Chapman- Maxwell	Boughton- Chapman	标准法	改进法	固定 步长法	滑动 步长法	局部最 小值法
Q90/Q50	BFI	0.68	0.50	0.50	0.66	0.73	0.75	0.89	0.88	0.81
BFI=0.58	NSE	0.39	0.49	0.49	-0.06	0.04	-0.08	-1.76	-1.72	-0.65
	R_{e}	0.31	0.30	0.30	0.34	0.41	0.44	0.68	0.68	0.52
Q75/Q50	BFI	0.68	0.50	0.50	0.66	0.73	0.75	0.89	0.88	0.81
BFI=0.70	NSE	0.76	0.58	0.58	0.67	0.68	0.65	0.04	0.05	0.50
	R.	0.15	0.30	0.30	0.20	0.19	0.21	0.35	0.34	0.24

表 1 不同基流分割方法的基流指数值及评价结果

BFI:基流指数 Base flow index; NSE: 纳什效率系数 Nash efficiency coefficient; Re: 相对误差 Relative error; Q 50, Q 75和 Q 50分别表示频率为 50%、75%和 95%的日流量值

基于9种基流分割方法,计算得到北石河流域降水丰平枯水年的基流指数,结果见表2。一般来说,年降水量越大,河川径流中来自于地表径流的占比也应该越大,亦即BFI值越小,反之在降水较枯的年份,其河川径流应更多的受基流补给,其BFI值应越大,因此不同来水年BFI值排序应为:丰水年<平水年<枯水年。Chapman、Chapman-Maxwell和Boughton-Chapman滤波法在不同来水年的BFI值差异很小,没有体现出降水丰枯程度对径流组分的影响,而其余6种方法能较好地反映出这一差异。

为了进一步分析不同基流分割方法在汾河源区的适用性,本研究以频率为50%的平水年—1992年为研究对象,绘制并对比9种方法分割的日基流过程(图2)。由于基流受包气带和饱和带的调蓄作用,日基流变化过程相对于日径流变化过程应显现出一定的滞后性和稳定性。总体来看,不同方法分割得到的基流过程线差异较大。在4种数字滤波法中,Chapman、Chapman-Maxwell和Boughton-Chapman滤波法日基流过程线与日径流曲线表现出较高的同步性,且拐点较多,不符合基流的滞后性和稳定性,而Lyne-Hollick法的日基流过程线较为平滑,基流的峰值点也都滞后于相应的径流峰值点,另外在枯水期其基流占比相对其他3种滤波方法更高一些,与实际情

况更加相符。两种平滑最小值法的基流分割结果几乎一致,虽然在枯水期能较好地放映基流是河川径流的主要 组成部分这一特性,但是在丰水期其涨水过程过快,且整体不够平滑。3种时间步长法的基流分割过程线陡涨陡 落,且在丰水期其基流占比过大,不符合基流的变化特性。

表 2 不同基流分割方法在不同降水水平年下的基流指数值

	Table 2	Baseflow inde	ex values est	timated by di	ifferent sepa	rating metho	ds under diffe	rent level ye	ears	
水平年 Level year	14 1.日	数字滤波法				平滑最小值法 Minimum smoothing method		时间步长法 HYSEP method		
	降水量 Precipitation/ mm		Digital filter method							
		Lyne-Hollick	Chapman	Chapman- Maxwell	Boughton- Chapman	标准法	改进法	固定 步长法	滑动 步长法	局部最 小值法
丰水年 Wet year	810.2	0.62	0.50	0.50	0.66	0.67	0.68	0.86	0.86	0.77
平水年 Normal year	670.9	0.64	0.49	0.50	0.66	0.69	0.72	0.88	0.88	0.81
枯水年 Dry year	518.3	0.77	0.50	0.50	0.66	0.83	0.86	0.92	0.91	0.84

—— 日径流 ----- 日基流 1.2 1.2 1.2 Lyne-Hollick法 Chapman法 Chapman-Maxwell法 0.9 0.9 0.9 0.6 0.6 0.6 03 03 0.3 0 0 0 04-01 01-01 07-01 10-01 12-30 01-01 04-01 07-01 10-01 12-30 01-01 04-01 07-01 10-01 12-30 1.2 1.2 1.2 流量 Discharge/(m³/s) Boughton-Chapman法 标准平滑最小值法 改进平滑最小值法 0.9 0.9 0.9 0.6 0.6 0.6 0.3 0.3 0.3 0 0 0 01-01 04-01 07-01 10-01 12-30 01-01 04-01 07-01 10-01 12-30 01-01 04-01 07-01 10-01 12 - 301.2 1.2 1.2 固定步长法 滑动步长法 局部最小值法 0.9 0.9 0.9 0.6 0.6 0.6 0.3 0.3 0.3 04-01 01-01 07-01 10-01 12-30 01-01 04-01 07-01 10-01 12-30 01-01 04-01 07-01 10-01 12 - 30时间 Time (月-日)

图 2 不同基流分割方法的 1992 年日流量和日基流量过程线

Fig.2 Daily flow and baseflow processes in 1992 estimated by 9 baseflow separating methods

综合枯水指数法、丰平枯水年基流指数与日基流过程线结果,本研究认为 Lyne-Hollick 法是9种基流分割方法中最为可靠和合理的方法,在后文中也是采用 Lyne-Hollick 法的计算结果分析北石河流域的基流变化规律。 3.2 径流及其组分年际变化规律

根据流域 1962—2018 年径流及其组分统计结果(图 3),流域多年平均径流深、地表径流深和基流深分别为 181.2 mm、67.4 mm 和 113.8 mm,可见基流是河川径流中的主要组成部分,其贡献占比达到了 62.8%。在整个研 究期间,流域径流深、地表径流深和基流深均呈现出上升的趋势,三者的变化过程也较为一致,径流深越大的年 份,地表径流深和基流深也越大,基流在年际尺度上并未表现出时间上的滞后性。通过计算三者的年际变异系 数,发现地表径流深的变异系数值(0.92)最大,基流深的变异系数值(0.49)最小,而径流深的变异系数值(0.63) 位于这两者之间,可见,地表径流的年际变化最剧烈,基流的年际变化最稳定,符合径流组分的变化特性。流域 多年平均 BFI 值为 0.68,年 BFI 值在 0.44—0.90 之间浮动,整体表现出较为明显的上升趋势,这意味着在研究区 降水更多的转化成了基流,而地表径流在河川径流中的占比逐渐降低。









图 4 北石河流域径流及其组分 M-K 检验结果

Fig.4 Results of M-K test for annual runoff and its components in the Beishihe watershed

M-K:Mann-Kendall;UF:顺时序统计量序列曲线 Forward curve of the test statistic; UB:逆时序统计量序列曲线 Backward curve of the test statistic; α 代表显著性水平

径流及其组分的 M-K 检验结果见图 4。流域多年径流深、地表径流深、基流深和 BFI 的 M-K 检验统计量值 分别为 1.56、0.21、2.52 和 2.08,这表明北石河流域年径流和年地表径流均呈现不显著的增加趋势,而年基流和 BFI 呈现显著的增加趋势。M-K 突变检验结果表明,年径流深 UF 线(顺时序统计量序列曲线)和 UB 线(逆时序 统计量序列曲线)在 1994 年、1998 年、2002 年、2013 年和 2016 年附近有交点,年地表径流深 UF 和 UB 线在 1964 年、1967 年、1971 年、1995 年、2007 年和 2014 年附近有交点,年基流深 UF 和 UB 线在 1995 年和 2003 年附近有交 点。由于 M-K 法检测出的突变点较多,本研究采用累计距平法进一步验证突变结果,结果表明年径流深、地表径 流深、基流深可能分别于 1993 年、1994 年和 1993 年附近发生了突变,因此,综合两种突变检验方法计算结果,可 以认为流域年径流、年地表径流和年基流的突变年份非常接近,均于 1994 年附近发生了突变。

基于突变分析结果,将径流序列分为两个时段:基准期(1962—1993年)和变化期(1994—2018年),分析不同时段径流组分的演变程度及贡献占比,结果见表3。北石河流域基准期多年平均径流深为152.2 mm,而变化期多年平均径流深为218.3 mm,增加了66.2 mm,从径流组分变化上来看,地表径流深增加了18.7 mm,基流深增加了47.5 mm,可见基流的增加是径流变化的主要直接原因。从径流组分的贡献占比上来看,无论是基准期还是变化期,基流一直是该流域径流的主要组成部分(占比60%以上),且变化期贡献占比相较于基准期有所提高。

Table 3 Statistical values of runoff and its components in the Beishihe watershed during the base and change periods								
时期	径流深	地表径流深 Su	urface runoff depth	基流深 Baseflow depth				
Period	Runoff depth/mm	值 Value/mm	比例 Proportion/%	值 Value/mm	比例 Proportion/%			
基准期 Base period	152.2	59.2	38.9	92.9	61.1			
变化期 Change period	218.3	77.9	35.7	140.4	64.3			
时期变化值 Variation value	66.2	18.7	_	47.5	_			

表 3 北石河流域径流及其组分在基准期和变化期的统计特征值

3.4 植被恢复和气候变化对径流及其组分的影响

根据流域 1962—2018 年气象和植被要素统计结果(表 4),流域多年平均降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 分 别为 666.0 mm、931.2 mm 和 0.62,其中,年降水量和年 NDVI 值呈现出显著的增加趋势,两者的突变时间分别出 现在 1993 年和 2011 年,而年潜在蒸散发量呈现出呈现不显著的减少趋势,其突变时间可能在 1980 年附近。流 域降水量的增加和潜在蒸散发的减少对于径流的增加应该起到了一定的促进作用,特别是降水量,其显著的增 加趋势及突变时间与径流突变时间的高度一致,表明降水可能是流域径流变化的重要驱动因素;而流域 NDVI 的 显著增加对于径流变化的影响究竟是正是负还有待进一步的探究。

Table 4	I renu analysis and mutation test result	s of annual pr	ecipitation, EI_0 and NDVI in the Bes	shine watershed	
			Mann-Kendall 统计检验	累计距平法	
影响因素	多年平均值		Mann-Kendall test	Cumulative anomaly method	
Impact factor	Annual average value	统计量	突变年份	突变年份	
		Statistics	Mutation point	Mutation point	
降水量 Precipitation/mn	n 666.0	2.30*	1993年、2005年	1993 年	
潜在蒸散发量 ET ₀ /mm	931.2	-1.46NS	1979 年	1981 年	
NDVI	0.62	2.727 **	2012 年	2011 年	

表 4	北石河流域年降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 趋势分析及突变检验结果

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; ET₀:潜在蒸散发量 Potential evapotranspiration; NS:不显著 Not significant; * 表示 P< 0.05; * * 表示 P<0.01

将降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 这三个指标与径流及其组分进行相关性分析(表 5),结果表明:降水量与 径流深、地表径流深和基流深的相关性均最大(*R* 均超过了 0.8),且呈显著正相关,这说明降水应该是影响径流 及其组分变化的主导因素;潜在蒸散发量与径流及其组分的相关性次之,但是均呈现出显著负相关关系,这说明 流域潜在蒸散发的减少对于径流及其组分的变化应该起到了重要的驱动作用;NDVI 与径流及其组分的相关性 很弱,与径流深、地表径流深和基流深的相关系数仅分别为0.059,0.011和0.116,但是却都呈现正相关关系,这表明 NDVI 的增加对于径流的变化可能起到了一定的正效应作用。

Table 5 Correlation analysis between runoff and its components and influencing factors in the Beishihe watershed						
	降水量 Precipitation		潜在蒸散发量 ET ₀		NDVI	
径流组分 Runoff elements	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance
径流深 Runoff depth	0.857	* *	-0.431	* *	0.059	NS
地表径流深 Surface runoff depth	0.807	* *	-0.364	* *	0.011	NS
基流深 Baseflow depth	0.849	* *	-0.473	* *	0.116	NS

表 5 北石河流域径流及其组分与影响因素的相关分析结果

为了更深入的揭示驱动因素对径流变化的定量影响,采用3种方法分别计算径流变化的归因结果(表6)。 根据双累计曲线法评价结果,流域降水变化和植被变化对径流变化的贡献率分别为27.9%和72.1%,对地表径流 变化的贡献率分别为45.1%和54.9%,对基流变化的贡献率分别为20.9%和79.1%;根据线性回归法评价结果,流 域降水变化和植被变化对径流变化的贡献率分别为78.1%和21.9%,对地表径流变化的贡献率分别为151.9%和 -51.9%,对基流变化的贡献率分别为49.4%和50.6%;根据弹性系数法评价结果,流域降水变化、潜在蒸散发变化 及植被变化对径流变化的贡献率分别为79.4%、5.3%和15.4%,对地表径流变化的贡献率分别为182.0%、34.6% 和-116.6%,对基流变化的贡献率分别为65.0%、12.3%和22.7%。不同方法的计算结果差异较大;从径流深变化 归因上来看,线性回归法和弹性系数法的计算结果较为接近,降水是径流变化的主导因素,植被是次要因素,但 是双累积曲线法的计算结果刚好相反;从地表径流深变化归因上来看,线性回归法和弹性系数法的计算结果相 对接近,降水的增加对于地表径流的增加起到了决定性作用,植被变化却引起了地表径流的减少,而双累积曲线 法的结果表明降水和植被变化均导致了地表径流的增加,且贡献率相近;从基流深变化归因上来看,三种方法的 计算结果相差较大,但是存在一个共同的结论,即两者的变化均促使了基流的增加。

Table 6 Attributions of variations of runoff and its components in the Beishihe watershed 双累积曲线法 线性回归法 弹性系数法 Double cumulative Regression analysis Elastic coefficient method 径流要素 curve method method **Bunoff** elements 降水 潜在蒸散发 植被 隆水 植被 隆水 植被 Precipitation Vegetation Precipitation Vegetation Precipitation ET_0 Vegetation 径流深 Runoff depth 27.9 72.1 78.1 21.9 79.4 5.3 15.4 地表径流深 Surface runoff depth 45.1 54.9 151.9 -51.9 182.0 34.6 -116.6 基流深 Baseflow depth 20.9 79.1 49.4 65.0 12.3 22.7 50.6

表 6 北石河流域径流及其组分变化的归因分析结果

4 讨论

本研究采用了 9 种数值模拟方法计算了北石河流域的河川基流,结果表明,Lyne-Hollick 法的估算精度相对 较高,其日基流过程线能较好地反映基流的滞后性和稳定性,在年际尺度上也能体现出降水丰枯程度对径流组 分的影响,因此该方法相较于其他 8 种方法具有更高的可靠性,这与黄河中游相关基流分割研究所得出的结论 较为一致^[21, 28-29],说明 Lyne-Hollick 法对于黄河中游地区基流的分割具有较好的适宜性。另外,本研究还发现 在利用枯水指数法估算年基流时,枯水指数采用 Q₇₅/Q₅₀比 Q₉₀/Q₅₀更为合适。枯水指数法的提出是源自于 Smakhtin 于 2001 年在 Journal of Hydrology 上发表的一篇综述性文献^[22],该文中指出可以用 Q₉₀/Q₅₀这个指标来 预测在河川径流中源自地下水的比例,这应该是多数研究直接采用该指标估算年基流的原因,但是文中同样也 指出 Q₇₅和 Q₉₅也是非常广泛地被用来表征低水流量的指标,因此枯水指数不应局限于 Q₉₀/Q₅₀这一指标,对于基 流占比较大的河流,采用 Q₇₅/Q₅₀比 Q₉₀/Q₅₀更能体现基流在河川径流中的重要构成,同时这也表明枯水指数法的 结果只能作为一种参考,在验证基流分割结果合理性时需综合考虑日基流过程线、流域下垫面条件等方面来 评判。

基于 Lyne-Hollick 法得到北石河流域多年平均 BFI 值为 0.68,该值高于黄河流域 BFI 均值 0.44^[30],另外与黄 河中游多数流域 BFI 值相比结果也偏大(表7)。不同流域的 BFI 值差异较大,其大小受到了流域水热条件、地形 地貌、土壤、植被和人类活动等多方面的综合影响。从表7 可以看出:风沙滩地区的 BFI 值要明显高于其他地貌 类型,这可能是因为风沙滩地区地势较平缓,地表多为风积沙,透水性较强,地下水埋深也相对较浅,因此降水会 更多地通过入渗形成地下径流,最终补给河道;土石山区、石质山区的 BFI 值也相对高于黄土丘陵沟壑区,例如 伊洛河、三川河、汾河和昕水河流域内有部分面积的土石山区或石质山区,流域 BFI 值在 0.49—0.70 之间浮动,本 研究推求出同为土石山区的北石河流域 BFI 值为 0.68,在该范围之内,也验证了本研究基流分割结果的合理性。 北石河流域作为土石山区的典型流域,其土层浅薄,一般为 30—100 mm,同时在森林植被的影响下其土壤渗透性 会增强,因此降水进入土壤后更容易发生饱和,并在相对不透水的岩石界面作用下,形成更多的地下径流,从而 补给河道。因此,可以认为北石河流域在土壤条件(土层较薄)、地貌条件(土石山区)和植被条件(森林覆盖率 高)的共同影响下,导致流域基流指数相对较高。

Table 7 Research results on BFI value in some watersheds of the middle reaches of the Yellow River								
引用文献 References	研究区 Study area	研究时段 Study period	主要地貌类型 Main landform type	BFI				
[29]	窟野河	1956—2012 年	上游为风沙地貌,中下游为盖沙丘陵和 黄土丘陵沟壑地貌	不同分割方法在 0.33—0.42 之间				
[31]	北洛河上游	1959—2011年	黄土丘陵沟壑区	不同水文站在 0.348—0.466 之间				
[32]	黑木头川、小理河、 大理河、清凉寺沟、 清涧河、佳芦河	1959—2006年	黄土丘陵沟壑区	不同流域在 0.38— 0.57 之间				
[33]	延河	1953—2015年	黄土丘陵沟壑区为主	不同分割方法在 0. 27—0. 45 之间				
[34]	渭河中下游	1950—2010年	黄土高塬沟壑区、河谷平原区、丘陵沟 壑区	不同水文站在 0.35—0.54 之间				
[35]	白马河(汾河中游)	1956—2012 年	山地丘陵区为主	0.435				
	松塔河(汾河中游)			0.459				
[36]	无定河风沙滩区	1954—2018年	风沙滩地区	0.71				
[37]	孤山川	1956—2010年	黄土丘陵沟壑区	0.133				
	岔巴沟	1971—2010年	黄土丘陵沟壑区	0.323				
	秃尾河风沙滩区	1967—2010年	风沙滩地区	0.688				
[38]	皇甫川	1956—2015年	黄土丘陵沟壑区	0.12				
	大理河	1960—2015年	黄土丘陵沟壑区	0.55				
	海流兔河	1957—2015年	风沙滩地区	0.79				
[27]	孤山川	1961—2014年	黄土丘陵沟壑区	0.31				
	窟野河		上游为风沙地貌,中下游为盖沙丘陵和 黄土丘陵沟壑地貌	0.42				
	秃尾河		风沙滩区、黄土丘陵沟壑区	0.73				
	无定河		风沙滩区、黄土丘陵沟壑区	0.61				
	清涧河		黄土丘陵沟壑区	0.43				
	延河		黄土丘陵沟壑区为主	0.42				
	伊洛河		土石山区、丘陵区、河谷平原区	0.58				
	湫水河		黄土丘陵沟壑区	0.33				
	三川河		上游为石质山区,中下游为黄土丘陵沟 壑区	0.70				
	汾河		河谷平原区、土石山区、丘陵沟壑区	0.55				
	昕水河		上游为石质山区,中、下游为黄土残塬沟 壑区	0.49				

表 7 黄河中游部分流域 BFI 值研究成果

本研究发现北石河流域年径流深、年地表径流深均呈现不显著的增加趋势,年基流呈现显著的增加趋势。 根据径流变化归因分析,线性回归法和弹性系数法的结果表明降水是径流变化的主导因素(贡献率为 78.1%和 79.4%),植被是次要驱动因素,但是双累积曲线法的计算结果表明植被变化对于径流深的增加起到了决定性作 用(贡献率为 72.1%),考虑到径流的突变时间与降水突变时间一致这一依据,本研究更倾向于认为降水是径流 变化的主要驱动因素,不过无论哪种归因方法,都说明植被恢复对于径流的增加起到了正向促进作用,这与黄河 中游黄土沟壑区植被恢复通常会减少径流量的研究结论^[19]相反,其主要原因可能在于北石河流域的土壤和地貌 条件使植被恢复增加的降水入渗量能够超过植被恢复引起的蒸散发增加量,最终导致降水入渗量更多地形成了 基流,从而增加了河川径流。根据地表径流变化归因分析,线性回归法和弹性系数法的结果表明植被变化导致 了地表径流的减少,而双累积曲线法的结果表明植被变化引起了地表径流的增加,考虑到森林植被能够促进降 水入渗,本研究更倾向于认为植被恢复会引起地表径流的减少。在基流深变化归因上,三种方法的计算结果相 差较大,但是均表明降水和植被变化引起了基流的增加。

综上所述,北石河流域降水的增加是径流增加的主要驱动因素,降水变化引起了径流、地表径流及基流的增 加,而植被恢复引起了径流和基流的增加以及地表径流的减少,流域植被恢复的径流增加效应主要是由基流的 增加所导致的。目前有关植被恢复对径流(或基流)的影响均出现了造林会减少、增加或不影响径流(或基流)三 种截然不同的结论[8],看似互相矛盾,实则有迹可循。以黄土高原土石山区和黄土高塬沟壑区为例:在本研究选 取的土石山区,植被恢复一方面会引起地表径流的减少,另一方面土石山区的土壤和地貌条件使增加的降水入 渗量更容易形成地下径流,从而补给河道基流,增加的基流量超过了减少的地表径流量,因此最终径流总量呈现 增加的趋势;而在黄土高塬沟壑区,土壤厚度可达50—200 m,地下水埋深较深,巨大的包气带厚度使得植被恢复 增加的降水入渗量还未形成地下径流便被森林植被蒸散消耗殆尽,植被恢复引起的蒸散发增加量能够基本抵消 甚至超过植被恢复增加的降水入渗量,这就导致基流量会出现小幅度增加或不变或减少的现象,而地表径流量 一般是减少的,两者的叠加效应就会导致径流总量会出现基本不变或者减少的趋势。因此,植被恢复的径流效 应并不仅仅依赖于植被的变化作用.植被恢复在不同的水热、地形地貌、土壤条件的因素综合影响下会呈现不同 的径流效应,从内在机制上来说就是植被恢复在这一系列气象和下垫面条件下通过影响蒸散和入渗来影响径流 路径,改变径流组分,从而最终影响径流总量,这也是植被与水的关系如此错综复杂的原因,径流总量最终是增 是减从根本上来说是森林增加的蒸散发与增加的入渗量之间博弈的结果,从路径上来说是地表径流和基流两种 径流组分的综合变化结果。因此,植被恢复对径流的影响并无绝对的对应关系。另外,通过对常用的3种归因 方法进行对比分析,发现不同方法的评价结果差异较大,有待于进一步开展径流变化归因的方法对比研究从而 提高评价的可靠性和合理性。

5 结论

本文以北石河流域为研究区域,分析了 1962—2018 年径流及其组分的年际变化规律,探讨了植被恢复和气候变化对径流及其组分的影响,主要结论如下:

(1)Lyne-Hollick 滤波法的估算精度相对较高,其基流分割结果比较符合实际日基流变化特征,在年际尺度 上也能体现出降水丰枯程度对径流组分的影响,因此该方法相较于其他 8 种方法在研究区具有更好的适用性。 另外,在研究区枯水指数采用 Q₇₅/Q₅₀比 Q₉₀/Q₅₀更为合适,可能是因为汾河源区河川径流中基流的占比较大,Q₇₅ 比 Q₉₀更能代表基流的补给程度。

(2)流域多年平均降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 分别为 666.0 mm、931.2 mm 和 0.62,其中,年降水量和年 NDVI 值呈现出显著的增加趋势,而年潜在蒸散发量呈现出呈现不显著的减少趋势;流域多年平均径流深、地表 径流深、基流深和 BFI 值分别为 181.2 mm、67.4 mm、113.8 mm 和 0.68,其中,年径流和年地表径流均呈现不显著 的增加趋势,而年基流和 BFI 呈现显著的增加趋势。另外,突变检验结果表明,径流及其组分的突变年份均在 1994 年附近。

(3)北石河流域降水的增加是径流增加的主要驱动因素(贡献率为78.1%—79.4%),降水变化引起了径流、 地表径流及基流的增加,而植被恢复引起了径流和基流的增加以及地表径流的减少,流域植被恢复的径流增加 效应主要是由基流的增加所导致的。

参考文献(References):

- [1] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [2] Naeem S, Zhang Y Q, Zhang X Z, Tian J, Abbas S, Luo L L, Meresa H K. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau. Science Bulletin, 2021, 66(12): 1160-1163.
- [3] 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.水科学进展,2020,31(5):725-733.
- [4] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nature Geoscience, 2016, 9: 38-41.
- [5] Yang X N, Sun W Y, Li P F, Mu X M, Gao P, Zhao G J. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities. Science of the Total Environment, 2018, 642: 591-600.
- [6] 刘晓燕,李晓宇,金双彦,郭玉涛,王富贵,罗娅,周旭,党素珍,高云飞,田勇,张丽,李小平,杨阳,杨胜天,温仲明,李晶晶,潘启民, 张楠,高亚军,胡著翱.黄河近年水沙锐减成因.北京:科学出版社,2016.
- [7] Wang S, Fu B J, Liang W, Liu Y, Wang Y F. Driving forces of changes in the water and sediment relationship in the Yellow River. Science of the Total Environment, 2017, 576: 453-461.
- [8] 孙阁,张橹,王彦辉.准确理解和量化森林水源涵养功能. 生态学报, 2023, 43(1): 9-25.
- [9] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄土高原流域水沙变化研究进展.生态学报,2020,40(1):2-9.
- [10] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8: 739-741.
- [11] 张强, 刘剑宇. 变化环境下不同时空尺度径流演变及其归因研究. 北京: 科学出版社, 2019.
- [12] Dey P, Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. Journal of Hydrology, 2017, 548: 278-290.
- [13] Wu J W, Miao C Y, Wang Y M, Duan Q Y, Zhang X M. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods. Journal of Hydrology, 2017, 545: 263-275.
- [14] 周国逸, 夏军, 周平, 施婷婷, 李琳. 不恰当的植被恢复导致水资源减少. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(2): 175-182.
- [15] 李中恺,李小雁,周沙,杨晓帆,付永硕,缪驰远,王帅,张光辉,吴秀臣,杨超,邓元红.土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展.中国科学:地球科学,2022,52(11):2105-2138.
- [16] Zhang M F, Wei X H. Deforestation, forestation, and water supply. Science, 2021, 371(6533): 990-991.
- [17] Aguilos M, Sun G, Noormets A, Domec J C, McNulty S, Gavazzi M, Minick K, Mitra B, Prajapati P, Yang Y, King J. Effects of land-use change and drought on decadal evapotranspiration and water balance of natural and managed forested wetlands along the southeastern US lower coastal plain. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 303: 108381.
- [18] 杨大文, 雷慧闼, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述. 水利学报, 2010, 41(10): 1142-1149.
- [19] Liang W, Bai D, Wang F Y, Fu B, Yan J P, Wang S, Yang Y T, Long D, Feng M Q. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. Water Resources Research, 2015, 51: 6500-6519.
- [20] Allen R, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [21] 夏露,毕如田,宋孝玉,吕春娟,马耘秀,李怀有.砚瓦川流域河川基流变化规律及其驱动因素.生态学报,2021,41(21):8430-8442.
- [22] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 147-186.
- [23] 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.干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665.
- [24] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, Gao P, Sun W Y, Li E H, Wei Y H, Huang J C. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches. Science of the Total Environment, 2018, 639: 773-784.
- [25] 黄斌斌,郝成元,李若男,郑华. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展. 自然资源学报, 2018, 33(5): 899-910.
- [26] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,张晓明,李鹏,孙倩,刘昱.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析.农业工程学报,2020,36(4):143-149.
- [27] Wu J W, Miao C Y, Duan Q Y, Lei X H, Li X Y, Li H. Dynamics and attributions of baseflow in the semiarid Loess Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(7): 3684-3701.
- [28] 吴珍妮,穆兴民,高鹏,赵广举,孙文义,田鹏.北洛河上游基流分割适宜性方法及基流特征.人民黄河,2019,41(3):94-99.
- [29] 申恋绵, 蒋晓辉, 雷宇昕. 窟野河流域河川基流变化及其驱动因素分析. 水资源研究, 2020, 9(4): 373-385.
- [30] 王雁林,王文科,钱云平,段磊,杨泽元.黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨.自然资源学报,2008,23(3):479-486.
- [31] 于艺鹏.黄土丘陵沟壑区典型流域径流及其组分变化和对植被恢复的响应[D].杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [32] 豆林,黄明斌.自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究.水土保持通报,2010,30(3):107-111,133.
- [33] 吴珍妮. 黄土区基流分割适宜性方法及基流特征分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [34] 王红. 水土保持典型措施对地下水补给生态基流的影响研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [35] 马瑞, 宋小燕, 孙文义, 雷晓平, 宋松柏. 黄土高原采矿扰动对小流域基流过程的影响. 水电能源科学, 2023, 41(1): 22-25, 21.
- [36] 农晓星, 聂卫波, 马孝义. 无定河流域风沙滩区河道基流变化规律与驱动因素分析. 水土保持学报, 2023, 37(1): 103-113.
- [37] 顾磊,张洪波,陈克宇,俞奇骏.陕北地区河川基流的时空演变规律.地球科学进展,2015,30(7):802-811.
- [38] 杨倩楠. 黄河中游不同地貌区基流变化及对生态建设的响应[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.