

DOI: 10.5846/stxb202104010845

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.

Xia L, Bi R T, Song X Y, Lü C J, Ma Y X, Li H Y. Study on the variation of baseflow and its driving factors in the Yanwachuan watershed. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8430-8442.

## 砚瓦川流域河川基流变化规律及其驱动因素

夏露<sup>1,\*</sup>, 毕如田<sup>1</sup>, 宋孝玉<sup>2</sup>, 吕春娟<sup>1</sup>, 马耘秀<sup>1</sup>, 李怀有<sup>3</sup>

1 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801

2 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

3 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站, 西峰 745000

**摘要:**基流是黄河径流的重要补给来源,目前大部分研究都集中在黄河流域径流变化规律上,而对维持河道基本流量和生态环境安全方面发挥着重要作用的基流却研究较少。因此,基于黄河中游砚瓦川流域 1981—2016 年的水文、气象及植被资料,选用 9 种数值模拟法对基流进行分割并分析其适用性,利用 Mann-Kendall 法和滑动  $t$  检验法对基流进行了趋势分析和突变点检验,并定性和定量的探讨了气候变化和植被变化对流域河川基流变化的影响。结果表明:(1)在各种基流分割方法中, Lyne-Hollick 滤波法的计算结果精度较高,且分割结果比较符合实际日基流变化规律,因此更适用于研究区的基流估算;(2)流域多年平均河川基流量和基流指数 BFI(基流量与河川流量的比值)分别为  $0.152 \text{ m}^3/\text{s}$  和 0.58,两者在年际上均呈现极显著的减少趋势 ( $P < 0.01$ ),且分别于 1993 年和 2006 年附近发生了突变;(3)基流量与潜在蒸散发量相关性最强,流域降水量、潜在蒸散发量及 NDVI 的变化对基流量变化的贡献率分别为 -99.1%、113.3% 和 85.8%,可见潜在蒸散发量和 NDVI 的增加是引起基流量减少的主要原因,而基流指数与 NDVI 相关性最强,且呈负相关关系,流域降水量、潜在蒸散发量及 NDVI 的变化对基流指数变化的贡献率分别为 41.3%、-27.7% 和 86.5%,这说明流域 NDVI 的增加对流域基流指数的降低起到了主导作用。

**关键词:**基流;数值模拟法;驱动因素;植被变化;气候变化

## Study on the variation of baseflow and its driving factors in the Yanwachuan watershed

XIA Lu<sup>1,\*</sup>, BI Rutian<sup>1</sup>, SONG Xiaoyu<sup>2</sup>, LÜ Chunjuan<sup>1</sup>, MA Yunxiu<sup>1</sup>, LI Huaiyou<sup>3</sup>

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

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

3 Xifeng Scientific Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Commission, Xifeng 745000, China

**Abstract:** Baseflow plays an important role in sustaining streamflow in the Yellow River watershed. Most of the recent researches have focused on the runoff variations in the Yellow River watershed, however, only a few studies investigated the variations of baseflow which are important to maintain the basic flow and ecological environment security. In this study, the Yanwachuan watershed was selected as the study area in the middle reaches of the Yellow River. Based on the hydrological, meteorological and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) data from 1981 to 2016 in the Yanwachuan watershed, nine numerical simulation methods were selected to separate the baseflow and were compared to analyze their applicability in the study area. The Mann-Kendall trend test and sliding  $t$ -test were then used to identify the changing trends and mutation points of the baseflow. Furthermore, the impacts of climate change and vegetation change on the baseflow were also

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41771259);山西省应用基础研究计划面上青年基金项目(201901D211352);山西省优秀博士来晋工作奖励基金(SXYBKY2019043);山西农业大学科技创新基金项目(2020BQ25)

收稿日期:2021-04-01; 采用日期:2021-08-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xialuxiaochen@163.com

qualitatively and quantitatively discussed. The results of this study can be drawn as follows: (1) Lyne-Hollick filtering method had higher accuracy than other separating methods, and its separating results were very consistent with the actual variations of daily baseflow. Thus, it was indicated that the Lyne-Hollick filtering method was more suitable for the baseflow estimation in the Yanwachuan watershed. (2) The average annual baseflow and baseflow index (the ratio of baseflow to runoff) of the Yanwachuan watershed were  $0.152 \text{ m}^3/\text{s}$  and 0.58, respectively. According to the results of the M-K statistical test and sliding  $t$ -test, the annual baseflow and baseflow index were both significantly declined from 1981 to 2016 and their mutation points occurred in 1993 and 2006, respectively. (3) The correlation between baseflow and potential evapotranspiration was the strongest, while the correlation between baseflow index and the NDVI was the strongest and negative. The contribution rates of precipitation variation, potential evapotranspiration variation, and NDVI change to the decrease of baseflow were  $-99.1\%$ ,  $113.3\%$  and  $85.8\%$ , respectively, while the corresponding contribution rates to the reduction of baseflow index were  $41.3\%$ ,  $-27.7\%$  and  $86.5\%$ , respectively. It was clear that potential evapotranspiration variation and NDVI change were the main factors causing the decrease of baseflow, while the influence of NDVI change played a key role on baseflow index reduction.

**Key Words:** baseflow; numerical simulation method; driving factor; vegetation change; climate change

近年来,在全球气候变化和区域人类活动的双重影响下,黄河流域各支流径流量大都呈现减少的趋势<sup>[1-3]</sup>。黄河径流量的持续减少进一步加剧了流域水资源短缺的矛盾,直接影响到了社会经济的稳定发展,因此,黄河流域径流变化及其驱动机制研究已成为当前水文水资源领域的研究热点之一。基流作为来源于地下水和其他延迟部分的流量,它是黄河流域河川径流中相对稳定的组成部分,是枯水期河道水流的重要补给来源,在维持河川流量和河流生态系统健康方面发挥着重要作用,同时也是流域汇流计算和水文模拟中的重要研究内容<sup>[4]</sup>,但是有关变化环境下的基流变化规律研究却还比较少见。

河川径流量可以直接测定获得,但基流量难以直接测定,一般会采用一定的方法进行估算,因此基流的分割一直以来就是基流研究中的重点和难点<sup>[5]</sup>。目前,国内外学者就基流的分割已提出不少方法,大致可以分为 4 大类:①图解法<sup>[6]</sup>,该方法作为传统的基流分割法,虽然过程简单,但在处理长时间序列数据时工作量很大,且带有强烈的主观性;②水文模型法<sup>[7]</sup>,该方法物理意义相对明确,但在模型构建、参数率定等过程上较为复杂繁琐,且具有一定的不确定性;③环境同位素和水化学方法<sup>[8]</sup>,该方法通过分析降雨与地下水及河流中稳定同位素的组成来分割基流,其结果较为可靠,但是需要投入较多的人力物力,难以广泛应用;④数值模拟法<sup>[9-10]</sup>,该方法可以通过计算机自动实现基流分割,克服了人工方法的主观性和随意性,操作简便,高效实用,因此目前已成为最为广泛应用的基流分割方法。对于同一流域,不同方法所得出的基流分割结果有所不同,有时差异可能较大,而先前较多研究只采用了一种方法进行基流分割从而可能造成了一定的不确定性,因此有必要对不同基流分割方法的适用性进行明确和筛选,而目前相关的方法对比研究却比较缺乏。

目前,有关气候变化和人类活动对基流的影响研究也日益增多。Zomlot 等<sup>[11]</sup>通过分析比利时 Flanders 地区基流变化特征及其驱动机制,发现植被变化是研究区基流变化的主导因素; Rumsey 等<sup>[12]</sup>利用主成分分析法研究北美科罗拉多河上游流域基流变化的影响因素,结果表明基流量与降水量、积雪、草地及自然荒地面积比等因素呈正相关,而与温度、潜在蒸散发量、农地及灌木林地面积比等因素呈负相关。气候变化对基流的正负效应一般较为明确,而人类活动对基流变化的影响效应可正可负,且不同学者的研究结论也存在着一定的差异,例如在土地利用/覆被变化引起的基流变化研究中, Wu 等<sup>[13]</sup>认为黄河中游大面积的退耕还林还草措施增强了流域实际蒸散发能力,造成了土壤干燥化,从而最终减少了基流量,而 Zhang 等<sup>[14]</sup>研究发现渭河流域水土保持措施引起的土地利用变化是流域河川基流增加的主要原因,其内在原因在于土地利用变化导致降水入渗量增加,从而增加了基流量。由此可见,人类活动特别是土地利用/覆被变化对基流变化的影响机制尚不明确。此外,有关基流变化的定量影响评价相对较少,还有待进一步研究。

因此,本文以黄河中游砚瓦川流域为研究对象,基于流域 1981—2016 年的水文、气象及植被资料,应用 9 种基流分割方法估算流域河川基流量及基流指数并对比分析不同方法的可靠性,确定出适用于研究区的最优基流分割方法;在此基础上,揭示流域基流时间变化规律,并定性和定量的评价气候变化和人类活动对流域基流变化的影响,以为黄河流域水资源开发利用及生态环境保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

砚瓦川流域地处甘肃省庆阳市西峰区及宁县境内,位于东经 107°37'—107°55',北纬 35°31'—35°44',系泾河支流马莲河右岸的一条支沟。流域总面积为 385.63 km<sup>2</sup>,海拔高度为 947—1432 m(图 1),主沟长为 35.0 km,沟壑密度为 1.59 km/km<sup>2</sup>。该区属半湿润季风气候区,多年平均降水量为 535.8 mm,5—9 月降水量占全年降水量的 78.9%,年平均气温为 8.1℃。流域地貌主要包括塬面、梁峁坡和沟谷这三种类型,分别占流域总面积的 53.7%、17.7%和 28.6%,具有典型的黄土高原沟壑区地貌特征。砚瓦川流域地质构造比较单一,地表主要被第四纪黄土所覆盖,厚度可达 200 m 左右,土壤侵蚀非常严重。为了有效地控制水土流失,黄委会西峰水保站于 1975 年选定砚瓦川流域作为黄土高原沟壑区的典型中尺度流域,进行流域综合治理试验研究。

流域水土保持治理总体上可分为以下 3 个阶段<sup>[15]</sup>:

第一阶段为 1975—1980 年:1975 年当地政府成立了砚瓦川流域治理指挥部,开始对砚瓦川流域集中开展治理工作,到 1979 年,已修成梯田 3886.4 hm<sup>2</sup>,人工造林 1768.6 hm<sup>2</sup>,人工种草 988.7 hm<sup>2</sup>。

第二阶段为 1981—1993 年:进入 80 年代,随着农村实行包产到户,土地使用权归农民所有,这一时期国家投资力度处于下降趋势,流域治理面积变化不大,有的地方治理面积有所减少。

第三阶段为 1994—2016 年:1994 年,黄土高原世界银行贷款马莲河流域治理项目实施,这是当地政府首次引进外资进行流域综合治理,使得流域治理步伐开始加快。至此之后,涉及本研究流域的综合治理项目主要还有:1999 年开始实施的退耕还林工程、2001—2005 年实施的黄河水土保持生态工程齐家川示范区项目以及 2008—2010 年实施的黄河水土保持生态工程砚瓦川示范区项目。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究所用观测数据主要包括流域水文、气象和植被资料。

(1) 水文资料:主要包括降水资料和径流泥沙资料,均来源于黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站,数据年限为 1981—2016 年。其中,降水资料选用了流域内系列连续且分布均匀的 10 个雨量站(图 1)共 36 年的降水数据,流域面降水量采用泰森多边形法求得;径流泥沙资料采用流域出口控制站—砚瓦川水文站的多年观测数据,该水文站控制流域面积为 341.54 km<sup>2</sup>。

(2) 气象资料:采用紧邻砚瓦川流域边界的西峰国家气象观测站 1981—2016 年的逐日数据资料,包括气温(最高气温、最低气温、平均气温)、相对湿度、太阳辐射、日照时数和风速等。基于该站多年逐日气象数据,

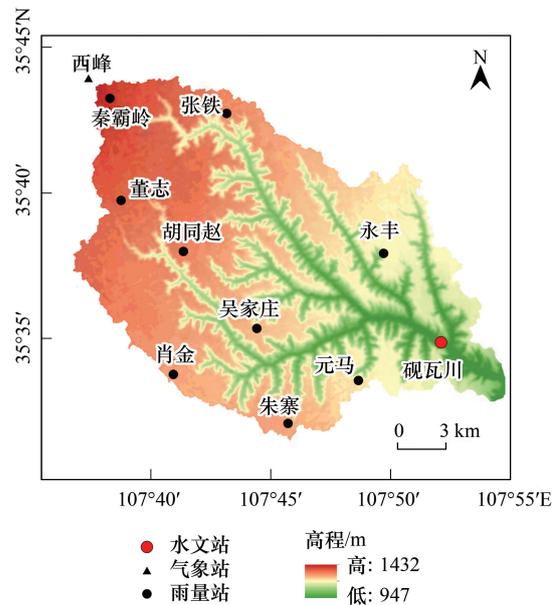


图 1 砚瓦川流域地理位置及测站分布情况

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

采用世界粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[16]</sup> 计算流域多年潜在蒸散发量。

(3) 植被资料: 本文用 NDVI 数据表征植被变化对基流的影响, 采用的是 AVHRR GIMMS NDVI (数据来源 <http://www.geodata.cn>; 数据年限为 1981—2006 年) 和 SPOT/VEGETATION NDVI (数据来源 <http://www.resdc.cn>; 数据年限为 1998 年至今) 数据集。由于这两套数据均不能完全覆盖本研究期限, 需要进行插补获得全时段 NDVI, 具体操作如下: 首先对两套数据重合时段(1998—2006 年)的月 NDVI 值进行了相关分析, 结果表明两者呈显著性相关, 相关系数为 0.96, 因此可以利用这两套数据进行插补延长, 然后建立起两套数据 1998—2006 年的月 NDVI 值线性回归方程, 最终将 GIMMS 1981—1997 的 NDVI 数据代入回归方程, 从而得到插补延长后全时段的 SPOT/VEGETATION NDVI 数据。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 基流的分割方法

本研究采用数值模拟法中的数字滤波法、平滑最小值法、时间步长法共 3 类 9 种方法对流域基流进行分割, 并利用实际基流量对各种基流分割方法进行参数率定。

#### (1) 数字滤波法

数字滤波法源于信号分析和处理技术, 主要功能是将信号分为高频信号和低频信号。由于直接径流的快速响应特征与高频信号类似, 而基流的慢速响应特征与低频信号类似, 因此该方法的原理将日径流看作是直接径流和基流的叠加, 通过数字滤波器分解出高频和低频信号, 从而相应的将直接径流和基流从径流中分割出来<sup>[17]</sup>。目前应用最为广泛的数字滤波法主要包括以下 4 种:

##### ① Lyne-Hollick 滤波法

Lyne-Hollick 滤波法是由 Lyne 和 Hollick 在 1979 年首次提出, 并由 Nathan 和 McMahon 于 1990 年首次引入到水文中进行基流分割, 其滤波方程为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{aligned} Q_d(i) &= f_1 Q_d(i-1) + f_2(1+f_1)[Q(i) - Q(i-1)] \\ Q_b(i) &= Q(i) - Q_d(i) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $Q_d(i)$  和  $Q_d(i-1)$  分别为第  $i$  和第  $i-1$  时刻的直接径流 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q(i)$  和  $Q(i-1)$  分别为第  $i$  和第  $i-1$  时刻的河川流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_b(i)$  为第  $i$  时刻的基流 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $f_1$  和  $f_2$  为滤波参数, 推荐取值分别为 0.925 和 0.5, 另外滤波次数 ( $N$ ) 一般取 1 或 3。本研究通过对  $f_1$  (调参范围在 0.90—0.98 之间)  $f_2$  (调参范围在 0.4—0.6 之间) 和  $N$  (调参范围为 1、3 和 5) 进行率定, 发现当  $f_1$  为 0.975  $f_2$  为 0.5、 $N$  为 1 时, 基流分割结果精度较高。

##### ② Chapman 滤波法

Chapman 通过对 Lyne-Hollick 滤波方程中的问题进行系统的分析, 在 1991 年对该滤波法进行了改进, 提出了 Chapman 滤波法, 其滤波方程为<sup>[19]</sup>:

$$Q_d(i) = \frac{3f_1 - 1}{3 - f_1} Q_d(i-1) + \frac{2}{3 - f_1} [Q(i) - Q(i-1)] \quad (2)$$

式中:  $f_1$  为滤波参数, 推荐取值为 0.95, 另外滤波次数 ( $N$ ) 一般取 1 或 3, 其他参数含义同上, 再用式(1)中的基流公式计算基流。本研究通过对  $f_1$  (调参范围在 0.90—0.98 之间) 和  $N$  (调参范围为 1、3 和 5) 进行率定, 发现当  $f_1$  为 0.925、 $N$  为 1 时, 基流分割结果较优。

##### ③ Chapman-Maxwell 滤波法

Chapman 和 Maxwell 在 1991 年对以上滤波法进行进一步改进, 他们假定某时刻的基流为该时刻的直接径流和前一时刻基流的加权平均, 其提出的滤波方程为<sup>[20]</sup>:

$$Q_b(i) = \frac{f_1}{2 - f_1} Q_b(i-1) + \frac{1 - f_1}{2 - f_1} Q(i) \quad (3)$$

式中:  $f_1$  为退水参数, 推荐取值为 0.95, 另外滤波次数 ( $N$ ) 一般取 1 或 3, 其他参数含义同上。本研究通过对  $f_1$  (调参范围在 0.90—0.98 之间) 和  $N$  (调参范围为 1、3 和 5) 进行率定, 发现当  $f_1$  为 0.925、 $N$  为 1 时, 基流分割

结果较优。

#### ④ Boughton-Chapman 滤波法

Boughton 于 1993 年提出了 Boughton-Chapman 滤波法,其滤波方程为<sup>[21]</sup>:

$$Q_b(i) = \frac{f_1}{1+f_2}Q_b(i-1) + \frac{f_2}{1+f_2}Q(i) \quad (4)$$

式中: $f_1$ 和 $f_2$ 为方程参数,推荐取值分别为 0.95 和 0.15,另外滤波次数( $N$ )一般取 1 或 3,其他参数含义同上。本研究通过对 $f_1$ (调参范围在 0.90—0.98 之间) $f_2$ (调参范围在 0.05—0.35 之间)和 $N$ (调参范围为 1、3 和 5)进行率定,发现当 $f_1$ 为 0.95、 $f_2$ 为 0.1、 $N$ 为 1 时,基流分割结果精度较高。

#### (2) 平滑最小值法

平滑最小值法是英国水文研究所在 1980 年提出的一种基流计算方法,主要有标准平滑最小值( $f$ )法和改进平滑最小值( $k$ )法,其方法原理为<sup>[22]</sup>:将连续的日径流系列按照时间间隔 $N$ 划分成 $365/N$ 个时间段,然后确定每个时间段的最小流量值,形成最小流量序列 $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ ,若某个 $i$ 时段内的流量最小值与拐点检验因子 $f$ 或 $k$ 的乘积小于等于左右相邻两个时段内的流量最小值,即 $fQ_i \leq \min(Q_{i-1}, Q_{i+1})$  [ $kQ_i \leq \min(Q_{i-1}, Q_{i+1})$ ],则将中间点确定为拐点。重复此过程,在流量过程线上确定出所有拐点,将所有拐点用直线连接即可得到基流过程线。

该方法需要确定 2 个参数:时间间隔 $N$ 和拐点检验因子 $f$ 或 $k$ 。 $N$ 一般取值为 3—5 d,而 $f$ 和 $k$ 推荐值为 0.9 和 0.979。本研究通过对 $f$ (调参范围在 0.85—0.95 之间)、 $k$ (调参范围在 0.90—0.99 之间)和 $N$ (调参范围为 3、4 和 5)进行率定,发现当 $f$ 为 0.9 或 $k$ 为 0.98、 $N$ 为 3 时,基流分割结果较优。

#### (3) 时间步长法

时间步长法也称为 HYSEP 法,是由 Pettyjohn 和 Henning 首先于 1979 年提出<sup>[23]</sup>,并由美国地质调查局开发计算程序推荐使用。HYSEP 法共有固定步长法(Fixed interval, FI)、滑动步长法(Sliding interval, SI)和局部最小值法(Local minimum, LM)3 种不同的分割方法,这 3 种方法都首先需要利用经验公式计算直接径流的持续时间 $t$ :

$$t = (2.95A)^{0.2} \quad (5)$$

式中: $t$ 为直接径流的持续时间(d); $A$ 为流域面积( $\text{km}^2$ )。

通过计算直接径流的持续时间,选择与 $2t$ 最为接近且介于 3 到 11 之间的奇数作为时间间隔 $N$ 。

砚瓦川水文站控制流域面积为 $341.54 \text{ km}^2$ ,计算得到 $t$ 为 3.99,故时间间隔 $N$ 为 7。之后,这 3 种方法计算基流的原理有所不同,其中,固定步长法(FI)是将该时间间隔内的最小流量作为该时段内任意一天的基流;滑动步长法(SI)是将某天前后 $(2N-1)/2d$ 内的最小流量作为该天的基流,由此计算出每一天的基流;局部最小值法(LM)是选择时间步长内中心点前后 $(2N-1)/2d$ 内的最小流量作为相邻时间步长内中心点的基流值,然后通过线性内插得到步长中心点之外时段的基流。3 种方法均以本次计算的终点作为下次时间的起点,重复以上过程便可得到基流过程线。

### 2.2.2 基流分割结果的评价

通过确定砚瓦川流域历年的实际基流量,利用统计指标评价不同基流分割方法的精度,从而选取最优基流计算方法的结果开展进一步的基流分析。

#### (1) 实际基流量的确定

直接观测河川基流量是一个非常困难的过程,因此目前国际上主要采用枯水指数法<sup>[24]</sup>来近似估计实际基流量,该方法的计算步骤为:利用历年的逐日流量数据绘制出历年的日流量历时曲线,然后推求历年的 $Q_{90}$ 和 $Q_{50}$ 值,这两个值分别代表某一年的低流量和中流量,那么本研究用枯水指数( $Q_{90}/Q_{50}$ )与年均流量相乘,即推求出年基流量的实际值。

#### (2) 基流分割方法的评价

将实际年基流量值与基流分割估算结果进行对比,利用纳什效率系数(NSE)和平均绝对相对误差( $R_e$ )来率定不同基流分割方法的参数,并评价其优劣性。其中,NSE 的计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

式中: $O_i$ 和 $S_i$ 分别为第 $i$ 年的年基流实际值和估算值; $\bar{O}$ 为多年基流实际值的平均值; $n$ 为年基流系列样本容量。值得注意的是,NSE 的范围在 $-\infty$ 和1之间,因此,NSE 越接近1,基流分割方法就越精确。

$R_e$ 可由下式计算得出<sup>[26]</sup>:

$$R_e = \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中, $R_e$ 值越小,估算效果就越好。一般认为,当 $R_e$ 值小于20%时,估算结果就具有一定的精度。

### 2.2.3 年基流变化趋势及突变分析

本研究采用 Mann-Kendall 检验法进行年基流的变化趋势及突变分析,并采用滑动 $t$ 检验法对 Mann-Kendall 突变检验的结果进行验证。由于这两种方法在水文研究中已被广泛使用,因此有关方法原理在此并不详述,具体方法详见文献<sup>[27-28]</sup>。

### 2.2.4 基流对气候变化和人类活动的响应分析

本文通过参考以往的基流驱动因素研究,最终选取降水量和潜在蒸散发量这两个指标反映气候变化的影响,同时考虑到研究区水土保持治理以植被措施为主,大型水利工程较少,流域内人类取用水量也非常少,人类活动主要通过改变土地利用/覆盖导致基流的变化,因此,选取 NDVI 这一指标反映人类活动(植被变化)对基流的影响。

选取主要影响因素后,对流域年降水量、年潜在蒸散发量和年 NDVI 值进行变化趋势及其与基流的相关性分析,探讨基流对气候变化和植被变化的响应规律,并定量评价气候变化和植被变化对基流变化的影响程度。本研究采用多元线性回归法来计算基流变化的贡献率,其计算步骤如下<sup>[24]</sup>:以标准化年基流量为因变量,以主要影响因子(即标准化年降水量、年潜在蒸散发量和年 NDVI)为自变量,建立标准化年基流量的多元线性回归方程,其中,每个变量的标准化值由各变量系列值减去变量均值再除以该变量的标准差求得。那么,每个影响因子对基流量变化的贡献率大小就可以由各自的回归系数来估计,计算公式如下:

$$Y = aX_p + bX_E + cX_N \quad (8)$$

$$\varphi_p = \frac{a}{a+b+c} \quad \varphi_E = \frac{b}{a+b+c} \quad \varphi_N = \frac{c}{a+b+c}$$

式中: $X_p$ 、 $X_E$ 和 $X_N$ 分别为标准化年降水量、年潜在蒸散发量和年 NDVI; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为相应影响因子的线性回归系数; $\varphi_p$ 、 $\varphi_E$ 和 $\varphi_N$ 分别为降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 变化对基流量变化的贡献率(%)。同理也可以推求出基流指数变化的贡献率结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 基流分割结果的对比与评价

表1列出了9种不同基流分割方法的计算结果及评价指标,总体来看,除了 Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 滤波法计算出来的 BFI 值低于0.45之外,其他7种方法的 BFI 计算结果都处于0.55—0.59之间,与枯水指数法计算出来的多年实际 BFI 平均值0.58较为接近,且都明显高于 Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 滤波法的计算结果,这可能是由于这两种方法的计算原理有所不同,导致基流分割过程在低流量时更为平滑,基流量及基流指数低于其他方法的结果。不同基流分割方法的评价指标结果显示,Chapman 滤波法、

Chapman-Maxwell 滤波法、平滑最小值法和时间步长法的 NSE 都低于 0.4,说明分割效果不够理想,而 Lyne-Hollick 滤波法的 NSE 和  $R_e$  分别为 0.49 和 17%, Boughton-Chapman 滤波法的 NSE 和  $R_e$  分别为 0.64 和 16%,说明这两种方法具有较高的精度,其中最优的还属 Boughton-Chapman 滤波法。

表 1 不同基流分割方法的基流指数值及评价结果

Table 1 Baseflow index estimated by different separating methods and their evaluation results

评价指标 Evaluating indicator	数字滤波法 Digital filter method			平滑最小值法 Minimum smoothing method			时间步长法 HYSEP method		
	Lyne-Hollick	Chapman	Chapman- Maxwell	Boughton- Chapman	标准法 BFI(f)	改进法 BFI(k)	固定 步长法 FI	滑动 步长法 SI	局部最 小值法 LM
BFI	0.55	0.44	0.45	0.56	0.57	0.56	0.59	0.59	0.56
NSE	0.49	0.09	0.17	0.64	0.39	0.38	0.38	0.38	0.35
$R_e$	17%	23%	22%	16%	19%	19%	19%	20%	19%

BFI:基流指数 Baseflow index;NSE:纳什效率系数 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; $R_e$ :相对误差 Relative error

为了进一步验证不同基流分割方法的适用性,本研究以 1981 年(频率为 10%的丰水年)为例,对比分析不同日基流分割过程线的特征,结果见图 2(为了使日流量过程线展示清晰,已删除 3 个日流量大于  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  的数据点)。在 4 种数字滤波法中,Boughton-Chapman 滤波法日基流过程线起伏最大,不太符合实际的日基流涨落过程,Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 法波动幅度次之,而 Lyne-Hollick 法的日基流过程线较为平滑,同时对汛期降水有一定的响应,在非汛期 BFI 值较大而在汛期 BFI 值小于其他 3 种滤波法,能够较好地反映日基流的实际变化规律。两种平滑最小值法的日基流过程相对于其他方法波动幅度最小,但是过于平滑,没能体现日基流对汛期降水的响应过程。在 3 种时间步长法中,固定步长法和滑动步长法的日基流变化过程与

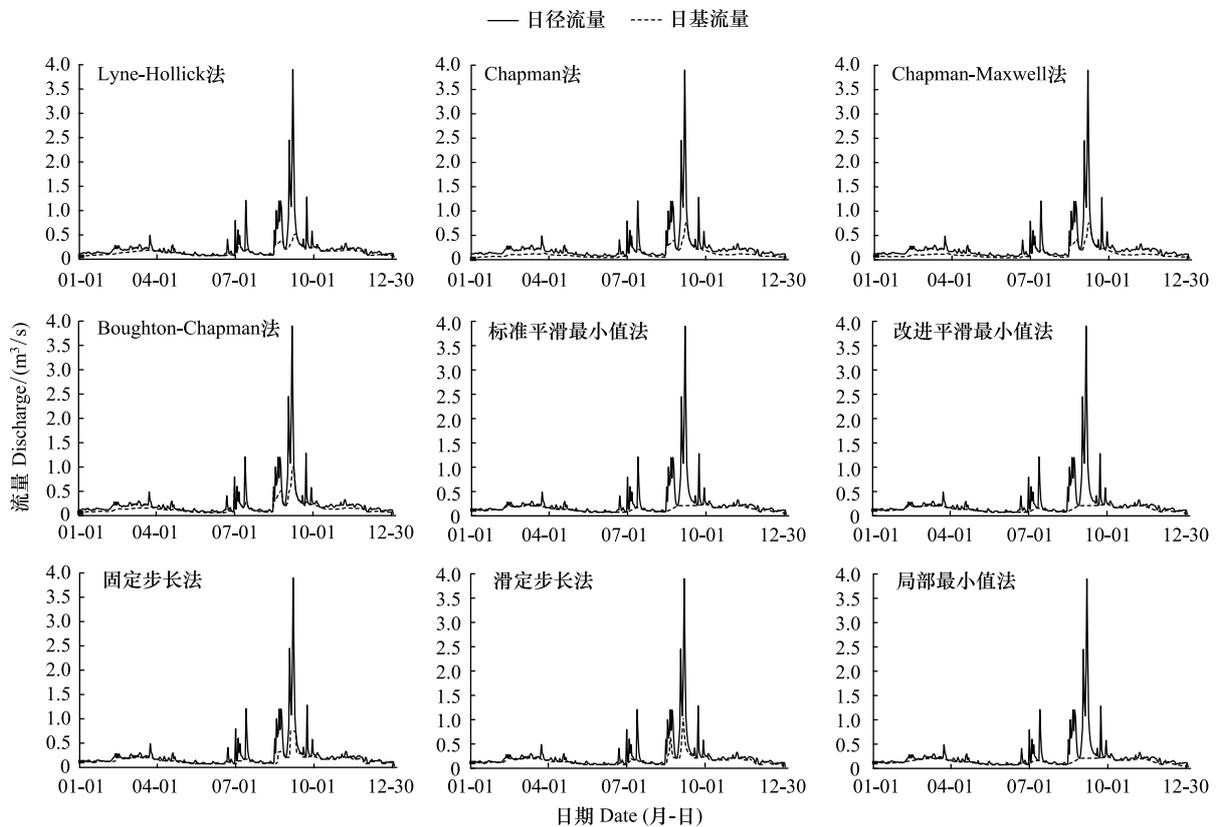


图 2 不同基流分割方法的 1981 年日流量和日基流量过程线

Fig.2 Baseflow hydrographs estimated with the 9 baseflow separating methods

日径流变化过程非常一致,未能体现基流的滞后性这一特征,这是由于这 2 种方法的分割原理所决定的,而局部最小值法整体波动非常小,日基流过程线过于平滑。总体来看, Lyne-Hollick 法的基流分割结果比较符合实际日基流变化规律。

综合年基流指数、年基流量误差分析与日基流过程线结果,本研究认为 Lyne-Hollick 法在所有基流分割方法中具有更好的合理性和可靠性。考虑到 Lyne-Hollick 法在年尺度上的基流估算还存在着一定的误差,所以在后续的年际尺度基流研究中直接利用枯水指数法计算的实际基流量成果,而在年内尺度基流研究中则采用 Lyne-Hollick 法的分割结果。

### 3.2 基流年内变化规律

根据 Lyne-Hollick 法的逐日基流分割结果,得到砚瓦川流域 1981—2016 年平均月基流量及月 BFI 变化过程(图 3)。砚瓦川流域 1—3 月份河川流量逐渐增加,同时月基流量也呈现上升的趋势,并在 3 月份达到第一个峰值,这和积雪融化补充径流及基流关系密切;4—6 月份河川流量与 3 月份相比有所下降,这一方面是由于这个时期降水量较小,另一方面是因为植物的生长使降水入渗量增加,从而减少了径流,同时期月基流量也呈现下降的趋势;7 月份河川流量达到全年最高峰值,这主要与 7 月份的降水量达到峰值有关,但是该月份的基流量却未达到最大,另外 7—10 月是径流主要的集中期,河川流量随着降水量的减少而逐渐降低,但是基流量在 7—10 月期间却稳步增加,在 10 月份达到了最大值,这体现了基流作为慢速流的滞后性;11—12 月份河川流量径流量和基流量均呈下降趋势。总体来看,基流在年内的变化幅度小于径流,且对降水/融雪补给的响应时间也较为缓慢,这都与基流的补给机制密切相关。另外,BFI 在年内总体呈现先减少后增加的变化规律,汛期(5—9 月份)的月 BFI 值明显低于非汛期,非汛期各月 BFI 值达到 0.56—0.81 之高,这也验证了在枯水期基流量是河川径流的主要组成部分这一结论。

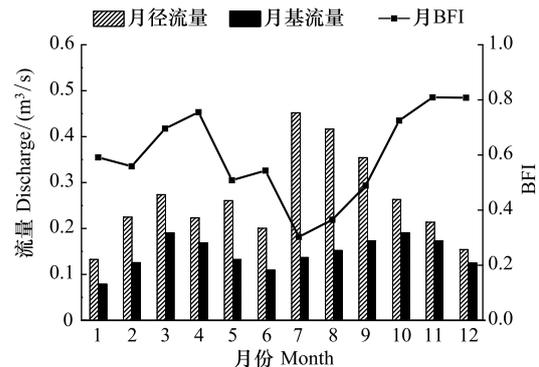


图 3 砚瓦川流域多年平均月径流和月基流变化规律

Fig. 3 Variation of annual average monthly streamflow and monthly baseflow in the Yanwachuan watershed

BFI: 基流指数 Baseflow index

3.3 基流年际变化规律

根据年径流及基流统计分析结果(图 4),流域多年平均河川流量和基流量分别为  $0.264 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.152 \text{ m}^3/\text{s}$ ,其中年流量和年基流量最大值分别为  $0.564 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.322 \text{ m}^3/\text{s}$ ,均出现在 1984 年,而年流量和年基流量最小值分别为  $0.180 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.129 \text{ m}^3/\text{s}$ ,分别发生在 1999 年和 2007 年。在整个研究期间,流域年基流量与年流量均呈现出下降的趋势,且两者的变化过程较为一致,基流在年际尺度上并未体现出一定的滞后性。流域多年平均 BFI 值为 0.58,年 BFI 值在 0.38—0.76 之间浮动,整体表现出下降的趋势,特别是在 2006 年以后,流域 BFI 值维持在一个较低的水平,这说明从 2006 年之后降水更多的形成了快速径流,使慢速流在径流中的占比较低。

年基流量和年 BFI 值的 M-K 检验和滑动  $t$  检验结果如图 5 所示。年基流量和年 BFI 值的  $UF$  值分别为  $-3.787$  和  $-2.642$ ,超过了  $P=0.01$  显著性水平,这说明砚瓦川流域年河川基流量和年 BFI 值均呈现极显著的减少趋势。M-K 突变检验结果显示,年基流量  $UF$  和  $UB$  线相交于 1993 年,年基流指数  $UF$  和  $UB$  线相交于 2006 年,而  $t$  检验显示年基流量于 1992 年附近发生了突变,年基流指数在 2006 年和 2007 年附近发生了突变,两种突变检验的结果非常一致。因此,可以认为砚瓦川流域年河川基流量和年基流指数在研究期间发生了极显著的减少趋势性变化,且分别于 1993 年和 2006 年附近发生了突变。

### 3.4 基流变化驱动因素分析

通过对砚瓦川流域 1981—2016 年降水量 ( $P$ )、潜在蒸散发量 ( $ET_0$ ) 和 NDVI 数据进行趋势分析及突变检

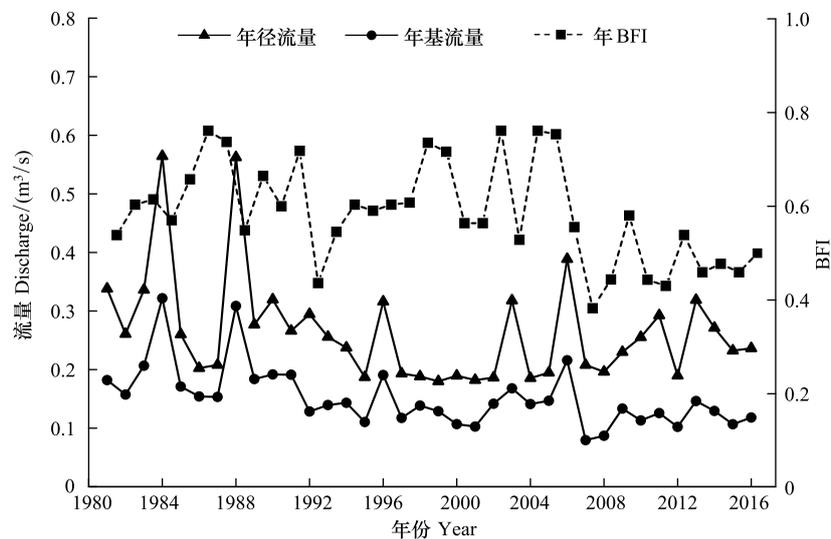


图4 砚瓦川流域 1981—2016 年年径流和年基流变化规律

Fig.4 Variation of annual streamflow and annual baseflow in the Yanwachuwan watershed from 1981 to 2016

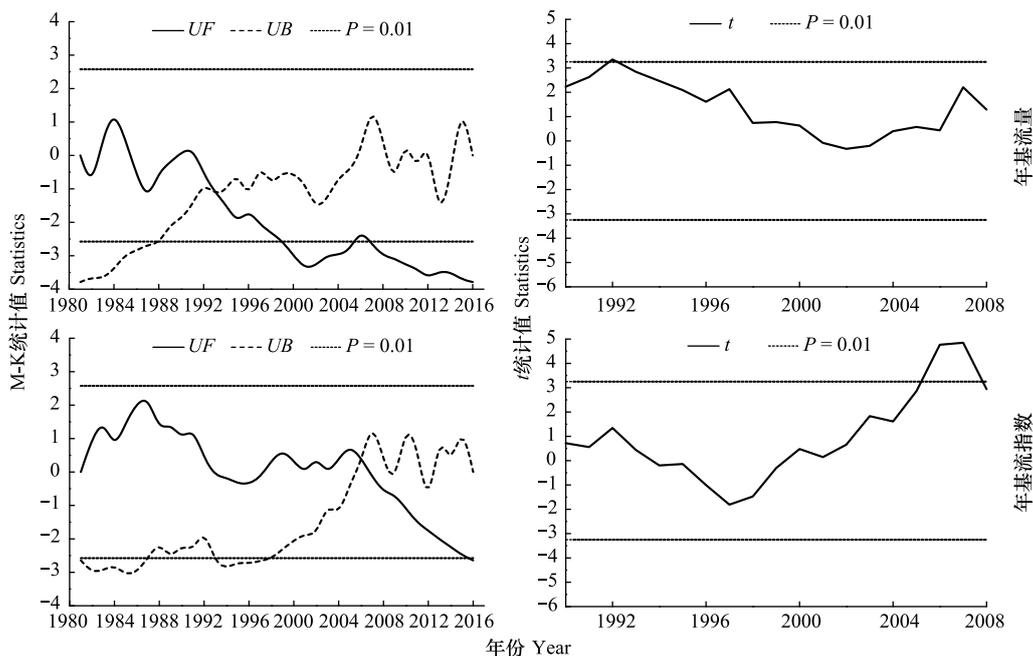


图5 砚瓦川流域年河川基流量和年基流指数 M-K 检验和滑动  $t$  检验结果

Fig.5 Results of M-K test and  $t$  test for annual baseflow and annual baseflow index in the Yanwachuwan watershed

UF: Mann-Kendall 统计值组成的曲线; UB: Mann-Kendall 反序列统计值组成的曲线;  $t$ : 滑动  $t$  检验的统计值

验(图6和表2),结果表明:流域多年平均年降水量和年潜在蒸散发量分别为 535.8 mm 和 1172.1 mm,在整个研究期内年降水量呈现不显著的增加趋势( $P > 0.05$ ),以平均每年 1.351 mm 的速度在增加,且未发生突变,而潜在蒸散发在年际上呈现极显著的增加趋势( $P < 0.01$ ),以平均每年 4.121 mm 的速度在增加,且于 1993 年附近发生了突变;流域多年平均年 NDVI 值为 0.535,年 NDVI 呈现极显著的增加趋势( $P < 0.01$ ),以平均每年 0.0056 的速度在增加,且于 2004 年附近发生了突变。综合以上因素的趋势分析及突变检验结果,可以发现年潜在蒸散发的突变时间与年基流量的突变时间均出现在 1993 年附近,且自 1994 年开始的黄土高原世界银行贷款使得流域治理步伐开始加快,流域植被条件也因此开始发生了较大的变化,这说明砚瓦川流域潜在蒸散

发和 NDVI 的增加可能是河川基流量减小的主要原因;另外,年 NDVI 的突变时间与年基流指数的突变时间较为接近,这表明 NDVI 的变化可能对于流域基流指数的减小趋势起到了一定的作用,还有待进一步验证。

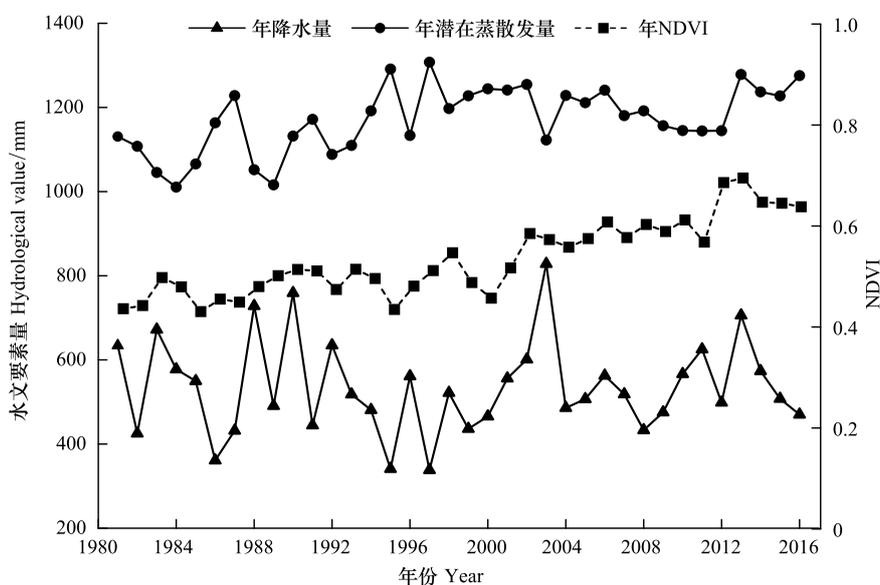


图 6 砚瓦川流域 1981—2016 年降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 变化规律

Fig.6 Variation of precipitation, potential evapotranspiration and NDVI in the Yanwachuwan watershed during 1981—2016

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

表 2 砚瓦川流域年降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 趋势分析及突变检验结果

Table 2 Trend analysis and mutation test results of annual precipitation, ET and NDVI in the Yanwachuwan watershed

影响因素 Impact factor	多年平均值 Annual average value	M-K 统计检验 M-K test		滑动 <i>t</i> 检验 <i>t</i> test
		统计量 Statistics	突变年份 Mutation point	突变年份 Mutation point
降水量 Precipitation/mm	535.8	0.245	—	—
潜在蒸散发量 $ET_0$ /mm	1172.1	3.132 **	1992 年 *	1994 年 *
NDVI	0.535	6.075 **	2004 年 **	2003 年附近 **

\* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$ ; — 表示未检测到突变年份; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

为了进一步揭示这三者对基流的影响规律,本研究利用 Spearman 秩相关检验对三者与基流量和基流指数进行相关性分析,结果见表 3。根据 Spearman 相关分析结果,基流量与三者均显著相关,其中,潜在蒸散发量相关性最大( $R = -0.510$ ),这说明潜在蒸散发应该是影响基流量最重要的因素,这也从基流量的突变年份与潜在蒸散发的突变年份一致这一点上得到了验证;基流量与降水量和 NDVI 均显著相关( $P < 0.05$ ),不过其与降水量呈正相关,而与 NDVI 却呈负相关,这表明了流域降水量的上升趋势确实会使基流量有所增加,而 NDVI 的上升趋势导致基流量有所减少。另外,在 3 个影响因素中,NDVI 与基流指数的相关性最高,降水量与基流指数的相关性次之,但是呈负相关关系,而潜在蒸散发与基流指数的相关性很弱,相关系数仅为 0.079。

表 3 砚瓦川流域基流与主要影响因素间的 Spearman 相关分析结果

Table 3 Spearman correlation analysis between baseflow and main influencing factors in the Yanwachuwan watershed

要素 Factor	降水量 Precipitation		潜在蒸散发量 Potential evapotranspiration		NDVI	
	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
基流量 Baseflow	0.366	*	-0.510	**	-0.391	*
基流指数 BFI	-0.387	*	0.079	NS	-0.432	**

NS 代表不显著; \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$

为了更深入的分析驱动因素对基流变化的定量影响,采用多元线性回归法评价基流变化的贡献率。表 4 列出了流域基流量和基流指数的线性回归系数及贡献率结果,两个线性回归方程均通过了 0.05 显著性水平上的  $F$  检验,但基流量线性回归方程的拟合度( $R^2=0.446$ )要优于基流指数线性回归方程( $R^2=0.241$ )。根据基流变化贡献率评价结果,流域降水量变化、潜在蒸散发量变化及 NDVI 变化对基流量变化的贡献率分别为 -99.1%、113.3%和 85.8%,即降水量的增加使流域基流量增加了 99.1%,而潜在蒸散发的增加以及 NDVI 的变化分别使基流量减少了 113.3%和 85.8%,可见潜在蒸散发和 NDVI 的变化是引起河川基流量减小的主要原因,这与前面得出的结论一致;流域降水量变化、潜在蒸散发量变化及 NDVI 变化对基流指数变化的贡献率分别为 41.3%、-27.7%和 86.5%,这说明流域 NDVI 的增加确实对于基流指数的降低起到了决定性的作用。

表 4 砚瓦川流域基流与基流指数的贡献率评价结果

Table 4 The contribution rates to the variations of baseflow and baseflow index in the Yanwachuan watershed

要素 Factor	基流量 Baseflow				基流指数 Baseflow index			
	降水量 $P$	潜在蒸散发量 $ET_0$	NDVI	$R^2$ /Sig.	降水量 $P$	潜在蒸散发量 $ET_0$	NDVI	$R^2$ /Sig.
回归系数 Regression coefficient	0.321	-0.367	-0.278	0.446 **	-0.198	0.133	-0.420	0.241 *
贡献率 Contribution rate/%	-99.1	113.3	85.8	—	41.3	-27.7	86.5	—

$R^2$ 为回归模型的拟合度平方;Sig.为  $F$  检验显著性水平; \* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $P<0.01$

#### 4 讨论

不同基流分割方法的计算结果有所差异,在本文采用的 9 种数值模拟方法中,Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 滤波法计算出来的基流量结果明显低于其他 7 种方法,且与枯水指数法计算出来的实际 BFI 值相差较远,这与吴珍妮等<sup>[29]</sup>在北洛河上游基流分割方法适用性研究中得出的结论一致,这表明 Chapman 滤波法和 Chapman-Maxwell 滤波法可能不适用于黄河中游地区的基流分割。另外,本研究通过综合分析不同方法的年基流误差与日基流过程线结果,发现 Lyne-Hollick 法在所有基流分割方法中具有更好的可靠性。吴珍妮等<sup>[29]</sup>、申恋绵等<sup>[30]</sup>、亢小语等<sup>[31]</sup>和周嘉欣等<sup>[5]</sup>曾分别对北洛河上游、窟野河流域、昕水河流域和疏勒河上游不同基流分割方法的适用性进行了评价,结果均发现 Lyne-Hollick 法基流估算结果稳定可靠且精度高,这说明 Lyne-Hollick 滤波法确实是黄河中上游比较适宜的基流分割方法。

砚瓦川流域河川基流量和基流指数在年际尺度上呈极显著下降趋势( $P<0.01$ ),气候变化和植被变化是影响研究区河川基流的主要驱动因素。在气候要素中,降水量和潜在蒸散发量是最关键的两个因子。降水是基流的补给来源,它直接决定着基流量的大小,因此在一般情况下降水量与基流量之间呈正相关关系,这一点也被众多研究所证实。本研究还分析了年降水量和年基流指数之间的相关关系,发现两者呈显著负相关,即降水量的增加会显著减小基流指数。Xu 等<sup>[32]</sup>曾采用弹性系数法分析降水和潜在蒸散发对基流的定量影响,他们也发现了基流的降水弹性系数为负值这一现象,但并未作相应的解释,本研究认为这可能是由于流域降水量一般集中在汛期,年降水量的增加意味着汛期降水量的增加,而汛期降水量更容易产生快速流,从而减小了基流占径流的比例即减小了基流指数。

潜在蒸散发反映了大气的蒸发能力,潜在蒸散发能力越强,降水入渗量会更多的转化为蒸散发量,基流量也会相应地减少,因此两者呈负相关关系(表 3)。在气象要素中,基流量与潜在蒸散发量相关性最大,而与降水量次之,这与传统的气候变化对径流的影响结论不太一致,例如杨大文等<sup>[33]</sup>基于流域水热耦合平衡模型对黄河流域 38 个典型流域 1961—2010 年间径流变化进行分析,结果表明在所有流域中径流变化对降水变化比对潜在蒸散发变化更为敏感。这种不一致的原因可能在于潜在蒸散发能更大程度上决定降水入渗量的消耗途径:它到底是会更多的形成蒸散发量还是会补给基流? 这比降水量对基流的影响更加直接和密切。

有关植被变化对径流的影响研究非常多见,但是针对植被变化对基流的影响研究却相对匮乏,且其定性影响结论尚有一定的差异。例如黄河中游大规模的生态恢复特别是人工造林对基流的影响仍存在争议:一些

学者<sup>[4,8,14,34]</sup>认为造林或植被恢复能增加土壤入渗,从而增加河川基流量;另一些学者<sup>[7,13,35]</sup>认为造林或植被恢复增加了植被蒸腾和截留蒸发,使得基流量有所减少。造成这种不一致的结果可能在于影响基流的因素错综复杂,一般的研究很难将植被变化的影响从众多因素中剥离出来,容易受到其他因素的干扰,从而得到了不同的研究结论,因此在以后的研究中亟需利用对比流域法来直接评判这一效应。本文的结论更倾向于后者,即在黄河中游地区植被覆盖度的增加会减小基流量,NDVI 与基流量的负相关关系主要是因为黄河中游干旱半干旱地区作为水分限制区,植被恢复增加的降水入渗不能抵消植被恢复引起的蒸散发(植被蒸腾和截留蒸发)增加,最终导致可以补给基流的降水入渗量有所减少。砚瓦川流域人类活动对基流的影响主要体现在植被变化上,因此该结果也有一定的参考性。另外,在 3 个影响因素中,基流指数与 NDVI 的相关性最高,这可能是由于 NDVI 能更大程度上决定径流的组成成分,穆兴民等<sup>[36]</sup>指出黄土高原植被恢复深刻地改变了黄土高原土壤水文性质,使土壤入渗能力增强、流域蓄水容量增大,虽然这意味着直接径流量的减少,但是由于流域 NDVI 的极显著增加导致蒸散发能力的增强,使补给基流的水量大大减小,最终导致基流的减少速度要快于直接径流的减少速度。

砚瓦川流域基流变化的定量评价结果表明,潜在蒸散发和 NDVI 的变化是引起流域河川基流量减少的主要原因,而流域 NDVI 的增加对于砚瓦川流域基流指数的降低起到了决定性的作用。Wu 等<sup>[13]</sup>对黄河中游 11 个典型流域的基流变化进行归因分析,发现人类活动是造成大部分流域河川基流量减少的原因,而基流指数的归因结果在不同流域分异较大。不过这些流域的人类活动不仅仅局限于植被变化,而如对地下水的开采、煤炭开采对地下含水层的破坏等等均是引起基流量减小的重要原因。

## 5 结论

本文以砚瓦川流域为研究区域,探讨了不同基流分割方法在研究区的适用性,分析了流域 1981—2016 年期间河川基流的年际及年内变化规律,定性和定量的评价了变化环境对基流变化的影响,主要结论如下:

(1) Lyne-Hollick 滤波法计算出来的流域多年平均 BFI 值为 0.55,与枯水指数法计算出来的多年实际 BFI 平均值 0.58 较为接近,另外该方法的 NSE 和  $R_e$  分别为 0.49 和 17%,具有一定的估算精度,且其基流分割结果比较符合实际日基流变化规律。综合年基流指数、年基流量误差分析与日基流过程线结果,本研究认为 Lyne-Hollick 法在所有基流分割方法中具有更好的合理性和可靠性。

(2) 基流量在年内的变化幅度小于径流,且对降水/融雪补给的响应时间也较为缓慢,体现了基流补给的滞后性,而 BFI 在年内总体呈现先减少后增加的变化规律,汛期(5—9 月份)的月 BFI 值明显低于非汛期。流域多年平均基流量为  $0.152 \text{ m}^3/\text{s}$ ,基流量和 BFI 在年际上均呈现极显著的减少趋势( $P < 0.01$ ),且分别于 1993 年和 2006 年附近发生了突变。

(3) 年潜在蒸散发的突变时间(1993 年)以及流域治理步伐开始加快的时间(1994 年)均与年基流量的突变时间(1993 年)较为接近,这说明砚瓦川流域潜在蒸散发和 NDVI 的增加可能是河川基流量减小的主要原因;另外,年 NDVI 的突变时间与年基流指数的突变时间较为接近,这表明 NDVI 的变化对于河川基流指数的减小应该起到了一定的作用。另外,根据 Spearman 相关分析结果,河川基流量与潜在蒸散发量相关性最大( $R = -0.510$ ),而基流指数与 NDVI 的相关性最高( $R = -0.432$ )。

(4) 流域降水量、潜在蒸散发量及 NDVI 的变化对基流量变化的贡献率分别为 -99.1%、113.3% 和 85.8%,对 BFI 变化的贡献率分别为 41.3%、-27.7% 和 86.5%,可见潜在蒸散发和 NDVI 的变化是引起砚瓦川流域河川基流量变化的主要原因,而流域 NDVI 的增加确实对于河川基流指数的降低起到了决定性的作用。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Liang W, Bai D, Wang F Y, Fu B J, 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(8):

- 6500-6519.
- [ 3 ] Zheng H Y, Miao C Y, Wu J W, Lei X H, Liao W H, Li H. Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: a high-density study. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 875-886.
- [ 4 ] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 刘二佳. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素. *生态学报*, 2013, 33(5): 1559-1568.
- [ 5 ] 周嘉欣, 丁永建, 吴锦奎, 王建. 基流分割方法在疏勒河上游流域的应用对比分析. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1456-1466.
- [ 6 ] Cheng L, Zhang L, Chiew F H S, Canadell J G, Zhao F F, Wang Y P, Hu X Q, Lin K R. Quantifying the impacts of vegetation changes on catchment storage-discharge dynamics using paired-catchment data. *Water Resources Research*, 2017, 53(7): 5963-5979.
- [ 7 ] 陈利群, 刘昌明, 李发东. 基流研究综述. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 1-15.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Ficklin D L, Robeson S M, Knouft J H. Impacts of recent climate change on trends in baseflow and stormflow in United States watersheds. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(10): 5079-5088.
- [ 10 ] Ahiablame L, Sheshukov A Y, Rahmani V, Moriasi D. Annual baseflow variations as influenced by climate variability and agricultural land use change in the Missouri River Basin. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 188-202.
- [ 11 ] Zomlot Z, Verbeiren B, Huysmans M, Batelaan O. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: assessment of controlling factors. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, 4: 349-368.
- [ 12 ] Rumsey C A, Miller M P, Susong D D, Tillman F D, Anning D W. Regional scale estimates of baseflow and factors influencing baseflow in the Upper Colorado River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, 4: 91-107.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Zhang J L, Song J X, Cheng L, Zheng H X, Wang Y T, Huai B J, Sun W J, Qi S H, Zhao P P, Wang Y Q, Li Q. Baseflow estimation for catchments in the Loess Plateau, China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 264-270.
- [ 15 ] 夏露. 基于绿水理论的硃瓦川流域生态水文过程对变化环境的响应[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [ 16 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M, Smith M A, Chollet-Martin S. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- [ 17 ] 徐榕焯, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 352-359.
- [ 18 ] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [ 19 ] Chapman T G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1783-1784.
- [ 20 ] Chapman T G, Maxwell A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments//23rd Hydrology and Water Resources Symposium. Hobart: Institution of Engineers, Australia, 1996: 539-545.
- [ 21 ] Boughton W C. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments//Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium. Newcastle: Institution of Engineers, Australia, 1993: 317-324.
- [ 22 ] Aksoy H, Kurt I, Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology*, 2009, 372(1/4): 94-101.
- [ 23 ] Pettyjohn W A, Henning R. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report, 1979.
- [ 24 ] Tan X J, Liu B J, Tan X Z. Global Changes in baseflow under the impacts of changing climate and vegetation. *Water Resources Research*, 2020, 56(9): e2020WR027349.
- [ 25 ] 黄琦, 覃光华, 王瑞敏, 向俊燕, 胡庆芳, 李伶俐. 基于 MSWEP 的祁连山地区降水空间分布特性解析. *水利学报*, 2020, 51(2): 232-244.
- [ 26 ] 郭向红, 毕远杰, 孙西欢, 马娟娟, 孔晓燕. 西葫芦微咸水膜下滴灌土壤水盐运移对产量影响的预测模型. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 167-175.
- [ 27 ] 黄生志, 杜梦, 李沛, 郭怿, 王璐. 变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究. *水科学进展*, 2019, 30(4): 496-506.
- [ 28 ] 李哲, 丁永建, 陈艾姣, 张智华, 张世强. 1960—2019年西北地区气候变化中的 Hiatus 现象及特征. *地理学报*, 2020, 75(9): 1845-1859.
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] 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.
- [ 31 ] 亢小语, 张志强, 陈立欣, 许行, 冷曼曼. 自动基流分割方法在黄土高原昕水河流域适用性分析. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 92-101.
- [ 32 ] Xu X L, Scanlon B R, Schilling K, Sun A. Relative importance of climate and land surface changes on hydrologic changes in the US Midwest since the 1930s: implications for biofuel production. *Journal of Hydrology*, 2013, 497: 110-120.
- [ 33 ] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [ 34 ] 刘柏君, 周广钰, 雷晓辉, 廖卫红, 王浩. 海流兔河基流特征及其对气候变化和人类活动的响应分析. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(5): 56-61.
- [ 35 ] 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, 133-113.
- [ 36 ] 穆兴民, 顾朝军, 孙文义, 赵广举, 高鹏, 王双银. 植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探. *人民黄河*, 2019, 41(10): 31-39.