

DOI: 10.20103/j.stxb.202401220201

曹文旭, 许行, 张志强. 气候变化和植被变化对潮河基流的影响. 生态学报, 2024, 44(24): 11295-11306.

Cao W X, Xu H, Zhang Z Q. The impact of climate and vegetation changes on baseflow in the Chao River. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11295-11306.

气候变化和植被变化对潮河基流的影响

曹文旭¹, 许行^{2,3,4,*}, 张志强^{2,3,4}

1 林木资源高效生产全国重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

2 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

3 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

4 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

摘要: 基流作为枯水期河川径流的主要补给源, 在维持河道基本流量和流域生态系统健康方面发挥着重要作用。然而, 退耕还林(草)等生态工程和气候变化影响下, 基流变化及其影响因素尚未得到充分解析。以潮河流域为研究对象, 研究基于 1961—2020 年水文气象资料, 评估九种基流分割方法的适用性; 同时, 采用 Mann-Kendall 趋势检验和 BFAST(Break For Additive Season and Trend) 算法阐明基流和基流指数(BFI)时变特征, 并通过多元线性回归和累积量斜率变化率比较法解析影响基流变化的主导因素。研究发现: (1) 基于结合退水曲线方法校准后的双参数 Eckhardt 递归数字滤波方法的估算精度较高, 且基流过程线较为符合潮河基流实际变化特征; (2) 年基流量呈显著下降趋势(-0.22 mm/a), 而归一化植被指数(NDVI)和 BFI 则呈现显著上升趋势($P < 0.001$), 且基流量和 NDVI 均在 1999 年发生突变; (3) 植被变化是导致基流量减少的主要因素, 贡献率达 73.13%—86.87%, 其次是潜在蒸散发(贡献率为 13.13%—43.28%); 降水量的增加对基流有一定促进作用(贡献率为 2.63%—16.42%)。研究旨在为潮河流域水资源的可持续利用和植被恢复提供重要科学依据。

关键词: 潮河流域; 植被恢复; 基流分割; 基流指数; 时变特征

The impact of climate and vegetation changes on baseflow in the Chao River

CAO Wenxu¹, XU Hang^{2,3,4,*}, ZHANG Zhiqiang^{2,3,4}

1 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, National Ecosystem Research Network of China, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: As an important recharge source of dry season runoff, baseflow plays an important role in maintaining the basic flow of rivers and the health of the basin ecosystems. However, under the influence of ecological projects such as the Grain for Green Project and climate change, baseflow changes and their influencing factors have not been thoroughly analyzed. A comprehensive understanding of these dynamics is essential for effective water resource management and the sustainability of these ecosystems. Taking the Chao River watershed as the study subject, this study provided a comprehensive comparative analysis of the applicability of nine different baseflow separation methods based on the hydrological and meteorological data

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2023MA002); 中国科协青年人才托举工程(YESS20230091); 中央高校基本科研业务费专项资金(QNTD202303)

收稿日期: 2024-01-22; **网络出版日期:** 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hangxu@bjfu.edu.cn

from 1961 to 2020. In addition, the Mann-Kendall trend test and the BFAST (Break For Additive Season and Trend) algorithm were employed to elucidate the time-varying characteristics of baseflow and the baseflow index (BFI). Furthermore, the dominant factors of the watershed's baseflow changes were determined through multiple linear regression and the slope change ratio of cumulative quantity methods. The study found that: (1) The two-parameter Eckhardt recursive digital filter method demonstrated relatively higher estimation accuracy, and the baseflow process line obtained using this method was more consistent with the actual changing characteristics of the Chao River's baseflow. (2) The annual baseflow showed a significant downward trend at a rate of -0.22 mm/a , while the normalized difference vegetation index (NDVI) and BFI exhibited a significant increasing trend ($P < 0.001$). Meanwhile, there were abrupt changes in both baseflow and NDVI in the year 1999. (3) Vegetation restoration emerged as the dominant factor contributing to the reduction of baseflow, with a substantial contribution rate range from 73.13% to 86.87%, followed by potential evapotranspiration (contribution rate of 13.13%—43.28%). Additionally, the increase in precipitation had a certain promoting effect on baseflow, with a contribution rate of 2.63%—16.42%. This study provided an important scientific foundation for the sustainable utilization of water resources and sustainable vegetation restoration in the Chao River watershed.

Key Words: Chao River watershed; vegetation restoration; baseflow separation; baseflow index; time-varying characteristics

基流作为地下水和其他延迟水资源补给河川径流的重要水源^[1],是河川径流中较为稳定的组成部分,也是联系地下水和地表水资源之间的重要纽带。作为干旱和无降水时期维持河流基本流量的主要来源,基流在调节河川径流季节分布和保障流域生态系统健康方面发挥着重要作用^[2-3]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)显示,气候变暖加剧了全球水资源的不均衡分配,并致使极端事件日渐频繁^[4]。诱发的高温热浪及持续干旱事件导致水资源短缺地区面临更加严峻的挑战^[5-6]。因此,气候变化背景下准确评估基流量及其时变特征对保障流域水资源可持续利用和生态安全至关重要。然而,不同于基流对气候变化的明确响应,人类活动对基流变化的影响仍然存在一定争议。相关研究表明,大范围植树造林引起耗水增加是导致基流减少的关键因素^[7]。植被覆盖和蒸散量的增加,致使地表径流减少和土壤水分过多消耗,从而导致地下水补给和基流的减少;与此同时,植被也能够通过促进降水入渗来补给地下水,进而保障基流和枯水期河流流量^[8-9]。因此,明确植被恢复对于基流变化的影响,成为实现流域水资源可持续利用和保障生态系统健康所亟待解决的问题。

基流分割是准确评估基流时变特征的关键,不同于河川径流能够直接监测,基流则主要通过示踪法和非示踪法两类方式间接获得^[10]。研究表明,相较于利用稳定同位素或其他化学试剂的示踪方法,数字滤波法^[11]和时间步长法^[12]等非示踪法因其便捷、人力成本低、对水源无污染并且可以评估历史基流特征等优势得到广泛应用^[13-14]。然而,对于同一流域而言,不同非示踪方法所分割获得的基流存在一定差异,因此分析和诊断不同基流分割方法对于特定区域的适用性成为准确评估基流的重要环节。

潮河流域作为京津冀水源涵养功能区的重要组成,在保障首都水源安全和生态安全方面发挥着至关重要的作用。20世纪90年代以来,退耕还林(草)工程以及京津风沙源治理等重点生态工程的相继实施,流域林草覆盖率得到明显提升。然而,大规模植被恢复在提高林草覆盖和改善生态环境的同时,也使得流域径流总量显著下降。研究发现,1960—1971年流域入库流量从3.20亿 m^3 减少至1998—2014年的1.19亿 m^3 ^[15]。水资源的持续衰减以及供需矛盾的日趋尖锐,严重威胁到潮河流域水安全和生态安全。尽管针对潮河流域地表水资源变化已开展众多研究,为流域水资源保护和合理利用提供了重要依据^[16-18]。但是,当前植被恢复对于基流变化的影响及其驱动机制尚不明晰。因此,本文以潮河流域为研究区,基于1961—2020年气象水文资料和非示踪剂基流分割方法,阐明潮河基流量和基流指数演变特征,定量评估气候和植被变化对基流的影响,明确基流变化的主导因素,旨在为潮河流域水资源适应性管理和保障流域水资源可持续利用提供重要科学依据。

1 材料与方 法

1.1 潮河流域概况

潮河流域(116°08'—117°28'E,40°34'—41°37'N,图1)位于北京市密云水库上游,是密云水库重要入库河流。流域总面积约为4854.82 km²,海拔为159—2218 m,自西北向东南递减。四季分明且雨热同季,属暖温带大陆性季风气候。1961—2020年流域多年平均气温为12.26℃,多年平均降水量为507.66 mm。潮河流域降水量年内分配不均,夏季和初秋(6—9月)降水较为集中,该时期降水量约占流域全年总降水量的79.10%。

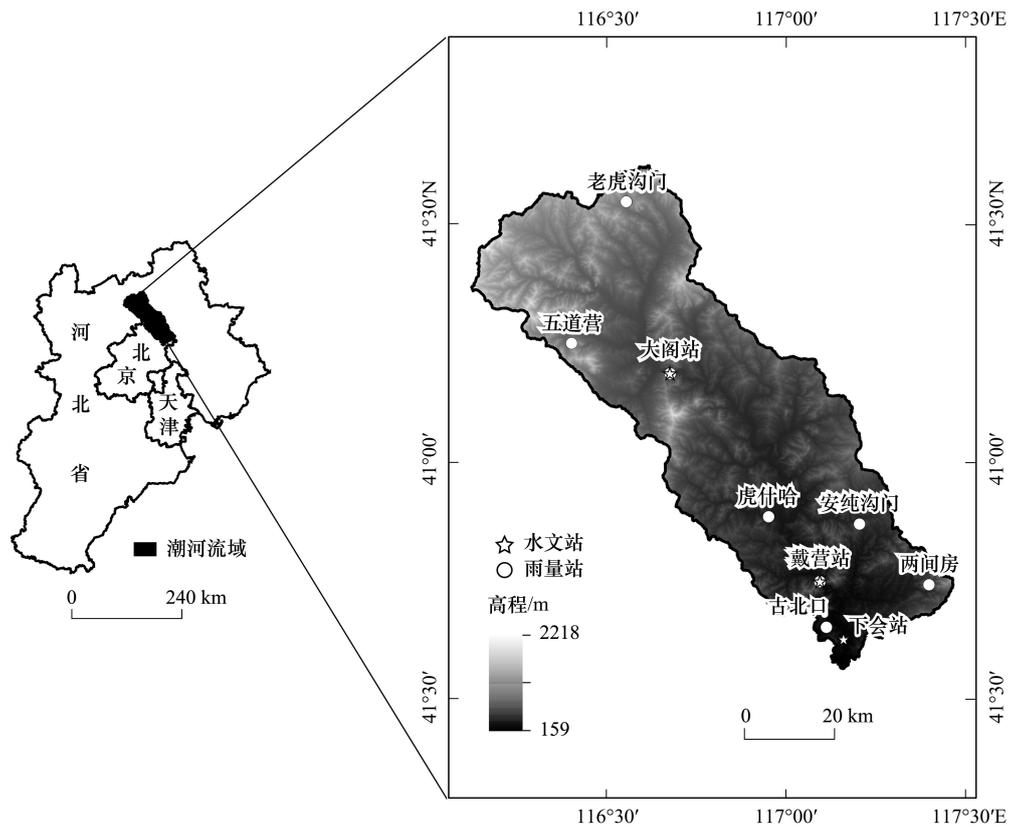


图1 潮河流域地理位置及水文气象站分布

Fig.1 Geographical location of Chao River watershed and distribution of hydrometeorological stations

1.2 数据使用及其来源

1.2.1 流域水文气象数据

研究所使用的水文气象资料主要涵盖:1961—2020年流域内三个水文站的逐日径流数据(图1,大阁站、戴营站和下会站)、8个雨量站的逐日降水数据、流域内部及周边3个气象站(丰宁站、承德站和密云站)的逐日气象数据,以及由中国气象数据网所提供的地面气候资料数据集和辐射数据。其中,水文站径流数据及同期雨量站数据均由河北水文水资源局、北京水文总站以及海河水利委员会提供。同时,采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的修正Penman-Monteith公式计算流域潜在蒸散发量(PET)^[19],并基于水量平衡原理的分项调查方法对水文站数据进行了天然径流还原。考虑到研究区位于密云水库上游并且是该水库的入库河流,同时在20世纪70年代,流域修建了部分塘坝和小水库但相继废弃^[17-18]。因此,本文主要考虑农业灌溉和生产生活用水对流域径流的影响:

$$Q_{\text{天然}} = Q_{\text{实测}} + Q_{\text{农业}} + Q_{\text{工业}} + Q_{\text{生活}} \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{天然}}$ 为还原后的天然径流量; $Q_{\text{实测}}$ 为水文站实测径流量; $Q_{\text{农业}}$ 、 $Q_{\text{工业}}$ 和 $Q_{\text{生活}}$ 分别为农业灌溉耗水量、工业

耗水量和生活耗水量。

1.2.2 流域地理空间数据来源

潮河流域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)由地理空间数据云提供,空间分辨率为 30 m。基于 MODIS 植被指数(2000—2020 年)以及 AVHRR GIMMS(1981—2003 年)遥感影像,插补获得全时段归一化植被指数(NDVI)用于表征流域植被变化。同时,选取中国土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD, <https://zenodo.org/records/8176941>)的 1985 年、2000 年和 2020 年共三期土地利用数据^[20],表征流域土地覆盖动态信息(空间分辨率:30 m)。该数据集基于谷歌地球引擎平台上 335709 景 Landsat 影像所制成,定义了包括耕地、森林、灌木、草地、水体、冰雪、裸地、不透水和湿地共 9 种土地覆盖类型,反映了中国快速城市化和退耕还林等生态工程,以及气候变化条件下人类活动对 CLCD 的影响,该数据已得到广泛应用^[21-22]。

1.3 研究方法

1.3.1 基流分割方法简述

研究选取 3 种图解方法和 6 种数字滤波方法用于基流分割。其中,图解法为美国地质调查局开发的时间步长方法(Hydrograph Separation Program, HYSEP)。基于对最低流量的选择方式,HYSEP 法分为固定间隔(HYSEP-FI)、滑动间隔(HYSEP-SI)和局部最小值(HYSEP-LM)3 种。首先,根据经验关系计算退水时段:

$$N = (2.59A)^{0.2} \quad (2)$$

式中, A 为潮河流域面积, km^2 ; N 为地表径流停止后退水持续的时间,选取最接近 $2N$ 且介于 3 与 11 之间的奇数。随后,应用 3 种 HYSEP 方法分别进行基流分割。具体计算方法详见参考文献^[12]。

研究选取 Lyne-Hollick 数字滤波法^[23]、Chapman 数字滤波法^[24]、Chapman-Maxwell 递归数字滤波法^[25]、Boughton-Chapman 数字滤波法^[26]、EWMA 数字滤波方法^[27]和 Eckhardt 双参数递归数字滤波法^[11]共 6 种数字滤波方法实现基流分割:

(1) 单参数 Lyne-Hollick 数字滤波法

Lyne 和 Hollick 于 1979 年提出单参数数字滤波法用于基流分割^[23]:

$$Q_{q,k} = aQ_{q,k-1} + \frac{1+a}{2}(Q_k - Q_{k-1}) \quad (3)$$

$$BF_k = Q - Q_{q,k} \quad (4)$$

式中, $Q_{q,k}$ 和 $Q_{q,k-1}$ 分别为 k 和 $k-1$ 时刻流域地表径流量, mm ; Q_k 和 Q_{k-1} 分别为对应时刻流域总径流量, mm ; a 为滤波参数,推荐值 9.25×10^{-1} ^[28]; BF_k 和 BF_{k-1} 分别为 k 和 $k-1$ 时刻滤波基流量, mm 。滤波器被传递了正向和反向共两次,用以消除相位失真^[29]。

(2) Chapman 数字滤波法

Chapman 改进 Lyne-Hollick 法,提出 Chapman 数字滤波法^[24],其解析式为:

$$Q_{q,k} = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha}Q_{q,k-1} + \frac{2}{3 - \alpha}(Q_k - \alpha Q_{k-1}) \quad (5)$$

式中,滤波参数 α 推荐值为 0.95。

(3) Chapman-Maxwell 递归数字滤波法

Chapman 和 Maxwell 将 k 时刻基流视为该时刻地表径流与 $k-1$ 时刻基流的加权平均,并提出 Chapman-Maxwell 数字滤波法^[25]:

$$BF_k = \frac{K}{2 - K}BF_{k-1} + \frac{1 - K}{2 - K}Q_k, (BF_k \leq Q_k) \quad (6)$$

式中, K 为退水系数,为 0.95。

(4) Boughton-Chapman 数字滤波法:

$$BF_k = \frac{k}{1 + C}BF_{k-1} + \frac{C}{1 + C}BF_k \quad (7)$$

式中, C 为常数, 为 $0.15^{[26]}$ 。

(5) EWMA 数字滤波法

$$BF_k = \varepsilon Q_k + (1 - \varepsilon) BF_{k-1}, (BF_k \leq Q_k) \quad (8)$$

式中, ε 为平滑常数, 取值范围为 $1.10 \times 10^{-2} - 1.50 \times 10^{-2}^{[27]}$ 。本研究中 ε 取平均值。

(6) 双参数递归数字滤波法

该方法是由 Eckhardt 在单参数数字滤波法的基础上所提出^[11], 包含退水系数 α 和最大基流指数 BFI_{\max} 。根据流域水文地质特征, 给出了 BFI_{\max} 在多孔含水层地区常年性河流、季节性河流以及硬质岩介质含水层地区的常年性河流适用的推荐值, 分别为 0.80、0.50 和 0.25。

$$BF_k = \frac{1 - BFI_{\max}}{1 - \alpha BFI_{\max}} \alpha BF_{k-1} + \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha BFI_{\max}} BFI_{\max} Q_k, (BF_k \leq Q_k) \quad (9)$$

式中, α 取值范围 $0.95 - 0.98^{[30]}$ 。鉴于 Eckhardt 方法给出的参数推荐值是基于有限流域的研究结果, 为保证可靠的基流分割, 本研究采用主退水曲线 MRC (Master Recession Curve) 方法^[31-33]对 Eckhardt 方法中参数进行优化和评估。

1.3.2 评价指标与统计方法

(1) 基流分割最优方法选择指标

研究采用适用于长时间序列且能够较好反映流域自然补给特征的枯水指数 (Low-flow Index, LFI) 与流域年总径流量的乘积作为年基流量的实测值 (公式 10)^[34]。同时, 选取相关系数 (R)、均方根误差 (RMSE)、标准差 (SD) 以及 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE) 和 Kling-Sutcliffe 效率系数 (KGE)^[35] 作为目标函数, 验证不同分割方法的可靠性。

$$LFI = \frac{Q_{90}}{Q_{50}} \quad (10)$$

式中, Q_{90} 和 Q_{50} 分别代表时段内出现频率大于等于 90% 和 50% 时的径流量, mm。

(2) 基流时变特征及其归因分析

基于 BFAST 算法、Mann-Kendall 趋势检验和变异系数分析基流时变特征^[36]。同时, 采用 Spearman 秩相关检验探究流域降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 与径流、基流和基流指数的相关性, 并结合多元线性回归和累积量斜率变化率比较法 (SCRAQ) 定量评价气候变化和植被恢复对基流变化的影响和贡献率^[37]。

2 结果与分析

2.1 基流分割方法比较

基于实测径流资料采用 9 种基流分割方法得到的基流过程线如图 2 所示。3 种 HYSEP 方法分割的基流过程线变化较大, 且雨季基流变化差异显著, 而枯水季节差异较小。其中, HYSEP-LM 方法得到的基流过程线相较平滑, 退水过程相对缓慢。数字滤波方法中, Lyne-Hollick 和 EWMA 滤波法分割的基流过程最为平缓。Chapman、Chapman-Maxwell 和 Boughton-Chapman 方法得到的基流过程相近, 然而过程线随流域径流变化陡涨陡落, 无法较好地反映基流的实际变化特征 (图 2)。相较而言, Eckhardt 方法得到的基流过程线起伏相对平稳, 且对汛期降水有一定的响应, 能够较好地反映潮河日基流量的变化。

比较各基流分割方法发现 (图 3), 3 种 HYSEP 方法分割的基流量与实测值的相关性分别为 0.60 (HYSEP-LM)、0.89 (HYSEP-SI) 和 0.91 (HYSEP-FI)。HYSEP-LM 表现较差, NSE 和 KGE 分别为 0.39 和 0.53 (表 1)。相比之下, 数字滤波方法所分割的基流结果优于 HYSEP 法, 相关性为 0.84—0.93。其中, 基于 Eckhardt 方法分割得到的基流精度较好, NSE 和 KGE 分别为 0.78 和 0.82。

进一步评估 Eckhardt 方法有效性发现, MRC 方法计算得到的 BFI_{\max} 值为 0.78, 且相较于 Eckhardt 方法 BFI_{\max} 的推荐值, 优化后的 Eckhardt 方法 (即 Eckhardt_{cal}) 性能显著提高 (图 3、表 1)。目标函数 R 、NSE 和 KGE

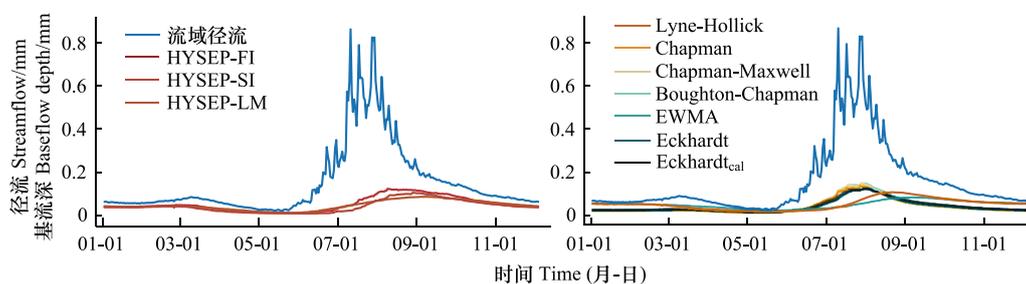


图2 图解法和数字滤波法的潮河基流过程线对比

Fig.2 Comparison of baseflow hydrographs of Chao River with HYSEP and digital filter method methods

HYSEP-FI: 固定间隔时间步长法; HYSEP-SI: 滑动间隔时间步长法; HYSEP-LM: 局部最小值时间步长法; Lyne-Hollick: Lyne-Hollick 数字滤波法; Chapman: Chapman 数字滤波法; Chapman-Maxwell: Chapman-Maxwell 递归数字滤波法; Boughton-Chapman: Boughton-Chapman 数字滤波法; EWMA: EWMA 数字滤波法; Eckhardt: Eckhardt 双参数递归数字滤波法; Eckhardt_{cal}: 优化后的 Eckhardt 双参数递归数字滤波法

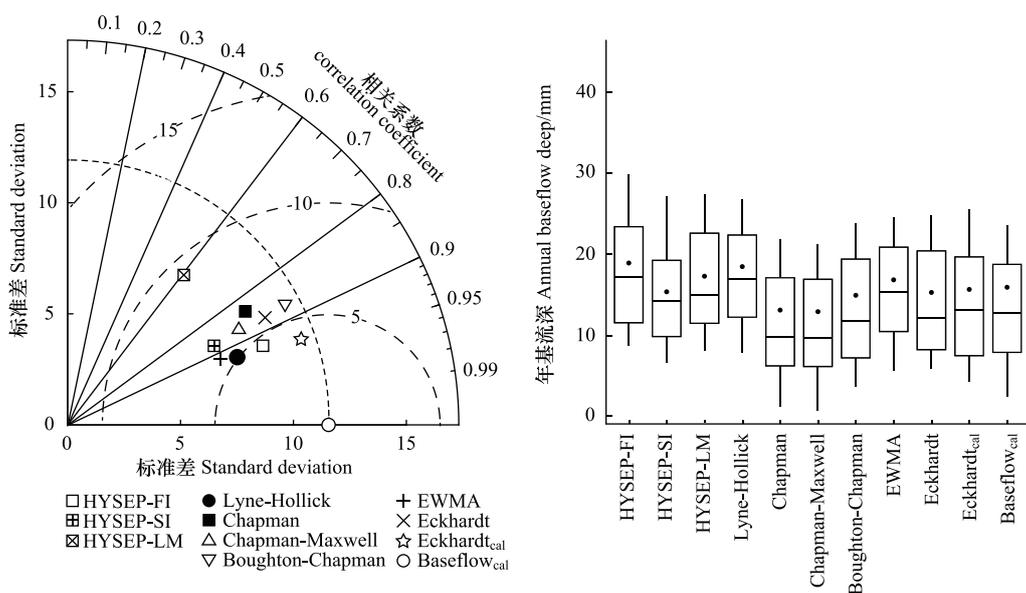


图3 不同基流分割方法的 Taylor 图和基流箱形图

Fig.3 Taylor diagram and box plot of baseflow of different baseflow separation methods

Baseflow_{cal}: 基于枯水指数方法的年基流量实测值

分别从 0.87、0.78 和 0.82 提高至 0.93、0.81 和 0.84。同时,潮河年均基流量实测值为 16.02 mm, Eckhardt_{cal} 方法表现出最为接近的估计值(15.87 mm, 图 3)。总体而言, Eckhardt_{cal} 方法对潮河基流分割的稳定性和可靠性最佳,因此基于该方法开展后续研究。

2.2 基流及基流指数时变特征

潮河流域年均径流量和基流量分别为(53.11±5.00) mm 和(16.02±1.35) mm(表 2),均呈现显著下降趋势(图 4),变化速率分别为-1.17 mm/a($P < 0.001$)和-0.22 mm/a($P < 0.05$)。然而,与年径流和年基流变化趋势相反,年 BFI 以平均每年 2.50×10^{-3} 的速度显著上升($P < 0.001$)。BFAST 算法结果表明,年径流和基流序列均存在一个变异点(1999 年)。基于此,流域径流和基流变化过程被划分成两个阶段,即 1961 至 1999 年(基准期)和 2000 至 2020 年(扰动期)。基准期,年均径流量和基流量分别为(68.29±6.39) mm 和(18.04±1.89) mm,且呈不显著下降趋势,变异系数为 0.69。然而,相较于基准期,年径流量和基流量在扰动期分别减少 64.79%和 41.35%,变异系数下降至 0.47。

表 1 不同基流分割方法的结果评价

Table 1 Evaluation of different baseflow separation methods

评价指标 Evaluating criteria	基流分割方法 Baseflow separation method									
	图解法 Graphical method					数字滤波法 Digital filter method				
	FI	SI	LM	Lyne-Hollick	Chapman	Chapman-Maxwell	Boughton-Chapman	EWMA	Eckhardt	Eckhardt _{cal}
Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE	0.76	0.74	0.39	0.77	0.67	0.64	0.75	0.76	0.78	0.81
Kling-Sutcliffe 效率系数										
KGE	0.74	0.63	0.53	0.67	0.69	0.67	0.80	0.65	0.82	0.84

NSE: Nash-Sutcliffe 效率系数 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; KGE: Kling-Sutcliffe 效率系数 Kling-Sutcliffe efficiency coefficient; FI: HYSEP 固定间隔法 HYSEP fixed-interval method; SI: HYSEP 滑动间隔法 HYSEP sliding-interval method; LM: HYSEP 局部最小值法 HYSEP local minimum method; EWMA: EWMA 数字滤波方法 Exponential weighted moving average digital filter method; Eckhardt_{cal}: 优化后的 Eckhardt 双参数递归数字滤波法 Calibrated Eckhardt two-parameter recursive digital filter method

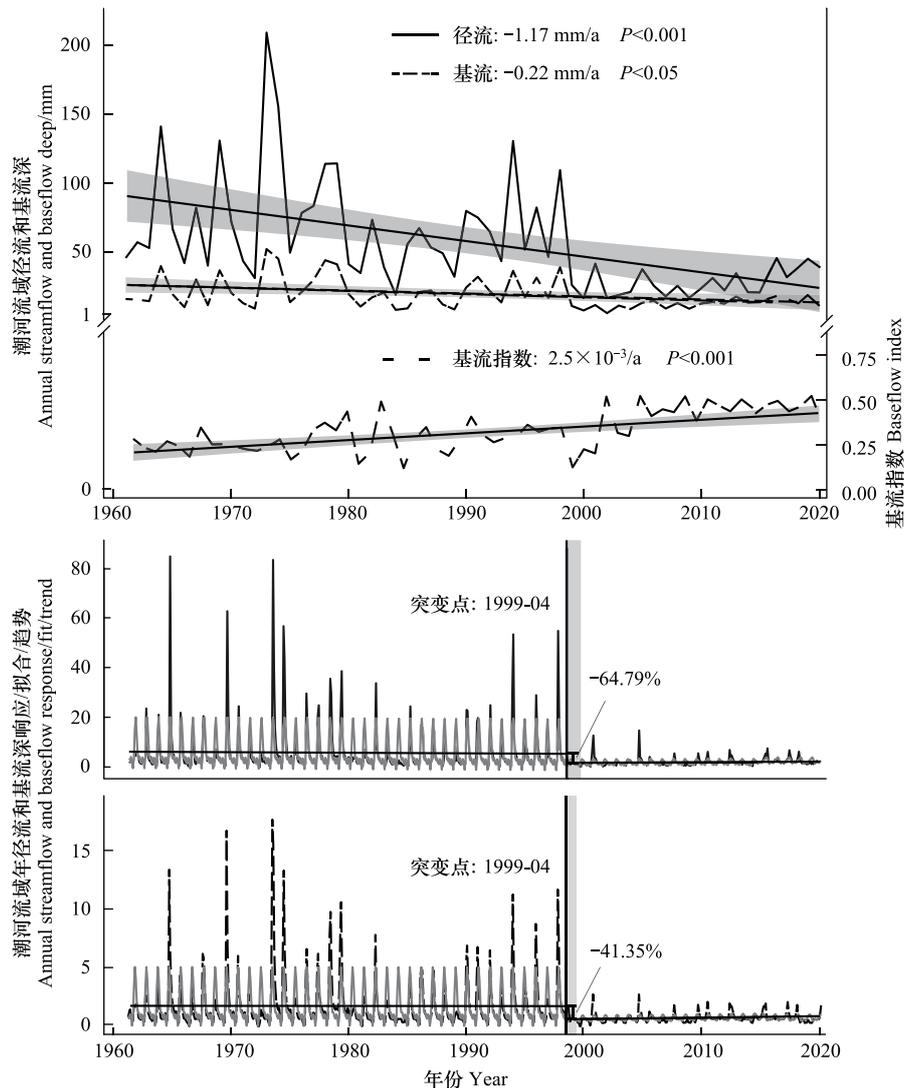


图 4 潮河年径流、年基流及 BFI 的时变特征以及非一致性分析

Fig.4 Time-varying characteristics and non-consistency analysis of annual runoff, baseflow, BFI

图中阴影代表 95% 置信区间; BFI: 基流指数 Baseflow index

2.3 潮河基流变化驱动因素

潮河流域多年平均降水量为(507.66±11.942) mm(表2),年降水量呈不显著上升趋势(图5, $P=0.55$)且年降水序列未检测到突变。多年平均PET为(1169.35±10.607) mm, PET序列整体呈显著上升趋势($P<0.01$), 变

表2 年降水量、潜在蒸散发量、NDVI、基流和 BFI 时变特征

Table 2 Time-varying characteristics of annual precipitation, potential evapotranspiration, NDVI, baseflow, and BFI

变量 Variables	变化趋势 Variation trend/a	突变年份 Mutation year	多年平均值 Annual mean value
降水 Precipitation/mm	0.42	—	507.66±11.942
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration/mm	1.83 **	—	1169.35±10.607
基流 Baseflow/mm	-0.22 **	1999	16.02±1.352
基流指数 BFI	2.50×10^{-3} *	—	0.32±0.020
归一化植被指数 NDVI	1.27×10^{-3} ***	1999	0.43±0.004

BFI:基流指数 Baseflow index; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; *表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$; —表示时间序列未检测到突变

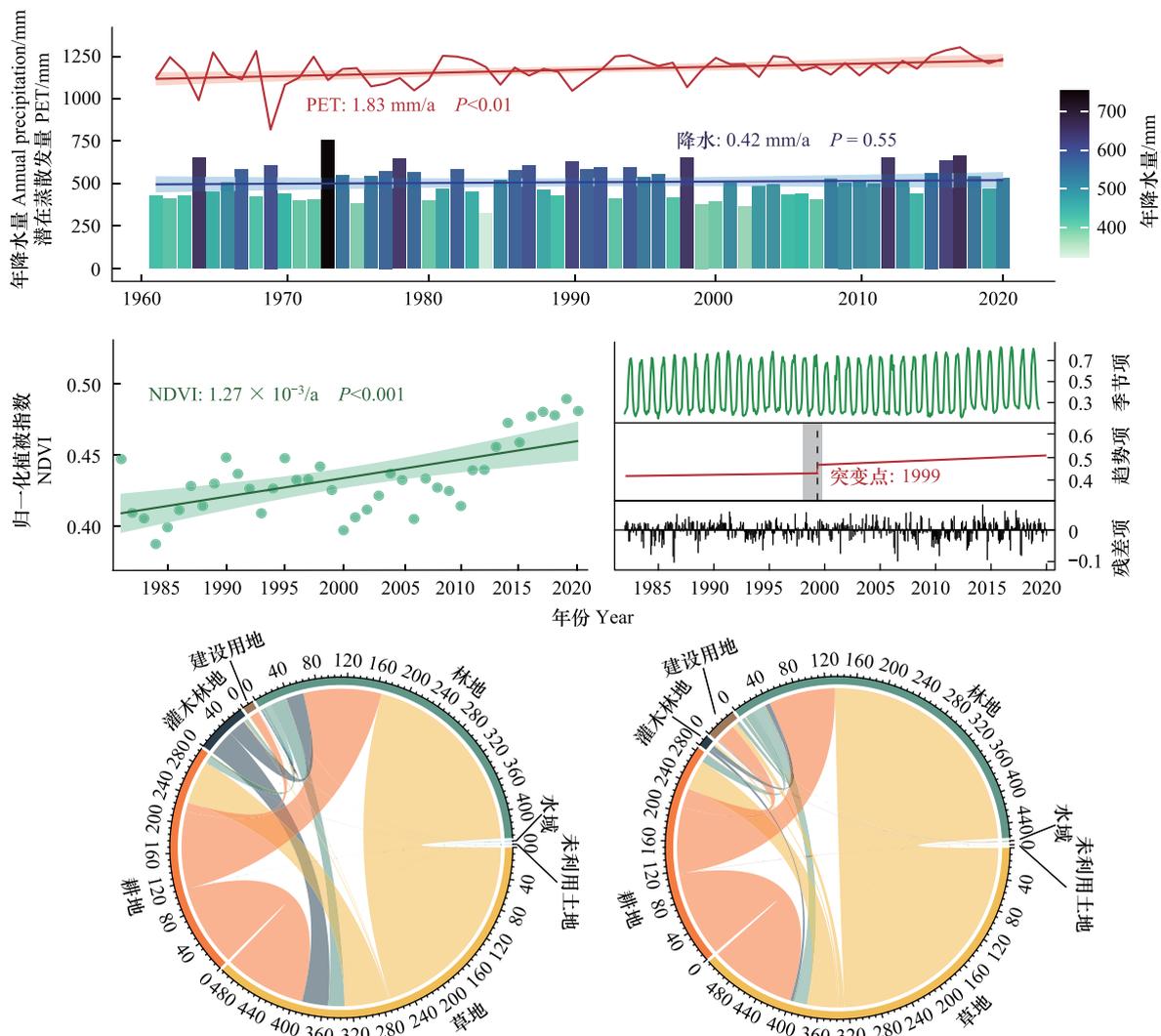


图5 年降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 变化特征以及 1961—1999 年和 2000—2020 年土地利用转移

Fig.5 Variation characteristics in annual precipitation, PET, NDVI, and land use transfer during 1961—1999 and 2000—2020

PET:潜在蒸散发 Potential evapotranspiration; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

化速率为每年上升 1.83 mm。多年平均 NDVI 值为 0.43 ± 0.004 , 并且以每年 1.27×10^{-3} 的速率显著增加 ($P < 0.001$)。最小值和最大值分别出现在 1984 年和 2019 年对应 NDVI 分别为 0.39 和 0.49 (图 5)。与基流突变年份一致, NDVI 序列也于 1999 年附近发生突变 (图 5, $P < 0.001$)。基准期 NDVI 变化不显著 ($P = 0.35$), 自 1999 年后 NDVI 以每年 3.81×10^{-3} 的速率显著上升 ($P < 0.001$)。

潮河流域的土地利用类型主要包括林地、草地、灌木林地、水域、耕地、建设用地和未利用地共七类 (图 5)。其中, 草地是转出面积最多的土地利用类型, 主要转向林地。两个研究时期内, 草地转向林地的面积分别为 268.52 km^2 和 325.78 km^2 。此外, 耕地也是流域内转出面积较多的土地利用类型, 主要转向草地和林地。两个时期内耕地分别向草地和林地转出 110.80 km^2 和 105.69 km^2 , 以及 116.03 km^2 和 89.55 km^2 。林地则是潮河流域内主要的转入地类, 转入面积分别为 398.27 km^2 和 422.43 km^2 。

Spearman 秩相关检验结果显示, 基流量与流域降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 显著相关 (表 3)。其中, NDVI 与基流量的相关性最大, 为 -0.51 ($P < 0.05$), 其次是潜在蒸散量 ($R = -0.36$, $P < 0.05$) 和降水量 ($R = 0.31$, $P < 0.01$)。由此推测, NDVI 和潜在蒸散发量的增加对于基流量减少起到重要的驱动作用, NDVI 可能是导致基流变化的关键因素, 降水量的增加对基流变化起到一定的正效应。然而, 由于径流量和基流量的复杂变化, BFI 与降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 相关性均不显著。采用 SCRAQ 方法和多元线性回归定量评估流域降水量、潜在蒸散发量和 NDVI 对基流量变化的影响, 结果表明植被变化是导致基流量减少的主导因素, 贡献率达 86.87%, 其次是潜在蒸散发和降水, 贡献率分别为 13.13% 和 -2.63%。此外, 多元线性回归结果也表明植被变化对基流量的减少起到了决定性的作用, 贡献率达 73.13%。潜在蒸散发和降水的贡献率分别为 43.28% 和 -16.42%。

表 3 潮河基流和 BFI 变化驱动因素

Table 3 Driving factors of baseflow and BFI in the Chao River

变量 Variables	Spearman 系数 Spearman coefficient		回归系数 Regression coefficient		SCRAQ 贡献率 Contribution rate of SCRAQ/%
	基流	BFI	基流	BFI	基流
降水 Precipitation	0.31 **	0.09	0.11 **	-0.05	-2.63
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	-0.36 *	-0.16	-0.29 *	-0.21	13.13
归一化植被指数 NDVI	-0.51 *	0.29	-0.49 *	0.34	86.87

SCRAQ: 累积量斜率变化率比较法 Slope change ratio of accumulative quantity method; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 潮河基流分割方法评价

基于实测径流资料利用 9 种方法对潮河基流进行分割, 结果表明 HYSEP 的 3 种方法所得基流结果表现出较大差异且基流过程线波动明显。这主要是因为 HYSEP 方法是基于经验关系 (公式 2) 计算得到流域地表径流退水持续时间 N , 并用于后续基流评估。然而, 该经验关系仅考虑了流域面积 (A)^[12], 而未充分考虑气候和流域下垫面特征的影响。因此, 当流域植被覆盖较低时, N 则会被高估。同时, 该方法在后续基流评估中将使用 $2N$ 作为滑动窗口间隔^[38], 因此较高的 N 估计值可能导致大量基流无法有效从径流资料中分割出来, 进而影响结果的准确性。此外, 由于流域的调蓄作用, 实际情况下基流过程线相对平滑。然而, 3 种 HYSEP 方法所得到的基流过程线表现出基流对于降水事件的即时变化, 并且在降水初期基流量增加速率与径流量变化速率相近, 这与实际情况下基流的延迟响应不一致^[39]。对比数字滤波法的基流分割结果发现, Eckhardt 方法得到的基流过程线起伏程度较小, 能够有效表征潮河基流变化。然而, 相关研究表明, 尽管 Eckhardt 方法可以得到光滑的基流过程且能够得到可靠的基流值, 但该方法对参数 BFI_{\max} 较为敏感。例如, Xie 等^[40] 评估美国地质勘探局编号 02301990 流域基流变化时发现, 由于干旱时期流域径流量相对较低导致了 BFI_{\max} 参数的低估, 并降低了 Eckhardt 方法的有效性。作为枯水期河流的基本流量, 基流的退水速率表征了潮河流域对地下

水的蓄滞能力^[41]。基于 MRC 通过参数 α 量化潮河流域下垫面条件和地下水补给特征对径流的影响^[42], 从而进一步实现对 BFI_{max} 的优化。因此, 为进一步提高 Eckhardt 方法的性能, 本研究对使用 Eckhardt 方法的 α 和 BFI_{max} 推荐值和基于结合退水曲线 MRC 估计的 α 和 BFI_{max} 的两种方法分割潮河基流的有效性进行评估, 以确定 Eckhardt 双参数数字滤波方法的最佳参数值。结果表明, MRC 方法计算 BFI_{max} 值为 0.78, 相对于默认 BFI_{max} 参数值, 校准后 Eckhardt 方法的性能得到了显著提高。 R 、NSE 和 KGE 分别从 0.87、0.78 和 0.82 提高至 0.93、0.81 和 0.84(图 3, 表 1), 校准后的 Eckhardt 方法对潮河基流分割的稳定性和可靠性明显改善。

3.2 潮河基流时变特征及驱动因子解析

气候变化和植被恢复是流域水文循环过程和水资源演变的重要驱动因素。IPCC AR6 指出, 自 20 世纪中期以来气候变化显著改变了全球水循环过程^[4]。其中, 降水波动以及受大气需水量和植被“变绿”双重影响的蒸散量增加, 导致水资源格局的重新配置, 并对流域水安全形势和生态系统稳定构成严峻威胁^[43]。潮河流域地处京津冀重要水源涵养生态功能保护区, 是首都重要水源地, 对保障首都饮用水安全和生态安全至关重要。研究发现, 20 世纪 60 年代以来, 基流量呈现显著减少态势(变化速率为 -0.22 mm/a , $P < 0.01$), 这与黄河、砚瓦川和伊洛河流域研究结果一致^[2, 44-45]。植被变化是潮河基流量显著减少的主导因素, 其贡献率达 73.13%—86.87%。上世纪 90 年代, 随着退耕还林(草)和京津风沙源治理等生态工程的相继实施, 流域植被覆盖整体呈现增长态势, 植被恢复成效显著^[46-47]。与前人研究结果一致, 大规模生态保护和恢复工程在提升流域植被覆盖度和改善生态环境的同时, 也致使冠层截留降水和植被耗水量的增加^[48-49]。1999 至 2009 年潮河流域年均蒸散发量相较于 1961 至 1999 年(444.09 mm)提升了 7.02%^[16], 植被大面积恢复使得流域地表径流量和地下水补给量减少^[50-51]。与此同时, 相关研究发现植被恢复也能够通过增加土壤孔隙度、促进下渗以及提高持水能力等途径, 改善流域土壤水文属性, 从而影响地表产流模式^[52]以及基流变化。一方面, 植被恢复使得流域调蓄能力得到改善, 降水能够更为均衡地补给地下水。潮河基流变异系数由基准期的 0.69 下降至 0.47, 基流变化更为稳定; 另一方面, 植被恢复致使土壤水分不断消耗, 降水对地下水补给量减少。PET 反映了大气蒸发能力, 即潜在蒸散发能力越强, 降水更倾向于由蒸散发所损失。气候变暖背景下, 土壤蒸散发量增加, 同时流域 NDVI 增加导致蒸散能力显著增强, 植被为满足其生长和生存需求将进一步利用包气带水分以及地下水。季节性降水入渗主要用于补偿流域土壤水分, 从而致使地下水资源补给量减少。研究发现, 降水和 PET 对潮河基流减少的贡献分别为 2.63%—16.42% 和 13.13%—43.28%。相较于潮河流域降水波动 (0.42 mm/a , $P = 0.55$), 显著上升的 PET (1.83 mm/a , $P < 0.01$) 能够更大程度上影响降水入渗量在补给基流和蒸散发之间的分配, 基流变化对 PET 变化更为敏感。因此, 优化水资源配置和保障水安全, 以期维持生态效益其可持续性成为潮河流域植被恢复所面临的新挑战。

4 结论

(1) 结合退水曲线校准后的双参数 Eckhardt 基流分割方法估算精度较高(R 、NSE 和 KGE 分别为 0.93、0.81 和 0.84), 且基流过程线较为符合潮河基流实际变化特征, 因此更适用于本流域的基流分割。

(2) 年基流量呈现显著下降趋势, 变化速率为 -0.22 mm/a ($P < 0.05$), 而 NDVI 和 BFI 则呈现显著上升趋势 ($P < 0.001$), 并且基流量和 NDVI 均在 1999 年发生突变。

(3) 植被大面积恢复导致的降水截留量和蒸散发量增加, 以及地下水资源补给量减少, 是导致基流量显著减少的主导因素, 贡献率达 73.13%—86.87%。同时, 植被恢复通过促进降水入渗和减少快速径流使得基流变化更为稳定。降水和 PET 对基流减少的贡献分别为 2.63%—16.42% 和 13.13%—43.28%。显著上升的 PET ($P < 0.01$) 决定了降水入渗量在补给基流和蒸散发之间的分配, 因此基流变化对 PET 变化更为敏感。

参考文献 (References):

- [1] Hall F R. Base-flow recessions—a review. *Water Resources Research*, 1968, 4(5): 973-983.
- [2] 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.

- [3] Miller M P, Buto S G, Susong D D, Rumsey C A. The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin. *Water Resources Research*, 2016, 52(5): 3547-3562.
- [4] Netz B, Davidson O, Bosch P, Dave R, Meyer L. Climate change 2007: mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers, Geneva, Switzerland, 1-34.
- [5] Dosio A, Mentaschi L, Fischer E M, Wyser K. Extreme heat waves under 1.5 °C and 2 °C global warming. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(5): 054006.
- [6] Ji P, Yuan X, Ma F, Pan M. Accelerated hydrological cycle over the Sanjiangyuan region induces more streamflow extremes at different global warming levels. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(11): 5439-5451.
- [7] Trancoso R, Phinn S, McVicar T, Larsen J, McAlpine C. Regional variation in streamflow drivers across a continental climatic gradient. *Ecohydrology*, 2017, 10(3): e1816.
- [8] Hou Y P, Zhang M F, Wei X H, Liu S R, Li Q, Cai T J, Liu W F, Zhao R Q, Liu X Z. Quantification of ecohydrological sensitivities and their influencing factors at the seasonal scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(3): 1447-1466.
- [9] Xue B L, A Y, Wang G Q, Helman D, Sun G, Tao S L, Liu T X, Yan D H, Zhao T, Zhang H B, Chen L H, Sun W C, Xiao J F. Divergent hydrological responses to forest expansion in dry and wet basins of China: implications for future afforestation planning. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): e2021WR031856.
- [10] 周星, 沈忱, 倪广恒, 胡宏昌. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法. *清华大学学报: 自然科学版*, 2017, 57(3): 318-323, 330.
- [11] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507-515.
- [12] Sloto R A, Crouse M Y. HYSEP: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. Geological Survey, *Water Resources Investigations Report*, 1996: 96-4040.
- [13] 王燕, 赵雪花, 张永波, 郑秀清, 祝雪萍. 不同基流分割方法在渭河流域的应用对比分析. *水力发电*, 2017, 43(2): 15-17, 80.
- [14] Cheng S Y, Tong X, Illman W A. Evaluation of baseflow separation methods with real and synthetic streamflow data from a watershed. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128279.
- [15] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 曾庆慧. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素. *生态学报*, 2018, 38(6): 1941-1951.
- [16] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 王盛萍, 郭军庭, 许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. *生态学报*, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [17] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, STRAUSS Peter, 姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. *生态学报*, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [18] Li Z J, Li X B, Xu Z M. Impacts of water conservancy and soil conservation measures on annual runoff in the Chaohe River Basin during 1961—2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(6): 947-960.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, 1998.
- [20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [21] Huang W Y, Wang P, He L, Liu B Y. Improvement of water yield and net primary productivity ecosystem services in the Loess Plateau of China since the “Grain for Green” project. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110707.
- [22] Shao W Y, Zhang Z P, Guan Q Y, Yan Y, Zhang J. Comprehensive assessment of land degradation in the arid and semiarid area based on the optimal land degradation index model. *CATENA*, 2024, 234: 107563.
- [23] Lyne V, Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. *Institute of Engineers Australia National Conference*, 1979: 89-93.
- [24] Chapman T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 1999, 13(5): 701-714.
- [25] Chapman T G, Maxwell A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Paper presented at *Hydrology and Water Resources Symposium Water and the Environment*. Institution of Engineers, Australia, 1996.
- [26] Boughton W C. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. In: *Hydrology and Water Resources Symposium*. Institution of Engineers Australia, Newcastle, 1993: 317-324.
- [27] Tularam G A, Ilahee M. Exponential smoothing method of base flow separation and its impact on continuous loss estimates. *American Journal of Environmental Sciences*, 2008, 4(2): 136-144.
- [28] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [29] Spongberg M E. Spectral analysis of base flow separation with digital filters. *Water Resources Research*, 2000, 36(3): 745-752.
- [30] 樊晶晶, 刘纯, 穆征, 赵雪花, 林帅, 孙雪, 黎云云. 不同基流分割方法在秦岭山区-黄土高原过渡带的对比应用及其演化规律研究. *华北*

- 水利水电大学学报: 自然科学版, 2022, 43(3): 1-10, 27.
- [31] Arnold J G, Allen P M, Muttiah R, Bernhardt G. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Groundwater*, 1995, 33(6): 1010-1018.
- [32] Narimani R, Jun C, Nezhad S M, Bateni S M, Lee J, Baik J. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 47: 101383.
- [33] Rimmer A, Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 249-257.
- [34] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3/4): 147-186.
- [35] Kling H, Fuchs M, Paulin M. Runoff conditions in the upper Danube Basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 2012, 424/425: 264-277.
- [36] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, Culvenor D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 106-115.
- [37] 叶晶萍, 刘政, 欧阳磊, 盛菲, 刘士余. 不同时间尺度小流域径流变化及其归因分析. *生态学报*, 2019, 39(12): 4478-4487.
- [38] Yan X, Sun J N, Huang Y N, Xia Y, Wang Z S, Li Z. Detecting and attributing the changes in baseflow in China's Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128957.
- [39] Fang W, Huang S Z, Huang Q, Huang G H, Wang H, Leng G Y, Wang L. Identifying drought propagation by simultaneously considering linear and nonlinear dependence in the Wei River Basin of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125287.
- [40] Xie J X, Liu X M, Wang K W, Yang T T, Liang K, Liu C M. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124628.
- [41] 徐磊磊, 刘敬林, 金昌杰, 王安志, 关德新, 吴家兵, 袁凤辉. 水文过程的基流分割方法研究进展. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3073-3080.
- [42] 熊斌, 熊立华. 基于基流退水过程的非一致性枯水频率分析. *水利学报*, 2016, 47(7): 873-883.
- [43] 刘俊国, 陈鹤, 田展. IPCC AR6 报告解读: 气候变化与水安全. *气候变化研究进展*, 2022, 18(4): 405-413.
- [44] 刘昌明, 成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析. *地理学报*, 2000, 55(3): 257-265.
- [45] 甘容, 徐孟莎, 左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征. *资源科学*, 2022, 44(9): 1824-1834.
- [46] Cao W X, Xu H, Zhang Z Q. Vegetation growth dynamic and sensitivity to changing climate in a watershed in northern China. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4198.
- [47] Cao W X, Li Q H, Xu H, Zhang Z Q. Vegetation dynamics regulate baseflow seasonal patterns of the Chaohe watershed in North China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53: 101797.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 孙思琦, 陈永喆, 王聪, 胡庆芳, 吕一河. 华北地区生态保护与恢复的水资源效应研究. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 97-106.
- [51] Owuor S O, Butterbach-Bahl K, Guzha A C, Rufino M C, Pelster D E, Díaz-Piñés E, Breuer L. Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 2016, 5(1): 16.
- [52] 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.