

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.038; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.038.

曹振江, 姬广兴, 杨瑞婷, 等. 黄河源实际蒸发和径流变化多时间尺度归因分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 209-217.

Cao Zhenjiang, Ji Guangxing, Yang Ruiting, et al. Multi-temporal scale attribution analysis of actual evapotranspiration and runoff changes in the source area of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 209-217.

黄河源实际蒸发和径流变化多时间尺度归因分析

曹振江^{1,2}, 姬广兴¹, 杨瑞婷¹, 王雨欣¹,
李凡¹, 张亚丽¹, 陈伟强¹, 黄珺嫦¹

(1.河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450046; 2.中国地质大学(武汉) 公共管理学院, 武汉 430074)

摘要: [目的]全面分析黄河源区变化环境下水文要素(实际蒸发和径流)变化的主要影响因素,为黄河源区水文循环机理研究和生态环境保护提供参考依据。[方法]基于黄河源区 1967—2020 年的水文气象数据,使用 Mann-Kendall 趋势检验法在年、季和月时间尺度上分析黄河源区实际蒸发和径流的变化特征,采用 ABCD 水文模型和月尺度 Budyko 模型在多时间尺度上定量分离出人类活动和气候变化对黄河源区实际蒸发和径流变化的贡献率。[结果](1) 1967—2020 年黄河源区实际蒸发量在年、季和月时间尺度上都表现为显著增加的趋势;径流在年尺度、旱季、8 月、9 月表现为不显著减少趋势,在雨季和 7 月表现为不显著增加趋势。(2) 在年尺度、旱季、8 月和 9 月,气候变化对流域实际蒸发的影响较大,其对实际蒸发量变化的贡献率分别为 59.61%, 108.43%, 50.71%, 58.17%;在雨季和 7 月,人类活动对流域实际蒸发的影响较大,其贡献率为 62.38% 和 53.34%。(3) 无论是在年尺度、季尺度还是 7 月、8 月、9 月,都表现为气候变化对流域径流变化的贡献率较大,贡献率分别为 55.58%, 56.23%, 59.92%, 68.70%, 51.51% 和 87.03%。[结论]黄河源区不同时间尺度实际蒸发和径流变化多受气候变化影响较大,但是气候因素和人类活动对它们的贡献率相差较小,未来仍应注重人类活动影响的加剧。

关键词: 黄河源区; 实际蒸发; 径流; 多时间尺度; 趋势分析; ABCD 水文模型; 月尺度 Budyko 模型

中图分类号: P339; S161.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0209-09

Multi-temporal scale attribution analysis of actual evapotranspiration and runoff changes in the source area of the Yellow River

Cao Zhenjiang^{1,2}, Ji Guangxing¹, Yang Ruiting¹, Wang Yuxin¹,
Li Fan¹, Zhang Yali¹, Chen Weiqliang¹, Huang Junchang¹

(1.School of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2.School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to comprehensively analyze the main influencing factors of hydrological elements (actual evaporation and runoff) change in the source area of the Yellow River, and to provide reference for the study of hydrological cycle mechanism and ecological environmental protection in this region. [Methods] Based on the hydrometeorological data of the Yellow River source area from 1967 to 2020, the characteristics of the changes in the actual evaporation and runoff of the Yellow River source area on the annual, seasonal, and monthly scales were analyzed by using the Mann-Kendall trend test method. And the ABCD hydrological model and the monthly scale Budyko model were used to quantitatively compute the contributions of human activities and climate change to the changes of actual evaporation and runoff in the

收稿日期: 2024-02-21

修回日期: 2024-03-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 河南省科技攻关项目(222102320041); 2022 年河南省高等学校智库研究项目(2022ZKYJ07); 河南省高校人文社会科学研究一般项目(2023-ZZJH-189); 河南农业大学拔尖人才项目(30501031); 河南农业大学创新训练项目(2022DC156)

第一作者: 曹振江(2001—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化下生态水文响应及管理。E-mail: 19503837521@163.com

通信作者: 姬广兴(1990—), 男, 河南商丘人, 博士, 讲师, 主要从事变化环境下生态水文研究。E-mail: guangxingji@henau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

source area of the Yellow River at multiple time scales. [Results] (1) The actual evapotranspiration in the source area of the Yellow River during the period 1967—2020 showed a significant increasing trend at the annual, seasonal and monthly time scales; runoff showed a non-significant decreasing trend at the annual scale in dry season, August and September, and a non-significant increasing trend in rainy season and July. (2) The influence of climate change on actual evapotranspiration was greater at the annual scale, in dry season, August and September, with contributions of 59.61%, 108.43%, 50.71%, and 58.17%, respectively. Human activities had a greater impact on the change of actual evapotranspiration in the rainy season and July, with contributions of 62.38% and 53.34%, respectively. (3) The dominant factor affecting the change of runoff was climate change, both at an annual scale and seasonal scale, and in July, August, and September, with contributions of 55.58%, 56.23%, 59.92%, 68.70%, 51.51%, and 87.03%, respectively. [Conclusion] The actual evaporation and runoff at different time scales in the source region of the Yellow River are mostly affected by climate change, but the contribution rates of climate factors and human activities to them are relatively small. In the future, attention should be paid to the intensification of human activities.

Keywords: Yellow River source area; actual evaporation; runoff; multiple time scales; trend analysis; ABCD hydrological model; monthly time scale Budyko model

近些年来,由于全球气候变化和人类活动影响加剧,我国江河流域水循环发生一定程度的变化,进而引起一系列生态问题。黄河源区是黄河流域的重要产流区,为下游各省区提供了丰沛的淡水资源,受全球环境变化的影响,黄河源区生态环境退化严重,出现不同程度的冻土退化^[1]和草地退化^[2]等问题。实际蒸发和径流是重要的水文因素,蒸散发是水分和能量交换的主要过程,也是区域水循环的组成部分^[3],蒸散发变化趋势是表征区域水循环的重要特征。径流是流域中气候和下垫面综合作用的产物,是水循环的基本环节^[4],对生态环境和经济发展至关重要。因此,分析黄河源区实际蒸发和径流变化的规律和驱动因素对于黄河源区的生态保护、可持续发展战略实施和水资源合理开发利用具有重要意义。

对流域水文要素(实际蒸发和径流)变化进行归因分析研究的常用方法有水文模型法和 Budyko 模型法两种。水文模型法主要依据能量守恒和水量平衡原理^[5],物理概念清晰,模拟精度高,应用广泛^[6-7]。例如,刘昌明等^[8]使用 SWAT 水文模型分析了黄河源区径流变化的原因。庄稼成等^[9]使用改进的 abcd 水文模型和去趋势分析法,计算出人类活动和气候变化对黄河源区径流变化的相对贡献。Budyko 模型法参数较少,结构较为简单,使用方便,同时物理意义明确,得到了广泛的应用^[10-11]。例如,师卫钊等^[12]使用基于 Budyko 假设的气候弹性系数法的水量平衡方程式进行嘉陵江上游流域径流变化归因分析,得出人类活动是引起径流变化的主导因素。张鸣等^[13]采用变参数的 Budyko 公式分离出降水、潜在蒸散发和下垫面变化对径流变化的贡献率。马卫明等^[14]使用扩

展 Budyko 框架下的公式,量化气候因素、流域下垫面条件和人类活动对径流变化的贡献。

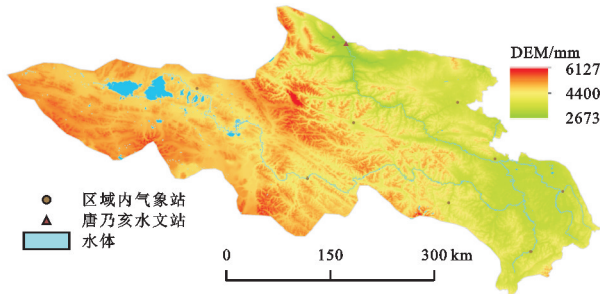
然而,这些研究大都是在年尺度上分析流域水文要素变化的原因,对年内尺度流域水文要素变化的归因研究较少,不利于掌握影响因素对流域水文要素变化的年内影响特征和指导农业生产活动^[15]。蒋小满等^[16]通过建立基于 Budyko 理论与互补模型的耦合模型,得出降水、NDVI 与日照时数分别是影响浑河流域夏季、秋季与冬季实际蒸散发变化的主要因素。王喆等^[17]使用扩展 Budyko 模型法量化了气候变化与人类活动对丰满二区灌溉季、湿季和干季的影响。上述研究虽然进行了流域水文要素变化年内归因分析研究,但仅是在单角度上(实际蒸散发或者径流变化)进行归因分析,未综合分析影响因素对实际蒸发量和径流变化的作用,不利于理解流域水循环过程及其变化的内在机理。

因此,本文在上述研究的基础上,根据黄河源区降水量的年内分布特征,将年划分为雨季和旱季进行季尺度研究,挑选实际蒸发量和径流量较大的 7 月、8 月、9 月三个月份进行月尺度研究。具体的内容为基于 1967—2020 年黄河源区水文气象数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验分析黄河源区实际蒸发和径流的变化特征,使用月尺度 ABCD 水文模型和扩展 Budyko 模型定量分离出人类活动和气候变化对实际蒸发和径流变化的贡献量,并对该变化进行解释。研究结果可为流域水文循环过程和机制的理论研究提供参考,对黄河流域生态环境保护 and 可持续发展建设具有一定的理论参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区及数据

黄河源是三江源之一,位于青海腹地,涉及青海、四川、甘肃 3 省的 6 个州、18 个县,流域范围为 95° — 103° E, 32° — 36° N,流域面积为 $121\,972\text{ km}^2$,占黄河流域面积的 16.2%,研究区概况如图 1 所示。黄河源区唐乃亥水文站建设于 1955 年 8 月,为多个水利工程单位的水情报汛任务提供基本水文依据。本研究的数据包含唐乃亥水文站 1967—2020 年逐月实测径流数据和黄河源区气象站点 1967—2020 年的逐日气象数据。



注:基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 研究区概况图

Fig. 1 Summary map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 突变分析和趋势分析方法 突变分析用于检验研究要素在时间序列上是否发生突变,同时可以确定发生突变的时间和次数。本文使用的突变分析方法是累积距平法^[18]。该方法在水文研究中具有广泛的应用^[19-21]。本文选用的趋势分析方法为 Mann-Kendall 趋势检验法^[22]。该方法被广泛应用于水文研究^[23-25]。

1.2.2 月尺度 ABCD 模型 ABCD 水文模型是一种概念性水文模型,由 Thomas 等^[26]在 1981 年提出。模型在确定 a, b, c, d 共 4 个参数的基础上,通过输入降水、潜在蒸发和实际径流数据,获得模拟径流、实际蒸发、有效降水和土壤水储量等数据。Alley^[27]于 1984 年将 abcd 水文模型扩展为月尺度 ABCD 水文模型并验证了它的适用性。Alley^[27]已对模型做了详细介绍,本文不再赘述。

本文使用月尺度 ABCD 水文模型求算黄河源区月实际蒸发量和土壤水储量数据,用于构建月尺度 Budyko 模型。具体应用为输入基准期降水、潜在蒸发和径流数据,获得基准期 a, b, c, d 值并用 WBE 和 NSE 系数对其进行精确度检验,在此基础上进一步得出实际蒸发、土壤水储量等数据,用于构建基准期

的 Budyko 模型;同理,输入突变期的基础数据,获得突变期 a, b, c, d 值的基础上获得实际蒸发、土壤水储量等数据,带入基准期 Budyko 模型,使用公式(6)可得出气候变化引起的径流变化量。在这个过程中,可直接进行实际蒸发的定量归因分析。

1.2.3 实际蒸发归因分析方法 根据基准期参数模拟流域的实际蒸发量,分析人类活动和气候变化对流域实际蒸发量的影响,具体方法为基于基准期的参数模拟得到基准期的实际蒸发量 E_3 ;基于变化期参数模拟得到变化期的实际蒸发量 E_1 ;基于基准期参数模拟得到变化期的实际蒸发量 E_2 。从年、季、月时间尺度上,利用以下公式计算出实际蒸发受人类活动和气候变化的影响值。

$$A_h = E_1 - E_2 \quad (1)$$

$$A_c = E_3 - E_2 \quad (2)$$

$$E_h = 100A_h / (E_1 - E_3) \quad (3)$$

$$E_c = 100 - E_h \quad (4)$$

式中: A_h 表示人类活动对实际蒸发变化的影响; E_1 为变化期受人类活动和气候变化共同影响的实际蒸发真实值(mm); E_2 为变化期仅受气候变化影响的实际蒸发模拟值(mm); E_3 为基准期仅受气候因素影响的流域实际蒸发真实值(mm); A_c 表示气候变化对实际蒸发变化的影响。 E_h 为人类活动引起的实际蒸发变化量(mm); E_c 为气候变化引起的实际蒸发变化量(mm)。

1.2.4 月尺度 Budyko 模型 月尺度上的流域水文研究需要考虑土壤水储量变化的影响,所以要扩展 Budyko 模型的适用性。本文采用 Chen 等^[28]向 Budyko 模型中引入有效降水,扩展形成的月尺度 Budyko 模型,其中有效降水在数值上等于降水减去流域土壤水储量变化量。模型的结构如下:

$$\frac{E}{P - \Delta S} = \left[1 + \left(\frac{E_p}{P - \Delta S} - \varphi \right)^{-\omega} \right]^{-\frac{1}{\omega}} \quad (5)$$

式中:其中 $E/(P - \Delta S)$ 为蒸发率; $E_p/(P - \Delta S)$ 为气候干燥指数; ΔS 表示土壤水储量变化量(mm); φ 是气候干燥指数的下界; ω 表示流域下垫面的特征参数。

1.2.5 径流归因分析方法 本文使用基于月尺度 Budyko 模型的垂直分解法^[29]分离人类活动和气候变化对流域径流变化的影响量,考虑土壤水储量的影响,计算公式为:

$$\Delta Q^c = (P_2 - \Delta S_2) [1 - E'_2 / (P_2 - \Delta S_2)] - Q_1 \quad (6)$$

式中: ΔQ^c 是气候变化引起的径流变化量(mm); $P_2 - \Delta S_2$ 为突变期的有效降水(mm); E'_2 为模拟理论情况下突变期的实际蒸发量(mm); Q_1 为基准期径流量(mm)。

人类活动引起的流域径流变化量公式为:

$$\Delta Q^h = \Delta Q - \Delta Q^c \quad (7)$$

式中: ΔQ 是总径流变化量, 由下列公式(8)计算得出。

$$\Delta Q = \Delta Q_2 - \Delta Q_1 \quad (8)$$

式中: ΔQ_2 为突变期径流量。

2 结果与分析

2.1 流域径流突变分析

本文使用累积距平法识别黄河源区唐乃亥水文站年径流量变化的突变年份, 得到黄河源区径流量突变年份为 1989 年, 如图 2 所示。由图 2 可知, 黄河源区年径流量累积距平在 1967—1989 年整体呈现上升趋势, 在 1989—2020 年整体呈现下降趋势, 年径流量累积距平峰值出现在 1989 年, 于是, 将 1989 年确定为黄河源区研究时间尺度内径流突变年份, 1967—1989 年为基准期, 1990—2020 年为突变期。

2.2 ABCD 水文模型参数率定

将基准期和突变期分别划分出率定期和验证期,

使用 ABCD 水文模型分别对基准期和突变期的率定期进行参数率定, 使用基准期和突变期的验证期对率定的参数进行验证, 利用实测径流与水文模型模拟径流之间的 NSE 纳什系数和 WBE 水量平衡误差评价模拟结果。模拟效果图和率定参数及评价指标表见图 3、图 4 和表 1。



图 2 黄河源区流域 1967—2020 年径流量累积距平变化
Fig. 2 Cumulative anomaly changes of runoff in the source region of the Yellow River during 1967—2020

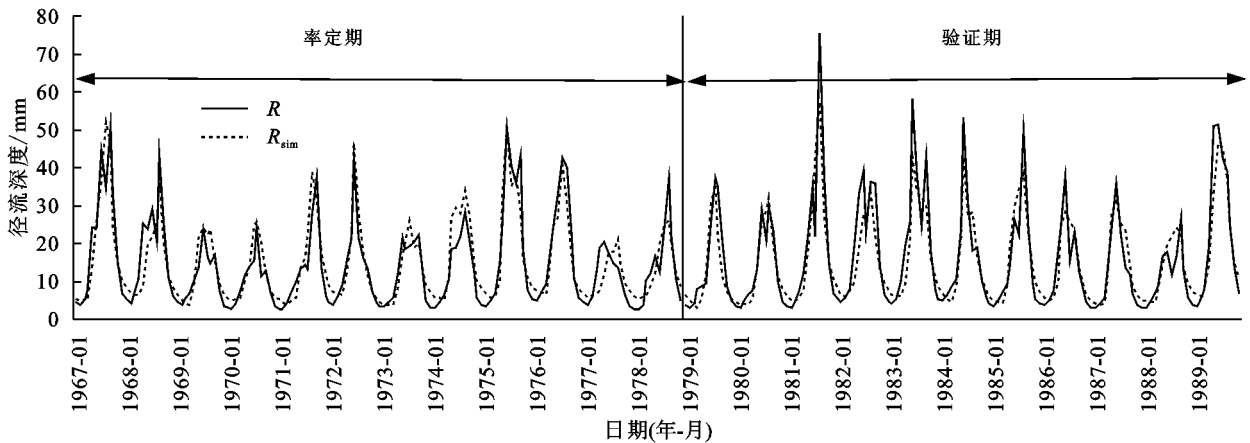


图 3 基准期的率定期和验证期径流模拟效果

Fig. 3 Runoff simulation renderings of the rate period and verification period in the base period

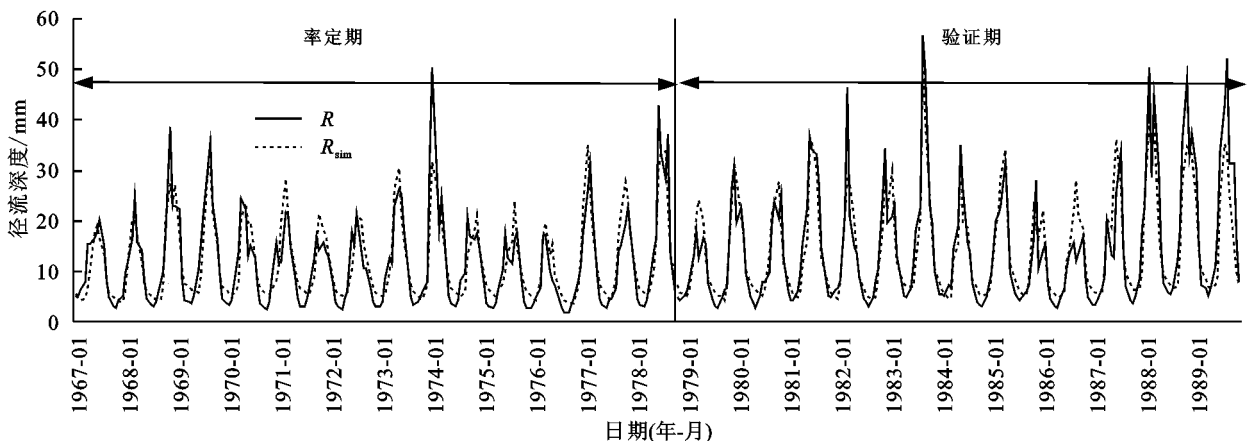


图 4 突变期的率定期和验证期径流模拟效果

Fig. 4 Runoff simulation renderings of rate periodicity and verification period in abrupt change period

由表 1 可知, 基准期和突变期的 ABCD 模型率定参数和水文模拟效果较好, 其中基准期和突变期的

验证期纳什系数分别为 0.83, 0.82, 模拟精度较高; 水量平衡误差分别 4.21% 和 3.12%, 表明验证期的径流

模拟值和实测值相差较小。

2.3 多时间尺度实际蒸发量变化趋势和归因分析

经过 ABCD 水文模型模拟后,使用 Mann-Kendall

趋势分析法将得到的实际蒸发量数据分年、季和月时间尺度进行趋势分析,探究在不同时间尺度上黄河源区实际蒸发量的变化趋势,趋势分析结果见表 2。

表 1 ABCD 模型率定参数及模拟效果评价指标

Table 1 abcd model calibration parameters and evaluation index of simulation effect							
时期	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	时期	NSE	WBE/%
基准期	0.902	385.920	0.001	0.063	率定期(1967—1978 年)	0.80	−2.80
					验证期(1979—1989 年)	0.83	4.21
突变期	0.900	333.362	0.246	0.041	率定期(1990—2005 年)	0.79	−2.17
					验证期(2006—2020 年)	0.82	3.12

表 2 多时间尺度黄河源区实际蒸发 Mann-Kendall 趋势检验
Table 2 Mann-Kendall trend test of actual evaporation in the source region of the Yellow River on multiple time scales

时间尺度	实际蒸发量		
	Z 值	趋势	显著性水平
全年	3.70	增加	0.01
旱季	2.75	增加	0.01
雨季	3.79	增加	0.01
7 月	4.16	增加	0.01
8 月	3.55	增加	0.01
9 月	2.54	增加	0.05

由表 2 可知,黄河源区年尺度上实际蒸发量的 Z 值为 3.70,在 0.01 显著性水平下表现为增加趋势。

表 3 多尺度实际蒸发量变化归因分析

Table 3 Multi-scale attribution analysis of actual evaporation change							
时间尺度	基准期/ mm	突变期/ mm	变化量/ mm	人类活动 贡献量	气候变化 贡献量	人类活动 贡献率/%	气候变化 贡献率/%
全年	324.85	336.08	11.23	4.54	6.69	40.39	59.61
旱季	139.69	143.17	3.49	−0.29	3.78	−8.43	108.43
雨季	185.16	192.91	7.74	4.83	2.91	62.38	37.62
7 月	53.06	55.99	2.93	1.56	1.37	53.34	46.66
8 月	50.37	52.49	2.12	1.05	1.08	49.29	50.71
9 月	37.16	38.89	1.73	0.72	1.01	41.83	58.17

由表 3 可知,在年尺度,流域基准期实际蒸发量为 324.85 mm,突变期实际蒸发量为 336.08 mm,相较于基准期,突变期的实际蒸发量增加了 11.23 mm,其中人类活动引起的流域实际蒸发变化量为 4.54 mm,贡献率为 40.39%;气候变化对流域实际蒸发变化的贡献量为 6.69 mm,贡献率为 59.61%,气候变化的影响更加明显。

旱季,基准期实际蒸发量为 139.69 mm,突变期实际蒸发量为 143.17 mm,实际蒸发量变化量为 3.49 mm,其中人类活动引起的流域实际蒸发变化量为 −0.29 mm,贡献率为 −8.43%;气候变化引起的流域实际蒸发变化量为 3.78 mm,贡献率为 108.43%,影响流域实际蒸发量的主要因素是气候变化。雨季,

基准期实际蒸发量为 185.16 mm,突变期实际蒸发量为 192.91 mm,实际蒸发量变化量为 7.74 mm,其中人类活动引起的流域实际蒸发变化量为 4.83 mm,贡献率为 62.38%;气候变化对流域实际蒸发变化的贡献量为 2.91 mm,贡献率为 37.62%,影响流域实际蒸发量的主要因素是人类活动。出现这种结果的原因是黄河源区的旱季基本处于春冬季,人类活动较少,此时引起黄河源区的实际蒸发量增加的主要因素是气候变化;黄河源区的雨季气温较高,人类活动的频率升高,人类活动的影响加剧,成为引起流域实际蒸发量上升的主要影响因素。

7 月,基准期实际蒸发量为 53.06 mm,突变期实际蒸发量为 55.99 mm,实际蒸发量变化量为 2.93

mm,其中人类活动对流域实际蒸发变化的贡献量为 1.56 mm,贡献率为 53.34%;气候变化对流域实际蒸发变化的贡献量为 1.37 mm,贡献率为 46.66%。8 月,基准期实际蒸发量为 50.37 mm,突变期实际蒸发量为 52.49 mm,实际蒸发量变化量为 2.12 mm,其中人类活动对流域实际蒸发变化的贡献量为 1.05 mm,贡献率为 49.29%;气候变化对流域实际蒸发变化的贡献量为 1.08 mm,贡献率为 50.71%。9 月,基准期实际蒸发量为 37.16 mm,突变期实际蒸发量为 38.89 mm,实际蒸发量变化量为 1.73 mm,其中人类活动对流域实际蒸发变化的贡献量为 0.72 mm,贡献率为 41.83%;气候变化对流域实际蒸发变化的贡献量为 1.01 mm,贡献率为 58.17%。7 月份人类活动是引起流域实际蒸发变化的主导因素;8 月份人类活动和气候变化对黄河源区实际蒸发变化的贡献率基本持平;9 月份气候变化是引起流域实际蒸发变化主要因素。

2.4 多时间尺度径流变化趋势和归因分析

将黄河源区 1967—2020 年的径流数据按照相同的方法进行趋势分析,得到的结果见表 4。由趋势分析结果可知,黄河源区年尺度上径流量的 Z 值为 -0.63 ,总体呈现减少趋势,但减少趋势不显著。旱季径流量的 Z 值为 -0.52 ,表现为不显著减少的变化趋势;雨季径流量的 Z 值为 1.61,表现为不显著增加的趋势。7 月径流量的 Z 值为 0.29,表现为不显著增加趋势;8 月径流量的 Z 值为 -0.22 ,表现为不显著减少的趋势;9 月径流量的 Z 值为 -1.07 ,表现为不显著减少的趋势。

表 4 多时间尺度黄河源区径流 Mann-Kendall 趋势检验
Table 4 Mann-Kendall trend test of runoff in the source region of the Yellow River on multiple time scales

时间尺度	径流量		
	Z 值	趋势	显著性水平
全年	-0.63	减少	不显著
旱季	-0.52	减少	不显著
雨季	1.61	增加	不显著
7 月	0.29	增加	不显著
8 月	-0.22	减少	不显著
9 月	-1.07	减少	不显著

综上所述,1967—2020 年黄河源区径流量的变化在各个时间尺度上的显著性水平均未通过 95%的置信度检验,表现为不显著的变化趋势,原因在于黄河源区的径流同时受到包括降水、实际蒸发和下垫面状况等多个因素的影响,这些因素的综合作用使得径流在各个时间尺度上的变化趋势不明显。

使用垂直分解法分离人类活动和气候变化对径流的影响量之前,需要拟合基准期的 Budyko 曲线。本文通过运行 MATLAB 代码得到六组基准期

Budyko 曲线参数,并用确定性系数和均方根误差对参数进行评价,参数取值和评价结果见表 5。由表 5 可知,六组拟合参数的确定性系数均在 0.9 以上,并且其均方根误差较小,拟合参数能够满足精度要求。

表 5 拟合的基准期 Budyko 参数和评价指标
Table 5 The fitted base period Budyko parameters and evaluation indicators

时间 尺度	参数		评价指标	
	ω	φ	R^2	RMSE
年	1.27	0.30	0.97	7.61
旱季	1.15	0.44	0.94	4.17
雨季	1.43	0.21	0.98	4.70
7 月	1.49	0.22	0.98	1.91
8 月	1.61	0.23	0.96	1.81
9 月	1.44	0.20	0.99	1.90

表 6 为黄河源区水文要素变化情况表,结合表 3 和表 6,由水量平衡方程可知,相比较于基准期,黄河源区年尺度上的降水增加 7.52 mm,土壤水储量变化量增加 22.30 mm,实际蒸发量增加 11.23 mm,潜在蒸发量增加 7.72 mm,因此径流减少;黄河源区旱季降水增加 10.61 mm,土壤水储量变化量增加 16.36 mm,实际蒸发量增加 3.49 mm,潜在蒸发量增加 2.27 mm,因此径流减少;雨季降水减少 3.09 mm,土壤水储量变化量增加 5.94 mm,实际蒸发量增加 7.74 mm,潜在蒸发量增加 5.45 mm,因此雨季径流减少;黄河源区 7 月降水增加 2.39 mm,土壤水储量变化量增加 3.30 mm,实际蒸发量增加 2.93 mm,潜在蒸发量增加 2.37 mm,因此 7 月径流减少;8 月降水增加 3.26 mm,土壤水储量变化量增加 3.16 mm,实际蒸发量增加 2.12 mm,潜在蒸发量增加 1.30 mm,蒸发量的增加幅度大于有效降水的增加幅度,因此 8 月径流减少;9 月降水减少 4.55 mm,土壤水储量变化量增加 2.47 mm,实际蒸发量增加 1.73 mm,潜在蒸发量增加 2.65 mm,因此 9 月径流减少。

在多时间尺度上量化人类活动和气候变化对黄河源区径流的影响,得到的结果见表 7。由表 7 可知,在各个时间尺度中都表现为气候变化因素对流域径流变化的贡献率较高。具体情况为在年尺度,流域基准期径流量为 184.37 mm,突变期径流量为 158.36 mm,相较于基准期,突变期的径流量减少了 26.01 mm,其中人类活动引起的流域径流量变化量为 -11.55 mm,贡献率为 44.42%;气候变化对流域径流量变化的贡献量为 -14.46 mm,贡献率为 55.58%。

旱季,基准期径流量为 75.64 mm,突变期径流量为 66.40 mm,径流量变化量为 -9.24 mm,其中人类活动引起的流域径流变化量为 -4.05 mm,贡献率为 43.77%;

气候变化引起的流域径流量变化量为−5.20 mm,贡献率为 56.23%。雨季,基准期径流量为 108.73 mm,突变期径流量为 91.96 mm,径流量变化量为−16.77 mm,其中人类活动引起的流域径流量变化量为−6.72 mm,贡献率为 40.08%;气候变化对流域径流量变化的贡献量为−10.05 mm,贡献率为 59.92%。

表 6 黄河源区水文要素变化情况

Table 6 Variation of hydrological elements in the source area of the Yellow River									mm
时间 尺度	准期 P	突变期 P	变化量	基准期 E_p	突变期 E_p	变化量	基准期 ΔS	突变期 ΔS	变化量
年	509.94	517.46	7.52	793.46	801.17	7.72	0.72	23.02	22.30
旱季	144.34	154.94	10.61	415.28	417.55	2.27	−70.99	−54.63	16.36
雨季	365.61	362.52	−3.09	378.18	383.63	5.45	71.72	77.65	5.94
7 月	99.70	102.09	2.39	106.94	109.31	2.37	14.92	18.23	3.30
8 月	84.74	88.00	3.26	99.72	101.02	1.30	9.24	12.39	3.16
9 月	81.24	76.69	−4.55	70.96	73.60	2.65	13.58	16.05	2.47

7 月,基准期径流量为 31.72 mm,突变期径流量为 27.87 mm,径流量变化量为−3.84 mm,其中人类活动对流域径流变化的贡献量为−1.20 mm,贡献率为 31.30%;气候变化对流域径流量变化的贡献量为−2.64 mm,贡献率为 68.70%。8 月,基准期径流量为 25.13 mm,突变期径流量为 23.12 mm,径流量变化量为−2.02 mm,其中人类活动对流域径流量变化的贡献量为−0.98 mm,贡献率为 48.49%;气候变化对流域径流量变化的贡献量为−1.04 mm,贡献率为 51.51%。9 月,基准期径流量为 30.50 mm,突变期径流量为 21.75 mm,径流量变化量为−8.75 mm,其中人类活动对流域径流量变化的贡献量为−1.14 mm,贡献率为 12.97%;气候变化对流域径流量变化的贡献量为−7.62 mm,贡献率为 87.03%。

表 7 多时间尺度径流量变化归因分析

Table 7 Attribution analysis of runoff change on multiple time scales							
时间 尺度	基准期 R / mm	突变期 R / mm	变化量/ mm	人类活动 贡献量	气候变化 贡献量	人类活动 贡献率/%	气候变化 贡献率/%
年	184.37	158.36	−26.01	−11.55	−14.46	44.42	55.58
旱季	75.64	66.40	−9.24	−4.05	−5.20	43.77	56.23
雨季	108.73	91.96	−16.77	−6.72	−10.05	40.08	59.92
7 月	31.72	27.87	−3.84	−1.20	−2.64	31.30	68.70
8 月	25.13	23.12	−2.02	−0.98	−1.04	48.49	51.51
9 月	30.50	21.75	−8.75	−1.14	−7.62	12.97	87.03

3 讨论

在得到黄河源区实际蒸发和归因以及径流变化特征的基础上,本文从气候变化和人类活动的实际影响两个角度讨论黄河源区径流变化的原因。气候变化的实际影响主要表现在 20 世纪 90 年代之后,全球气候变暖以及流域下垫面状况发生变化,导致流域下渗量增加和下垫面蒸散发能力增强,流域土壤储水量变化增加,同时年尺度流域的实际蒸发量增加,降水的增加幅度小于土壤储水量增加的幅度,流域径流减少;黄河源区地处青藏高原,受中国西北地区气候的“暖湿化”影响,黄河源区旱季降水增加,雨季较短并且降水减少,季尺度流域实际蒸发量增加,综合作用使得流域径流减少;月尺度的气候影响效果是季尺度效果的细化。

人类活动的实际影响为在黄河源区,对流域径流产生影响的主要人类活动因素为居民的日常用水和

灌溉畜牧用水,这些因素的作用强度随着气温和降水的增加而增加。雨季人类活动对流域径流的影响量较大,具体表现为在雨季气温升高、降水增加,流域居民的平时生活用水及牧草灌溉用水的消耗增加,同时处于农作物的灌溉期,灌溉取水在该季较多,是此时期引起径流变化的主要人类活动因素;在旱季,人类活动对黄河源区径流的影响较小,因为旱季气温和降水减少,人类生活用水和灌溉用水减少;年尺度人类活动对流域径流的影响大致表现为雨季和旱季的综合;所选的 3 个月份中,人类活动对流域径流变化的贡献量相当。

4 结论

(1) 在年尺度、旱季、8 月和 9 月中,引起黄河源区实际蒸发变化主要因素为气候变化,其贡献率分别为 59.61%,108.43%,50.71%和 58.17%;在雨季和 7 月,引起黄河源区实际蒸发变化的主要因素是人类活

动,其贡献率分别为 62.38%和 53.34%;

(2) 无论是在年尺度、季尺度还是月尺度,对黄河源区径流变化影响较大的因素均为气候变化。年尺度、旱季、雨季、7 月、8 月、9 月份气候变化对径流变化的贡献率分别是 55.58%,56.23%,59.92%,68.70%,51.51%,87.03%。

参考文献(References):

- [1] 马帅,盛煜,曹伟,等.黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟[J].地理学报,2017,72(9):1621-1633.
Ma S, Sheng Y, Cao W, et al. Numerical simulation of spatial distribution and change of permafrost in the source area of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(9):1621-1633.
- [2] 李通,崔丽珍,庄明浩,等.牧民对草地可持续利用的生态认知水平及其影响因素:以黄河源区 5 个县为例[J].生态学报,2022,42(20):8193-8201.
Li T, Cui L Z, Zhuang M H, et al. Herdsmen's cognitive level about sustainable utilization of grassland and its influencing factors: A case study of five counties in the Headwater Region of the Yellow River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(20):8193-8201.
- [3] 王卫光,李进兴,魏建德,等.基于蒸散发数据同化的径流过程模拟[J].水科学进展,2018,29(2):159-168.
Wang W G, Li J X, Wei J D, et al. Runoff simulation by hydrological model based on the assimilated evapotranspiration[J]. Advances in Water Science, 2018,29(2):159-168.
- [4] 龚珏,杜洪勋,郑江坤,等.川北典型小流域产流对降雨的多时间尺度响应规律[J].长江流域资源与环境,2020,29(6):1445-1453.
Gong J, Du H X, Zheng J K, et al. Response of runoff to rainfall in multi-time scale of typical small watershed in northern Sichuan Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(6):1445-1453.
- [5] 刘三超,张万昌,高懋芳,等.分布式水文模型结合遥感研究地表蒸散发[J].地理科学,2007,27(3):354-358.
Liu S C, Zhang W C, Gao M F, et al. Simulation of land surface evapotranspiration using distributed hydrological model, remote sensing and GIS technology[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007,27(3):354-358.
- [6] 宫兴龙,杜树平,付强,等.挠力河流域丘陵-平原-湿地区径流变化驱动力分析[J].农业工程学报,2019,35(16):114-124.
Gong X L, Du S P, Fu Q, et al. Analysis on driving force of runoff change in hill-plain-wetland area of Naoli River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(16):114-124.
- [7] 黎云云,畅建霞,王义民,等.渭河流域径流对土地利用变化的时空响应[J].农业工程学报,2016,32(15):232-238.
Li Y Y, Chang J X, Wang Y M, et al. Spatiotemporal responses of runoff to land use change in Wei River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(15):232-238.
- [8] 刘昌明,李道峰,田英,等.基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J].地理科学进展,2003,22(5):437-445.
Liu C M, Li D F, Tian Y, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed[J]. Progress in Geography, 2003,22(5):437-445.
- [9] 庄稼成,星寅聪,李艳忠,等.基于改进 abcd 模型的黄河源区径流变化与归因[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):953-965.
Zhuang J C, Xing Y C, Li Y Z, et al. Attribution analysis of runoff change based on the abcd model coupled with the snowmelt module in the source region of the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022,20(5):953-965.
- [10] 张静,刘国庆,宋小燕,等.Budyko 假设对松花江流域实际蒸散发的模拟研究[J].水文,2019,39(2):22-27.
Zhang J, Liu G Q, Song X Y, et al. A simulation study of actual evapotranspiration in Songhua River Basin based on budyko hypothesis[J]. Journal of China Hydrology, 2019,39(2):22-27.
- [11] 薛帆,张晓萍,张檐,等.基于 Budyko 假设和分形理论的水沙变化归因识别:以北洛河流域为例[J].地理学报,2022,77(1):79-92.
Xue F, Zhang X P, Zhang L, et al. Attribution recognition of streamflow and sediment changes based on the Budyko hypothesis and fractal theory: A case study in the Beiluo River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(1):79-92.
- [12] 师卫钊,何毅,邵祎婷.嘉陵江上游径流变化及其影响因素归因分析[J].水土保持学报,2023,37(3):124-131.
Shi W Z, He Y, Shao Y T. Attribution analysis of runoff change and its influencing factors in the upper reaches of Jialing River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):124-131.
- [13] 张鸣,朱奎,鲁帆,等.黄河源区水文要素变化及驱动因素分析[J].人民黄河,2023,45(10):30-37.
Zhang M, Zhu K, Lu F, et al. Analysis of changes of hydrological elements and driving factors in the source area of the Yellow River[J]. Yellow River, 2023,45(10):30-37.
- [14] 马明卫,王召航,王文川,等.基于 Budyko 假设的黄河源区径流演变与量化归因分析[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2023,44(3):53-60.

- Ma M W, Wang Z H, Wang W C, et al. Analysis of runoff evolution and quantitative attribution in the source area of the Yellow River based on budyko hypothesis[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2023,44(3):53-60.
- [15] 朱景武,吕景德.吉林省水田需水规律研究[J].灌溉排水,1992,11(2):20-22.
- Zhu J W, Lyu J D. Study on water demand law of paddy field in Jilin Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1992,11(2):20-22.
- [16] 蒋小满,王国强,薛宝林,等.基于 Budyko 理论和互补模型的浑河流域实际蒸散发时空变化特征及驱动力分析[J].生态学报,2022,41(7):1361-1368.
- Jiang X M, Wang G Q, Xue B L, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of actual evapotranspiration in Hunhe River Basin based on Budyko theory and complementary model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(7):1361-1368.
- [17] 王喆,李昱,丁伟,等.基于扩展 Budyko 假设的季节径流变化归因分析[J].水力发电学报,2017,36(8):22-33.
- Wang Z, Li Y, Ding W, et al. Attribution analysis on seasonal river runoff based on extended Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017,36(8):22-33.
- [18] 张应华,宋献方.水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J].干旱区地理,2015,38(4):652-665.
- Zhang Y H, Song X F. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: Advances and evaluation[J]. Arid Land Geography, 2015,38(4):652-665.
- [19] 陈沛源,俞巧,李金文,等.1957—2016 年泾河干流径流量变化趋势分析[J].人民黄河,2022,44(8):22-27.
- Chen P Y, Yu Q, Li J W, et al. Changes of runoff in the Jinghe River Basin in 1957—2016[J]. Yellow River, 2022,44(8):22-27.
- [20] 焦玮,朱仲元,宋小园,等.近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):12-19.
- Jiao W, Zhu Z Y, Song X Y, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff yield of the Xilin River Basin over nearly 50 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(6):12-19.
- [21] 闫敏华,邓伟,陈泮勤.三江平原气候突变分析[J].地理科学,2003,23(6):661-667.
- Yan M H, Deng W, Chen P Q. Analysis of climate jumps in the Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003,23(6):661-667.
- [22] 曾波,王钦.我国南方地区 50 a 冬季降水和相对湿度特征分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):828-839.
- Zeng B, Wang Q. Analysis of precipitation and relative humidity in winter in south of China in the past 50 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(4):828-839.
- [23] 陈家宁,孙怀卫,王建鹏,等.综合气象干旱指数改进及其适用性分析[J].农业工程学报,2020,36(16):71-77.
- Chen J N, Sun H W, Wang J P, et al. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(16):71-77.
- [24] 陈坤,蒋卫国,何福红,等.基于 GRACE 数据的中国水资源变化特征分析[J].自然资源学报,2018,33(2):275-286.
- Chen K, Jiang W G, He F H, et al. Temporal and spatial variations of water storage changes in China with GRACE data[J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(2):275-286.
- [25] 徐志鹏,刘文飞,沈芳芳,等.基于扩展的 Budyko 模型定量评估平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的影响[J].生态学报,2020,40(23):8783-8793.
- Xu Z P, Liu W F, Shen F F, et al. Quantitative assessment on the effects of reforestation and climate variability on the seasonal streamflow in Pingjiang watershed using the extended Budyko model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(23):8783-8793.
- [26] Thomas J A. Improved methods for national water assessment, water resources contract: WR15249270, 1981.
- [27] Alley W M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models[J]. Water Resources Research, 1984,20(8):1137-1149.
- [28] Chen X, Alimohammadi N, Wang D B. Modeling interannual variability of seasonal evaporation and storage change based on the extended Budyko framework[J]. Water Resources Research, 2013,49(9):6067-6078.
- [29] Wang D B, Hejazi M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States[J]. Water Resources Research, 2011,47(10):W00J12.