

基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法

崔豪^{1,2}, 江善虎^{1,2}, 任立良^{1,2}, 朱永卫², 杜树平², 严登华³

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 为了科学评估自然-社会系统影响下非平稳水文干旱, 考虑气候变化(降水、气温)和人类活动(取用水、水库)四元要素的影响, 通过基于四元驱动的 GAMLSS 模型构建非平稳标准化径流指数(NSRI), 提出了基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法。黄河流域非平稳水文干旱实例评估结果表明: 黄河流域花园口站径流序列呈现出明显的非平稳特征, 径流量 1961—2020 年发生显著下降, 并在 1990 年发生突变; 基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法能够更好地对径流数据进行非平稳概率分布拟合; 对于历史干旱事件的识别, NSRI 识别的干旱过程与实际更加接近, NSRI 比标准化径流指数(SRI)识别效果更好, 可以更好地反映变化环境下的水文干旱演变趋势。

关键词: 标准化径流指数; 自然-社会系统; GAMLSS 模型; 非平稳; 四元驱动

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)01-0071-08

A non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven// CUI Hao^{1,2}, JIANG Shanhu^{1,2}, REN Liliang^{1,2}, ZHU Yongwei², DU Shuping², YAN Denghua³ (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To scientifically evaluate non-stationary hydrological drought under the influence of the natural-social system, taking the impact of climate change (precipitation, temperature) and human activities (water intake, reservoirs) into consideration, a non-stationary standardized runoff index (NSRI) was constructed based on the generalized additive model for location scale and shape (GAMLSS) of four-source driven, and a non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven was proposed. The evaluation results of non-stationary hydrological drought cases in the Yellow River Basin indicate that the runoff sequence at Huayuankou Station in the Yellow River Basin exhibits obvious non-stationary characteristics, with a significant decrease in runoff from 1961 to 2020 and a sudden change in 1990. The non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven can better fit the non-stationary probability distribution of the runoff data. As for the identification of historical drought events, the drought process identified by NSRI is closer to reality. NSRI achieves better performance than the standardized runoff index (SRI) when identifying drought events, and can better reflect the evolution trend of hydrological drought in changing environments.

Key words: SRI; natural-social system; GAMLSS model; non-stationary; four-source driven

旱灾作为一种复杂而广泛的自然灾害, 对水资源、环境、农业、经济和社会具有严重的负面影响^[1], 会引起河流断流、生态环境恶化、农作物减产歉收、工业和居民用水受限等问题^[2]。我国地形复杂、气候类型多样、地理环境脆弱, 更易遭受干旱灾害影响^[3]。传统干旱指数的计算是基于统计平稳性基本假设, 并认为水文气象过程的概率特征不随时间而变化^[4]。大量研究表明, 在气候变化和人类

活动的影响下, 河川径流已发生了突变, 其演变规律的分析对水文平稳性基本假设提出了挑战^[5-8]。因此, 如何识别和应对非平稳干旱事件已成为全球干旱评估和管理的迫切需要^[9], 需有新的方法来考虑变化环境下水文过程的非平稳性, 并允许概率参数随时间变化^[10]。Rigby 等^[11]提出了基于位置、尺度和形状参数的广义加性模型 (generalized additive models for location scale and shape, GAMLSS), 该模

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2243203, 51979069)

作者简介: 崔豪 (1992—), 男, 博士研究生, 主要从事变化环境下极端水文事件及其风险研究。E-mail: chiwhr@163.com

通信作者: 江善虎 (1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail: hik0216@163.com

型可以调用多种分布函数,并且可以根据需要建立分布参数与协变量之间的线性或非线性关系,并采用基于物理过程的协变量函数来表征统计分布参数,可以更好地评估气候和人为影响对于旱事件产生的非平稳性。

气候变化和人类活动是影响水文过程的两大重要因素。在非平稳模型中选择大尺度气候指数作为径流的气候因子协变量可以更好地描述气候变化引起的非平稳性^[12-13]。除了气候变化外,人类活动也是导致径流产生非平稳性的另一个驱动因素^[14]。在各种人类活动中,水库建设运行和取用水对径流过程的影响最大^[15-16]。最近有研究者尝试通过大尺度气候指数和人类活动指数进行非平稳水文干旱指数的构建,以研究由气候变化和人类活动变化对径流过程的非平稳影响^[17-18]。例如:Wang 等^[17]构建了考虑年际径流量变化的改进水库指数,以更好地表征人类活动对水文干旱的影响;Wang 等^[18]通过 SWAT 模型构建综合人为影响指数来评估气候变化和人类活动的影响。但以往的研究主要侧重于大尺度气候因子和单一人类活动两类协变量的非平稳径流拟合,为了更深入地刻画复杂环境变化对径流非平稳性的影响,需要对气候变化和人类活动因子做进一步细化。

大尺度气候因子的筛选通常需要考虑其滞后响应和叠加效应,这会造成计算量几何倍数的增加,同时也可能会产生更多的不确定性。降水和气温变化是气候变化最直接的体现,同时也对流域水文过程产生深刻的影响,选用降水和气温作为气候因素协变量可以体现气候变化对水文干旱的影响。同时,人类活动对年内径流影响主要体现在两个方面:一是针对社会发展需求的直接取用水,水资源量需求的显著增加可能会造成严重的水文干旱^[19];二是水库对于径流的影响,水库蓄水调控会改变径流的年内分布过程,同时水库淤积也会对库容造成直接影响,改变其对径流的调控能力,如黄河流域作为典型多沙河流,水库淤损率高达 36.76%^[20]。因此,本文提出了一种非平稳水文干旱评估方法,该方法基于四元驱动的 GAMLSS 模型构建非平稳标准化径流指数 (non-stationary standardized runoff index, NSRI),采用降水和气温作为 GAMLSS 模型的气候因素协变量,采用取用水指数和考虑淤积过程的改进的水库指数作为 GAMLSS 模型的人为因素协变量,以解释气候变化和人类活动因素对流域水文干旱的共同影响,并以黄河流域(花园口以上)为例对 NSRI 进行评价,以期对评估变化环境下非平稳水文干旱提供一种可靠普适的方法。

1 评估方法

本文提出的非平稳水文干旱评估方法主要包括两个部分内容:①对径流序列进行水文变异及趋势诊断分析,以判别径流序列是否具有非平稳特征;②若径流序列具有非平稳特征,则基于四元驱动的 GAMLSS 模型构建 NSRI,进而对水文干旱进行评估。

1.1 水文变异及趋势诊断方法

采用去趋势预置白的 Mann-Kendall (trend-free pre-whitening Mann-Kendall, TFPW-MK)) 趋势分析法^[21]对径流序列的变化趋势进行检测,统计量 $Z < -1.96$ 或 $Z > 1.96$ 时,表示通过 95% 的显著性检验。径流序列的突变点通过 Pettitt 突变点检验法^[22]确定。

1.2 指数构建

NSRI 是基于 GAMLSS 模型构建的,步骤如下:①将径流数据和协变量作为拟合数据输入 GAMLSS 模型,通过全局偏差 (GD)、Akaike 信息准则 (AIC) 和 Schwartz 贝叶斯准则 (BIC) 结合图形验证 (蠕虫图和 Q-Q 图) 选择最优拟合分布 (GD、AIC 和 BIC 可以权衡模型模拟的复杂度和模型拟合数据的优良性);②得到相应的最优非平稳模型关于位置和尺度参数的两个表达式,通过将径流数据的位置和尺度参数转换为协变量来描述协变量与径流数据之间的关系;③将最优非平稳模型估计得到的径流累积概率,经过标准正态化处理得到 NSRI。本文标准化径流指数 (standardized runoff index, SRI) 和 NSRI 时间尺度均为 1 月。

1.2.1 GAMLSS 模型

GAMLSS 模型可以对分布的位置、尺度和形状等参数进行时变建模,即上述参数可以和与时间变量或观测序列具有成因关系的物理变量建立某种函数关系,如线性、指数、多项式等函数关系,从而由实测序列样本来反映总体样本。GAMLSS 模型的具体公式可参考文献[11]。本文选取耿贝尔分布、威布尔分布、伽马分布、对数正态分布和正态分布 5 种双参数连续分布作为 GAMLSS 模型的备选分布。

1.2.2 四元驱动的协变量计算

四元驱动的影响要素包括降水、气温、取用水和水库,对 4 个影响要素进行定量化表征后作为协变量输入 GAMLSS 模型中。其中,降水、气温协变量是通过泰森多边形插值后求得流域平均降水量和气温,取用水量通过统计流域内单位面积取用水量与区域面积相乘计算得到。3 个协变量均通过减去平

均值后除以标准差来标准化,以消除它们之间差异较大的变化波动^[23]。为了反映水库对径流拦蓄的影响,López 等^[24]提出了一种用来反映大坝和水库对径流变化影响的水库指数,但水库对径流的影响与年径流量和水库的可利用储存能力密切相关。因此,本文采用一种考虑淤积过程的改进的水库指数表征水库对径流的影响,计算公式为

$$I_R = \sum_{i=1}^N (A_i/A_T) [(V_i - S_i)/R_T] \quad (1)$$

式中: I_R 为改进的水库指数; N 为需要计算的水文站(本文为花园口水文站)上游水库的数量; A_i 为上游水库*i*的集水面积; A_T 为需要计算的水文站集水面积; V_i 为上游水库*i*的总库容; S_i 为上游水库*i*的淤积量; R_T 为需要计算的水文站年平均径流量。改进的水库指数越大,表明上游水库群对径流形态的改变程度越大。

2 实例验证

2.1 研究区概况及数据

2.1.1 研究区概况

黄河流域从西向东穿过青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元(32°N ~ 42°N,96°E ~ 119°E,图 1),地势西高东低。黄河流域冬季和春季干燥,夏季和秋季多雨。多年平均降水量为 470 mm,6—9 月约占年总降水量的 70%。年平均气温在-4 ~ 14℃之间。花园口站作为黄河流域重要水文站,控制着全流域 97% 的集水面积,其天然径流量占全流域的 95% 以上。

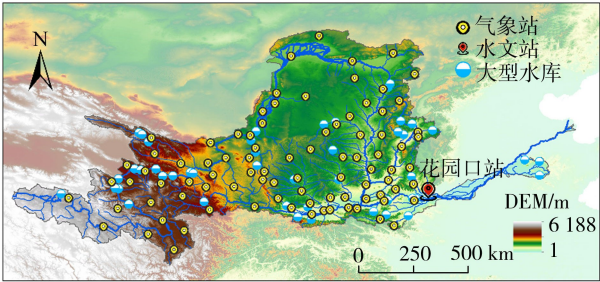


图 1 研究区气象站、水文站及大型水库分布
Fig.1 Distribution of meteorological station, hydrological station, and large reservoirs in study area

2.1.2 数据来源

1961—2020 年花园口站实测月径流数据收集自黄河水利委员会水文局;1961—2020 年气象数据由中国气象局国家气候中心提供,包括黄河花园口以上流域的 87 个国家气象站的相关数据;流域水库建设资料来自《黄河大典》以及黄河水利委员会水利调查资料;取用水数据采用严登华等^[25]发布的 1960—2020 年全球人口和水资源的分布数据集。

2.2 指数构建与验证

2.2.1 径流序列非平稳分析

图 2 为研究区降水与径流关系,可以看出,花园口站径流量丰枯波动较大,降水丰枯波动较小,但径流系列的波动与降水一致。其中年径流系列的 TFPW-MK 趋势检验 Z 值为-4.475,通过 95% 的显著性检验,证明了径流量的变化呈显著减少的趋势。从径流序列可以看出,1964 年达到 856 亿 m^3 的峰值,1997 年达到最低水平,为 142 亿 m^3 。图 3 为花园口站径流 Pettitt 检验结果,径流量在 1990 年发生突变。因此将径流量序列分为 1961—1990 年和 1991—2020 年两个部分,其中 1961—1990 年系列较为接近自然期状态,定义为基准期;1991—2020 年受人类活动等多方面影响,定义为变化期。对应的分段径流量平均值分别为 437 亿 m^3 和 267 亿 m^3 。

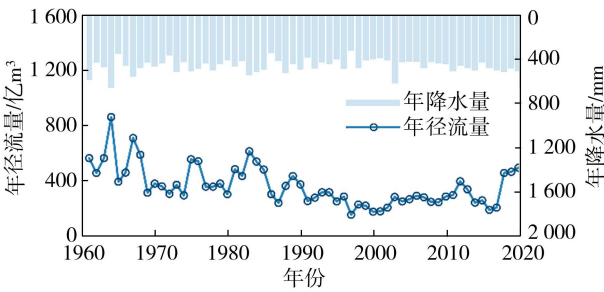


图 2 年降水量和年径流量的变化趋势
Fig.2 Trends in annual precipitation and runoff

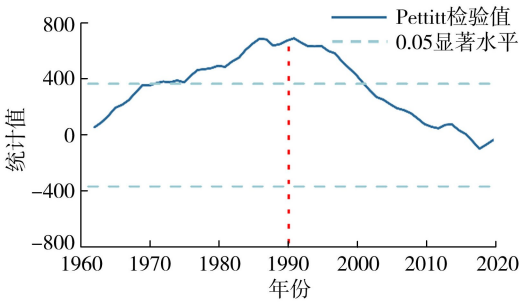


图 3 年径流量 Pettitt 突变检验
Fig.3 Pettitt mutation test for annual runoff

研究区年降水量、取用水变化指数和改进的水库指数的长期变化如图 2、4 所示,可以看出降水呈不显著下降趋势,取用水指数和改进的水库指数呈显著上升趋势。由图 5 可以看出,降水和径流呈正相关关系,取用水指数、改进的水库指数与径流呈显著负相关关系。

降水在径流变化中起着重要作用,但人类活动的影响也不容忽视。对于黄河流域的文献调查也表明,水库和取用水是造成黄河流域径流变化的主要影响因素^[26-28]。由图 4 可见,改进的水库指数在 2000 年后减小,这是由于 2000 年后黄河流域降

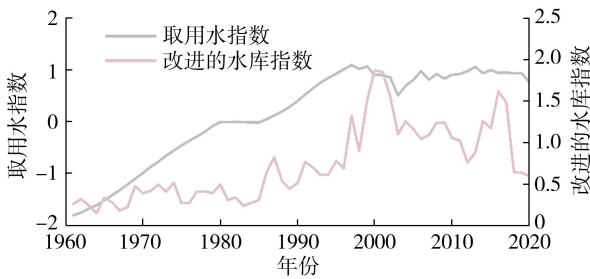


图4 取用水指数和改进的水库指数变化趋势
Fig.4 Trends in water withdrawal index and modified reservoir index

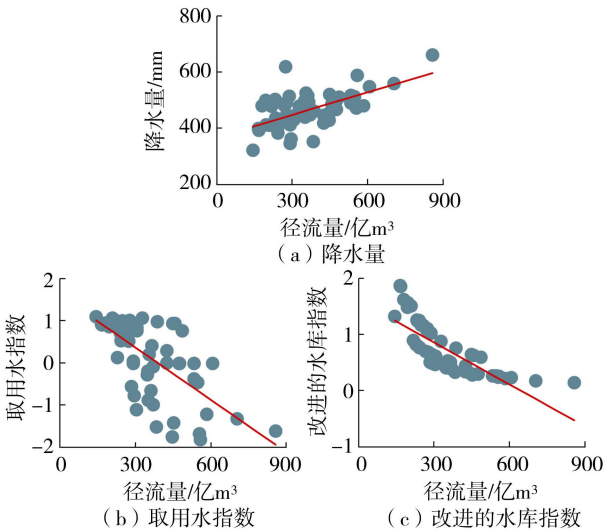


图5 降水量、取用水指数、改进的水库指数与径流量相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of precipitation, water withdrawal index, modified reservoir index, and runoff

水量的增加使得花园口站径流量增加,并且黄河流域作为世界上典型的多泥沙河流,泥沙淤积对水库的影响不容忽视,水库随着时间不断淤积,也会造成改进的水库指数逐渐降低。

2.2.2 基于四元驱动的 GAMLSS 建模

选取降水量和气温作为 NSRI 构建的气候协变量,取用水指数和改进的水库指数作为 NSRI 构建的人为协变量,以期能够更好解释两时期的非平稳水文干旱过程。为了保证协变量能够充分描述径流的变化,将上述 4 个协变量分为不同组合进行分布拟合筛选。Hao 等^[29]研究发现在双协变量的拟合中非线性连接能较好地反映频率的变化,但随着协变量和函数维数增加,拟合函数可能会变得更加复杂以及产生过拟合等问题。由于本文采用多个协变量,协变量直接输入模型并线性连接,避免 GAMLSS 模型过拟合。后续在对 NSRI 的改进中,对协变量的选取和函数构建仍然需要谨慎选择。不同协变量组合和分布的 GAMLSS 模型的 AIC 值如表 1 所示。

表1 各月径流量 5 种候选分布模型拟合 AIC 值
Table 1 Fitting AIC values of monthly runoff using five candidate distribution models

月份	不同分布的 AIC 值				
	耿贝尔	威布尔	伽马	对数正态	正态
1	358.9	345.7	342.8	345.2	344.5
2	357.0	342.0	340.0	350.5	347.2
3	405.0	395.4	396.6	400.6	397.9
4	400.7	392.1	388.3	394.4	390.4
5	431.7	415.8	414.1	423.3	419.9
6	509.1	487.4	488.1	502.1	499.0
7	527.5	501.0	500.2	516.1	514.3
8	530.4	504.1	504.5	526.4	522.1
9	537.0	490.6	486.9	521.8	519.2
10	529.6	497.0	491.4	512.9	511.3
11	423.5	404.3	399.1	406.9	407.3
12	384.1	370.3	363.3	365.3	366.7

基于 GAMLSS 模型,分别构建平稳和非平稳模型对逐月径流拟合模型进行筛选,得到各月最优评估值如表 2 所示,所有月份非平稳模型均优于平稳模型,故采用最优非平稳型参数对每个月径流进行建模。对逐月径流分别选择非平稳模型的最优协变量和分布,最优模型参数如表 3 所示。

表2 各月平稳和非平稳模型的评估结果
Table 2 Evaluation results of monthly stationary and non-stationary models

月份	GD		AIC		BIC	
	平稳	非平稳	平稳	非平稳	平稳	非平稳
1	363.4	332.8	367.4	342.8	371.6	353.2
2	351.6	330.0	355.6	340.0	359.8	350.5
3	418.5	381.4	422.5	395.4	426.6	410.1
4	400.0	376.3	404.0	388.3	408.2	400.9
5	442.2	396.1	446.2	414.1	450.4	433.0
6	494.3	478.0	498.3	488.0	502.5	498.5
7	533.3	483.2	537.3	500.2	541.5	520.0
8	568.1	492.1	572.1	504.1	576.3	516.7
9	571.8	473.6	575.8	486.9	579.9	502.3
10	559.3	481.4	563.3	491.4	567.5	501.9
11	478.8	387.3	482.8	399.1	487.0	411.9
12	403.4	351.3	407.4	363.3	411.6	375.8

根据多年平均月径流量划分丰水期、平水期和枯水期,图 6 为平水期(3 月)、丰水期(8 月)和枯水期(1 月)径流序列变化时模型模拟分位数表现。可以看出,非平稳模型的表现优于平稳模型。例如,在平水期平稳模型的第 2 和第 98 分位数所跨越的面积覆盖了站点观测数据的 96.6%,而非平稳模型的分位数覆盖了观测数据的 100%。并且相较于平稳模型,非平稳模型能够提供更精确的置信区间。因此,基于四元驱动的非平稳模型可以为月径流序列提供更好的拟合效果,可以根据最优非平稳模型拟合结果计算 NSRI。

表 3 最优非平稳模型参数

Table 3 Optimal non-stationary model parameters		
月份	位置参数	尺度参数
1	降水量、改进的水库指数	降水量
2	降水量、取用水指数、改进的水库指数	恒定值
3	取用水指数、改进的水库指数	降水量、气温、取用水指数
4	改进的水库指数	降水量、气温、取用水指数
5	降水量、气温、取用水指数、改进的水库指数	降水量、气温、改进的水库指数
6	降水量、气温	改进的水库指数
7	降水量、气温、改进的水库指数	降水量、气温、取用水指数、改进的水库指数
8	降水量、取用水指数、改进的水库指数	改进的水库指数
9	降水量、气温、改进的水库指数	气温、取用水指数
10	降水量、取用水指数、改进的水库指数	恒定值
11	降水量、气温、取用水指数、改进的水库指数	恒定值
12	降水量、气温、改进的水库指数	降水量

为进一步判断统计参数的估计质量,采用图形检验对建模效果进行评判。图 7 为花园口站各时期模型 Q-Q 图建模效果。基于四元驱动的 GAMLSS 模型在正态 Q-Q 图中表现出良好效果,且蠕虫图(图 8)显示,基于四元驱动的 GAMLSS 模型残差点均通过了 95% 的显著性检验。

2.2.3 NSRI 计算结果验证

采用 NSRI 与 SRI 进行对比的方法来进行合理性验证,图 9 为 SRI 与 NSRI 计算结果。由图 9 可以看出 SRI 与 NSRI 相关性明显,而图 10 表明两者变化并不相同,说明非平稳模型对 SRI 表征存在一定的影响。由图 11 可以看出,基准期 NSRI 的平均值低于 SRI,说明 NSRI 可以识别出更多的干旱事件,并且 NSRI 识别了更多的极端干旱情况;随着取用水增长逐渐放缓以及上游水库联合调度的应用,变化期 NSRI 的分布变为在 0 值附近均匀分布。这也说明水库运行对缓解水文干旱事件起到了一定的积极作用。

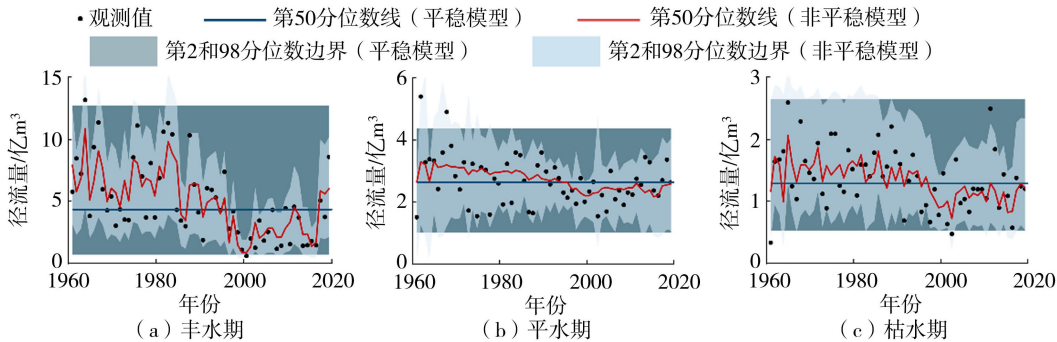


图 6 平稳和非平稳模型月径流量分位图

Fig. 6 Monthly runoff distribution map of stationary model and non-stationary model

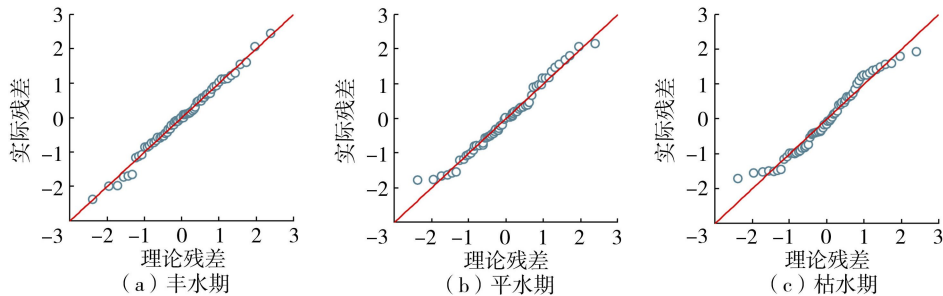


图 7 不同时期正态 Q-Q 图

Fig. 7 Normal Q-Q diagrams in different periods

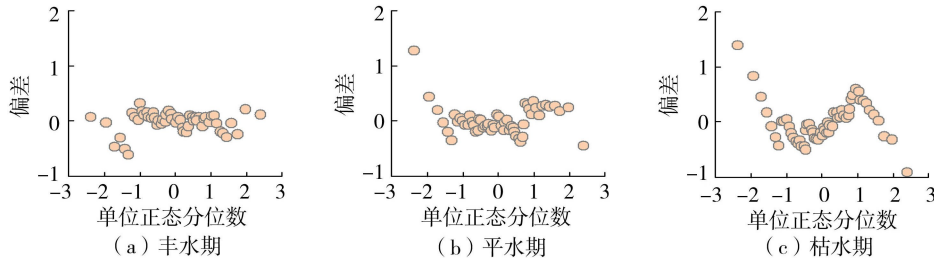


图 8 不同时期正态蠕虫图

Fig. 8 Normal worm diagrams in different periods

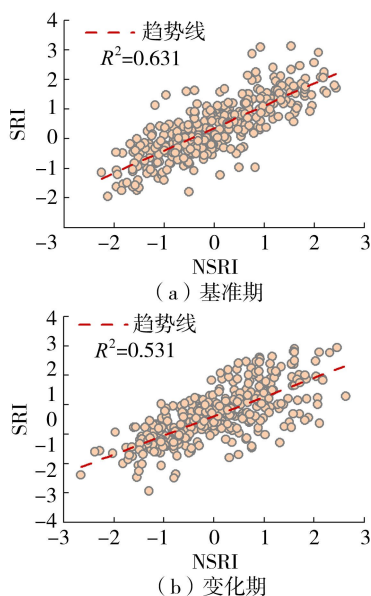


图9 不同时期 SRI 与 NSRI 时间序列散点图
Fig.9 Time series scatter plots of SRI and NSRI in different periods

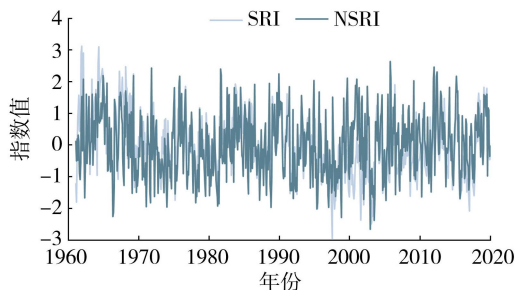


图10 SRI 与 NSRI 的时间序列折线图
Fig.10 Time series line plot of SRI and NSRI

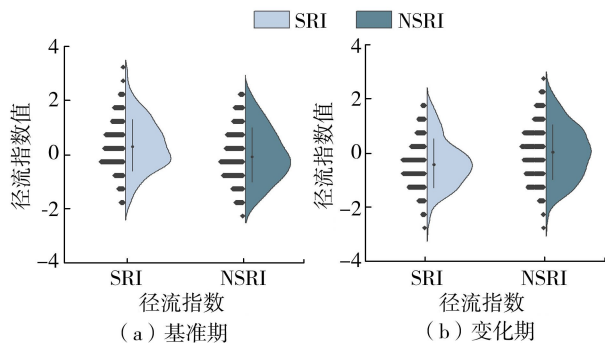


图11 不同时期 SRI 与 NSRI 小提琴图

Fig.11 Violin plots of SRI and NSRI in different periods

为了进一步验证 NSRI 对干旱事件的识别效果,收集了《黄河流域水旱灾害》和《中国水旱灾害公报》中记录的黄河流域历史干旱事件进行验证。1972 年黄河流域在春季和秋季均遭遇大旱影响,4 月和 10 月的 SRI 为 -1.11 和 -0.94 ,而 NSRI 为 -1.62 和 -1.52 。SRI 识别出的干旱分别为中度干旱和轻度干旱,而 NSRI 识别出的干旱均为重度干旱,与历史资料对比可知,NSRI 识别的结果更为准确。

1980 年黄河发生冬春连旱,1—4 月的 SRI 为 0.37 、 -0.82 、 -0.03 和 0.65 ,而 NSRI 为 -0.31 、 -1.60 、 -0.77 和 -1.29 ,在 1—4 月 NSRI 均识别出更严重的干旱情况。2016 年黄河流域进入秋季后旱情逐渐严重,9—12 月的 SRI 为 -1.48 、 -1.14 、 -1.06 和 -1.68 ,NSRI 为 -0.45 、 -0.57 、 -0.69 和 -1.42 ,NSRI 能够更准确识别干旱事件逐渐加重的变化过程,而 SRI 是基于全序列同时期径流量计算的固定参数的干旱指数,导致对变化期干旱程度的高估。通过历史旱情的验证,表明 NSRI 识别的干旱结果与实际情况更加接近。

虽然 NSRI 能够较好地识别变化环境下干旱事件,但仍有一定的局限性,需要根据实际情况应用。人类活动与气候变化对径流的影响因素复杂繁多。Shao 等^[30]采用水库需水用水量来代表人类活动的影响;Cui 等^[31]以低频气候因子和水库指数作为协变量,以重新评估三峡库区在变化环境下水库对洪水调控的效果;Wang 等^[17]通过构建 SWAT 模型获得人为影响指数作为协变量,大大提高了滦河流域 NSRI 的拟合效果。这些研究根据研究区域特点的不同提出了适用的协变量进行非平稳拟合。变化环境下,不同研究区的协变量选择可能会对 NSRI 的构建产生不同的影响,需要对径流影响的主要因素进行甄别。本文基于四元驱动的 GAMLSS 模型构建的 NSRI 对变化环境下的干旱评估提供了一种可靠的方法,同时也为干旱的多源归因分析提供了可能。

2.2.4 干旱事件发生频率分析

图 12 为 1961—2020 年不同时期花园口站 SRI 和 NSRI 识别的干旱等级频率。从图 12 可以看出,在基准期和变化期 SRI 识别的轻度干旱事件发生频率大多高于 NSRI 识别的轻度干旱发生频率。对于中度干旱事件,SRI 识别的中度干旱事件发生频率在变化期最高(35.12%),同时期 NSRI 识别的中度干旱事件发生频率为 39.83%。SRI 和 NSRI 识别的重度干旱事件发生频率在基准期达到了最大值,分别为 16.67% 和 19.01%。此外,从极端干旱事件可以看出,在基准期和变化期 NSRI 识别的极端干旱事件发生频率分别高于和低于 SRI 识别的极端干旱事件发生频率(图 12(b))。总的来说,NSRI 在基准期识别出了更多的重度干旱和极端干旱事件,这是由于基准期水库建设数量较少,但取用水量增长迅速,这使得 NSRI 识别出了更多的重度 and 极端干旱事件;在变化期,随着取用水增长速率减缓以及大型水库的联合调度可能缓解了水文干旱,NSRI 定义了更少的重度干旱和极端干旱事件,这也与图 11 的趋势结果相对应,可见 NSRI 可以更准确地反映出变

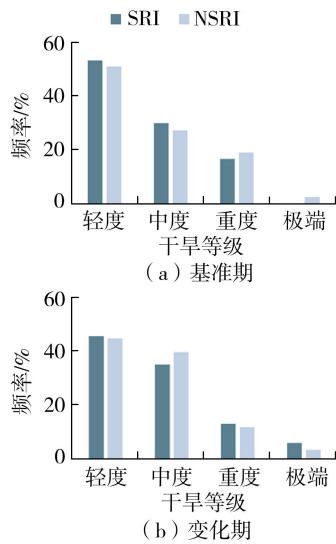


图 12 不同时期 SRI 和 NSRI 识别的干旱等级频率
Fig.12 Frequency of drought level identified by SRI and NSRI in different periods

3 结 论

- a. 通过对径流序列进行非平稳识别, 根据 AIC、BIC 及 GD 确定了 NSRI 各月的最优协变量和分布。引入取用水指数和改进的水库指数可以有效地提高模型在变化环境下的拟合性能。
- b. NSRI 可以比 SRI 更准确地反映出变化环境下水文干旱演变趋势, NSRI 识别的干旱过程与实际情况更加接近。NSRI 能够识别出不同时期气候变化与人类活动对水文干旱的影响, 验证了 NSRI 构建的合理性与必要性。
- c. 本文提出的非平稳水文干旱评估方法可为评估变化环境下的水文干旱提供一种普适的思路, 但需要注意的是随着国家水网建设, 跨区域调水工程也会改变河流径流过程, 在计算 NSRI 时应注意不同区域人类影响的协变量选取。

参考文献:

[1] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391 (1/2): 202-216.

[2] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策 [J]. 水利学报, 2022, 53 (10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (10): 1143-1153. (in Chinese))

[3] 吕娟, 凌永玉, 姚力玮. 新中国成立 70 年防洪抗旱减灾成效分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17 (4): 242-251. (LYU Juan, LING Yongyu, YAO Liwei. Analysis on the effect of flood and drought disaster

prevention in the 70 years since the founding of New China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17 (4): 242-251. (in Chinese))

[4] 石朋, 唐汉, 瞿思敏, 等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 49-56. (SHI Peng, TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 49-56. (in Chinese))

[5] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: whither water management? [J]. Science, 2008, 319 (5863): 573-574.

[6] 鲁帆, 肖伟华, 戴雁宇, 等. 黄河干流年径流量非一致性频率计算 [J]. 水力发电学报, 2020, 39 (12): 76-84. (LU Fan, XIAO Weihua, DAI Yanyu, et al. Study on non-stationary hydrological frequency calculations for the annual runoff of Yellow River mainstream [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 (12): 76-84. (in Chinese))

[7] 孙鹏, 孙玉燕, 张强, 等. 淮河流域洪水极值非平稳性特征 [J]. 湖泊科学, 2018, 30 (4): 1123-1137. (SUN Peng, SUN Yuyan, ZHANG Qiang, et al. Evaluation on non-stationarity assumption of annual maximum peak flows during 1956-2016 in the Huaihe River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30 (4): 1123-1137. (in Chinese))

[8] 江善虎, 任明明, 章二子, 等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (2): 1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 1-7. (in Chinese))

[9] 鲁帆, 肖伟华, 严登华, 等. 非平稳时间序列极值统计模型及其在气候-水文变化研究中的应用综述 [J]. 水利学报, 2017, 48 (4): 379-389. (LU Fan, XIAO Weihua, YAN Denghua, et al. Progresses on statistical modeling of non-stationary extreme sequences and its application in climate and hydrological change [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (4): 379-389. (in Chinese))

[10] WANG Menghao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. The development of a nonstationary standardized streamflow index using climate and reservoir indices as covariates [J]. Water Resources Management, 2022, 36 (4): 1377-1392.

[11] RIGBY R A, STASINOPOULOS D M. Generalized additive models for location, scale and shape (with discussion) [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 2005, 54 (3): 507-554.

- [12] FOROOTAN E, KHAKI M, SCHUMACHER M, et al. Understanding the global hydrological droughts of 2003-2016 and their relationships with teleconnections [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2587-2604.
- [13] ZHANG Te, SU Xiaoling, FENG Kai. A novel nonstationary meteorological and hydrological drought index using the climatic and anthropogenic indices as covariates [J]. Science of the Total Environment, 2021, 786: 147385.
- [14] JIANG Shanhu, WANG Menghao, REN Liliang, et al. A framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on hydrological drought in a semiarid basin of Northern China [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(7): 1075-1088.
- [15] 鲍振鑫, 张建云, 严小林, 等. 基于四元驱动的海河流域河川径流变化归因定量识别 [J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 171-181. (BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, YAN Xiaolin, et al. Quantitative assessment of the attribution of runoff change caused by four factors in the Haihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 171-181. (in Chinese))
- [16] SLATER L J, ANDERSON B, BUECHEL M, et al. Nonstationary weather and water extremes: a review of methods for their detection, attribution, and management [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(7): 3897-3935.
- [17] WANG Youxin, PENG Tao, LIN Qingxia, et al. A new non-stationary hydrological drought index encompassing climate indices and modified reservoir index as covariates [J]. Water Resources Management, 2022, 36(7): 2433-2454.
- [18] WANG Yixuan, DUAN Limin, LIU Tingxi, et al. A non-stationary standardized streamflow index for hydrological drought using climate and human-induced indices as covariates [J]. Science of the Total Environment, 2020, 699: 134278.
- [19] DANG Chiheng, ZHANG Hongbo, SINGH V P, et al. Investigating hydrological variability in the Wuding River Basin: implications for water resources management under the water-human-coupled environment [J]. Water, 2021, 13(2): w13020184.
- [20] 邓安军, 陈建国, 胡海华, 等. 我国水库淤损情势分析 [J]. 水利学报, 2022, 53(3): 325-332. (DENG Anjun, CHEN Jianguo, HU Haihua, et al. Analysis of reservoir siltation in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 325-332. (in Chinese))
- [21] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析 [J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496. (ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese))
- [22] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [23] YAN Lei, XIONG Lihua, LIU Dedi, et al. Frequency analysis of nonstationary annual maximum flood series using the time-varying two-component mixture distributions [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(1): 69-89.
- [24] LÓPEZ J, FRANCÉS F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17: 3189-3203.
- [25] YAN Denghua, ZHANG Xin, QIN Tianling, et al. A data set of distributed global population and water withdrawal from 1960 to 2020 [J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 640.
- [26] 任立良, 王宇, 江善虎, 等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 26-32. (REN Liliang, WANG Yu, JIANG Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 26-32. (in Chinese))
- [27] 任立良, 张炜, 李春红, 等. 中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 13-18. (REN Liliang, ZHANG Wei, LI Chunhong, et al. Impacts of human activities on river runoff in North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(4): 13-18. (in Chinese))
- [28] XIE J, XU Y, WANG Y, et al. Influences of climatic variability and human activities on terrestrial water storage variations across the Yellow River Basin in the recent decade [J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124218.
- [29] HAO Wenlong, SHAO Quanxi, HAO Zhenchun, et al. Non-stationary modelling of extreme precipitation by climate indices during rainy season in Hanjiang River Basin, China [J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(10): 4154-4169.
- [30] SHAO Shuting, ZHANG Hongbo, SINGH V P, et al. Non-stationary analysis of hydrological drought index in a coupled human-water system: application of the GAMLSS with meteorological and anthropogenic covariates in the Wuding River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2022, 608: 127692.
- [31] CUI Hao, JIANG Shanhu, GAO Bin, et al. On method of regional non-stationary flood frequency analysis under the influence of large reservoir group and climate change [J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129255.

(收稿日期: 2023-02-26 编辑: 熊水斌)