

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.001

基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析

江善虎^{1,2},任明明^{1,2},章二子³,马明卫⁴,王孟浩²,刘亚婷²,丁雨²,任立良^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;
3. 南京市江宁区水务局,江苏 南京 211112; 4. 华北水利水电大学水资源学院,河南 郑州 450046)

摘要:为剖析气候变化对水文极值非平稳性的影响,采用 5 a 滑动平均和 Mann-Kendall 突变检验法对黄河唐乃亥水文站 1957—2018 年最枯多日平均流量进行非平稳检验;根据 Kendall 等级相关分析法优选气候指数,以时间和气候指数为协变量构建非平稳广义极值分布 (generalized extreme value, GEV) 模型,并进行参数估计与模型优选,对比平稳与非平稳 GEV 模型在枯季径流模拟中的应用效果。研究结果表明:黄河源区枯季径流呈现明显的非平稳特征;平稳 GEV 模型的模拟值偏高,以西太平洋指数为协变量的非平稳 GEV 模型对极值的拟合效果较好,且能较好地解释极端枯水事件的波动性。

关键词:非平稳 GEV 模型;枯季径流;气候因子;演变特征;黄河源区
中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)02-0001-07

Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River

JIANG Shanhu^{1,2}, REN Mingming^{1,2}, ZHANG Erzi³, MA Mingwei⁴, WANG Menghao²,
LIU Yating², DING Yu², REN Liliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jiangning District Water Affairs Bureau of Nanjing City, Nanjing 211112, China;
4. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The non-stationary characteristics of the average runoff in driest days are tested in this paper based on the measured runoff data of Tangnaihai Hydrological Station from 1957 to 2018 using the 5-year moving average and Mann-Kendall abrupt change test to analyze the effect of climate change on the non-stationary of hydrological extreme value. According to the Kendall rank correlation analysis method, the climate index was selected, and the non-stationary generalized extreme value distribution model (generalized extreme value, GEV) was constructed with time and climate index as covariates. Parameter estimation and model selection were carried out, and application effects of the stationary and non-stationary GEV models in the runoff simulation of dry season were compared. The results indicated that the dry season runoff shows obvious non-stationary characteristics. Meanwhile, the simulated value of the stationary GEV model is higher than the measured value, and the GEV model with the western Pacific index as covariate produces better fit for the extreme value, which better explained the volatility of extreme dry events.

Key words: non-stationary generalized extreme value distribution model; dry season runoff; climate index; evolution characteristics; Source Region of the Yellow River

近几十年来,在气候变化和高强度人类活动的共同影响下,全球水循环过程发生了显著的变化,水文序列呈现出非平稳的特性,因此,变化环境下水文频率计算的稳态假设面临挑战^[1-4]。Milly 等^[5]认为,变化环

基金项目: 国家自然科学基金(U2243203,51979069,41701022)
作者简介: 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
通信作者: 马明卫(1986—),男,副教授,博士,主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail:mamingwei@ncwu.edu.cn
引用本文: 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.

境下平稳性假设不再适用于水资源的风险评估,目前水文平稳性研究方法会造成结果偏离实际情况,因此必须合理解决极端降雨造成的非平稳性问题。鉴于气候变化的复杂性,考虑气候因子变化的水文序列非平稳性研究成为目前水文非一致性研究的热点与难点^[6]。

广义极值分布考虑位置参数、尺度参数、形状参数,将 Weibull、Gumbel 和 Frechet 分布统一起来,有效地解决了单一分布的不足,因而被广泛地应用于极值事件的分析。高洁等^[7]采用 GEV (generalized extreme value) 分布对雅砻江年最大洪峰流量系列的非平稳性进行研究,认为考虑参数的时变特征和尾部特点会使模拟效果更佳。尹义星等^[8]采用以时间为位置参数协变量的非平稳 GEV 模型,对鄱阳湖流域降水进行模拟分析。但在水文非一致性研究中仅考虑时间协变量,其可靠度还有待进一步探讨。在气候影响剧烈的背景下,气候因素已成为水文非一致性研究中不可或缺的影响因子。吴孝情等^[9]采用随机森林 (random forest, RF) 算法分析气候因子对极端降雨的影响,发现厄尔尼诺指标对流域的极端降雨影响最明显。Ouarda 等^[10]以北大西洋指数 (AMO, Atlantic multidecadal oscillation) 等气候因子为协变量,发现非平稳 GEV 模型更适合描述研究站点极端降雨在时间上的演变特性。上述研究表明,非平稳 GEV 模型对于极端降雨、极端径流等事件的研究具有较好的适用性。

枯季作为水资源、水生态和水环境问题的高发期^[11],自然和社会系统对其径流过程的影响尤为敏感。黄河源区的多年平均流量约占黄河流域的 35%,是黄河重要的水源地。张建云等^[12]研究指出,人类活动对黄河上游流域(唐乃亥水文站)的影响并不明显,而枯季径流呈现出非显著下降趋势的原因主要在于气温的显著升高。此外,气候变化带来的水资源短缺问题也制约着国民经济的发展^[13-15],因此,探讨变化环境下黄河枯季径流变化特征及其驱动因素,对于气候变化背景下的黄河流域水资源管理具有重要的现实意义。

当前,非平稳 GEV 模型应用于黄河源区水文序列的研究鲜有报道,更没有将气候因素纳入非平稳 GEV 模型进行枯季径流演变分析。因此,本文基于黄河源区唐乃亥水文站 1957—2018 年极端枯水序列和月尺度气候指数序列,除考虑时间为协变量外,构建以气候指数为协变量的非平稳 GEV 模型,模拟和分析黄河源区枯季径流的演变特征,以期为黄河流域水资源预测和管理提供更为精确的数据支撑和方案选择。

1 研究区概况

黄河源区位于青藏高原东北部,龙羊峡水库以上黄河流域的范围,流域面积约 12.2 万 km²,气候类型属于高原大陆性气候,年均大风日数高达 128 d,多集中在 11 月至次年 5 月,该时间段也是干旱频发时期。由于长期受自然侵蚀及人类活动的影响,黄河源区出现了水土流失等生态问题,而其水资源丰缺度与生态环境状况关系着整个黄河流域的安危。唐乃亥水文站(100°09'E, 35°30'N)是黄河上游重要的水文控制站,位于青海省兴海县唐乃亥乡,其地理位置如图 1 所示。

贾仰文等^[16]分析气候变化对黄河源区径流过程的影响时,发现其枯水径流受积雪融雪及冻土的影响较大,在各水文年的 12 月、1 月、2 月的径流量占比很小。在研究极端枯水事件时,考虑其发生时间可能提前或延后,因此将每年 11 月至次年 4 月作为枯水季节,研究最长历时为 3 月的极端枯水事件。根据已有研究^[17-18],以最枯 1 d、7 d、30 d 和 90 d 平均流量为研究对象,利用滑动平均法提取唐乃亥水文站 1957—2018 年各历时枯季径流系列。为分析气候对黄河源区枯季径流的非一致性影响,根据以往研究^[19-20],本文主要选用 6 个主要气候因

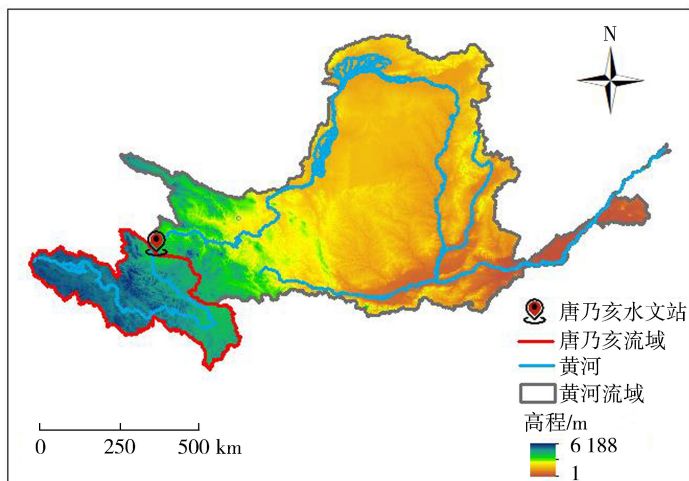


图 1 黄河源区及唐乃亥水文站位置

Fig. 1 Location of Source Region of the Yellow River and the Tangnaihai Hydrological Station

子:西太平洋指数(WP, western Pacific index)、太平洋年代际震荡指数(PDO, Pacific decadal oscillation)、南极涛动(AO, Atlantic oscillation)、南方涛动指数(SOI, southern oscillation index)、北大西洋涛动(NAO, north

Atlantic oscillation) 和热带太平洋海温指数(Nino3)。数据来自美国海洋和大气管理局月尺度气候指数时间序列(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)。

2 研究方法

2.1 非平稳性检验及气候指数选取

2.1.1 非平稳性检验

在趋势分析中,滑动平均法^[21]最为常见,可以减少序列的随机性,突显序列的变化趋势;而在突变检验中,Mann-Kendall 突变检验法的优势在于计算简单,基本不受异常值干扰^[22]。因此,采用 5 a 滑动平均法对黄河源区唐乃亥水文站枯季径流进行趋势分析。

2.1.2 气候指数选取

Kendall 等级(Kendall tau)相关系数^[23]是用于测量两个观测数据之间线性相关程度的指标,检验两个随机变量的统计依赖性。Kendall 相关系数(τ)的取值范围在-1~1 之间,当 τ 为 1 时,表示两个随机变量拥有一致的等级相关性;当 τ 为-1 时,表示两个随机变量拥有完全相反的等级相关性;当 τ 为 0 时,表示两个随机变量相互独立。因此,采用 Kendall 等级相关分析法对唐乃亥水文站枯季径流与气候指数时间序列进行相关性分析,以选取较优的气候指数。

2.2 非平稳 GEV 模型结构

2.2.1 广义极值分布理论

通常情况下,当独立随机变量 y 服从 GEV 分布^[24],概率密度函数为

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = \begin{cases} \exp \left[- \left(1 + k \frac{y - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{k}} \right] & k \neq 0 \\ \exp \left[- \exp \left(\frac{y - \mu}{\sigma} \right) \right] & k = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中: y 为符合 GEV 分布的随机变量; μ 为位置参数; σ 为尺度参数; k 为形状参数,假定 k 为常数^[25-26]。在实际的计算中, k 是模型中的关键参数,其取值决定了极值的分布类型。当 k 趋近于 0 时为极值 I 型(Gumbel 分布);当 $k < 0$ 时为极值 II 型(Frechet 分布);当 $k > 0$ 时为极值 III 型(Weibull 分布)。

2.2.2 非平稳 GEV 模型

根据 Tyralis 等^[27]的研究,将枯季径流与历时、频率之间的关系定义为

$$q(d) = \frac{F(T)}{(d + \theta)^\eta} \tag{2}$$

式中: q 为枯季径流; d 为历时; F 为频率; T 为重现期; η 和 θ 为非负数。

从式(2)可以看出,同一历时下, $F(T)$ 由 $q(d)$ 决定,假定各历时枯季径流序列均服从 GEV 分布,其频率用 $F_{q(d)}(q;d)$ 表示,又因 $F(T) = q(d)(d + \theta)^\eta$, $(d + \theta)^\eta$ 为常数项,故 $F(T)$ 也服从 GEV 分布,用 $F_Y(y)$ 表示。而研究枯水问题时,频率和重现期之间的关系为

$$F = 1 - 1/T \tag{3}$$

因此

$$F_{Q(d)}(q;d) = F_{Y(y)} = 1 - 1/T \quad F(T) = F_Y^{-1}(1 - 1/T) \tag{4}$$

基于式(1)~(4),构建非平稳 GEV 模型如下:

$$q_T(d) = \frac{\mu_t - \frac{\sigma_t}{k} \left\{ 1 - \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-k} \right\}}{(d + \theta)^\eta} \tag{5}$$

式中 μ_t 和 σ_t 为模型参数。对协变量的依赖性可以采用多种形式(如线性 $y = a + bx$,二次形式 $y = a + bx + cx^2$),从而使模型模拟值与样本数据的拟合效果更佳。

μ_t 和 σ_t 形式如下:

$$\mu_t = \begin{cases} \mu_0 \\ \mu_0 + \mu_1 Z_t \\ \mu_0 + \mu_1 Z_t + \mu_2 Z_t^2 \end{cases} \tag{6}$$

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_0 \\ \sigma_0 + \sigma_1 Z_t \end{cases} \tag{7}$$

式中 Z_t 为第 t 个时间序列的协变量。当 $\mu_t = \mu_0, \sigma_t = \sigma_0$ 时,为平稳 GEV 模型;当 $\mu_t \neq \mu_0, \sigma_t = \sigma_0$ 或 $\mu_t = \mu_0, \sigma_t \neq \sigma_0$ 时,为非平稳 GEV 模型。

2.3 参数估计及模型效果评价

2.3.1 参数估计

极大似然法^[28]是概率统计中一种非常经典的估算模型参数的方法,根据对数似然函数最大化进行概率分布参数估计。因此,采用极大似然法对不同复杂程度的非平稳 GEV 模型进行参数估计。

2.3.2 模型效果评价

赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)^[29]和贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)^[30]是常见的模型评价指标。其中, AIC 函数由两项构成,一项为拟合误差量,体现模型拟合的好坏;第二项为惩罚项,在维数过大且训练样本数据相对较少的情况下,可以有效避免出现维数灾难现象。综合考虑模型参数个数与拟合精度,本文采用 AIC 和 BIC 对模型进行评价。

3 结果与讨论

3.1 枯季径流非平稳性检验

根据 5 a 滑动平均法和 Mann-Kendall 突变检验法对各历时下的黄河源区枯季径流分别进行趋势分析和突变检验,以最枯 30 d 平均流量的检验结果为例,如图 2 所示。

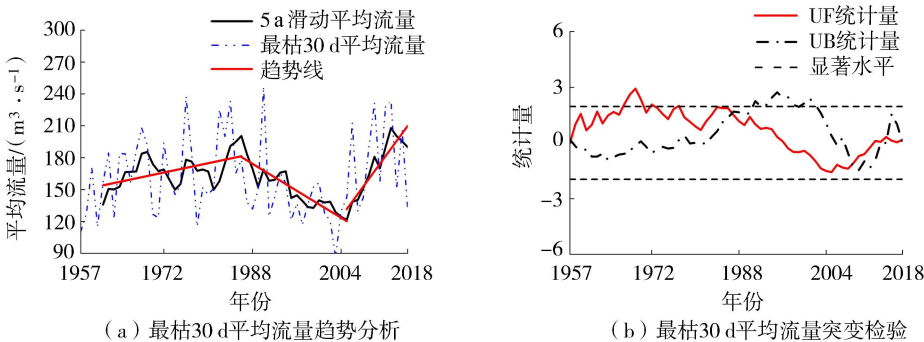


图 2 唐乃亥水文站 1957—2018 年最枯 30 d 平均流量非平稳性检验

Fig.2 Non-stationary test for the driest thirty days mean runoff at the Tangnaihai Hydrological Station from 1957 to 2018

a. 5 a 滑动平均法趋势检验表明,黄河源区 1957—2018 年最枯 30 d 平均流量总体呈现上升—下降—上升的变化趋势。其他历时也表现出类似的波动变化趋势。

b. Mann-Kendall 突变检验显示,黄河源区 1957—2018 年最枯 30 d 平均流量从 1969 年开始表现为下降趋势,1986 年发生下降突变,从 2005 年开始表现为上升趋势,2009 年发生上升突变。其他历时也存在类似的突变现象。

3.2 参数估计及模型效果评价

3.2.1 气候指数

采用 Kendall 等级相关分析法对气候指数与枯季径流进行相关分析,包括最枯 1 d、7 d、30 d 和 90 d 平均流量与 6 个气候指数序列簇的相关分析。其中,通过对气候指数进行 e 月滑动处理($e = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, 当 $e = 1$ 时,即逐月气候指数序列)得到 6 个气候指数序列簇。此外,还考虑了河川径流对气候的时滞性,将滞后时间取为 g a($g = 1, 2, 3, 4$)。结果表明,当 $g = 4, e = 4$ 时,WP 与最枯 1 d、7 d、30 d 和 90 d 平均流量的相关度最高,且均通过了 95% 的置信度。

3.2.2 非平稳 GEV 模型构建与优选

根据所构建的模型与选取的气候指数,非平稳 GEV 模型包括以时间为协变量的 GEV-Time 模型和以 WP 为协变量的 GEV-WP 模型。为比较非平稳 GEV 模型的适用性,对平稳 GEV(GEV-Stationary)、GEV-Time 与 GEV-WP 模型的拟合效果进行对比分析。表 1 为最枯 1 d、7 d、30 d 和 90 d 平均流量的位置参数、尺度参数

估计值,似然函数对数值及 AIC 和 BIC 结果;表 2 为黄河源区两年一遇(频率 50%) 枯水流量设计值与实测枯水流量均值;图 3 为以最枯 7 d 和 30 d 平均流量为例,3 种模型在低、中、高频率(2.5%、50%、97.5%) 下的枯季径流理论频率曲线。

表 1 GEV-Stationary、GEV-Time 和 GEV-WP 模型各类指标对比

Table 1 Comparisons of various indexes of GEV-Stationary , GEV-Time and GEV-WP models						
历时/d	模型	位置参数	尺度参数	参数个数	AIC	BIC
1	GEV-Stationary	145.000	30.000	5	688	708
	GEV-Time	143.981+0.017Z _t	30.480	6	774	798
	GEV-WP*	144.919+6.166Z _t	30.777+9.890Z _t	7	620	649
7	GEV-Stationary	150.000	31.000	5	710	730
	GEV-Time	152.963+0.010Z _t	31.144	6	752	776
	GEV-WP*	153.674+7.037Z _t	31.687+6.741Z _t	7	624	653
30	GEV-Stationary	160.000	32.000	5	710	730
	GEV-Time	159.967+0.002Z _t	31.059	6	740	764
	GEV-WP*	161.446+8.851Z _t	33.708+3.230Z _t	7	630	659
90	GEV-Stationary	170.000	35.000	5	700	720
	GEV-Time	169.971+0.002Z _t	36.040	6	750	774
	GEV-WP*	178.120+11.405Z _t	37.221-2.198Z _t	7	636	665

注: *为最优模型。

表 2 黄河源区两年一遇(频率为 50%) 不同历时枯水流量设计值对比

Table 2 Comparison of design low water values in different durations of once-in-two years (50%) in Source Region of the Yellow River

历时/d	两年一遇枯水流量设计值/(m ³ ·s ⁻¹)			实测枯水流量均值/ (m ³ ·s ⁻¹)
	GEV-Stationary 模型	GEV-Time 模型	GEV-WP 模型	
1	161.35	211.37 ~ 212.54	128.38 ~ 154.28	144.37
7	184.24	191.16 ~ 191.80	137.77 ~ 163.15	153.37
30	191.04	217.09 ~ 217.24	144.97 ~ 171.26	161.43
90	209.69	254.18 ~ 254.35	162.07 ~ 190.85	178.28

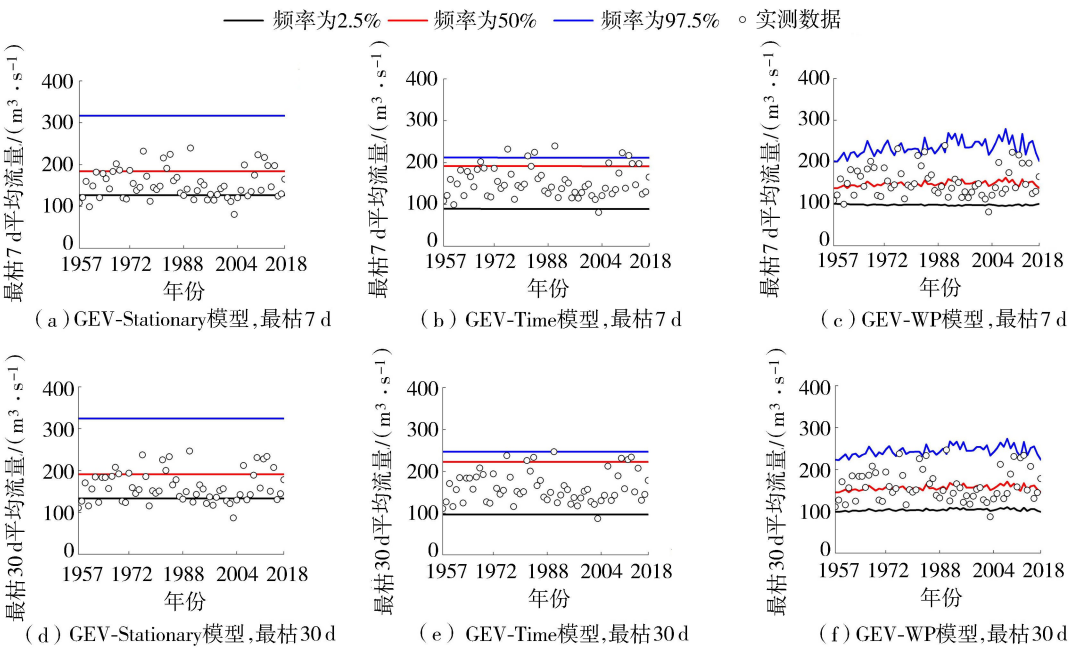


图 3 2.5%、50%和 97.5%频率下模型拟合成果

Fig.3 Model fitting results at 2.5% , 50% and 97.5% frequencies

由表1 的 AIC 和 BIC 指标可见,GEV-WP 模型拟合效果最好,明显优于 GEV-Stationary 模型和 GEV-Time 模型;而 GEV-Time 模型拟合效果劣于 GEV-Stationary 模型,说明时间协变量并不适用于非平稳 GEV 模型。从图 3(a)(d)可知,各频率下 GEV-Stationary 模型的流量模拟值均高于实测点,表明 GEV-Stationary 模型模

拟效果并不好,若将其看作平稳序列进行模拟,结果会远远偏离实际值;从图 3(b)(e)来看,GEV-Time 模型在频率为 50%时流量的估计值偏高,且其理论频率曲线随着时间变化极不明显,形象地解释了以时间为协变量的模型中参数较小的情况;图 3(c)(f)中,在 2.5%~97.5% 的频率范围内,GEV-WP 模型模拟效果明显较好,理论频率曲线包络了 98% 的经验点据,且随时间波动,波动幅度随频率增大而增大。3 种模型最枯 1 d 和 90 d 平均流量的拟合结果也具有同样的特征。由表 2 可知,GEV-WP 模型的枯水流量设计值在实测枯水流量均值上下浮动,误差范围在-11%~7%之间,而 GEV-Stationary 模型和 GEV-Time 模型与实测枯水流量均值的误差范围为 12%~47%。因此,GEV-WP 模型可以较好地识别黄河源区枯季径流的波动性特征。

3.3 非平稳 GEV 模型应用

为探究非平稳 GEV 模型的实际应用能力,将研究期划分为训练期(1957—2000 年)和验证期(2001—2018 年),根据训练期的数据进行参数估计,使用 GEV-Stationary 模型、GEV-WP 模型和 GEV-Time 模型对验证期的枯水流量(两年一遇即频率为 50%)进行预测。模型模拟结果表明:最枯 1 d、7 d、30 d 和 90 d 平均流量,GEV-Stationary 模型与 GEV-WP 模型预测的枯水流量远高于实测值;由于 GEV-Stationary 模型的位置参数体现整体数据的平均水平且恒定不变,受极值的影响,导致枯水流量被高估;GEV-Time 模型的预测结果比 GEV-Stationary 模型更高,说明其对枯水流量的预测并不适用。综上所述,结合气候指数的非平稳 GEV 模型可以更好地识别训练期以及验证期枯水频率的波动和趋势,同时,在气候指数被预测的基础上,GEV-WP 模型对黄河源区枯季径流演变特征可以进行较好的预测分析。其中,最枯 7 d 和 30 d 平均流量的模型应用结果见图 4(图中黑色线代表训练期结果,红色线表示验证期结果)。

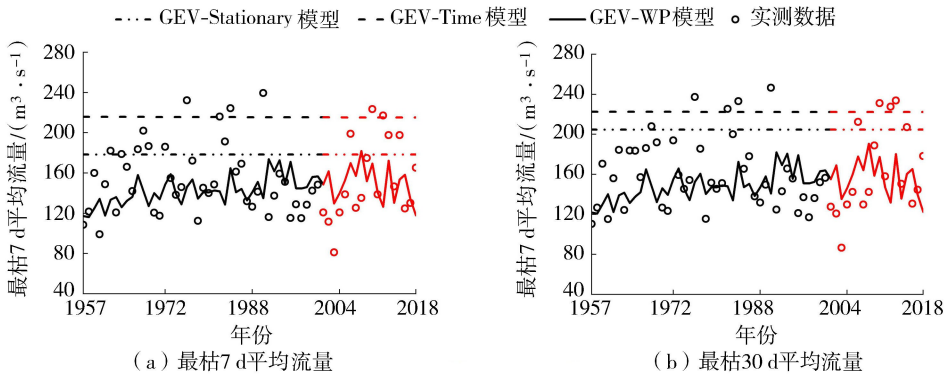


图 4 50% 频率下 GEV-Stationary、GEV-Time 和 GEV-WP 模型模拟结果

Fig. 4 Application results of GEV-Stationary, GEV-Time and GEV-WP models at 50% frequency

4 结 论

- a. 黄河源区枯季径流量在 1957—2018 年期间呈现上升和下降交替的显著变化趋势,在 1986 年和 2009 年存在突变点,黄河源区枯季径流具有明显的非平稳特性。
- b. 根据 AIC 和 BIC 结果,GEV-WP 模型为最优模型;从 3 种模型的拟合效果来看,GEV-WP 模型的理论频率曲线可以包络 98% 的经验点据,而时间对黄河源区枯季径流影响甚微,表明以西太平洋指数为协变量的非平稳 GEV 模型对极值拟合效果较优,GEV-WP 模型可以更好地解释极端枯水事件的波动性。
- c. 平稳 GEV 模型、GEV-WP 模型和 GEV-Time 模型的应用结果表明,受极端值的影响,平稳 GEV 模型枯水流量预测值高于实际值,考虑气候指数的非平稳 GEV 模型可以更好地识别训练期与验证期枯水频率的变化;结合气候指数预测产品,以西太平洋指数为协变量的非平稳 GEV 模型对黄河源区枯季径流演变特性可以较精准地进行预测。

参考文献:

[1] 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))

- [2] 王怀军,曹蕾,肖明贤,等. 淮河流域极端气候事件非平稳特征研究[J]. 中国农村水利水电,2021(4):1-9. (WANG Huaijun,CAO Lei,XIAO Mingxian,et al. Non-stationary characteristics of extreme climate events:a case study of Huaihe River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(4):1-9. (in Chinese))
- [3] 胡义明,梁忠民,姚轶,等. 变化环境下洪峰-洪量组合设计值计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):492-498. (HU Yiming,LIANG Zhongmin,YAO Yi,et al. Calculation method of design value combination of flood peak and flood volume under changing environment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):492-498. (in Chinese))
- [4] 黄凯,冯平. 基于非一致性水文序列的水库极限防洪风险复核分析[J]. 水力发电学报,2016,35(1):28-37. (HUANG Kai,FENG Ping. Recheck analysis of reservoir extreme flood control risk using inconsistent hydrological sequences[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(1):28-37. (in Chinese))
- [5] MILLY P C D,BETANCOURT J,FALKENMARK M,et al. On critiques of “stationarity is dead;whither water management?” [J]. Water Resources Research,2015,51(9):7785-7789.
- [6] 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 Yunyan,ZHANG Qiang,et al. Non-stationary characteristics of flood extreme value in Huaihe River Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(4):1123-1137. (in Chinese))
- [7] 高洁,杨龙. 考虑非平稳性特征的雅砻江流域洪水量化分析[J]. 水力发电,2020,46(9):55-62. (GAO Jie,YANG Long. A quantitative analysis on flood peak of Yalong River Basin considering non-stationarity[J]. Water Power,2020,46(9):55-62. (in Chinese))
- [8] 尹义星,陈海山,许崇育,等. 基于平稳与非平稳 GEV 模型的鄱阳湖流域极值降水模拟[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1906-1917. (YIN Yixing,CHEN Haishan,XU Chongyu,et al. Modeling extreme precipitation in the Poyang Lake Basin based on stationary and non-stationary GEV models[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(11):1906-1917. (in Chinese))
- [9] 吴孝情,陈晓宏,唐亦汉,等. 珠江流域非平稳性降雨极值时空变化特征及其成因[J]. 水利学报,2015,46(9):1055-1063. (WU Xiaoqing,CHEN Xiaohong,TANG Yihan,et al. Spatiotemporal variations and the causes of non-stationary extreme precipitation in the Pearl River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(9):1055-1063. (in Chinese))
- [10] OUARDA T B,YOUSEF L A,CHARRON C. Non-stationary intensity-duration-frequency curves integrating information concerning teleconnections and climate change[J]. International Journal of Climatology,2019,39(4):2306-2323.
- [11] 魏伊宁,李勋贵,李芳. 黄河上游径流丰枯空间分布特征及其影响因素[J]. 水资源保护,2021,37(6):103-113. (WEI Yining,LI Xungui,LI Fang. Spatial distribution characteristics and influencing factors of wet and dry of runoff in upper reaches of the Yellow River[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):103-113. (in Chinese))
- [12] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展,2020,31(2):153-161. (ZHANG Jianyun,WANG Guoqing,JIN Junliang,et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. Advances in Water Science,2020,31(2):153-161. (in Chinese))
- [13] ANGHILERI D,BOTTER M,CASTELLETTI A,et al. A Comparative assessment of the impact of climate change and energy policies on alpine hydropower[J]. Water Resources Research,2018,54(11):9144-9161.
- [14] 马涛,刘九夫,彭安帮,等. 中国非常规水资源开发利用进展[J]. 水科学进展,2020,31(6):960-969. (MA Tao,LIU Jiufu,PENG Anbang,et al. Progress in development and utilization of non-conventional water resources in China[J]. Advances in Water Science,2020,31(6):960-969. (in Chinese))
- [15] 左其亭,李佳伟,马军霞,等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. 水资源保护,2021,37(2):21-27. (ZUO Qiting,LI Jiawei,MA Junxia,et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):21-27. (in Chinese))
- [16] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报,2008,39(1):52-58. (JIA Yangwen,GAO Hui,NIU Cunwen,et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(1):52-58. (in Chinese))
- [17] 张洪波,黄强,张双虎. 梯级水库运行对黄河上游水文条件的累积影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(2):137-142. (ZHANG Hongbo,HUANG Qiang,ZHANG Shuanghu. Cumulative effects of operation of cascade reservoirs on hydrological conditions in upper reaches of Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2011,39(2):137-142. (in Chinese))
- [18] 陈子桑,黄强,刘曾美. 变化环境下西江北江枯水流量联合分布分析[J]. 水科学进展,2015,26(1):20-26. (CHEN Zishen,HUANG Qiang,LIU Zengmei. Cumulative effects of operation of cascade reservoirs on hydrological conditions in upper reaches of Yellow River[J]. Advances in Water Science,2015,26(1):20-26. (in Chinese))

(LI Xiaochao,ZHONG Denghua,REN Bingyu,et al. Study on evaluation of rock mass groutability of dam foundation based on fuzzy RES-cloud model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(11):1311-1323. (in Chinese))

[16] 周雪,左忠义,程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报,2020,30(增刊1):158-164. (ZHOU Xue,ZUO Zhongyi,CHENG Wei. Safety evaluation of railway passenger transportation based on combined weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal,2020,30(Sup1):158-164. (in Chinese))

[17] 高玉琴,陈鸿玉,刘云苹. 基于云模型的自然灾害灾情等级评估[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):38-43. (GAO Yuqin,CHEN Hongyu,LIU Yunping. Study of grade assessment of natural disaster situation based on cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(6):38-43. (in Chinese))

[18] 顾培英,王岚岚,邓昌,等. 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):1-8. (GU Peiying,WANG Lanlan,DENG Chang,et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):1-8. (in Chinese))

[19] 邓成发,余军军,来晟,等. 大塘口空腹式双曲拱渡槽安全评价分析[J]. 水电能源科学,2019,37(7):70-73. (DENG Chengfa,YU Junjun,LAI Sheng,et al. Safety evaluation analysis of Datangkou hollow-type double curved arch aqueduct[J]. Water Resources and Power,2019,37(7):70-73. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 07 - 02 编辑:熊水斌)

(上接第 7 页)

[19] 温庆志,孙鹏,张强,等. 非平稳性条件下淮河流域极端气温时空演变特征及遥相关、环流特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(10):2513-2526. (WEN Qingzhi,SUN Peng,ZHANG Qiang,et al. Non-stationary characteristic of extreme temperature and climate-related impacts,circulation character in the Huai River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(10):2513-2526. (in Chinese))

[20] WANG M,JIANG S,REN L,et al. The development of a nonstationary standardised streamflow index using climate and reservoir indices as covariates[J]. Water Resources Management,2022,36:1377-1392.

[21] 张文浩,瞿思敏,徐瑶,等. 泼水水库对黄河径流过程及水文情势的影响[J]. 水资源保护,2021,37(3):61-65. (ZHANG Wenhao,QU Simin,XU Yao,et al. Influence of Pohe Reservoir on runoff process and hydrological regime of Huanghe River[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):61-65. (in Chinese))

[22] 赵贵章,徐远志,王莉莉,等. 黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):195-201. (ZHAO Guizhang,XU Yuanzhi,WANG Lili,et al. Effect of Qingtongxia Hydraulic Project in upstream of Yellow River on river baseflow[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2020,48(3):195-201. (in Chinese))

[23] KENDALL M. A new measure of rank correlation[J]. Biometrika,1938,30(1-2):81-93.

[24] MARES C,MARES I,STANCIU A. Extreme value analysis in the Danube lower basin discharge time series in the twentieth century[J]. Theoretical and Applied Climatology,2009,95(3-4):223-233.

[25] NASRI B,ADLOUNI S E,OUARDA T B M J. Bayesian estimation for GEV-B-Spline model[J]. Open Journal of Statistics,2013,3(2):118-128.

[26] MANTON M J,DELLA-MARTA P M,HAYLOCK M R,et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific:1961—1998[J]. International Journal of Climatology,2001,21(3):269-284.

[27] TYRALIS H,LANGOUSIS A. Estimation of intensity-duration-frequency curves using max-stable processes[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2019,33(1):239-252.

[28] SMITH R L. Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases[J]. Biometrika,1985,72(1):67-90.

[29] WANG Yi, DUAN L, LIU Tao, 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.

[30] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model[J]. The Annals of Statistics, 1978,6(2): 461-464.

(收稿日期:2022 - 04 - 18 编辑:胡新宇)