

夏琳蓉, 唐颖, 隆院男, 等. 基于 GAMLSS 模型的资水流域最大日径流研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 183-191. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.014

XIA Linrong, TANG Yin, LONG Yuannan, et al. Research on annual maximum daily runoff of Zishui River Basin based on GAMLSS model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 183-191. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.014

# 基于 GAMLSS 模型的资水流域最大日径流研究

夏琳蓉<sup>1</sup>, 唐颖<sup>1</sup>, 隆院男<sup>1,2</sup>, 宋昕熠<sup>1,2</sup>, 黄春福<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】受全球气候变化和人类活动共同影响, 资水流域极端气象水文事件日益增加, 导致水文过程的一致性受到破坏, 从而使得传统水文频率计算方法得到的计算结果存在不确定性。【方法】因此, 基于资水流域桃江站 1963—2022 年水文气象资料, 采用 GAMLSS 模型构建多协变量组合不同分布的非一致模型, 综合比较各模型的拟合优度, 选择最优模型计算不同设计频率下的年最大日径流设计值。【结果】结果表明, 降水对径流变化的贡献率为 66.52%, 是导致资水流域年最大日径流序列上升的主要原因。此外, 以降水、气温以及水库指数为协变量的 GA 分布模型拟合效果最优, 可有效阐述降水变化和人类活动影响下资水流域年最大日径流的动态变化特征。【结论】随着城市发展资水流域的年最大日径流受到降水显著影响, 洪涝威胁日趋增大, 研究结果可为变化环境下资水流域水资源管理和水安全维护提供一定参考。

**关键词:** GAMLSS 模型; 协变量; 年最大日径流; 气候变化; 人类活动; 降水; 水文过程; 极端降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.014

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0183-09



与作者互动  
请扫描二维码

## Research on annual maximum daily runoff of Zishui River Basin Based on GAMLSS model

XIA Linrong<sup>1</sup>, TANG Yin<sup>1</sup>, LONG Yuannan<sup>1,2</sup>, SONG Xinyi<sup>1,2</sup>, HUANG Chunfu<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Water Environment Treatment and Ecological Restoration in Hunan Province, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** [Objective] Due to the influence of global climate change and human activities, extreme meteorological and hydrological events in the Zishui Basin are increasing day by day, resulting in the destruction of the consistency of hydrological processes, which makes the calculation result obtained by traditional hydrological frequency calculation method uncertain. [Methods] Therefore, based on hydrological data and meteorological data of Taojiang Station in the Zishui Basin from 1963 to 2022, a non-consistent model with different distribution of multiple covariates was constructed using the GAMLSS model. The

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-01-07; 录用日期: 2025-01-07; 网络出版日期: 2025-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079010); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ40492); 湖南省研究生科研创新项目(CLSJXC23052)

作者简介: 夏琳蓉(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 1051385402@qq.com

通信作者: 隆院男(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: lynzhb@csust.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

good degree of fit of each model was comprehensively compared, and the design value of annual maximum daily runoff under different design frequencies was calculated using the optimal model. [Results] It is shown by the result that the contribution rate of precipitation to runoff change is 66.52%, which is identified as the main reason for the increase of annual maximum daily runoff series in the Zishui basin. In addition, the best fitting effect is shown by the GA distribution model with precipitation, temperature, and reservoir index as covariables, which can be used to effectively describe the dynamic change characteristics of the annual maximum daily runoff in the Zishui basin under the influence of changes in precipitation and human activities. [Conclusion] As the annual maximum daily runoff of the urban development watershed is significantly affected by precipitation, the flood threat is being increased, and some reference for water resources management and water security maintenance in the watershed under the changing environment can be provided by the research result.

**Keywords:** GAMLSS model; covariate; annual maximum daily runoff; climate change; human activity; precipitation; hydrological processes; extreme rainfall

## 0 引言

随着全球气候变化和人类活动影响加剧,流域的天然环境受到影响,水资源时空分布发生变化,极端气象水文事件发生的强度和频率具有逐渐增加的趋势。频发的极端气象水文事件导致了干旱、洪涝等极端灾害问题的加剧,尤其是非一致性水文变化的出现,导致水文序列无法满足一致性假设,使得流域水文情势变化更加复杂,严重影响了流域水资源安全和社会经济发展。因此,为降低变化环境下水文频率计算结果的不确定性,亟待研究和发展非一致性水文频率计算方法。

随着暴雨和洪水问题的日益严重,极端径流变化的规律引起了越来越多的关注。在统计分析中,年最大日径流作为代表年际极端洪水量级变化的重要指标,成为研究极端径流演变的重要途径<sup>[1]</sup>。相关研究揭示了不同地区年最大日径流的增减趋势及其突变现象,但变化机制相对复杂。在城市化地区,尽管年最大日径流对降水量变化的响应较为显著,但由于人类活动的影响,这种关联性逐渐减弱。已有研究表明,年最大日径流对温度、气候指数和土地利用类型等因素的响应日益增强<sup>[2-4]</sup>,甚至人口数量也可以作为一个解释变量,反映人类活动强度变化对年最大日径流的潜在影响。

关于非一致性水文频率计算方法,国内外学者已经开展了大量的研究并有较为丰富的成果。关于非一致性水文频率计算方法可以分为还原或还现方法<sup>[5-6]</sup>和水文频率分布模型<sup>[7-9]</sup>两种。其中,国内常用的还原或还现方法计算相对简单,如降雨径流关系法<sup>[10]</sup>、时间序列的分解与合成法<sup>[11]</sup>、水文模型法<sup>[12]</sup>等,但还原或还现结果存在不确定性;国外基于水文频率分布模型直接对非一致性水文序列进行计算的研究较

多,如混合分布法<sup>[13-14]</sup>、条件概率分布法<sup>[15-16]</sup>和时变矩法<sup>[17-18]</sup>,其中时变矩法可有效考虑统计参数的时变特征,被广泛应用于非一致性水文频率计算方面。目前最常用的时变矩法是 GAMLSS 模型(Generalized Additive Models for Location, Scale, and Shape)<sup>[19-20]</sup>,它能够刻画解释变量和统计量之间的相互关系,在非一致性水文频率分析领域中受到越来越多的关注,是时变矩法的进一步发展<sup>[21]</sup>。

VILLARINI 等<sup>[22]</sup>首次应用 GAMLSS 模型取得较好的效果,之后国内外的水文研究学者在洪水、径流、降水等方面的非一致性问题展开研究。SHAO 等<sup>[23]</sup>考虑了气候变化和人类活动的影响,应用 GAMLSS 模型分析无定河流域的干旱情况;CUI 等<sup>[24]</sup>对水库指数进行修正,并以改进后的水库指数作为 GAMLSS 模型的解释变量,研究结果可有效阐述梯级水库影响下的洪水变化特征;JIN 等<sup>[25]</sup>构建了基于泥沙荷载的非一致性分析模型,发现径流和降水均可作为泥沙输沙量的解释变量,结果可为泥沙荷载下的非一致性分析提供重要参考;郑锦涛等<sup>[26]</sup>基于玛纳斯河水文气象资料,构建了基于时间、气象因子为协变量的 GAMLSS 模型;崔豪等<sup>[27]</sup>通过构建四元要素的 GAMLSS 模型计算变化环境下非一致标准径流指数,提出了基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法。

资水流域地处湖南省中部,属湖南四水之一,地势呈现西南高、东北低的布局<sup>[28]</sup>。近年来,受全球气候变化以及人类活动共同影响,该流域内极端气象水文事件日益增加,给流域社会经济安全造成了严重威胁。李彤等<sup>[29]</sup>研究发现资水流域 1959—2014 年降水和径流有显著的先上升后下降的趋势,其变化主要是由气候变化和人类活动共同作用导致的;李颖等<sup>[30]</sup>发现资水流域径流年内分配主要受水利工程建

设及极端降水方面的影响。由于气候变化、下垫面改变和人类活动的耦合作用, 资水流域的降雨-径流关系表现出一定的非一致性。以往研究针对气候变化和人类活动对极端径流的影响未进行全面分析, 鉴于此, 本文以资水流域作为研究对象, 采用能够准确描述极端洪水量级变化特征的年最大日径流数据作为统计量, 分别选取无物理意义的时间变量以及具备明确物理意义的变量(降水、气温、水库指数)作为协变量进行不同组合, 构建服从不同分布函数的 GAMLSS 模型, 综合对比分析不同分布下非一致模型的拟合优度, 并采用最优模型进行年最大日径流设计值计算, 以期变化环境下资水流域水资源管理和水安全维护提供一定参考。

## 1 研究区域概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

资水流域地处湖南省中部, 于益阳市甘溪港注入洞庭湖, 是洞庭湖水系的重要支流。资水从邵阳县双江口以上分为两源, 左源为赧水, 右源为夫夷水。资水河长全长 633 km, 流域面积 28 027 km<sup>2</sup>[31]。流域内地形种类多样, 地貌多变, 受地形地貌和气候条件等因素影响, 流域降水时空分布不均且具有南多北少、径流呈现上升趋势的特点, 流域概况如图 1 所示。

### 1.2 研究数据

水文数据采用资水流域出口水文站桃江站 1963—2022 年年最大日径流数据, 气象数据采用流域及周围 12 个气象站的逐日实测降水和气温数据, 流域水库主要选取六都寨水库、柘溪水库、马迹塘水库、修山电站水库等 4 座水库, 这 4 座水库库容总和为 39.60 亿 m<sup>3</sup>, 对资水流域径流具有较为重要的影响, 水库相关情况如表 1 所列。本文选取资水流域降水、气温和水库指数作为协变量, 并采用标准化处理消除三个协变量之间的量纲差异。

表 1 水库相关情况

Table 1 The relevant situation of reservoir

水 库	集水面积/km <sup>2</sup>	总库容/亿 m <sup>3</sup>	修建年份
六都寨水库	338	1.31	1991
柘溪水库	22 640	35.67	1962
马迹塘水库	26 171	1.03	1983
修山水库	27 000	1.59	2006

## 2 研究方法

### 2.1 水库指数(RI)

LÓPEZ 等<sup>[19]</sup>提出了一种水库指数, 可有效量化

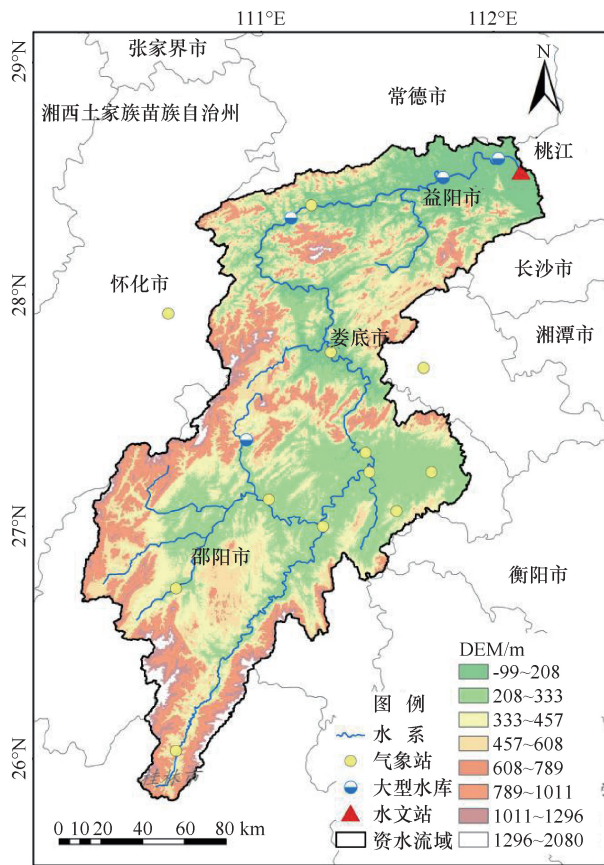


图 1 资水流域概况

Fig. 1 Overview of Zishui Basin

水库或大坝对径流过程的影响, 其计算公式为

$$RI = \sum_{j=1}^n \left( \frac{A_j}{A_T} \right) \times \left( \frac{C_j}{C_T} \right) \quad (1)$$

式中,  $n$  为水文站点上游水库的总个数;  $A_j$  为第  $j$  个水库的集水面积;  $A_T$  为流域水文站的控制流域面积;  $C_j$  为第  $j$  个水库的总库容;  $C_T$  为水文站的多年平均径流量。

### 2.2 双累积曲线法<sup>[32]</sup>

双累积曲线法是目前识别水文序列驱动因素的常用方法之一。基于突变点, 该方法将序列划分为基准期和变异期, 通过计算基准期累积降水和累积径流深, 绘制两者之间曲线图, 并建立对应的线性回归方程, 基于该线性回归方程可计算变异期的累积径流深<sup>[33]</sup>。气候变化对径流的影响可以定义为变异期和基准期的径流深变化值, 人类活动对径流的影响则可以定义为变异期实测径流深和模拟径流深之间的差值。

### 2.3 GAMLSS 模型<sup>[34]</sup>

GAMLSS 模型是针对位置、尺度和形状的半参数回归的广义可加模型, 其假定某一时刻  $t$  的随机变量

观测值  $y_i$  满足概率密度函数  $f(Y_i | \theta^i)$ , 其中  $\theta^i$  为  $t$  时刻的概率分布函数的相关参数。 $g_k(\theta_k)$  表示  $\theta_k$  和解释变量  $X_k$  之间的函数关系

$$g_k(\theta_k) = X_k \beta_k + \sum_{j=1}^{I_k} h_{jk}(x_{jk}) \quad (2)$$

式中,  $X_k$  为一个  $n \times I_k$  的协变量矩阵;  $\beta_k$  为长度为  $I_k$  的参数向量;  $h_{jk}$  表示分布函数中相关参数和解释变量  $x_{jk}$  之间的连接函数, 本文中采用三次样条函数进行连接, 自由度选择为 0、1、2。

由于该模型具有多种分布函数, 基于相关水文特征研究, 本研究主要选取对数正态分布 (LOGNO)、耿贝尔分布 (GU)、伽马分布 (GA)、韦布尔分布 (WEI) 4 种两参数分布函数作为备选函数集, 采用 AIC 选择最优模型, 并基于 Filliben 系数和残差诊断图 (worm 图) 分析各个模型的拟合质量。为了充分描述不同协变量对于年最大日径流序列的影响, 本文将不同协变量进行组合, 构建了 3 种模型: Model0 (假设分布参数均为常数)、Model1 (假设分布参数仅随时间变化)、Model2 (假设分布参数随降水、气温和水库指数变化), 其中 Model2 可分为以下 3 种情景: 情景 1 (参数随降水  $P$  和气温  $T$  变化)、情景 2 (参数随降水  $P$  和水库指数  $RI$  变化)、情景 3 (参数随降水  $P$ 、气温  $T$  和水库指数  $RI$  变化)。

### 3 结果分析

#### 3.1 径流序列非一致性分析

为揭示资水流域年最大日径流变化趋势, 采用 TFPW-MK 检验法和 Pettitt 法对资水流域年最大日径流进行变异诊断, 检验结果如图 3 所示。根据 Pettitt 诊断结果, 年最大日径流序列在 1987 年发生突变, 突变点前后均呈现下降趋势, 突变前均值为  $4\,761.67 \text{ m}^3/\text{s}$ , 而突变后为  $5\,956.94 \text{ m}^3/\text{s}$ , 最大日径流序列在 1963—2022 年期间整体呈现上升趋势 (线性函数:  $y = 12.142x - 18\,714.1$ ), 整体线性变化速率为  $12.14 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。此外, 分析资水流域年降水变化趋势, 年降水在过去 60 a 呈现不显著上升趋势, 与年最大日径流变化趋势相一致。

为探究资水流域年最大日径流序列呈现上升趋势的原因, 进一步定量分析降水和人类活动对于年最大日径流呈现上升趋势的影响, 本文以序列突变点为界, 将时间序列划分为基准期和变异期, 绘制两个时期的降水-年最大日径流深双累积曲线图 (见图 3)。通过曲线图可以发现, 两个时期累积降水和累积年最大日径流深相关关系显著, 线性相关系数  $R^2$  均大于

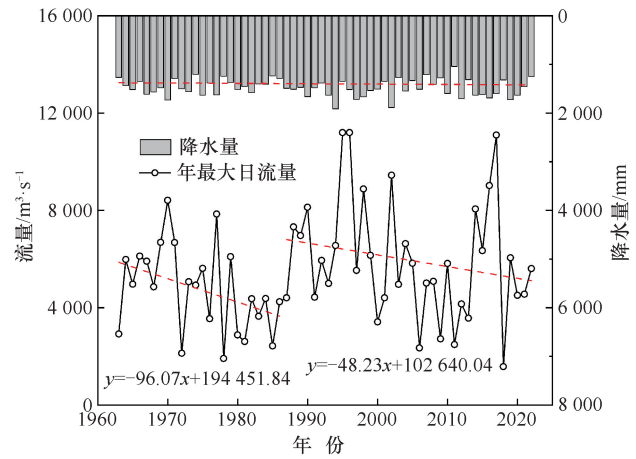


图 2 资水流域年降水量和年最大日径流变化趋势  
Fig. 2 Variation trends of annual precipitation and annual maximum daily runoff in the Zishui Basin

0.99, 说明该方法拟合精度较高, 可进行贡献率的定量分析。因此, 得到基准期线性回归方程为

$$\sum R = 0.0108 \sum P + 10.195, \quad R^2 = 0.9921 \quad (3)$$

将变异期的累积降水量代入基准期回归方程中得到变异期模拟年最大日径流深, 计算结果如表 2 所列。变异期年均降水量较基准期增加了  $61.09 \text{ mm}$ , 年最大日径流深则增加了  $165.72 \text{ mm}$ 。根据双累积曲线法, 降水对年最大日径流的影响可以定义为变异期和基准期的年最大日径流深变化值, 人类活动对年最大日径流的影响则可以定义为变异期实测年最大日径流深和模拟年最大日径流深之间的差值。因此, 通过进一步计算降水和人类活动对年最大日径流序列变化的贡献率发现, 降水贡献率为  $66.52\%$ , 人类活动的贡献率为  $33.48\%$ , 说明降水是导致资水流域年最大日径流序列呈现上升趋势的主要原因。此外, 统计 1980—2015 年资水流域城镇用地的变化情况, 结果如表 3 所列, 可以发现流域内城镇用地占比在过去 40 年中突变前后也出现了一定程度的增加。流域内城镇用地的不断扩张, 导致流域不透水面积扩大, 引起降雨入渗减少, 从而使得流域内极端洪水的量级逐渐增大。因此, 年均降水量的增加和下垫面的扩张是导致资水流域洪峰量级在多个水库建设条件下仍呈现上升趋势的原因。

#### 3.2 洪水序列非一致性模型

构建以时间为协变量的 GAMLSS 模型 Model1, 相较于一致性模型可有效考虑分布参数随时间的变化特征, 选取 4 种不同类型的分布函数进行拟合优度比较, 结果如表 4 所列。在年最大日径流序列服从

表 2 双累积曲线法计算结果

Table 2 The result of double accumulation curve method

时 间	实测径流深/mm	模拟径流深/mm	变化总量/mm	人类活动		气候变化	
				影响量/mm	贡献率/%	影响量/mm	贡献率/%
1963—1986 年	207.21	317.45	165.72	55.48	33.48	110.24	66.52
1987—2022 年	372.93						

表 3 资水流域城镇用地变化情况

Table 3 Changes of urban land use in Zishui Basin

年 份	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015
城镇用地占比/%	0.90	1.02	0.96	0.99	1.05	1.16	1.73

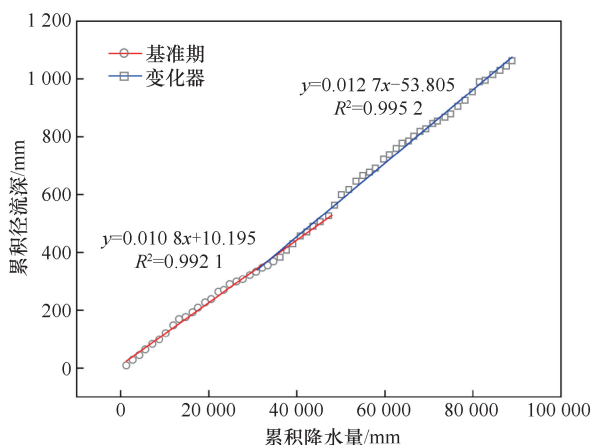


图 3 降水-年最大日径流深双累积曲线

Fig. 3 Double accumulation curve of precipitation and runoff depth

表 4 不同分布函数下模型的拟合优度评价(加粗字体为对应的最优模型)

Table 4 Goodness of Fit evaluation of models with different distribution functions (bolded font is the corresponding optimal model)

模型类型	分布类型	年最大日径流序列
		<i>AIC</i>
Model1	LOGNO	1 098.65
	GU	1 117.96
	<b>GA</b>	<b>1 096.27</b>
	WEI	1 097.05

GA 分布的情况下, *AIC* 数值均小于其他分布, 说明服从 GA 分布的模型的拟合效果最优。

以时间为协变量所构建的 GAMLSS 模型缺乏物理意义, 仅从统计学角度分析径流序列的变化。因此, 为综合考虑气候变化和人类活动对径流序列变化过程的影响, 本文分别引入降水、气温和水库指数作为协变量构建 GAMLSS 模型 Model2。由于该种情况下具有较多的协变量组合, 本文构建 3 种类型的 GAMLSS 模型进行讨论分析: 类型一是至少有一个分布参数随降水和气温变化; 类型二是至少有一个分布

参数随降水和水库指数变化; 类型三是至少有一个分布参数随降水、气温和水库指数变化。3 类 GAMLSS 模型拟合优度如图 4 所示。由图 4 可知, 当以物理因子为协变量的模型服从 GA 分布时, 模型 *AIC* 值最小, 表明 GA 分布为模型的最优拟合分布函数。其中, 类型 3 的形状参数是降水、气温和水库指数的函数, 位置参数是降水和气温的函数, 得到的 GAMLSS 模型拟合效果最优。

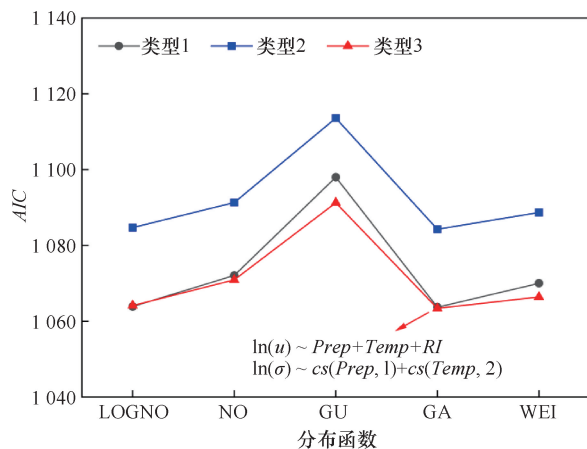


图 4 Model2 中各类模型拟合结果比较

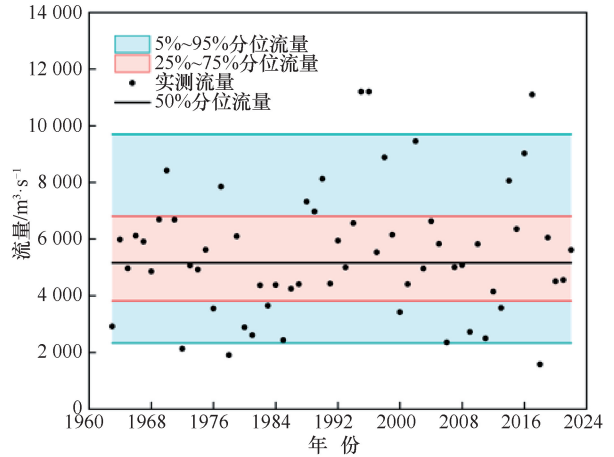
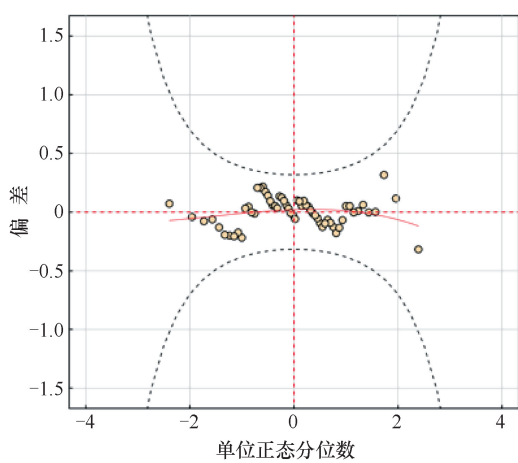
Fig. 4 Comparison of fitting results of various models in Model2

针对不同情况下的最优 GAMLSS 模型的拟合优度, 采用 *AIC*、Filliben 系数以及 worm 图进行综合评价。不同协变量组合下各最优模型的拟合检验比较结果如表 5 所列。表 5 结果表明, Model0、Model1 和 Model2 的 Filliben 系数均大于 0.99 且接近于 1, 说明不同情景下优选得到的模型中分布函数及其参数与协变量之间的拟合关系较好, 均通过了 0.05 显著性检验。其中, Model2 中 *AIC* 值最小且 Filliben 系数最大, 说明 Model2 所构建的 GAMLSS 模型为最优分布模型, 根据图 5 中各模型的 worm 图也可以得到相同结论。

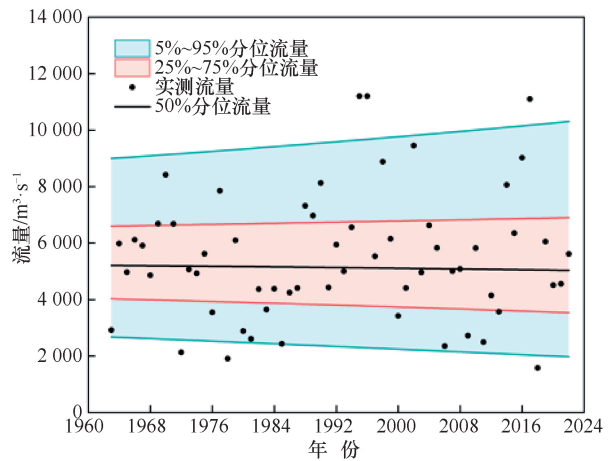
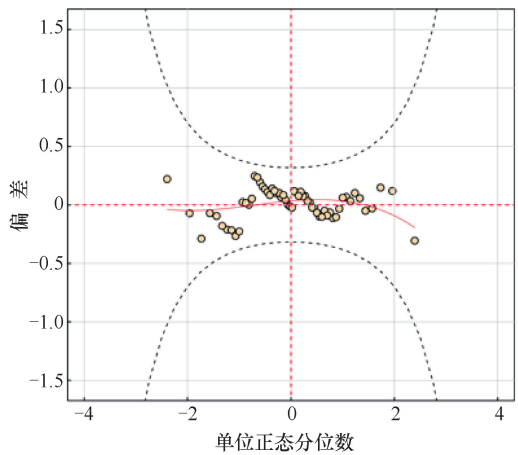
Model0、Model1 和 Model2 的 worm 图中的残差点据均未达到 95% 信度水平的可接受范围, 但对比

表 5 最优模型评估标准值 ( $AIC$ 、Filliben 系数) 以及位置参数和尺度参数的协变量选择 (加粗字体为对应的最优模型)Table 5 The optimal model evaluation criteria ( $AIC$ , Filliben coefficient) as well as the location parameters and scale parameters Covariate selection (bold font for the corresponding optimal model)

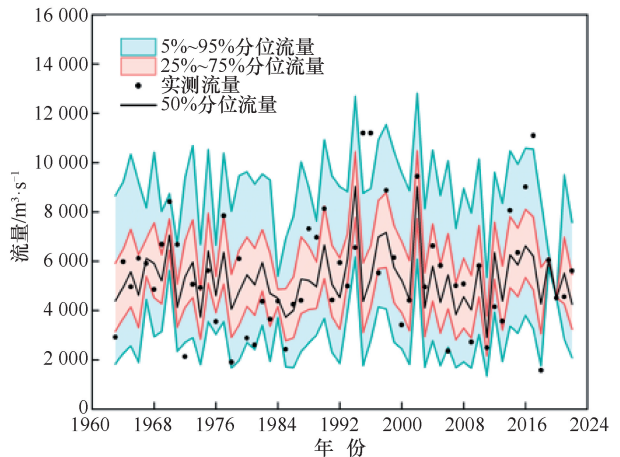
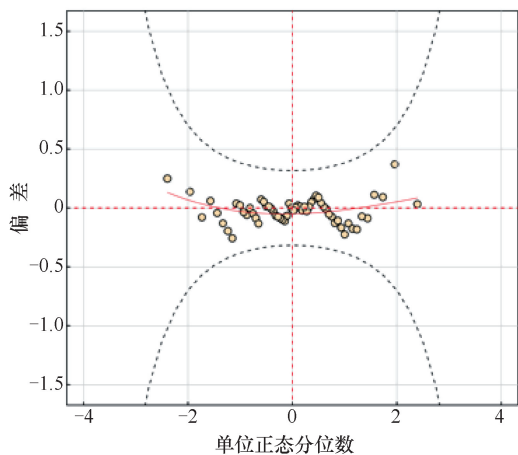
模型类型	分布	位置参数	尺度参数	$AIC$	Filliben 系数
		$\theta_1$	$\theta_2$		
Model0	GA	$ct$	$ct$	1 095.11	0.993
Model1	GA	$ct$	$t$	1 096.27	0.992
<b>Model2</b>	GA	<b><math>Prep+Temp+RI</math></b>	<b><math>cs(Prep, 1)+cs(Temp, 2)</math></b>	<b>1 063.41</b>	<b>0.994</b>



(a) Model 0



(b) Model 1



(c) Model 2

图 5 模型 worm 图及分位曲线

Fig. 5 Worm diagram and quantile graph of the model

表 6 Model0 和 Model2 的设计年最大日径流值

Table 6 Design annual runoff values of Model0 and Model2

模 型	取 值	不同设计频率下设计年最大日径流值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$				
		5%	25%	50%	75%	95%
Model0	固 定	9 696.97	6 800.50	5 164.62	3 816.11	2 333.42
Model2	最 小	4 510.07	3 789.10	2 901.52	2 165.36	1 348.14
	最 大	12 811.37	10 476.72	9 046.42	7 779.45	6 175.98

三个模型的残差点离散情况, 可以发现 Model2 的残差点据相较于 Model0、Model1 则更为集中, 与分布函数拟合效果相对更好。此外, 图 5 中各模型分位曲线图表明 Model2 可更有效地解释降水变化和人类活动影响下的年最大日径流序列的动态变化特征。因此, 采用多物理因子作为协变量构建不同分布函数下的非一致模型, 可以更好地刻画年最大日径流序列的非一致性。

### 3.3 设计年最大日径流计算

在非一致性最优模型中, 位置参数与降水、气温和水库指数呈指数关系, 尺度参数与降水和气温呈指数关系, 并通过三次样条函数进行连接。由于降水、气温和水库指数会随时间发生变化, 因此模型的位置参数和尺度参数也会随之变化, 模型每年的概率密度函数不同, 使得模型得到的设计年最大日径流是一个变化区间。根据 Model2 和 Model0 计算 5%、25%、50%、75%、95% 下的设计年最大日径流, 结果如表 6 所列。由表 6 可知, Model0 计算所得到的 5%、25%、50%、75%、95% 下的设计年最大日径流值均位于 Model2 的设计年最大日径流区间内, Model0 为 Model2 取值范围内的一种可能, 说明 Model2 充分考虑了气候变化和人类活动对资水流域年最大日径流序列的影响, 以此为基础所构建的模型进行的水文频率计算结果可以为变化环境下资水流域水资源管理和水安全维护提供科学的决策依据。

## 4 讨 论

(1) 以讨论较多的 4 种大尺度气象因子作为协变量构建 GAMLSS 模型, 但影响年最大日径流的因素有许多, 对于其他影响因素的分析尚待探讨。没有考虑其他的气候因子作为协变量构建 GAMLSS 模型。

(2) 本文采用了 López 提出的水库指数 ( $RI$ ), 用于反映大坝和水库对径流变化的影响。水库对径流的影响与年最大日径流量及水库的可用储存能力密切相关。然而, 本文未采用改进后的水库指数, 例如考虑淤积过程的改进版本。

(3) 气候变化与高强度人类活动导致极端事件发生重大变革, 增加未来气候模式数据的模型构建, 可以模拟未来变化环境下对资水流域年最大日径流的影响, 为应对未来极端水文事件提供参考。

## 5 结论与展望

本文采用 1963—2022 年资水流域桃江站的水文气象资料, 建立了以时间、降水、气温和水库指数为协变量的 GAMLSS 模型进行设计年最大日径流计算, 采用  $AIC$  对模型拟合优度进行综合评价, 基于最优拟合的 GAMLSS 模型计算资水流域的设计年最大日径流, 主要结论如下。

(1) 资水流域桃江站年最大日径流序列呈现上升趋势, 并于 1987 年发生突变。进一步分析降水变化和人类活动对年最大日径流序列的影响, 发现极端降水的增加和下垫面的扩张是导致资水流域年最大日径流序列在过去 40 a 呈现上升的原因。

(2) 通过不同评价指标对模型的拟合优度进行综合分析, 发现以降水、气温和水库指数作为协变量, 服从 GA 分布的非一致模型 (Model2) 对资水流域年最大日径流序列模拟效果相对最优, 在一定程度上可描述降水变化和人类活动影响下资水流域年最大日径流的动态变化特征过程。

(3) 根据非一致模型 Model2 和一致性模型 Model0 计算得到的不同保证率下的设计年最大日径流结果对比可以发现, 一致性模型得到的设计年最大日径流结果介于非一致设计年最大日径流区间内, 为非一致模型的一种可能取值, 说明随着气候和人类活动发生变化, 流域未来各不同保证率下的设计径流结果也会发生相应变化。该模型所得到的不同保证率下的设计年最大日径流结果可为资水流域变化环境下水资源管理和水安全维护提供一定参考。

### 参考文献 (References):

- [1] DU H, XIA J, ZENG S D, et al. Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin[J]. Acta Geogr Sin, 2012, 67(3): 398-409.
- [2] LI H, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Hydrological effects of

- cropland and climatic changes in arid and semi-arid river basins: a case study from the Yellow River basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017(549): 547-557.
- [3] ZHANG Q, GU X, SINGH V P, et al. Evaluation of flood frequency under non-stationarity resulting from climate indices and reservoir indices in the East River Basin, China. [J]. *Journal of Hydrology*, 2015(527): 565-575.
- [4] 李佳秀, 徐长春, 晓王, 等. 开都河流域极端水文事件变化及其对气候的响应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 285-291.  
LI J X, XU C C, XIAO W, et al. Extreme hydrological events and their response to climate in the Kaidu River Basin [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2014, 21(5): 285-291.
- [5] 许斌, 邹大胜, 刘雁襄, 等. 1950—2022 年鄱阳湖汛期最低水位演变分析[J]. *水利水电快报*, 2023, 44(2): 8-11.  
XU B, ZOU D S, LIU Y Y, et al. Analysis of the evolution of the lowest water level during the flood season in Poyang Lake from 1950 to 2022 [J]. *Water Resources and Hydropower Express*, 2023, 44(2): 8-11.
- [6] 钟斯睿, 郭生练, 谢雨祚, 等. 丹江口水库运行期非一致性洪水频率分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(6): 1110-1118.  
ZHONG S R, GUO S L, XIE Y Z, et al. Non-stationary flood frequency analysis for Danjiangkou Reservoir in operation period[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(6): 1110-1118.
- [7] 张悦. 基于混合分布的非一致性长江口潮位序列频率计算方法[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(8): 26-28.  
ZHANG Y. Frequency calculation method for non-uniform Yangtze River estuary tidal level sequence based on mixed distribution [J]. *Hydroelectric Energy Science*, 2020, 38(8): 26-28.
- [8] 宋志红, 王辉, 景唤, 等. 引江济淮工程水源区和受水区干旱遭遇风险[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 996-1005.  
SONG Z H, WANG H, JING H, et al. The risk of concurrent drought between the water source and destination regions of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(5): 996-1005.
- [9] 江聪, 熊立华. 基于 GAMLSS 模型的宜昌站年径流序列趋势分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1505-1514.  
JIANG C, XIONG L H. Trend analysis of annual runoff series at Yichang Station based on GAMLSS model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1505-1514.
- [10] 邓乐乐, 郭生练, 田晶, 等. 汉江上游径流情势变化及归因分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 761-769.  
DENG L L, GUO S L, TIAN J, et al. Runoff variation and attribution analysis in the upper Han River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 761-769.
- [11] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005(6): 6-9.  
XIE P, CHEN G C, XIA J. Principle of hydrological frequency calculation for non-uniform annual runoff series under changing environments [J]. *Journal of Wuhan University (Engineering Edition)*, 2005(6): 6-9.
- [12] 王国庆, 张建云, 刘九夫. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. *中国水利*, 2008(2): 55-58.  
WANG G Q, ZHANG J Y, LIU J H. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on river runoff [J]. *China Water Resources*, 2008(2): 55-58.
- [13] YAN L, ZHANG L, XIONG L, et al. Flood frequency analysis using mixture distributions in light of prior flood type classification in Norway [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 401.
- [14] TOTARO V, GIOIA A, KUCZERA G, et al. Modelling multidecadal variability in flood frequency using the Two-Component Extreme Value distribution [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2024(1): 1-18.
- [15] PRONOOS S M, RAMEZANI Y, NAZERI T M, et al. Joint frequency analysis of river flow rate and suspended sediment load using conditional density of copula functions [J]. *Acta Geophysica*, 2023, 71(1): 489-501.
- [16] KIRAN K G, SRINIVAS V V. Multivariate regional frequency analysis using conditional extreme values approach [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): e2021WR031095.
- [17] QU C, LI J, YAN L, et al. Non-stationary flood frequency analysis using cubic B-spline-based GAMLSS model [J]. *Water*, 2020, 12(7): 1867.
- [18] HE C, CHEN F, LONG A, et al. Frequency analysis of snowmelt flood based on GAMLSS model in Manas River Basin, China [J]. *Water*, 2021, 13(15): 2007.
- [19] LÓPEZ J, FRANCÉS F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(8): 3189-3203.
- [20] WANG Y, LIU M, XING Z, et al. Study of nonstationary flood frequency analysis in Songhua River Basin [J]. *Water*, 2023, 15(19): 3443.
- [21] 霍雨, 王腊春, 陈晓玲, 等. 1950s 以来鄱阳湖流域降水变化趋势及其持续性特征 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 454-462.  
HUO Y, WANG L C, CHEN X L, et al. The trend and sustainability characteristics of precipitation changes in the Poyang Lake Basin since the 1950s [J]. *Lake Science*, 2011, 23(3): 454-462.
- [22] VILLARINI G, SMITH J A, SERINALDI F, et al. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin [J]. *Advance in Water Resource*, 2009, 32(8): 1255-1266.
- [23] SHAO S, ZHANG H, SINGH V P, et al. Nonstationary 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.
- [24] CUI H, JIANG S, GAO B, 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.

- [25] JIN H, ZHONG R, LIU M, et al. Nonstationary analysis of water and sediment in the Jinsha River Basin based on GAMLSS model [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, 37 (12): 4765-4781.
- [26] 郑锦涛, 陈伏龙, 张鑫厚, 等. 基于 GAMLSS 模型的玛纳斯河设计年径流分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 257-265. ZHENG J T, CHEN F L, ZHANG X H, et al. Design annual runoff analysis of Manas River based on GAMLSS model [J]. *Progress in Climate Change Research*, 2018, 14 (3): 257-265.
- [27] 崔豪, 江善虎, 任立良, 等. 基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 71-78. CUI H, JIANG S H, REN L L, et al. Non stationary hydrological drought assessment method based on four element drive [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40 (1): 71-78.
- [28] 高畅. 资水流域洪水预报方法研究与应用[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022. GAO C. Research and Application of Flood Forecasting Methods in Zishui River Basin [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022.
- [29] 李彤, 胡国华, 顾庆福, 等. 近 55 年来降水及人类活动对资水流域径流的影响[J]. *水文*, 2018(6): 54-58. LI T, HU G H, GU Q F, et al. The impact of precipitation and human activities on runoff in the Zishui River Basin over the past 55 years[J]. *Hydrology*, 2018 (6): 54-58.
- [30] 李颖, 姚奕. 资水流域径流年内分配变化趋势研究[J]. *湖南水利水电*, 2022(1): 49-52. LI Y, YAO Y. Research on the annual distribution trend of runoff in the Zishui River Basin [J]. *Hunan Water Resources and Hydropower*, 2022 (1): 49-52.
- [31] 李兵, 章新平, 杨令, 等. 湖南省资水流域极端降水量时空变异特征及重现期极端降水量的推算[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38 (11): 117-128. LI B, ZHANG X P, YANG L, et al. The spatiotemporal variation characteristics and recurrence interval estimation of extreme precipitation in the Zishui River Basin of Hunan Province [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (11): 117-128.
- [32] SEARCY J K, HARDISON C H. *Double-mass Curves* [M]. Washington: United States Government Printing Office, 1960.
- [33] 魏宣, 王宁, 周明通, 等. 气候变化和人类活动对克里雅河径流变化影响定量研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 80-86. WEI X, WANG N, ZHOU M T, et al. Quantitative study on the impact of climate change and human activities on the runoff changes of the Kriya River [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41 (8): 80-86.
- [34] RIGBY R A, STASINOPOULOS D M. Generalized additive models for location, scale and shape [J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 2005, 54(3): 507-554.

(责任编辑 王海锋)