

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.017

汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究

杨少康^{1,2}, 刘冀^{1,2}, 张特³, 彭涛^{1,2}, 常文娟^{1,2}, 林青霞^{1,2}

(1. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:为揭示汉江上游气象-水文干旱特征变量响应关系,分别选用标准化降水指数、标准化径流指数表征气象干旱和水文干旱,采用线性、非线性函数模型构建气象-水文干旱特征变量响应模型,进而构建了基于Copula函数耦合贝叶斯网络概率模型的气象-水文干旱特征变量响应概率曲线。结果表明:气象-水文干旱历时和烈度的最优响应模型分别为线性函数模型和基于Gumbel Copula函数的非线性模型;干旱历时和烈度的最优联合分布函数分别为Frank Copula函数和Gumbel Copula函数;水文干旱历时、烈度的响应概率随对应的气象干旱特征变量的增加而增加,水文干旱历时响应概率变化速率逐渐减小,最后趋于平缓,水文干旱烈度响应概率变化速率较小。

关键词:气象干旱;水文干旱;响应关系;Copula函数;贝叶斯网络概率模型;汉江上游

中图分类号:P338+.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0143-09

Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin//YANG Shaokang^{1,2}, LIU Ji^{1,2}, ZHANG Te³, PENG Tao^{1,2}, CHANG Wenjuan^{1,2}, LIN Qingxia^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to reveal the response relationship between meteorological drought and hydrological drought characteristic variables in upper reaches of the Hanjiang River Basin, the standardized precipitation index and standardized runoff index were chosen to reflect the meteorological drought and hydrological drought, respectively, and the linear and nonlinear function models were used to construct the meteorological-hydrological drought characteristic variable response probabilistic model. Then, meteorological-hydrological drought characteristic variable probability curves were established based on the Copula function coupled with the Bayesian network probabilistic model. The results show that the optimal response models of meteorological-hydrological drought duration and intensity are the linear function model and the Gumbel Copula function-based nonlinear model, respectively; the optimal joint distribution functions of drought duration and intensity are the Frank Copula function and Gumbel Copula function, respectively; the response probability of hydrological drought duration and intensity increases with the meteorological drought characteristic variables, and the rate of change of response probability of hydrological drought decreases gradually, and finally tends to level off, and the rate of change of response probability of hydrological drought intensity is low.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; response relationship; Copula function; Bayesian network probabilistic model; upper reaches of the Hanjiang River Basin

在全球气候持续变暖背景下,近年来高强度、高损害的极端天气事件频发^[1]。干旱作为一种由降水不足或水分收支失衡引发的极端天气事件,相较于其他自然灾害而言,其发展虽较为缓慢,但更容易

在大面积范围内发生且持续较长时间,是目前造成损失最大的自然灾害之一^[2,4]。干旱一旦发生,可通过水循环进一步导致土壤水分和径流亏缺,进而对水资源安全、区域用水调度、生态环境及社会经济

基金项目:国家自然科学基金项目(52009065);湖北省自然科学基金项目(2020CFB293)

作者简介:杨少康(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: 1002878336@qq.com

通信作者:刘冀(1980—),男,副教授,博士,主要从事流域水文模拟与水库调度研究。E-mail: liuji@ctgu.edu.cn

发展造成严重影响^[5-7],因此,加强干旱监测力度和深入研究其演变规律对于抗旱减灾至关重要。

根据水资源供需关系,可将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱4种类型^[8]。一般而言,气象干旱是干旱发生的第一步,主要是由于长期缺乏降水导致^[9],在自然环境状态下,气象干旱是水文干旱的主要驱动因子,持续的气象干旱引起土壤含水量和径流下降,若水资源补给不及时或不足,则会导致水文干旱的发生^[10],从而增强区域受灾程度,因此研究水文干旱对气象干旱的响应关系十分重要。但干旱难以用技术手段直接监测,通常需要构建不同类型的干旱指数来评价区域干旱状况。标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)以降水序列作为数据输入,被广泛应用于气象干旱评价^[11-13];标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)只需径流数据,计算简便,被应用于水文干旱评价^[14-15]。

气象干旱和水文干旱的发生机理及演变规律虽不同,但二者之间存在一定的相互联系和响应关系。近年来,气象-水文干旱响应关系成为干旱研究领域的热点问题^[16-17]。相关分析法^[18-19]、灰色关联时滞法^[20]广泛应用于水文干旱对气象干旱响应时间的研究。线性、非线性函数用于构建气象、水文干旱在干旱历时、干旱烈度等干旱特征变量间的响应模型^[21-22],以此揭示气象干旱导致水文干旱的传播阈值^[22]。上述研究较好地促进了气象-水文干旱响应关系研究,但在推求干旱响应的传播阈值时,采用了确定性方法量化气象-水文干旱响应关系,而干旱影响因素,包括流域性质、气候条件和人类活动^[23-24]等众多不确定因素决定了水文干旱对气象干旱响应关系的非确定性。贝叶斯网络概率模型广泛用于不确定环境下的概率分析问题, Copula 函数在多变量间的联合分析方面具有显著优势,结合贝叶斯网络概率模型和 Copula 函数,可为分析不同干旱类型间的响应概率提供新的途径^[21,25]。

汉江流域作为南水北调工程的源头流域,水文干旱对于调水工程效益的发挥具有重要的影响。以往针对汉江流域的相关研究多以分析气象干旱时空演变特征及其成因^[26-28],以及水文干旱的风险评估等^[29]为主,这些研究成果对于深入了解汉江流域干旱演变机制具有重要的参考意义。目前仍缺乏针对汉江上游流域气象-水文干旱响应模型及响应概率曲线构建的深入研究,且对于主要受气象条件控制的气象干旱而言,几乎无法通过人为手段预防其发生。水文干旱的产生与气象干旱密切相关,若能构建出水文干旱对气象干旱的响应模型及响应概率曲

线,则可以采取一定措施预防或减轻水文干旱带来的影响。鉴于此,本文以汉江上游白河水文站以上为研究区域,采用 SPI 和 SRI 分别表征气象干旱和水文干旱,从线性、非线性模型角度建立气象-水文干旱特征变量的响应模型,利用 Copula 函数结合贝叶斯网络概率模型建立水文干旱特征变量对气象干旱特征变量的响应概率特征曲线。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

汉江发源于陕西省秦岭南麓,全长 1 542 km,流域面积为 17 万 km²。本文以汉江上游白河水文站以上为研究区域(31°59'N ~ 34°19'N、106°07'E ~ 110°27'E),研究区内汉江河长 625 km,流域面积为 5.9 万 km²,占汉江全流域面积的 34.7%。研究区北靠秦岭,南与大巴山相接,地势两边高,中间低。汉江上游流域降水量充沛,属于北亚热带季风气候,降水空间、年内分布不均,表现为自南向北递减,5—10 月降水量占全年的 80% 以上,流域存在明显汛期,径流 80% 以上集中在 4—10 月。研究区概况如图 1 所示。

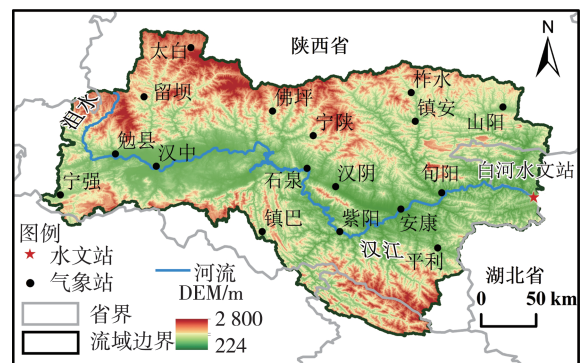


图 1 汉江上游流域概况

Fig. 1 Overview of upper reaches of the Hanjiang River Basin

1.2 数据来源

本文采用中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>)提供的汉江上游白河水文站以上 18 个气象站点 1961—2014 年逐日降水数据,数据经过严格的代表性、可靠性和一致性检查,考虑过极端值和逻辑检验等,对于少数缺测日值数据采用邻近站点数值进行插补,采用累加法得到各气象站点逐月降水数据。本文利用梯度距离平方反比(gradient plus inverse distance squares, GIDS)法^[30]将站点降水数据插值成空间分辨率为 0.125°的空间降水数据。1961—2014 年白河水文站月径流数据来源于长江水利委员会水文局,白河水文站受上游水库影响较小,且丹江口水库对白河水文站

径流量年内分配过程基本没有影响^[31]。流域 DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

2 研究方法

2.1 干旱指数

本文采用 SPI 和 SRI 分别表征气象干旱和水文干旱,两者广泛应用于水文气象领域。一般而言,季节尺度干旱指数更适用于流域连续性干旱事件的识别,因此,本文基于 SPI-3 和 SRI-3 构建气象-水文干旱响应关系。SPI 和 SRI 的主要计算步骤如下:根据研究需求选择不同的时间尺度,选择适宜的概率分布函数对不同年份同一月份下的降水和径流序列进行拟合,通过等概率变换将降水和径流序列的累积概率标准正态化,最终得到该时间尺度下的 SPI 和 SRI,其计算公式可见文献[32-33]。依据国家气象干旱等级分级标准^[34],SPI 和 SRI 数值范围为 $(-\infty, -2]$ 、 $(-2, -1.5]$ 、 $(-1.5, -1]$ 、 $(-1, -0.5]$ 、 $(-0.5, +\infty)$ 时,对应的干旱等级分别为极旱、重旱、中旱、轻旱、无旱。

2.2 气象、水文干旱事件匹配

基于汉江上游干旱指数 SPI-3 和 SRI-3,采用三阈值游程理论对气象、水文干旱事件进行识别,并提取气象、水文干旱历时和干旱烈度特征要素^[35-36],进而对汉江上游气象、水文干旱事件进行匹配。匹配规则主要依据气象、水文干旱时间上的重叠,但会同时存在偶然重叠的事件,如在长历时、高强度水文干旱事件的同时,发生的短历时、低烈度气象干旱事件不是导致水文干旱发生的因素,因此需要对该场干旱事件对进行剔除^[37]。

2.3 传统线性和非线性函数响应模型

干旱响应模型主要分为线性和非线性函数模型。一般而言,线性函数用于反映干旱特征变量间的关系,被广泛应用于构建干旱特征变量响应模型。而非线性函数能较好地拟合干旱特征变量间的关系,在构建不同类型干旱特征变量响应模型中得到一定的应用。本文首先对汉江上游发生的气象、水文干旱事件进行匹配,并采用线性函数和非线性函数(包括一元二次、对数和幂指函数)对匹配的气象、水文干旱事件特征,即干旱历时和干旱烈度,进行拟合,获得气象干旱向水文干旱传播的响应模型。

2.4 基于 Copula 函数的非线性响应模型

根据 Hao 等^[37]的研究,基于 Copula 函数的条件概率可用于建立变量间的非线性关系,并用于进行概率预测。借鉴这一思想,本文建立气象干旱特征变量 X 和水文干旱特征变量 Y 间的非线性响应

模型,推求 Y 对 X 响应的条件概率分布。 $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$ 分别为 X 和 Y 两个变量的边缘分布函数,令 $u = F_X(x)$, $v = F_Y(y)$,则 X 和 Y 的联合分布函数及概率密度函数分别为

$$F(x, y) = C[F_X(x), F_Y(y)] = C(u, v) \quad (1)$$

$$f(x, y) = C(u, v)f_X(x)f_Y(y) \quad (2)$$

式中: $C(u, v)$ 为 Copula 函数,表示 X 和 Y 的联合分布函数; $f_X(x)$ 、 $f_Y(y)$ 分别为 X 和 Y 两个变量的边缘概率密度函数。

令 $X = x$,求得变量 Y 发生的条件概率分布函数:

$$F_{Y|X}(y) = P(Y \leq y | X = x) = \frac{\partial F(x, y) / \partial x}{dF_X(x) / dx} = \frac{\partial C(u, v)}{\partial u} \quad (3)$$

相应的条件概率密度函数为

$$f_{Y|X}(y) = f(x, y) / f_X(x) = C(u, v)f_Y(y) \quad (4)$$

令 $df_{Y|X}(y) / dy = 0$,可求得条件概率密度函数最大值对应的 Y ,并作为预测值。

2.5 贝叶斯网络概率模型

贝叶斯网络概率模型能够有效解决系统中的不确定性问题,它通过结合条件概率方法来预估变量间的相关关系^[38],本文采用一阶贝叶斯网络概率模型求解。在实际生产生活中,人们更为关注某一变量在大于特定值下,另一变量对应的响应概率。因此,对一阶贝叶斯网络概率模型进行变形,得到在气象干旱特征变量值大于某一特定值的前提下,水文干旱特征变量响应概率,计算公式为

$$P(Y > y | X > x) = \frac{P(X > x, Y > y)}{P(X > x)} = 1 - \frac{v - C(u, v)}{1 - u} \quad (5)$$

2.6 模型精度评价

选择确定性系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、Akaike 信息准则 (AIC) 及贝叶斯信息准则 (BIC) 4 个指标评价气象-水文干旱特征变量响应模型模拟精度^[25]。 R^2 接近 1,表示模拟结果与实际值之间相关程度高; R^2 接近 0,表示模拟结果与实际值之间相关程度低。通常, RMSE、AIC、BIC 的值越小,表示模型精度越好。

3 结果与分析

3.1 传统线性和非线性函数响应模型

以汉江上游 27 场由气象干旱导致的水文干旱事件为分析对象,采用交叉验证法^[39]将 27 场干旱事件对划分为 3 种方案,并分别采用线性函数和非线性函数(包括一元二次、对数和幂指函数)构建不

同干旱特征变量的4种响应模型,根据验证结果选择最优响应模型。Shao等^[40]研究表明,函数的拟合度与构建样本及验证样本数的比率有关,比率在2左右为最佳。本文第1种方案采用第1~18场干旱事件对进行模型构建,采用第19~27场干旱事件对进行模型验证;第2种方案采用第10~27场干旱事件对进行模型构建,采用第1~9场干旱事件对进行模型验证;第3种方案采用第5~22场干旱事件对进行模型构建,采用第1~4和第23~27场干旱事件对进行模型验证,响应模型及验证结果如表1所示。由表1可知,在干旱历时响应模型中, R^2 最小为0.52,最大为0.98;干旱烈度响应模型中, R^2 介于0.37~0.93,所有结果均通过95%的置信度检验。干旱历时和干旱烈度响应模型均在方案1中验证结果最优。

3.2 基于Copula函数的非线性响应模型

为构建基于Copula函数的非线性气象-水文干旱特征变量响应模型,利用第1~18场干旱事件序列对各干旱特征变量的边缘分布及其联合分布函数进行选择,利用伽马分布(Gam)、对数逻辑分布(LogL)、对数正态分布(LogN)、韦布尔分布(Wb)、极值分布(EV)拟合汉江上游气象、水文干旱事件对的干旱历时和干旱烈度,根据Kolmogorov-Smimov(K-S)检验、RMSE和图形拟合优度选择最佳边缘分

布拟合函数。参数 h 和概率 P_0 为K-S检验值,当 $h=0$ 时,说明K-S检验通过了5%的显著性水平检验; P_0 越大说明经验分布和理论分布相似的概率越高;RMSE越小,拟合效果越好。拟合优度结果如图2所示。由图2可知,气象、水文干旱历时最优边缘分布分别为LogN和Wb;气象、水文干旱烈度最优边缘分布分别为LogL和Wb。

为构建基于Copula函数的非线性响应模型,选用Frank Copula、Clayton Copula、Gumbel Copula和AMH Copula函数作为Copula连接函数,对干旱特征变量间的联合分布进行优选,选取RMSE、AIC、BIC和图形拟合优度进行检验,4种Copula函数的拟合优度如图3所示。由图3可知,干旱历时最优联合分布函数为Frank Copula函数,干旱烈度最优联合分布函数为Gumbel Copula函数。

3.3 气象-水文干旱特征变量响应模型模拟效果对比

基于Copula函数建立的非线性响应模型,利用第19~27场气象干旱历时、烈度模拟出相对应的水文干旱历时、烈度特征值,与基于传统方法建立的干旱历时最优线性函数响应模型、干旱烈度最优一元二次函数响应模型结果进行对比。对于水文干旱历时,基于Frank Copula函数的非线性模型和线性函数模型模拟的 R^2 都大于0.94,但线性函数模型的

表1 气象-水文干旱特征变量响应模型及验证结果

Table 1 Meteorological-hydrological drought characteristic variables response model and validation results

方案	干旱特征变量	响应模型	R^2	RMSE	AIC	BIC
1	干旱历时	$f_1(x) = 0.84811x + 3.2102 *$	0.98	1.59	11.46	11.65
		$f_2(x) = -0.0267x^2 + 1.51x + 0.3824$	0.89	2.93	22.41	22.61
		$f_3(x) = -24.8039 + 13.7116\ln(x + 5.4876)$	0.94	2.44	19.15	19.35
		$f_4(x) = 9.2488x^{0.3837} - 9.6428$	0.94	2.37	18.63	18.83
	干旱烈度	$f_1(x) = 1.5243x - 1.746$	0.93	2.77	21.39	21.59
		$f_2(x) = -0.0061x^2 + 1.6208x - 2.0368 *$	0.93	2.55	19.88	20.08
		$f_3(x) = -1188.9 + 237.5324\ln(x + 147.9424)$	0.93	2.60	20.23	20.42
		$f_4(x) = 1.5386x^{1.9969} - 1.7751$	0.93	2.76	21.33	21.53
2	干旱历时	$f_1(x) = 0.90934x + 1.9769$	0.52	2.96	22.60	22.80
		$f_2(x) = -0.0036x^2 + 1.0139x + 1.4399$	0.52	2.96	22.62	22.81
		$f_3(x) = -343.2102 + 80.02\ln(x + 73.9445)$	0.53	2.96	22.62	22.82
		$f_4(x) = 1.7999x^{0.8133} - 0.3143$	0.53	2.95	22.55	22.75
	干旱烈度	$f_1(x) = 1.3216x - 0.48292$	0.61	2.31	18.15	18.34
		$f_2(x) = -0.0222x^2 + 1.8197x - 2.5496$	0.61	2.25	17.69	17.89
		$f_3(x) = -161.0878 + 48.6211\ln(x + 26.1005)$	0.61	2.26	17.70	17.90
		$f_4(x) = 2.7533x^{0.7854} - 3.6304$	0.60	2.27	17.81	18.01
3	干旱历时	$f_1(x) = 0.90991x + 2.2998$	0.67	1.95	15.10	15.29
		$f_2(x) = -0.0079x^2 + 1.1326x + 1.3081$	0.68	2.01	15.59	15.79
		$f_3(x) = -132.6107 + 39.2292\ln(x + 29.9241)$	0.69	2.01	15.64	15.83
		$f_4(x) = 2.5896x^{0.7148} - 1.3369$	0.70	1.98	15.34	15.53
	干旱烈度	$f_1(x) = 1.3508x - 0.72281$	0.37	2.26	17.75	17.98
		$f_2(x) = -0.029x^2 + 1.9659x - 2.8249$	0.38	2.44	19.08	19.28
		$f_3(x) = -118.5933 + 39.2176\ln(x + 19.1572)$	0.38	2.39	18.77	18.96
		$f_4(x) = 3.0881x^{0.7532} - 4.0331$	0.38	2.36	18.54	18.74

注: *表示最优特征变量响应模型。

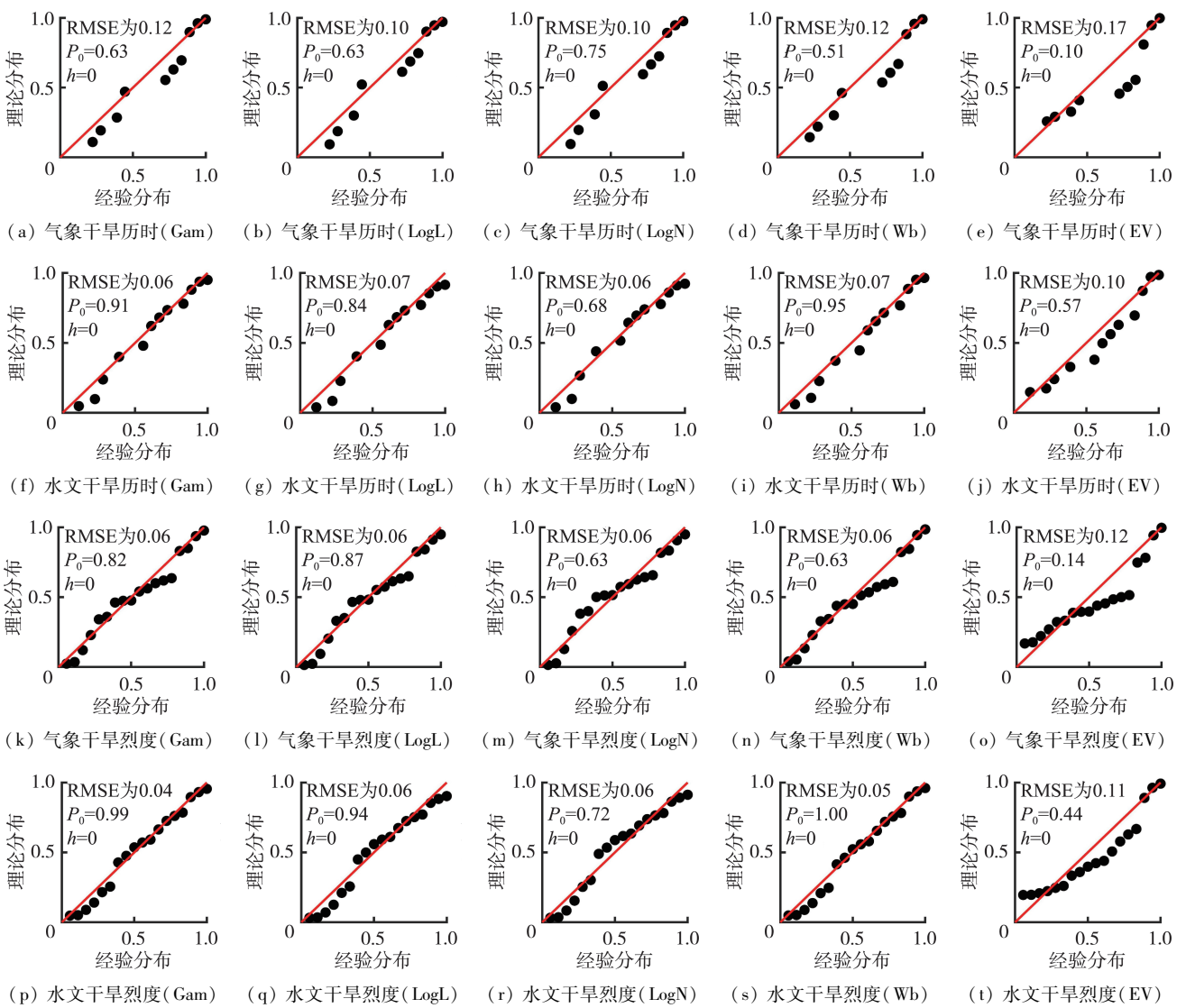


图2 干旱事件对干旱特征变量边缘分布拟合优度

Fig. 2 Goodness of fit of marginal distributions of drought characteristic variables for drought event pairs

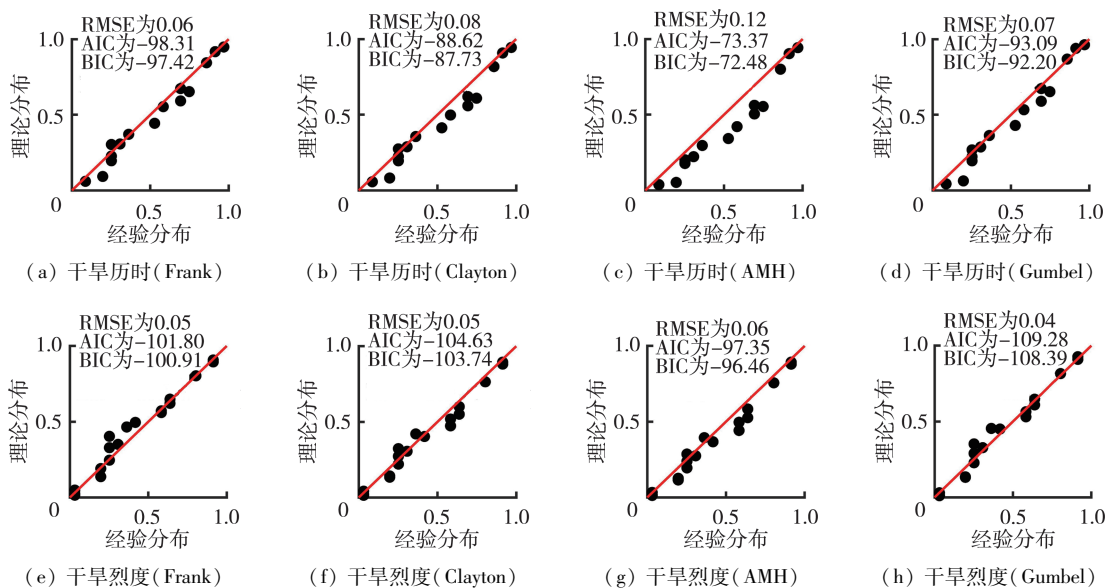


图3 干旱事件对干旱特征变量联合分布拟合优度

Fig. 3 Goodness of fit of joint distributions of drought characteristic variables for drought event pairs

RMSE、AIC 和 BIC 更小,表明线性函数模型的模拟效果更好。对于水文干旱烈度,基于 Gumbel Copula 函数的非线性模型和一元二次函数模型的模拟精度相近,前者模拟的 R^2 为 0.92, RMSE 为 2.44, AIC 和 BIC 分别为 19.12 和 19.32; 而后者相应的 R^2 为 0.93, AIC 和 BIC 分别为 19.88 和 20.08, 综合比较, 基于 Gumbel Copula 函数的非线性模型模拟效果较好。因此, 汉江上游流域气象-水文干旱历时、烈度最优响应模型分别为线性函数模型和基于 Gumbel Copula 函数的非线性模型。在已知气象干旱特征变量的条件下, 可通过最优响应模型模拟相应的水文干旱特征变量。

3.4 气象-水文干旱特征变量响应概率特征

为得到气象干旱特征变量大于某一特定值条件下水文干旱特征变量相对应的响应概率, 基于 27 场气象、水文干旱事件对的干旱特征变量, 利用 Copula 函数结合贝叶斯网络概率模型探究两者之间的响应概率。对气象、水文干旱特征变量的边缘分布函数进行优选, 结果表明, 气象、水文干旱历时的最优边缘分布分别为 LogL (RMSE 为 0.08, $P_0 = 0.77, h = 0$) 和 Gam (RMSE 为 0.07, $P_0 = 0.85, h = 0$), 气象、水文干旱烈度的最优边缘分布分别为 LogL (RMSE 为 0.05, $P_0 = 0.72, h = 0$) 和 Wb (RMSE 为 0.04, $P_0 = 0.96, h = 0$)。基于气象、水文干旱特征变量优选的边缘分布, 对两者间的联合分布函数进行优选。利用 4 种不同 Copula 函数进行联合, 不同 Copula 函数经验分布及理论分布的拟合优度表明, 干旱历时的最优联合分布函数为 Frank Copula 函数 (RMSE 为 0.05, AIC 为 -153.69, BIC 为 -152.40), 干旱烈度的最优联合分布函数为 Gumbel Copula 函数 (RMSE 为 0.03, AIC 为 -182.69, BIC 为 -181.39)。

将优选的干旱特征变量最优边缘分布和最优联合分布函数带入式(5), 可得到气象-水文干旱历时和烈度响应概率, 如图 4 所示, 图中各等值线上的数值为相应概率。从图 4 可以看出, 水文干旱历时、烈度的响应概率随着相应的气象干旱特征变量的增加而增加。由图 4(a) 可知, 当气象干旱历时分别大于 5、10、15、20、25 月时, 发生干旱历时大于 15 月水文干旱的概率分别为 26.9%、60.5%、82.9%、88.4%、90.1%。可以看出水文干旱历时对气象干旱历时的响应概率在气象干旱历时大于某一特定值时达到一个相对稳定的概率, 如当水文干旱历时大于 23 月时, 其对任意气象干旱历时的响应概率均小于 20%。响应概率等值线的斜率反映干旱特征变量的响应概率速率, 等值线间距反映响应概率变化速率的大小。当气象干旱历时较短时, 水文干旱历

时的响应概率变化速率较大, 当气象干旱历时较长时, 水文干旱历时的响应概率变化速率变小, 水文干旱历时的响应概率变化速率随着气象干旱历时的增加而减小, 最后趋于平稳。由图 4(b) 可知, 当气象干旱烈度分别大于 5、10、15、20 时, 对应水文干旱烈度大于 15 的概率分别为 27.3%、75.3%、97.2%、99.5%。水文干旱烈度对气象干旱烈度的响应概率变化速率与干旱历时具有较大差异, 水文干旱烈度响应概率等值线间的距离随着气象干旱烈度的增加几乎没有显著变化, 但响应概率等值线的斜率较大, 表明水文干旱烈度对气象干旱烈度的响应概率速率较大, 但响应概率变化速率较小。

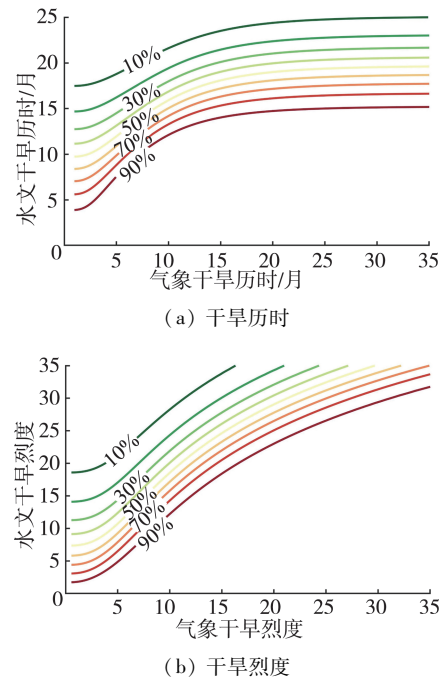


图 4 气象-水文干旱特征变量响应概率

Fig. 4 Response probability of meteorological-hydrological drought characteristic variables

4 结论

a. 汉江上游流域气象-水文干旱历时最优响应模型为线性函数模型, 干旱烈度的最优响应模型为基于 Gumbel Copula 函数的非线性模型。

b. 构建气象-水文干旱特征变量响应模型时, 气象、水文干旱历时最优边缘分布分别为 LogN 和 Wb, 气象、水文干旱烈度最优边缘分布分别为 LogL 和 Wb。干旱历时、烈度的最优联合分布函数分别是 Frank Copula 函数和 Gumbel Copula 函数。

c. 构建气象-水文干旱特征变量响应概率曲线时, 气象、水文干旱历时最优边缘分布分别为 LogL 和 Gam, 气象、水文干旱烈度最优边缘分布以及干旱特征变量间的最优联合分布函数与干旱特征变量

响应模型相同。

d. 水文干旱特征变量响应概率随气象干旱特征变量的增加而增加。水文干旱历时的响应概率变化速率随气象干旱历时的增加而减小,最后趋于平缓;水文干旱烈度对气象干旱烈度的响应概率速率较大,但响应概率变化速率不大。

参考文献:

[1] LENG Guoyong, TANG Qihong, RAYBURG S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 126: 23-34.

[2] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions [M]. London: Routledge, 2000: 3-18.

[3] DENG Shulin, CHEN Tan, YANG Ni, et al. Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 28-41.

[4] 王利民, 刘佳, 张有智, 等. 我国农业干旱灾害时空格局分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42 (1): 96-105. (WANG Limin, LIU Jia, ZHANG Youzhi, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of agricultural drought disaster in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42 (1): 96-105. (in Chinese))

[5] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42 (5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42 (5): 28-36. (in Chinese))

[6] 杨少康, 刘冀, 魏榕, 等. 长江上游流域生长季气象干旱分异特征 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29 (2): 184-191. (YANG Shaokang, LIU Ji, WEI Rong, et al. Differentiation characteristics of meteorological drought in the growing season in the upper reaches of the Yangtze River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29 (2): 184-191. (in Chinese))

[7] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应 [J]. *水资源保护*, 2022, 38 (1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (1): 34-42. (in Chinese))

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

[9] YUAN Xing, ZHANG Miao, WANG Linying, et al. Understanding and seasonal forecasting of hydrological

drought in the Anthropocene [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21 (11): 5477-5492.

[10] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题 [J]. *水科学进展*, 2013, 24 (3): 449-456. (PEI Yuansheng, JIANG Guiqin, ZHAI Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24 (3): 449-456. (in Chinese))

[11] 代萌, 黄生志, 黄强, 等. 干旱多属性风险动态评估与驱动力分析 [J]. *水力发电学报*, 2019, 38 (8): 15-26. (DAI Meng, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Dynamic assessments of drought multi-attribute risks and analysis of its driving force [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38 (8): 15-26. (in Chinese))

[12] CAMMALLERI C, SPINONI J, BARBOSA P, et al. The effects of non-stationarity on SPI for operational drought monitoring in Europe [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42 (6): 3418-3430.

[13] 林盛吉, 许月萍, 田焯, 等. 基于 Z 指数和 SPI 指数的钱塘江流域干旱时空分析 [J]. *水力发电学报*, 2012, 31 (2): 20-26. (LIN Shengji, XU Yueping, TIAN Ye, et al. Spatial and temporal analysis of drought in Qiantang River Basin based on Z index and SPI [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31 (2): 20-26. (in Chinese))

[14] 张向明, 栗晓玲, 张更喜. 基于 SRI 与 Copula 函数的黑河流域水文干旱等级划分及特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38 (5): 107-113. (ZHANG Xiangming, SU Xiaoling, ZHANG Gengxi. Classifying drought in Heihe Basin using SRI index and copula function [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (5): 107-113. (in Chinese))

[15] YUE Shupeng, SHENG Xiaodan, YANG Fengtian. Spatiotemporal evolution and meteorological triggering conditions of hydrological drought in the Hun River Basin, NE China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22 (3): 995-1014.

[16] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38 (3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (3): 80-86. (in Chinese))

[17] 郑丽虹, 刘懿, 任立良, 等. 黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系 [J]. *水资源保护*, 2022, 38 (3): 87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (3): 87-95. (in Chinese))

[18] HUANG Shengzhi, LI Pei, HUANG Qiang, et al. The

- propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 184-195.
- [19] ZHAO Lin, LYU Aifeng, WU Jianjun, et al. Impact of meteorological drought on streamflow drought in Jinghe River Basin of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(6): 694-705.
- [20] 胡彩虹, 赵留香, 王艺璇, 等. 气象、农业和水文干旱之间关联性分析 [J]. *气象与环境科学*, 2016, 39(4): 1-6. (HU Caihong, ZHAO Liuxiang, WANG Yixuan, et al. Analysis of the relationship between the meteorological, agriculture and hydrological drought [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, 39(4): 1-6. (in Chinese))
- [21] 刘永强, 黄生志, 郭怿, 等. 气象干旱到不同等级水文干旱的传播阈值: 以沁河流域为例 [J]. *水力发电学报*, 2022, 41(2): 9-19. (LIU Yongqiang, HUANG Shengzhi, GUO Yi, et al. Propagation threshold of meteorological drought to different levels of hydrological drought: a case study of Qinhe River Basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(2): 9-19. (in Chinese))
- [22] 王志霞, 穆振侠, 陈翠彦. 水文干旱与气象干旱临界转变条件的判定及响应关系 [J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 119-125. (WANG Zhixia, MU Zhenxia, CHEN Cuiyan. Judgment of critical transition conditions and the response relationship of hydrological and meteorological droughts [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(3): 119-125. (in Chinese))
- [23] APURV T, CAI Ximing. Drought propagation in contiguous U. S. watersheds: a process-based understanding of the role of climate and watershed properties [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(9): e2020WR027755.
- [24] GEVAERT A I, VELDKAMP T I E, WARD P J. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(9): 4649-4665.
- [25] 冯凯, 李彦彬, 许桂平, 等. 西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 59-69. (FENG Kai, LI Yanbin, XU Guiping, et al. Spaitotemporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 59-69. (in Chinese))
- [26] 冉鹏羽, 赵强, 熊丹, 等. 1960—2017 年汉江流域气象干旱时空特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 712-720. (RAN Pengyu, ZHAO Qiang, XIONG Dan, et al. Spatial and temporal characteristics of meteorological drought in the Hanjiang River Basin from 1960 to 2017 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(3): 712-720. (in Chinese))
- [27] 汪琳, 舒章康, 王国庆, 等. 汉江流域 1961—2018 年多尺度气象干旱时空演变特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1649-1658. (WANG Lin, SHU Zhangkang, WANG Guoqing, et al. Spatial and temporal evolution of multi-scale meteorological drought in Hanjiang River Basin from 1961 to 2018 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1649-1658. (in Chinese))
- [28] LIU Hai, WU Jing, XU Yanqing. Investigating the effects of precipitation on drought in the Hanjiang River Basin using SPI [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2019, 10(4): 977-992.
- [29] 李京芳, 彭涛, 董晓华, 等. 基于 Copula 函数的汉江流域水文干旱风险研究 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 179-188. (LI Jingfang, PENG Tao, DONG Xiaohua, et al. Hydrological drought risk in the Hanjiang River Basin based on Copula function [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 179-188. (in Chinese))
- [30] NALDER I A, WEIN R W. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92(4): 211-225.
- [31] 陆国宾, 刘轶, 邹响林, 等. 丹江口水库对汉江中下游径流特性的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10): 959-963. (LU Guobin, LIU Yi, ZOU Xianglin, et al. Impact of the Danjiangkou Reservoir on the flow regime in the middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10): 959-963. (in Chinese))
- [32] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. Anaheim: Meteorology Society, 1993: 179-184.
- [33] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02405.
- [34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [35] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [36] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*

- 版), 2023, 51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):1-9. (in Chinese))
- [37] HAO Zengchao, HAO Fanghua, SINGH V P, et al. Probabilistic prediction of hydrologic drought using a conditional probability approach based on the meta-Gaussian model [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 772-780.
- [38] SATTAR M N, LEE J Y, SHIN J Y, et al. Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea [J]. Water Resources Management, 2019, 33(7):2439-2452.
- [39] WANG Fei, WANG Zongmin, YANG Haibo, et al. Comprehensive evaluation of hydrological drought and its relationships with meteorological drought in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584:124751.
- [40] SHAO Jun. An asymptotic theory for linear model selection [J]. Statistica Sinica, 1997, 7(2):221-262.
- (收稿日期:2022-10-18 编辑:施业)
-
- (上接第 142 页)
- [15] 陶思铭, 梁忠民, 陈在妮, 等. 长短期记忆网络在中长期径流预报中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(1):21-27. (TAO Siming, LIANG Zhongmin, CHEN Zaini, et al. Application of long-short term memory network in medium-long term runoff forecast [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(1):21-27. (in Chinese))
- [16] ZHAO Xuehua, LYU Hanfang, LYU Shujin, et al. Enhancing robustness of monthly streamflow forecasting model using gated recurrent unit based on improved grey wolf optimizer [J]. Journal of Hydrology, 2021, 601:126607.
- [17] 宋欣瑞, 张宪琦, 张展, 等. 多传感器数据融合的复杂人体活动识别 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(10):814821. (SONG Xinrui, ZHANG Xianqi, ZHANG Zhan, et al. Multi-sensor data fusion for complex human activity recognition [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(10):814-821. (in Chinese))
- [18] YU Yong, SI Xiaosheng, HU Changhua, et al. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures [J]. Neural Computation, 2019, 31(7):1235-1270.
- [19] KE Guolin, MENG Qi, FINLEY T, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree [C]//Proceedings of the 31th International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc., 2017:3149-3157.
- [20] 王文川, 高畅, 徐雷. 基于 TVF-EMD 与 LSTM 神经网络耦合的月径流预测研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022(2):76-81. (WANG Wenchuan, GAO Chang, XU Lei. Monthly runoff forecast based on TVF-EMD and LSTM neural network coupling [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2):76-81. (in Chinese))
- [21] 赵磊娜, 王延鹏, 邵毅明, 等. 利用时变经验模态分解的主干道短时交通量预测 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(3):37-44. (ZHAO Leina, WANG Yanpeng, SHAO Yiming, et al. Short-term traffic volume prediction of arterial road using TVF-EMD method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(3):37-44. (in Chinese))
- [22] CUI Zhongjie, QING Xiaoxia, CHAI Hongxiang, et al. Real-time rainfall-runoff prediction using light gradient boosting machine coupled with singular spectrum analysis [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:127124.
- [23] HENG Li, ZHI Li, WEI Mo. A time varying filter approach for empirical mode decomposition [J]. Signal Processing, 2017, 138:146-158.
- [24] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2041-2046. (LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. Advance in grey incidence analysis modelling [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8):2041-2046. (in Chinese))
- [25] HAO Fanghua, SUN Mingze, GENG Xiaojun, et al. Coupling the Xinanjiang model with geomorphologic instantaneous unit hydrograph for flood forecasting in northeast China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2015, 3(1):66-76.
- [26] YIN Hanlin, ZHANG Xiuwei, WANG Fandu, et al. Rainfall-runoff modeling using LSTM-based multi-state-vector sequence-to-sequence model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598:126378.
- [27] MOOSAVI V, FARD Z G, VAFAKHAH M. Which one is more important in daily runoff forecasting using data driven models: input data, model type, preprocessing or data length? [J]. Journal of Hydrology, 2022, 606:127429.
- [28] BERKHAHN S, FUCHS L, NEUWEILER I. An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575:743-754.
- (收稿日期:2022-10-04 编辑:施业)