

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.008

西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应

冯凯¹, 李彦彬¹, 许桂平², 王飞¹, 张泽中¹, 粟晓玲³, 张更喜⁴

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 黄河水文勘察测绘局, 河南 郑州 450003;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225012)

摘要:采用标准化降水蒸散指数和标准化土壤水指数分别表征气象干旱和农业干旱,基于干旱事件三维识别和气象干旱与农业干旱事件对的匹配结果,利用 Copula 函数条件概率分布和贝叶斯网络概率模型分析了西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应关系。结果表明:基于线性、非线性关系模型及 Copula 函数条件概率分布确立了西北地区农业干旱对气象干旱的干旱历时、干旱烈度、干旱面积及干旱迁移距离间最优响应关系分别为二次多项式模型、基于 Frank Copula 函数的非线性关系模型、指数模型和线性模型;建立的气象、农业干旱变量间的响应概率特征曲线可定量预测西北地区不同程度的气象干旱发展为农业干旱的概率;已知气象干旱特征条件下,根据最优响应关系及响应概率特征曲线可对农业干旱特征及其发生概率进行可靠预测。

关键词:气象干旱;农业干旱;响应关系模型;响应概率;西北地区

中图分类号:P338+.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0059-11

Spatiotemporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought in Northwest China//
FENG Kai¹, LI Yanbin¹, XU Guiping², WANG Fei¹, ZHANG Zezhong¹, SU Xiaoling³, ZHANG Gengxi⁴ (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Yellow River Hydrographic Bureau of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225012, China)

Abstract: Taking Northwest China as the research object, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and the standardized soil moisture index (SSMI) were used to characterize meteorological drought and agricultural drought respectively. Based on the three-dimensional recognition of drought events and the matching results of meteorological and agricultural drought events, the spatio-temporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought was established by using Copula function conditional probability distribution and Bayesian network probability model. The results show that based on the linear and nonlinear relationship models and the conditional probability distribution of Copula function, the optimal response relationship between agricultural drought and meteorological drought about drought duration, drought intensity, drought area and drought migration distance in Northwest China are quadratic polynomial model, nonlinear relationship model based on Frank Copula function, exponential model and linear model, respectively. The established response probability characteristic curve between meteorological and agricultural drought variables can quantitatively predict the probability of different degrees of meteorological drought developing into agricultural drought in Northwest China. Given the meteorological drought characteristics, the agricultural drought characteristics and its occurrence probability can be reliably predicted according to the optimal response relationship and response probability characteristic curve.

Key words: meteorological drought; agricultural drought; response relationship model; response probability; Northwest China

基金项目:国家自然科学基金(51879222,52079111,52179015,51779093);内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站开放研究基金(YSS202112);流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-202212);河南省重大科技专项(201300311400);贵州省水利厅科技项目(KT202001)

作者简介:冯凯(1991—),男,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:fengk0121@163.com

通信作者:粟晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文模拟及水资源优化研究。E-mail:xiaolingsu@nwafu.edu.cn

干旱是一种发生频繁、分布广泛的极端气候现象,具有发生缓慢、持续时间长、时空影响效应深远等特点^[1-2]。20世纪以来,全球70%以上的国家受到不同强度的旱灾威胁,造成年均直接经济损失多达80亿美元^[3-4]。气候变化及经济社会迅猛发展背景下,水资源短缺问题更加凸显,干旱问题愈演愈烈,导致水质恶化、农作物减产,对生态环境造成不可逆转的影响^[5-6]。因此,干旱已成为国际社会和不同领域专家共同关注的焦点。

根据水资源的供需关系,干旱通常可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种类型,不同类型干旱是水循环系统中不同环节出现水分收支不平衡而引发的现象^[7-8]。干旱的形成和演变受到气象、水文、地貌、人类活动、社会经济等多方面影响,不同类型干旱发生的时间和机理不同,但它们之间存在一定的相互联系和响应关系^[9]。近年来,干旱响应关系方面的研究成为国内外干旱研究领域的热点问题,Huang等^[10]研究结果表明渭河流域气象干旱向水文干旱的传播时间具有明显的季节性特征,春夏两季传播时间较短,秋冬两季传播时间较长;Wang等^[11]研究结果表明黄河流域气象干旱向水文干旱传播时间在夏季较短(约3月),在冬季较长(约12月)。随着研究的深入,一些学者开始尝试构建不同类型干旱特征变量之间的统计关系模型,以期通过输入气象干旱信息达到农业和水文干旱的模拟、监测以及预警目的。李运刚等^[12]建立了气象和水文干旱特征变量(历时、烈度、强度)之间的线性关系;郑丽虹等^[13]从时间尺度确定了黄河流域气象干旱与水文干旱事件传递关系分类体系;Wu等^[14]从时间尺度建立了气象与水文干旱特征间的三参数对数函数模型。根据干旱指数的多时间尺度特性,亦可利用主成分分析法、多元联合分布等非线性方法联合不同时间尺度的气象干旱指数对水文干旱进行监测或预警,以建立气象、水文不同干旱特征耦合模型推求水文干旱的持续时间或严重程度^[15-16]。

上述研究多集中在干旱传播的滞后时间上,关注干旱的时间特征(如干旱指数、干旱历时、干旱烈度),而忽略了空间过程(如干旱面积、迁移距离)。从时空多角度探讨气象和农业干旱间的响应关系研究较少,该方面研究存在诸多难点,不同气候、下垫面条件会影响干旱传播速度,不同程度的气象干旱发展为农业干旱的可能性也不同。农业干旱对不同程度的气象干旱的响应概率、响应的临界条件以及不同干旱特征变量间的最优响应关系模型都是亟待解决的问题。

鉴于此,本文以西北地区为研究对象,分别以标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)和标准化土壤水指数(standardized soil moisture index, SSMI)表征气象干旱和农业干旱,基于干旱事件三维识别方法和时空尺度干旱事件的匹配准则提取并匹配1960—2018年具有对应关系的气象、农业干旱事件,从线性、非线性角度建立气象、农业干旱特征变量间的最优响应模型,利用贝叶斯网络概率模型建立农业干旱对气象干旱变量间的响应概率特征曲线,从时空多尺度对干旱响应特性进行系统分析,以期防旱抗旱方案的制定以及农业旱情预警提供参考。

1 研究区概况与数据来源

我国西北地区通常包括陕西、甘肃、宁夏、青海以及新疆5个省区^[17]。内蒙古东西范围广阔,横跨西北、华北和东北3个地区,属于西北旱区向东部湿润区的过渡地带,其西部与西北地区相邻,与西北地区具有相似的气候特征,自然地理研究中通常将内蒙古西部也归为西北地区^[18]。新疆位于干旱区,其水资源补充主要来自冰川或常年冻土融化,会对本研究中的干旱三维识别结果造成一定的影响^[19]。因此,本研究选择的西北地区包括陕西、宁夏、青海、甘肃以及内蒙古西部区域,该研究区位于东经89°25′~111°27′,北纬31°33′~42°48′,总土地面积约为186.81万km²,占国土面积的19.46%。研究区深居内陆,距海遥远,加之高原、山地地形较高对湿润气流的阻挡,导致本区降水稀少、气候干燥,是同纬度下最干旱的地区之一。研究区地势西高东低,高程为184~6672m,整体上由西向东呈现出三级阶梯形下降地形,年降水量从东向西递减,大部分地区年降水量在500mm。研究区范围如图1所示。

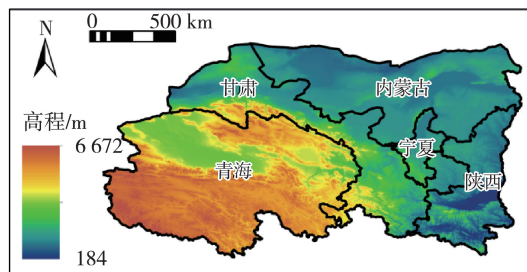


图1 研究区范围

Fig.1 Scope of study area

全球陆地同化系统采用先进的陆面模式和同化技术,为无法进行可靠地面测量的地区提供科学数据,其土壤湿度数据已被验证在中国西北地区具有

较好的适用性^[20-21]。本研究选用 GLDAS V2.0 中 Noah 模型提供的根区(0~1 m)土壤含水量月时间序列栅格数据集,时间覆盖范围为 1960—2018 年,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,可通过美国宇航局戈达德地球科学数据和信息服务中心获取(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_)。采用东英吉利大学气候中心 CRU TS v. 4.03 数据集提供的月降水 P 和潜在蒸散发 ET_p 数据(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>)计算 SPEI,时间序列为 1960—2018 年,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,为了保证与土壤含水量栅格数据的空间分辨率一致,将其重采样为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,可得研究区内共包含 2 903 个栅格。从中国气象数据共享网(<http://www.nmic.cn/data/cdcindex/cid/>)获取研究区内 70 个气象站点 1960—2018 年气象要素实测数据,依据决定系数 R^2 评估遥感数据集的观测质量。对比分析,研究区 85% 以上站点的实测降水数据与遥感数据之间的 R^2 集中在 0.7~0.9(显著性水平 $p=0.01$),表明实测降水数据与遥感再分析数据之间具有较好的一致性,能够保证计算结果的可靠性。

2 研究方法

首先,采用标准化方法计算气象、农业干旱指数;然后,基于干旱事件三维识别方法提取气象干旱与农业干旱特征变量,提出干旱事件匹配准则进行气象与农业干旱事件匹配;最后,基于匹配结果采用 Copula 函数和贝叶斯网络概率模型等方法建立气象干旱与农业干旱变量间的最优响应关系和响应概率曲线。

2.1 干旱指数

SPEI 的主要计算步骤为:建立逐月降水量与潜在蒸发量差值序列 D ;利用三参数 Log-logistic 概率分布函数拟合 D 序列并计算概率分布函数 $F(x)$;将 $F(x)$ 转化为标准正态分布求得 SPEI 值。SSMI 的计算步骤与 SPEI 类似,不同之处在于需采用土壤水服从的最优分布函数正态分布对其进行拟合并求累积概率分布函数,最后将其转化为标准正态分布求得 SSMI 值。

2.2 干旱事件识别及干旱事件匹配

基于“经度-纬度-时间”层面的干旱指数三维矩阵,通过干旱斑块空间识别和干旱斑块时程连接,从干旱指标的三维空间体中提取时空连续的干旱事件,识别干旱历时、面积、烈度、中心、迁移距离等时空干旱特征变量。干旱历时表示一场干旱事件从开始发生至结束所持续的时间,干旱面积表示干旱事件所影响的范围,干旱烈度反映干

旱事件缺水程度之和,干旱迁移距离反映干旱事件从开始到结束在空间上的移动距离。具体提取步骤可参考文献[22]。

气象干旱和农业干旱间具有内在联系,基于干旱响应关系类型及其发展条件提出气象干旱与农业干旱事件匹配准则,从时空尺度将具有成因联系的气象干旱与农业干旱事件进行匹配,可以从多个层面更加形象地描述干旱响应特征,具体匹配过程为:①气象干旱、农业干旱事件识别结果排序;②判断气象干旱与农业干旱事件对是否存在时间上的交集;③基于②判别结果进而判断是否存在空间上的交集。

2.3 基于 Copula 函数的非线性响应关系

Hao 等^[23]研究表明基于 Copula 函数的条件概率可以建立预测因子与预测对象之间的非线性概率关系来进行概率预测。借鉴条件概率的思想,建立气象干旱与农业干旱特征变量间的非线性耦合关系,求得给定气象干旱特征变量等于某一特定值时对应的农业干旱特征变量的条件概率分布。气象干旱与农业干旱变量间的联合分布函数和概率密度函数可表示为

$$F(x, y) = C(u, v) \quad (1)$$

其中

$$u = F_X(x) \quad v = F_Y(y)$$

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

式中: X, Y 分别为气象干旱与农业干旱的特征变量(干旱历时、烈度、面积、迁移距离); $F_X(x), F_Y(y)$ 分别为 X, Y 的边缘分布函数; $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; $c(u, v)$ 为 $C(\cdot)$ 的密度函数; $f_X(x), f_Y(y)$ 分别为 X, Y 的边缘概率密度函数。

采用的条件概率为一个等量事件发生的概率,即给定气象干旱特征 $X = x$ 条件下,农业干旱特征变量 Y 发生的条件概率分布函数表达式为

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

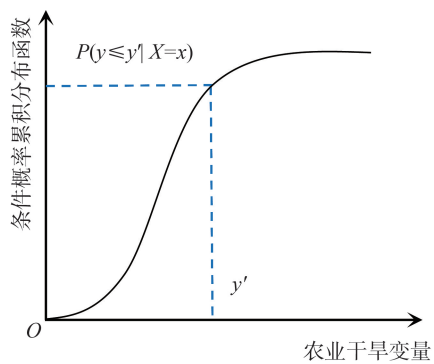
相应的条件概率密度表达式为

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

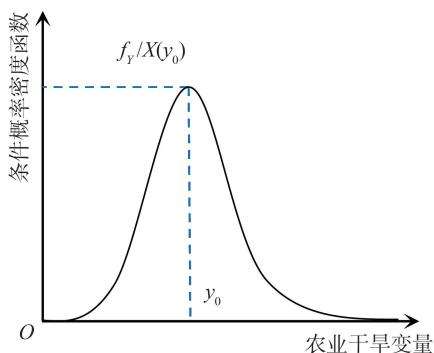
可以将条件概率密度函数最大值对应的农业干旱特征变量值作为预测值^[24]。图 2 为农业干旱特征变量的条件概率累积分布函数及概率密度函数示意图。

2.4 贝叶斯网络概率模型

贝叶斯网络基于数理统计知识能够有效解决复杂系统中的不确定性问题,可通过条件概率方法估计随机变量之间的关系^[25]。采用贝叶斯网络概率



(a) 条件概率累积分布函数



(b) 条件概率密度函数

图2 农业干旱变量条件概率累积分布函数及条件概率密度函数示意图

Fig.2 Schematic diagram of conditional probability cumulative distribution function and density function of agricultural drought variables

模型求解农业干旱对气象干旱的响应概率问题。由于本文只涉及气象干旱和农业干旱特征两种随机变量,因此采用一阶贝叶斯网络概率模型求解,其一般表达式为

$$P(X_2 | X_1) = \frac{P(X_1, X_2)}{P(X_1)} \quad (5)$$

实际生产活动中人们更关注气象干旱特征变量大于某一特定值条件下,相应农业干旱特征变量的响应概率。因此,对式(5)进行变形可得气象干旱特征变量大于某一特征值条件下,农业干旱特征变量对气象干旱特征变量的响应概率公式:

$$P(Y > y | X > x) = \frac{P(X > x, Y > y)}{P(X > x)} \quad (6)$$

式中 $P(Y > y, X > x)$ 为 X 和 Y 的联合发生概率。

2.5 模型精度评价

采用均方根误差 (RMSE)、Akaike 信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 和贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC) 来评价气象、农业干旱特征变量间的响应关系模型精度。AIC 是基于熵的概念建立的拟合精度和参数未知个数的加权函数,同时兼顾模型拟合精度和模型参数个数。

BIC 与 AIC 准则相似,相比于 AIC, BIC 在样本量较大时可有效解决由于模型精度过高导致的复杂度也较高的问题。通常, RMSE、AIC 和 BIC 的值越小,表示模型模拟精度越优。

3 结果与分析

3.1 传统的线性和非线性响应关系

基于干旱事件识别方法及干旱事件对匹配准则,研究区 1960—2018 年共成功匹配气象干旱与农业干旱事件对 53 场。采用交叉验证方法^[11]将匹配成功的干旱事件对分为 3 组样本,分别构建不同干旱特征间的响应关系模型,根据验证结果确定干旱特征的最优响应模型。第一组用前 30 场干旱事件对构建模型,后 23 场干旱事件对验证模型;第二组用编号 11 ~ 40 的中间 30 场干旱事件对构建模型,其余 23 场干旱事件对验证模型;第三组用后 30 场干旱事件对构建模型,前 23 场干旱事件对验证模型。

气象与农业干旱特征响应关系模型及验证结果见表 1,其中 x 和 $f(x)$ 分别代表气象和农业干旱特征变量。由表 1 可知,干旱历时、烈度、面积、迁移距离响应关系模型中 R^2 最小值分别为 0.904、0.708、0.501、0.566。所有结果均通过 $p = 0.05$ 显著性检验,表明西北地区农业干旱对气象干旱具有密切的响应关系。由模型评价指标可知,干旱历时、烈度、面积和迁移距离的最优响应模型均集中在第一组样本中(表中带*数据),且干旱历时和烈度的最优响应关系模型均为二次多项式函数,分别为 $f(x) = 0.06x^2 + 0.73x + 3.02$ 和 $f(x) = 0.008x^2 + 1.05x - 0.89$,干旱面积的最优响应关系模型为指数函数 $f(x) = \exp(1.14x^2 - 0.91x - 1.99)$,干旱迁移距离的最优响应关系模型为线性函数 $f(x) = 0.83x - 80.44$ 。

3.2 基于 Copula 函数的非线性响应关系

基于匹配成功的前 30 场气象干旱与农业干旱事件对序列,对各干旱特征的边缘分布及联合分布函数进行优选,结果如表 2 和表 3 所示。由表 2 和表 3 可知,气象干旱历时、烈度、面积和迁移距离的最优边缘分布分别为 Gam 分布、Wb 分布、Wb 分布和 GP 分布,对于农业干旱历时、烈度、面积和迁移距离 4 个特征变量,分别是 GP 分布、LogL 分布、GP 分布、GP 分布的拟合效果最佳。气象干旱与农业干旱事件对历时与历时的最优联合分布为 Clayton Copula 函数,气象干旱与农业干旱事件对烈度与烈度、面积与面积、迁移距离与迁移距离的最优联合分布均为 Frank Copula 函数。

表 1 气象干旱与农业干旱特征响应模型及验证结果

Table 1 Meteorological and agricultural drought variables response models and validation results

类型	干旱特征变量	响应模型	R^2	RMSE	AIC	BIC
第一组	历时	$f(x) = 0.95x + 2.07$	0.913	3.285	56.715	57.851
		$f(x) = 0.006x^2 + 0.73x + 3.02$	0.918	3.143 *	55.818 *	54.682 *
		$f(x) = \exp(-8.82 \times 10^{-4}x^2 + 0.09x + 1.48)$	0.913	3.667	61.775	62.910
	烈度	$f(x) = 1.28x - 1.38$	0.708	4.330	71.42	70.55
		$f(x) = 0.008x^2 + 1.05x - 0.89$	0.712	4.324 *	70.48 *	69.35 *
		$f(x) = \exp(-0.02x^2 + 0.98x - 7.31)$	0.881	5.825	83.06	84.19
	面积	$f(x) = 0.43x - 0.006$	0.587	0.216	-68.56	-67.42
		$f(x) = 0.39x^2 - 0.29x + 0.15$	0.651	0.196	-71.82	-72.96
		$f(x) = \exp(1.14x^2 - 0.91x - 1.99)$	0.712	0.190 *	-74.50 *	-73.36 *
第二组	历时	$f(x) = 0.83x - 80.44$	0.566	897.2 *	314.8 *	315.9 *
		$f(x) = 1.37 \times 10^{-5}x^2 + 0.75x - 40.24$	0.567	897.8	315.9	316.8
		$f(x) = \exp(-6.13 \times 10^{-8}x^2 + 8.89 \times 10^{-4}x + 5.49)$	0.567	949.7	317.4	318.5
	烈度	$f(x) = 0.99x + 1.46$	0.926	3.361	57.76	58.90
		$f(x) = 0.002x^2 + 0.92x + 1.81$	0.927	3.367	58.98	57.85
		$f(x) = \exp(-0.001x^2 + 0.10x + 1.40)$	0.909	3.596	60.87	62.01
	面积	$f(x) = 1.14x - 0.92$	0.799	7.943	97.32	98.46
		$f(x) = 0.008x^2 + 0.94x - 0.47$	0.804	7.921	98.33	97.20
		$f(x) = \exp(-0.007x^2 + 0.37x - 0.86)$	0.842	7.344	93.72	94.86
第三组	历时	$f(x) = 0.43x - 0.04$	0.574	0.227	-66.23	-65.10
		$f(x) = 0.51x^2 - 0.50x + 0.19$	0.700	0.244	-61.67	-62.81
		$f(x) = \exp(1.62x^2 - 1.71x - 1.91)$	0.794	0.610	-20.72	-19.58
	烈度	$f(x) = 0.83x - 68.00$	0.803	1 759	345.7	346.8
		$f(x) = 1.9 \times 10^{-5}x^2 + 0.72x - 5.69$	0.806	1 761	346.9	345.8
		$f(x) = \exp(-5.9 \times 10^{-8}x^2 + 8.8 \times 10^{-4}x + 5.54)$	0.801	1 790	346.5	347.7
	面积	$f(x) = 1.09x + 0.51$	0.917	3.418	58.54	59.68
		$f(x) = -0.003x^2 + 1.22x - 0.15$	0.919	3.661	62.83	61.69
		$f(x) = \exp(-0.002x^2 + 0.13x + 1.22)$	0.904	3.225	55.86	56.99
第四组	历时	$f(x) = 1.18x - 0.64$	0.758	7.591	95.24	96.37
		$f(x) = 0.002x^2 + 1.12x - 0.49$	0.759	7.582	96.32	95.19
		$f(x) = \exp(-0.006x^2 + 0.29x - 0.05)$	0.781	7.164	92.58	93.71
	烈度	$f(x) = 0.45x - 0.07$	0.501	0.217	-68.33	-67.19
		$f(x) = 0.42x^2 - 0.34x + 0.19$	0.601	0.210	-68.73	-69.87
		$f(x) = \exp(1.24x^2 - 1.21x - 1.65)$	0.686	0.211	-69.50	-68.37
	面积	$f(x) = 0.87x - 47.27$	0.723	1 674	343.5	344.6
		$f(x) = 1.26 \times 10^{-5}x^2 + 0.79x + 8.62$	0.724	1 672	344.5	343.4
		$f(x) = \exp(-6.6 \times 10^{-8}x^2 + 9.13 \times 10^{-4}x + 5.67)$	0.742	1 767	345.9	347.1

表 2 Copula 函数的拟合优度检验及参数

Table 2 Goodness-of-fit test and parameters of Copula functions

干旱特征变量	准则	Gumbel	Clayton	Frank	Joe	Normal	t	最优 Copula 函数	参数
历时	AIC	-165.1	-167.3	-163.9	-159.6	-167.0	-163.8	Clayton	4.82
	BIC	-163.7	-165.9	-162.5	-158.1	-165.6	-162.3		
	RMSE	0.062	0.059	0.063	0.068	0.060	0.063		
烈度	AIC	-156.9	-155.7	-157.6	-141.2	-157.5	-151.8	Frank	12.86
	BIC	-155.5	-154.3	-156.2	-139.8	-156.1	-150.4		
	RMSE	0.071	0.072	0.069	0.092	0.070	0.077		
面积	AIC	-172.3	-175.4	-176.5	-165.1	-174.8	-173.3	Frank	9.10
	BIC	-170.9	-174.1	-175.1	-163.7	-173.4	-171.9		
	RMSE	0.055	0.052	0.051	0.062	0.052	0.0534		
迁移距离	AIC	-160.2	-161.4	-165.8	-150.6	-160.8	-160.7	Frank	11.09
	BIC	-158.8	-160.0	-164.4	-149.2	-159.3	-159.3		
	RMSE	0.070	0.066	0.060	0.079	0.066	0.066		

表3 匹配成功的前30场气象干旱与农业干旱特征变量的最优边缘分布函数及参数

Table 3 Optimal marginal distribution functions with estimated parameters of first 30 meteorological and agricultural drought variables after successful matching

类型	干旱特征变量	K-S 检验							A-D 统计量							最优分布	参数
		Gam	LogL	LogN	Wb	P-III	GEV	GP	Gam	LogL	LogN	Wb	P-III	GEV	GP		
气象干旱	历时	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.31	0.53	0.47	0.36	4.09	0.42	0.32	Gam	$\alpha = 0.945$ $\beta = 10.943$
	烈度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.58	0.59	0.56	0.39	4.01	1.13	0.90	Wb	$\alpha = 0.591$ $\beta = 4.086$
	面积	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2.25	1.13	1.23	0.95	1.99	1.54	1.05	Wb	$\alpha = 0.937$ $\beta = 0.861$ $\alpha = 0.120$
	迁移距离	×	×	×	×	✓	✓	✓	10.56	10.68	10.62	13.48	6.15	1.32	1.07	GP	$\beta = 1838.4$ $\mu = -360.5$
农业干旱	历时	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.56	0.89	0.81	0.63	4.77	0.65	0.53	GP	$\alpha = -0.037$ $\beta = 11.637$ $\mu = 0.717$
	烈度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1.70	0.36	0.40	0.95	4.53	1.29	1.20	LogL	$\alpha = 0.882$ $\beta = 1.202$
	面积	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.87	0.66	0.72	1.02	4.49	0.84	0.65	GP	$\alpha = 0.210$ $\beta = 0.270$ $\mu = 0.015$
	迁移距离	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2.55	2.21	2.20	2.19	2.31	1.03	0.87	GP	$\alpha = 0.523$ $\beta = 705.96$ $\mu = -125.13$

注: α 为形状参数; β 为尺度参数; μ 为位置参数; “✓”表示通过 K-S 检验, “×”表示未通过 K-S 检验。

3.3 响应关系模拟效果对比

根据建立的气象干旱与农业干旱特征变量间的 Copula 函数非线性关系, 利用后 23 场气象干旱历时、烈度、面积、迁移距离模拟对应的农业干旱特征变量值, 并与第 3.1 节确定的最优响应关系模拟结果进行对比。图 3 为不同响应关系模型的农业干旱特征模拟值和实测值的泰勒指数图, 图中辐射线表示模型模拟值和实测值之间的相关系数, 模拟值与原点之间的距离表示其相对于实际值的标准差, 模拟值到参考点 REF 的距离表示其与实际值之间的均方根误差(图中红线曲线)。模拟值和实测值之间的相关系数越高、均方根误差越小、模拟与观测值标准差之比越接近于 1, 说明模型的模拟效果越好^[26]。

由图 3 可见, 对于农业干旱历时, 基于 Copula 函数的非线性关系模型和多项式模型的模拟值和实测值之间的相关系数均集中在 0.9 ~ 0.95, 而多项式模拟结果与实测值之间的均方根误差较小且标准差之比更接近于 1, 说明多项式模型的模拟效果更好; 对于农业干旱烈度, 基于 Frank Copula 函数的非线性关系模型的模拟值和实测值之间的相关系数最大、均方根误差更小, 为干旱烈度的最优响应关系模型; 对于农业干旱面积, 指数模型相比基于 Copula 函数的非线性关系模型, 模拟值和实测值之间的相关系数(0.7 ~ 0.8)更大、均方根误差更小、标准差

之比更大, 为干旱面积的最优响应模型; 对于农业干旱迁移距离, 基于 Copula 函数的非线性关系模型和线性模型的模拟值和实测值之间的相关系数均集中在 0.6 ~ 0.7, 而线性模型的均方根误差较小且标准差之比更接近于 1, 说明线性模型对干旱迁移距离的模拟效果更好。

综上所述, 研究区气象干旱与农业干旱历时、烈度、面积和迁移距离的最优响应关系模型分别为多项式模型、基于 Frank Copula 函数的非线性关系模型、指数模型和线性模型。在已知气象干旱特征变量的条件下, 可利用最优响应关系模型模拟得到若发生气象干旱时, 相应的农业干旱特征变量值, 可为提前做好防旱抗旱准备提供理论指导。

3.4 气象干旱与农业干旱特征变量响应概率特征

对匹配成功的气象干旱与农业干旱特征变量的边缘分布函数以及它们之间的联合函数(Copula 函数)进行优选, 结果见表 4。由表 4 可知, 匹配成功后的气象、农业干旱历时的最优边缘分布函数分别为 GEV 分布和 GP 分布, 干旱烈度的最优边缘分布函数分别 Wb 分布和 LogN 分布, 干旱面积和干旱迁移距离的最优边缘分布函数均为 GP 分布。气象干旱与农业干旱历时的最优联合分布函数为 Gumbel Copula 函数, 气象干旱与农业干旱烈度、面积和迁移距离的联合概率分布最优构建模型均为 Frank Copula 函数。

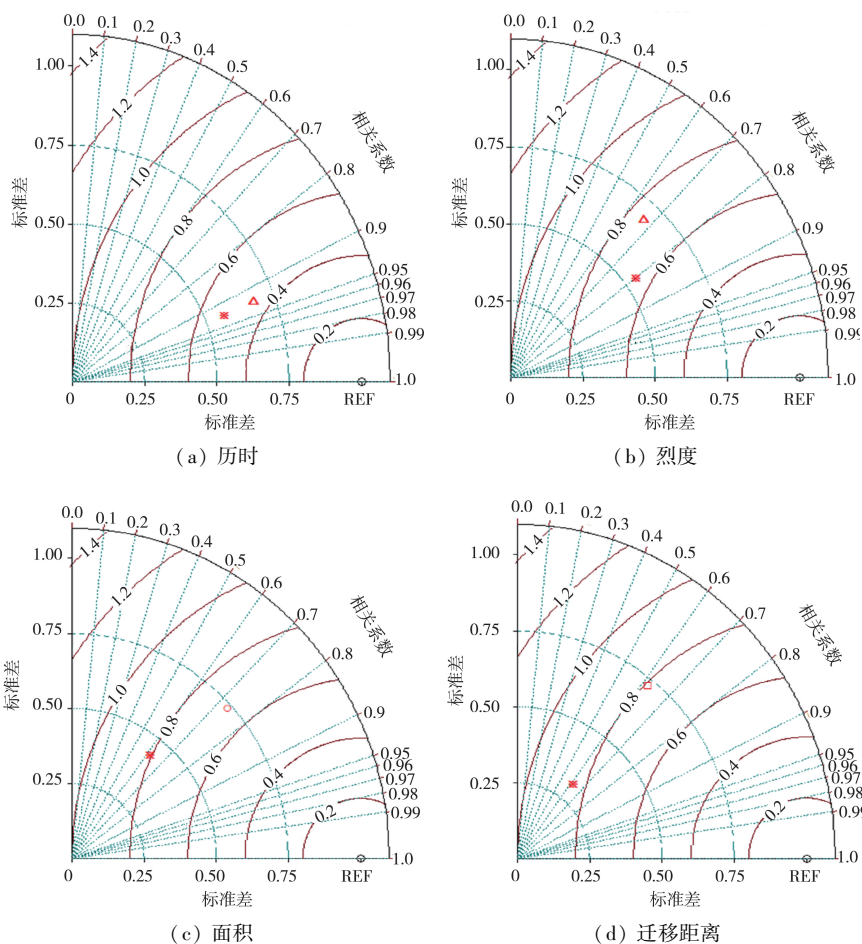


图 3 不同响应关系模型的农业干旱特征变量模拟值和实测值的泰勒指数图

Fig. 3 Taylor diagram of simulation from various response models and observation of agricultural drought variables

表 4 匹配成功的气象干旱与农业干旱特征变量的最优边缘分布函数及参数

Table 4 Optimal marginal distribution functions with estimated parameters of meteorological and agricultural drought variables after successful matching

类型	干旱特征变量	K-S 检验							A-D 统计量							最优分布	参数
		Gam	LogL	LogN	Wb	P-III	GEV	GP	Gam	LogL	LogN	Wb	P-III	GEV	GP		
气象干旱	历时	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.30	0.57	0.51	0.36	4.35	0.30	0.39	GEV	$\alpha = 0.254$ $\beta = 4.819$ $\mu = 5.175$
	烈度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.38	0.63	0.56	0.26	4.08	0.77	0.48	Wb	$\alpha = 0.752$ $\beta = 4.068$
	面积	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2.15	1.72	1.73	0.83	1.17	0.98	0.54	GP	$\alpha = -0.697$ $\beta = 1.539$ $\mu = -0.058$
	迁移距离	×	×	×	×	✓	✓	✓	14.11	14.56	14.47	13.39	9.69	1.01	0.68	GP	$\alpha = 0.118$ $\beta = 1475.9$ $\mu = -198.27$
农业干旱	历时	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.44	0.93	0.79	0.54	4.51	0.59	0.37	GP	$\alpha = -0.122$ $\beta = 11.62$ $\mu = 0.745$
	烈度	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	3.13	0.39	0.36	0.31	4.91	1.76	1.52	LogN	$\beta = 1.732$ $\mu = 0.289$
	面积	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1.19	0.80	0.77	1.45	4.24	0.99	0.65	GP	$\alpha = 0.173$ $\beta = 0.251$ $\mu = 0.024$
	迁移距离	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	4.81	4.30	4.29	4.31	4.44	1.79	1.27	GP	$\alpha = 0.438$ $\beta = 722.67$ $\mu = -95.41$

根据式(6)计算出气象干旱与农业干旱历时、烈度、面积和迁移距离之间的响应概率,结果如图4。整体上,农业干旱特征变量对相应的气象干旱特征变量的响应概率随着气象干旱特征变量的增加而增加。如当气象干旱历时分别大于2月、5月、10月和15月时,发生历时大于10月的农业干旱的概率分别为49.5%、65.4%、92.8%和98.9%,当气象干旱烈度大于300月·万km²、600月·万km²、900月·万km²、1200月·万km²、1500月·万km²、1800月·万km²、2100月·万km²时,发生烈度大于500月·万km²的农业干旱事件的概率分别为46.6%、64.3%、73.9%、78.9%、81.5%、83.1%和83.9%。可以看出,农业干旱烈度对气象干旱烈度的响应概率在气象干旱烈度大于某一值时达到一个相对稳定的概率水平,如当气象干旱烈度大于2000月·万km²时,发生烈度大于1000月·万km²的农业干旱的概率保持在60%左右,当气象干旱烈度大于2500月·万km²时,发生烈度大于2500月·万km²的农业干旱的概率保持在30%左右;且当农业干旱烈度大于3500月·万km²时,其对任意烈度的气象干旱事件的响应概率均小于20%。

农业干旱面积对气象干旱面积的响应概率特征表现出与干旱历时相类似的规律,但不同概率水平等值线的斜率有所减小且它们之间的距离有所增加,表明随着气象干旱面积的增加,农业干旱面积对其的响应概率变得相对平缓一些,如当气象干旱面积分别大于20万km²、40万km²、60万km²、80万km²、100万km²、120万km²、140万km²时,发生面积大于40万km²的农业干旱的响应概率分别为58.7%、66.4%、74.2%、81.3%、86.9%、90.9%、93.5%,且干旱面积小于10万km²的农业干旱事件对任意面积的气象干旱事件的响应概率均大于90%。农业干旱迁移距离对气象干旱迁移距离的响应特征与干旱烈度响应特征基本一致^[27-28],不同的是干旱迁移距离响应概率较小区域包含的气象干旱与农业干旱事件对相对较多,如当农业干旱迁移距离大于5500km时,其对任意迁移距离的气象干旱事件的响应概率均小于20%。

4 讨论

气象干旱与农业干旱在发生和发展机制方面有着密切的内在联系,它们之间的时空响应关系十分

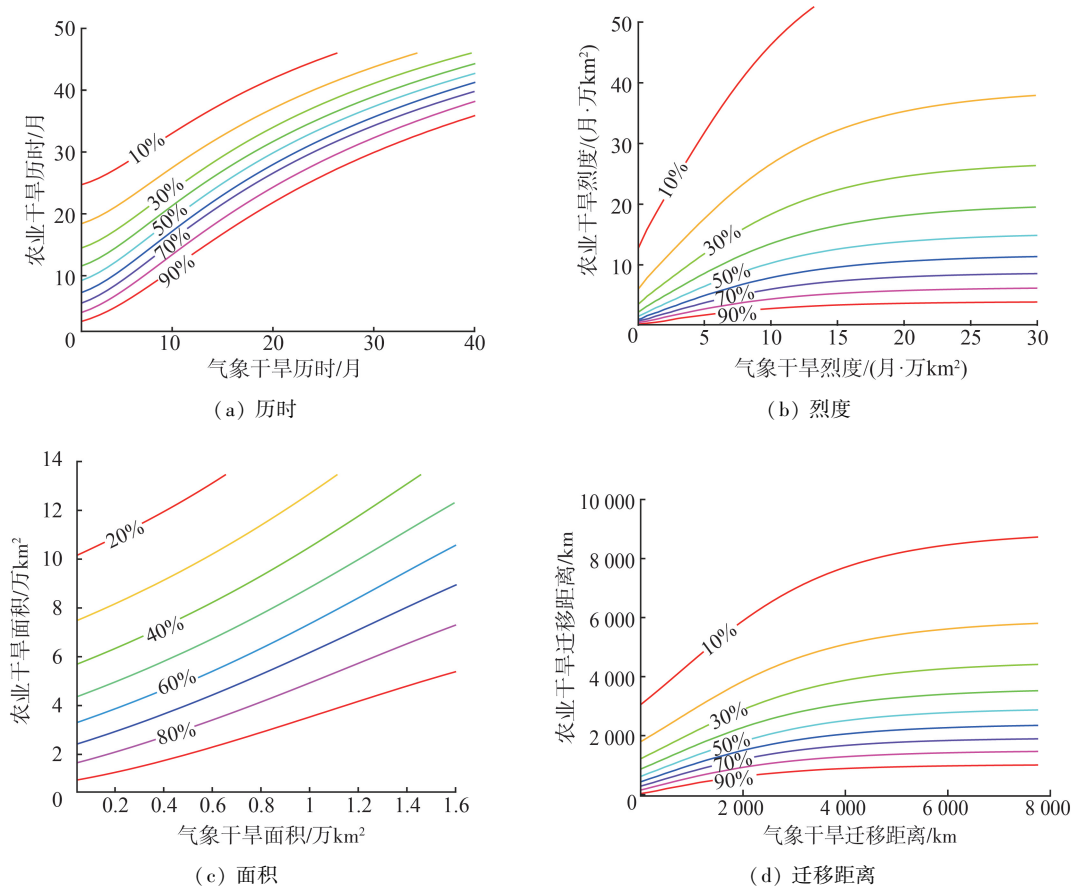


图4 气象干旱与农业干旱特征变量的响应概率等值线图

Fig.4 Response probability isogram between meteorological and agricultural drought variables

复杂,响应过程会出现合并、延长、滞后、衰减等现象^[29-30],如一场大面积、长历时的气象干旱可能引发多场小面积的农业干旱或多场小面积、低强度的气象干旱可能引发一场大面积的农业干旱。从时空角度对具有成因联系的气象、农业干旱事件进行匹配,能够保证它们在时空尺度上的错综复杂关系更接近实际状况,将两者间的响应联系更加形象立体化。较以往单一时间尺度的干旱响应关系研究^[31],从三维视角较为全面地刻画了气象、农业干旱间的时空响应关系及响应概率特征。

基于 Copula 函数的条件概率分布建立成对的气象和农业干旱特征变量之间的响应关系,能够准确描述各类干旱之间的非线性协变关系。与其他统计模型一样,基于 Copula 函数方法的响应模型的预测性能也依赖于数据样本的代表性^[32],本文将极端干旱事件纳入模型构建,一定程度上提高了农业干旱事件预测结果的可靠性^[24]。研究结果明确了西北地区农业干旱对气象干旱变量的响应概率特征曲线,可将其与确立的气象干旱与农业干旱特征变量间的最优响应关系模型相结合,构建农业干旱预警系统。将研究区发生的气象干旱特征值作为输入,通过最优响应关系模型可以推求出对应的农业干旱特征值,再通过它们之间的响应概率特征曲线便可获知相应程度农业干旱的发生概率,基于响应概率和干旱特征值实现农业干旱预测的目的。上述结果能够回答不同程度的气象干旱引发农业干旱的可能性大小的问题,对农业干旱的预警具有一定的参考价值,为水行政主管部门对于干旱条件下的水资源系统评估提供有价值的信息,同时能够为实际的农业生产活动及抗旱减灾方案制定等提供理论参考。

5 结 论

a. 从时空多角度识别气象、农业干旱事件并进行干旱事件对匹配,有利于从多维度全面阐释农业干旱对气象干旱的响应机制。

b. 基于 Copula 函数的条件概率分布建立了气象、农业干旱特征变量间的非线性关系,能够较好地描述它们之间的非线性协变关系。

c. 气象干旱与农业干旱在历时、烈度、面积、迁移距离 4 个特征变量的最优响应关系模型,分别为多项式模型 $f(x) = 0.006x^2 + 0.73x + 3.02$ 、基于 Frank Copula 函数的非线性关系模型(参数为 12.86)、指数模型 $f(x) = \exp(1.14x^2 - 0.91x - 1.99)$ 和线性模型 $f(x) = 0.83x - 80.44$ 。

d. 基于贝叶斯网络概率模型建立了农业干旱特征变量对气象干旱特征变量的响应概率曲线,响

应概率随着气象干旱特征变量的增大而增大。

参考文献:

- [1] 闫昕畅,张强,闫晓敏,等.全球干旱区分布特征及成因机制研究进展[J].地球科学进展,2019,34(8):826-841. (YAN Xinyang, ZHANG Qiang, YAN Xiaomin, et al. An verview of distribution characteristics and formation mechanisms in Global Arid Areas[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 826-841. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 周帅,王义民,畅建霞,等.黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J].水利学报,2019,50(10):1231-1241. (ZHOU Shuai, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241. (in Chinese))
- [4] 李军,吴旭树,王兆礼,等.基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究[J].水利学报,2021,52(4):1-12. (LI Jun, WU Xushu, WANG Zhaoli, et al. Changes of drought characteristics in future in Pearl River Basin describing by a new comprehensive standardized drought index [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 1-12. (in Chinese))
- [5] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹.生态干旱的概念及研究进展[J].水资源保护,2021,37(4):15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 15-21. (in Chinese))
- [6] 张更喜,栗晓玲,郝丽娜,等.基于 NDVI 和 scPDSI 研究 1982-2015 年中国植被对干旱的响应[J].农业工程学报,2019,35(20):145-151. (ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, HAO Lina, et al. Response of vegetation to drought based on NDVI and scPDSI data sets from 1982 to 2015 across China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 145-151. (in Chinese))
- [7] 陶然,张珂.基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J].水资源保护,2020,36(5):50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 50-56. (in Chinese))

- [8] 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))
- [9] 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))
- [10] HUNAG S, LU P, HUANG Q, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 184-195.
- [11] WANG F, WANG Z, YANG H, 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.
- [12] 李运刚,何娇楠,李雪. 基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J]. 地理科学进展, 2016, 35 (6): 758-767. (LI Yungang, HE Jiaonan, LI Xue. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI Indices [J]. Progress in Geography, 2016, 35 (6): 758-767. (in Chinese))
- [13] 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分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Analysis on temporal and spatial 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))
- [14] WU J, CHEN X, YAO H, et al. Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 495-507.
- [15] HAO Z, SINGH V P. Drought characterization from a multivariate perspective: a review [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 668-678.
- [16] ZHU Y, WANG W, SINGH V P, et al. Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection [J]. Science of the Total Environment, 2016, 571: 1058-1068.
- [17] 姜田亮,栗晓玲,郭盛明,等. 西北地区植被耗水量的时空变化规律及其对气象干旱的响应[J]. 水利学报, 2021, 52 (2): 229-240. (JIANG Tianliang, SU Xiaoling, GUO Shengming, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water consumption and its response to meteorological drought in Northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 571: 1058-1068. (in Chinese))
- [18] 廉陆鹂,刘滨辉. 近 58a 我国西北地区干期与湿期变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42 (6): 1301-1309. (LIAN Luyao, LIU Binhui. Change characteristics of dry and wet spells in northwest China during the past 58 years [J]. Arid Land Geography, 2019, 42 (6): 1301-1309. (in Chinese))
- [19] XU K, YANG D W, YANG H B, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: a climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253-264.
- [20] 刘丽伟,魏栋,王小巍,等. 多种土壤湿度资料在中国地区的对比分析[J]. 干旱气象, 2019, 37 (1): 40-47. (LIU Liwei, WEI Dong, WANG Xiaowei, et al. Multi-data intercomparison of soil moisture over China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37 (1): 40-47. (in Chinese))
- [21] SEYYEDI H, ANAGNOSTOU E N, BEIGHLEY E. Hydrologic evaluation of satellite and reanalysis precipitation datasets over a mid-latitude basin [J]. Atmospheric Research, 2015, 164-165: 37-48.
- [22] 冯凯,栗晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (8): 103-113. (FENG Kai, SU Xiaoling. Spatiotemporal response characteristics of agricultural drought to meteorological drought from a three-dimensional perspective [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (8): 103-113. (in Chinese))
- [23] HAO Z, HAO F, 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.
- [24] ZHU Y, LIU Y, WANG W, et al. Three-dimensional characterization of meteorological and hydrological droughts and their probabilistic links [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124016.
- [25] 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.
- [26] 张凯锋,曹宁,张敏. CMIP5 多模式下的 ENSO 模拟评估及非对称性特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2019, 34 (3): 278-286. (ZHANG Kaifeng, CAO Ning, ZHANG Min. Evaluation and asymmetry feature analysis of ENSO events in CMIP5 multi-models [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2019, 34 (3): 278-286. (in Chinese))
- [27] 蔣桂芹. 干旱驱动机制与评估方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.

- [28] 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))
- [29] VAN LOONA F, VAN LANEN H A J. A process-based typology of hydrological drought[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2012,16(7):1915-1946.
- [30] LIU Y, ZHU Y, REN L, et al. Understanding the spatiotemporal links between meteorological and hydrological droughts from a three-dimensional perspective [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019,124(6):3090-3109.
- [31] 吴杰峰,陈兴伟,高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学,2017,32(1):199-204. (WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions[J]. Journal of Catastrophology,2017,32(1):199-204. (in Chinese))
- [32] WONG G, VAN LANEN H A J, TORFS P J J F. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought [J]. Hydrological Sciences Journal,2013,58(2):253-270.

(收稿日期:2022-02-16 编辑:王芳)

(上接第24页)

- [17] 许心怡. 多源数据下径流模拟的不确定性问题研究 [D]. 天津:天津大学,2021.
- [18] MULETA M K. Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(6):756-767.
- [19] WU Hongjing, CHEN Bing. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE,SUFI-2,and Para Sol methods [J]. Ecological Engineering,2015,76:110-121.
- [20] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [J]. Journal of Hydrology,2007,333(2):413-430.
- [21] 杨祎. SWAT 模型径流模拟的不确定性研究 [D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [22] ABBASPOUR K C. SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs:a user manual[R]. Bern:Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology,2014.
- [23] 王京晶,徐宗学,赵刚,等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty analysis of urban storm water simulation [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):65-71. (in Chinese))
- [24] ABBASPOUR K C, JOHNSON C A, VAN GENUCHTEN M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure [J]. Vadose Zone Journal,2004,3(4):1340-1352.
- [25] 付军,冯平. 降水丰枯及下垫面变化对滦河干流径流量的影响[J]. 水力发电学报,2015,34(9):10-19. (FU Jun,FENG Ping. Influence of high and low precipitations and underlying surface changes on runoff in the Luan River mainstream [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(9):10-19. (in chinese))
- [26] ABBASPOUR K C,ROUHOLAHNEJAD E,VAGHEFI S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model [J]. Journal of Hydrology,2015,524:733-752.
- [27] LI Mei,DI Zhenhua,DUAN Qingyun. Effect of sensitivity analysis on parameter optimization: case study based on streamflow simulations using the SWAT model in China [J]. Journal of Hydrology,2021,603:126896.
- [28] FICKLIN D L,BARNHART B L. SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds [J]. Journal of Hydrology,2014,519:2081-2090.
- [29] THAVHANA M P,SAVAGE M J,MOELETSI M E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2018,105:115-124.
- [30] RAFIEI EMAM A,KAPPAS M,HOANG KHANH LINH N,et al. Hydrological modeling in an ungauged basin of central Vietnam using SWAT model [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2016,1:1-33.

(收稿日期:2022-01-05 编辑:王芳)