

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.001

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:薛瑞华,罗军刚,李少轩,景鑫. 关中地区气象干旱时空变化特征分析[J]. 西安理工大学学报,2023,39(2): 151-161.

XUE Ruihua, LUO Jungang, LI Shaoxuan, JING Xin. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of meteorological drought in Guanzhong Area[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2): 151-161.

关中地区气象干旱时空变化特征分析

薛瑞华, 罗军刚, 李少轩, 景鑫

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 干旱对农业和供水的影响,给地区造成了十分严重的经济损失,对关中地区进行干旱特征分析可为防旱抗旱工作提供指导。本文应用 SPI12 指数结合游程理论提取并分析关中地区的干旱特征,并通过 Copula 函数进行干旱历时与干旱烈度的重现期计算。结果表明:① Gaussian、Clayton 以及 BB1 函数更适用于于关中地区干旱特征联合分布计算;② 近年来关中地区整体干旱情况有所加剧,其中宝鸡市与渭南市干旱加重较为明显;③ 宝鸡市、咸阳市以及西安市干旱烈度大、历时长,干旱情况较为严重,渭南市次之,铜川市干旱情况较轻;④ 关中地区长重现期主要分布在铜川市以及渭南市西北部地区,短重现期主要分布在宝鸡市、西安市西部以及渭南市东部部分地区。

关键词: SPI12; 贝叶斯框架; Copula 函数; 重现期

中图分类号: P426.616

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)02-0151-11

Analysis of temporal and spatial variation characteristics of meteorological drought in Guanzhong Area

XUE Ruihua, LUO Jungang, LI Shaoxuan, JING Xin

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The impact of drought on agriculture and water supply has caused significant economic losses to the region. An analysis of drought characteristics of the Guanzhong Area can be of guidance for drought prevention and drought relief work. In this paper, we apply the SPI12 index combined with run-length theory to extract and analyze the drought characteristics of Guanzhong Area, and perform the recurrence period calculation of drought ephemeris and drought intensity by Copula function. The results showed that: ① Gaussian, Clayton and BB1 functions are more suitable for calculating the joint distribution of drought characteristics in Guanzhong Area. ② In recent years, the overall drought situation in Guanzhong has increased, especially in Baoji City and Weinan City. ③ In Baoji, Xianyang and Xi'an, the intensity of drought was high and the duration was long, so the drought situation was more serious; Weinan was next, and Tongchuan was less arid. ④ In Guanzhong Area, the long return period is mainly distributed in Tongchuan and northwest Weinan, while the short return period is mainly distributed in Baoji, west Xi'an and a few parts of eastern Weinan.

Key words: SPI12; Bayesian framework; Copula function; return period

收稿日期: 2022-06-29; 网络首发日期: 2022-10-12

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20221012.1110.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679186); 陕西水利科技计划项目(2018slkj-4)

第一作者: 薛瑞华, 女, 硕士生, 研究方向为干旱风险管理。E-mail: 1365102958@qq.com

通信作者: 罗军刚, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水资源管理。E-mail: jgluo@xaut.edu.cn

干旱是一种在世界各地频繁发生的慢性自然灾害,其发生与缓解都不如其他自然灾害那么迅速^[1],且干旱的发生通常由地区长期异常降水造成^[2],这导致与其他大多数自然灾害相比,干旱的影响更大、范围更广、持续时间更长。干旱通常分为四类:气象、农业、水文和社会经济干旱^[3]。气象干旱主要表现为降雨量不足^[4]。当一定时期内的降水量持续少于正常状态时,河流径流量会相应减少形成水文干旱,当干旱持续发展时,土壤含水量将继续减少直到不能满足生物生长的需水量而形成农业干旱,最终导致作物减产造成经济损失形成社会经济干旱^[5]。因此,气象干旱是形成其他类型干旱的原因,监测气象干旱对减轻干旱危害至关重要^[6]。

关中地区是陕西省最典型、最重要的农业区,受气候地形的影响,关中地区干旱频发。据统计,近百年来关中地区河流径流量严重减少,水资源开发难度大,但随着经济的发展以及人口的增长,对水的需求迅速增加,如今缺水率约为 25%且仍在上升^[7]。最近一次大型旱灾是 2014 年 8 月上旬,关中地区遭遇了 57 年以来最严重的大旱,渭河、洛河等河流的径流比往年同期偏枯一至四成,近 20 万人用水紧张,咸阳 65 万亩作物受旱,西安 97 万亩作物受旱、11 万亩绝收^[8]。因此,需密切关注干旱持续时间、严重程度等干旱特征,分析其变化趋势与重现期,并根据干旱特征采取合理的应对措施以减少旱灾造成的影响。

目前,关于关中地区的气象干旱研究已有许多。Zhang 等^[9]通过标准化降水蒸散指数分析了 1955—2015 年间关中盆地的干旱变化趋势;栗晓玲等^[10]采用 Gumbel Copula 函数构建气象水文综合干旱指数,探讨了该指数的适用性,并使用该指数分析了关中地区的干旱周期与频率;Chen 等^[11]探讨了 1928—1931 年陕西关中地区极端干旱事件的社会影响。综上,已有的关中地区气象干旱研究,主要是基于干旱指数进行干旱频率、干旱强度等特征变量的单独分析,少有对多特征变量进行联合分析的。而干旱的发生与多个变量相关,其特征以多种方式体现,多特征变量联合分析可以更好地表征复杂的干旱条件及其影响^[12],因此,分析干旱多特征变量的联合关系对研究干旱有着十分重要的意义。

Copula 是最常用的多元分析方法之一,适用于多变量分析,已在极端降水、洪水频率分析和干旱特征分析等方面得到广泛应用^[13]。刘瑞琳等^[14]利用游程理论、单变量和多变量 Copula 方法,得到了横断山地区的干旱特征在不同重现期下的联合分布特

征。李京芳等^[15]运用 Copula 函数计算干旱特征变量之间的联合累积概率,分析了联合重现期和同现重现期以及汉江流域水文干旱风险及驱动因素。因此,基于 Copula 的干旱特征分析在单独考虑边际分布或多变量相关性建模方面具有优势,然而在使用 Copula 进行分析时,存在参数计算、边际函数选择和 Copula 函数选择等多个方面的不确定性^[16]。

贝叶斯网络利用可信区间解决了参数的不确定性问题^[17],因此本文采用包括基于贝叶斯框架的马尔可夫链蒙特卡罗方法(Markov chain Monte Carlo, MCMC)与局部优化算法在内的多种方法进行参数计算,优选最合适的参数,并通过比较广泛的边际函数与 Copula 函数来有效解决不确定性问题,为关中地区多特征变量联合分析提供有效方法。

本文基于 SPI12 时间序列,通过游程理论识别干旱特征,采用局部优化算法与基于贝叶斯框架下的马尔可夫链蒙特卡罗模拟两种算法进行 Copula 参数估计,得到最优的 Copula 函数及其参数;对干旱历时与干旱烈度进行联合分析得到关中地区的干旱分布特征,可为关中地区干旱风险评估与水资源管理规划提供依据。

1 研究区概况与数据

关中地区总面积 5.55 万 km²,位于陕西省中部,属于渭河流域,由南向北从秦岭延伸至北山,由西向东从宝鸡延伸至黄河,处于温暖带半湿润与半干旱气候的过渡地带,属大陆性季风气候^[18],西部、北部和南部海拔较高,东部和中部地区海拔较低。地貌类型主要由漫滩、阶地和黄土台地组成,行政区域包括杨凌示范区以及西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川 5 市,是陕西省经济最发达的地区。

本文收集到关中地区 20 个气象站 1979—2018 年的日降水资料(来源于国家青藏高原科学数据中心 <http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),在对数据进行计算前,对缺测的数据采用链式方程多重插补法进行插补。研究区域与气象站的分布如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 标准化降水指数

标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)是用来表示某时段降水量出现概率多少的指标,适用于不同地区的干旱检测与评估^[19]。

$$S_{PI} = - \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right], 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (1)$$

$$S_{PI} = + \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right], 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (2)$$

$$\begin{cases} t = \sqrt{\text{Ln} \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)}, \text{ if } 0 < H(x) \leq 0.5 \\ t = \sqrt{\text{Ln} \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)}, \text{ if } 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $H(x) = q + (1 - q)G(x)$, q 是降雨量为 0 的概率, $G(x)$ 是服从伽马分布的累计概率; $C_0 = 2.515\ 517$, $C_1 = 0.802\ 853$, $C_2 = 0.010\ 328$, $d_1 =$

$1.432\ 788$, $d_2 = 0.189\ 29$, $d_3 = 0.001\ 308$ 。

SPI 指数计算结果: $S_{PI} > -0.5$ 表示无旱, $-1.0 < S_{PI} \leq -0.5$ 表示轻旱, $-1.5 < S_{PI} \leq -1.0$ 表示中旱, $-2.0 < S_{PI} \leq -1.5$ 表示重旱, $S_{PI} \leq -2.0$ 表示特旱。

SPI 指数用于度量多种时间尺度上的降水不足, 关中地区干旱频发, 几乎年年有旱, 因此采用 12 个月时间尺度的 SPI 值(记为 SPI12)反映长期降雨模式, 分析关中地区气象干旱的年际变化。

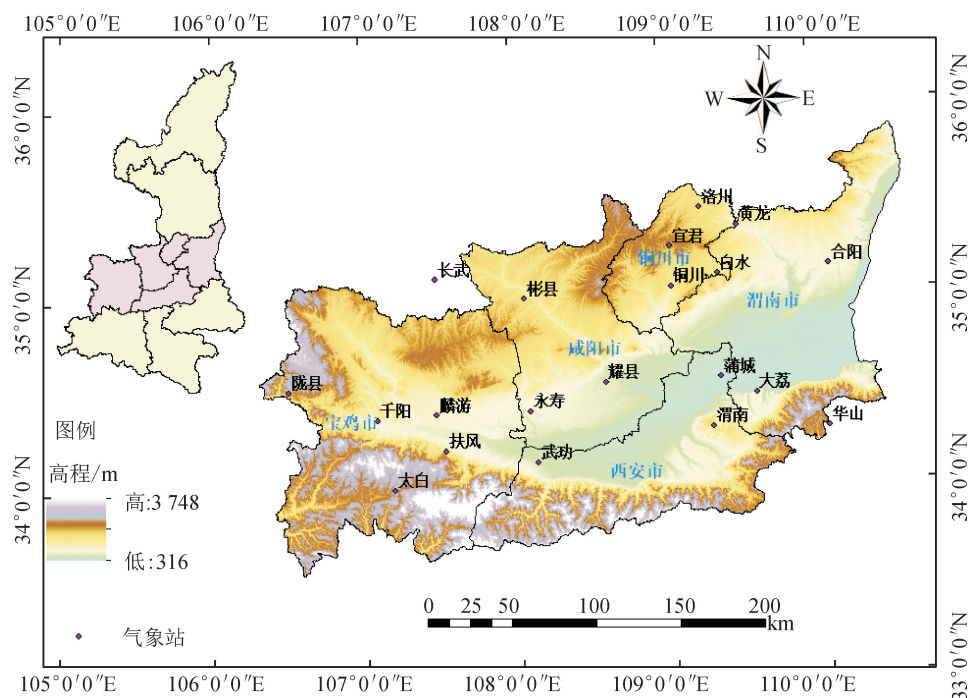


图 1 关中地区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological sites in Guanzhong Area

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2017)1267 号的标准地图制作,底图无修改。

2.2 游程理论

游程理论是由 Yevjevich^[20] 提出的研究干旱特征最常用的方法之一^[21]。考虑到实际中会出现较大降雨, 导致一次严重干旱事件的过程分割, 从而弱化干旱的实际严重程度, 故本研究采用王晓峰等^[22] 提出的三截取游程理论, 并在此基础上进行调整, 得到适用于 SPI 指数的干旱事件识别游程理论。

1) 根据《气象干旱等级》(GB/T 20481—2017), 当 SPI 值小于或等于 -0.5 时, 有干旱发生。

2) 若只识别出单独一个月的事件, 且这个月的 SPI 值大于 -0.75 , 就认为这个月没有发生干旱。

3) 若两次干旱事件之间仅间隔一个月, 且间隔月的 SPI 值小于 0, 则将两次干旱事件合并为一次

干旱事件。

通过确定出的干旱事件, 基于三截取游程理论可提取出持续时间和烈度等干旱事件的基本特征^[23]。其中, 干旱历时表示单次干旱过程的持续时间, 干旱烈度表示单次干旱过程持续时间内 SPI 的累加值。

2.3 自适应 Copula 函数选择

自适应 Copula 函数选择是依据拟合优度的评价结果选取其中最优的方法作为 Copula 参数的估计方法。本文采用了两种算法进行 Copula 的参数估计, 分别是局部优化算法与基于贝叶斯框架下的马尔可夫链蒙特卡罗模拟算法。

2.3.1 边缘分布与相关性检验

在 Matlab 中采用 MvCAT 工具箱所包含的指数分布、伽马分布、威布尔分布等在内的 16 种函数进行单变量边缘分布函数拟合,并对拟合后的函数进行 K-S 检验,通过赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)进行拟合优度检验,根据 AIC 最小值原则选出合适的边缘分布函数。

采用 Kendall 秩相关系数法、Pearson 相关系数法和 Spearman 秩相关系数法对干旱历时与干旱烈度进行关联性检验。

2.3.2 Copula 函数

Copula 函数通常用于从单变量边际分布生成多变量分布,该技术的理论基础是由 Sklar^[24]定义的。根据 Sklar 定理,如果 F_{XY} 是相依随机变量 X 和 Y 的二维联合分布函数,其边缘分布函数为 F_X 和 F_Y ,则存在一个 Copula C ,即:

$$P(X \leq x, Y \leq y) = F_{XY}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (4)$$

上面定义的函数 F_{XY} 是一个具有边缘分布函数 F_X 和 F_Y 的二维函数。

本文采用了 MvCAT 工具箱中的 Gaussian, t, Clayton, Frank, Gumbel 等 26 种 Copula 函数进行计算^[25]。

2.3.3 局部优化算法

本文采用的局部优化算法是一种基于梯度的内点优化算法^[26]。此算法通过一个稠密的拟牛顿近似方法(dense quasi-Newton approximation)估算 Hessian 矩阵,并使用内点法寻找可行解空间。

在求解参数的过程中,每次的参数估计将从随机的 30 个点出发寻找最优解,以此减少陷入局部最优的概率。

2.3.4 贝叶斯框架

贝叶斯统计推断对于不确定性评估和参数估计是有效的,其中假定参数为具有概率分布的随机变量^[16]。贝叶斯推理的基本定理是:

$$\pi(\theta | Y_{\text{obs}}) = \frac{\pi(\theta)p(Y_{\text{obs}} | \theta)}{p(Y_{\text{obs}})} \propto \pi(\theta)L(\theta | \hat{Y}) \quad (5)$$

式中: $\pi(\theta | Y_{\text{obs}})$ 和 $\pi(\theta)$ 分别为后验和先验参数概率密度分布; $p(Y_{\text{obs}}) = \int p(\theta)p(\hat{Y} | \theta)d\theta$ 作为标准化常数的边际可能性; $p(Y_{\text{obs}} | \theta) \equiv L(\theta | Y_{\text{obs}})$ 是似然函数。然而,在实际应用中,参数的后验分布很难计算或解析逼近。MCMC 为参数的后验分布估计提供了一种简单有效的方法。

2.3.5 马尔科夫链蒙特卡洛模拟

本研究使用一种新混合进化的 MCMC 方法,

该方法采用自适应采样分布来描述贝叶斯环境中的后验参数区域。首先通过拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)算法对整个先验空间进行随机搜索,通过样本的随机分配从中选择出可能性值最高的样本作为马尔科夫链的起点,这种智能起点的选择使不同吸引区域的点作为起始点成为可能,从而避免了退化。在进行后验参数空间搜索时,采用 10% 概率的斯诺克方向更新和 90% 概率的并行方向更新,在并行方向中有 N_{AM} 条马尔科夫链采用自适应采样算法(adaptive metropolis, AM)丰富跳跃方向,增强 MCMC 早期的搜索能力,其他链则采用差分进化算法(differential evolution, DE)加快收敛速度。

2.3.6 拟合优度评价

在本研究中采用均方根误差(root mean square error, RMSE)、纳什效率系数(Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE)以及 AIC 进行 Copula 函数拟合优度检验。

1) 均方根误差

$$P_{ei} = \frac{m_i - 0.44}{n + 0.12} \quad (6)$$

$$M_{SE} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{ei} - P_i)^2 \quad (7)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{M_{SE}} \quad (8)$$

2) 纳什效率系数

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ei} - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_{ei} - \bar{P}_i)^2} \quad (9)$$

3) 信息准则

$$A_{IC} = n \ln(M_{SE}) + 2 \quad (10)$$

式中: P_{ei} 为联合分布经验频率; P_i 为联合分布理论频率; n 为样本容量; m_i 为干旱特征小于某一阈值的干旱事件发生的次数。

2.4 重现期计算

单变量重现期通常会高估或低估某一特定事件的风险率。因此,本研究计算了气象干旱特征的二变量重现期。该方法假设 X_1 、 X_2 代表与干旱事件相关的特征变量值, x_1 、 x_2 代表与干旱事件相关的特征变量序列对应干旱特征的给定阈值。

二维联合回归周期可以表示为:

$$T_{or} = \frac{N}{n \times P(X_1 \geq x_1 \cup X_2 \geq x_2)} = \frac{N}{n \times (1 - C(F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2)))} \quad (11)$$

二维共现重现期可以表示为:

$$T_{\text{and}} = \frac{N}{n \times P(X_1 \geq x_1 \cap X_2 \geq x_2)} = \frac{N}{n \times (1 - F_{X_1}(x_1) - F_{X_2}(x_2) + C(F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2)))}$$

(12)

式中: N 表示总观测次数; n 表示样本容量。

如图2所示,本文主要包括干旱指数计算、干旱特征识别、边缘分布函数筛选、构建 Copula 联合分布以及关中地区干旱特征分析这五个部分。

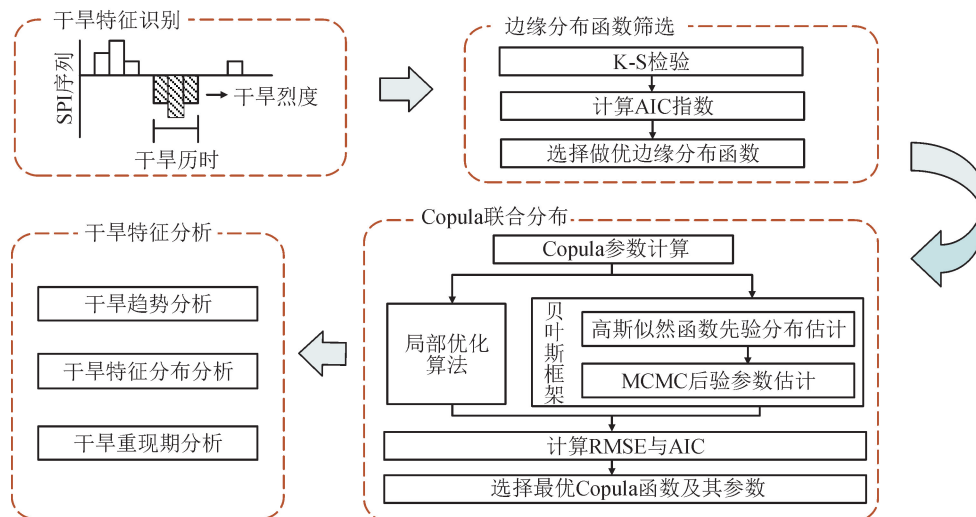


图2 干旱特征分析流程图

Fig. 2 Flowchart of drought feature analysis

3 结果分析

3.1 干旱特征

根据各测站的月累计降雨量数据,采用算数平均法计算出关中地区五个市的逐月累计降雨量,并根据逐月累计降雨量得到各市的 SPI12 时间序列。关中地区及五个市 1980—2018 年逐月累计降雨量与 SPI12 时间序列的变化如图 3 所示。从图中可以看出,关中地区整体的 SPI12 指数呈现下降趋势,宝鸡市与渭南市的 SPI12 指数有较明显的下降趋势,西安市和铜川市的 SPI12 指数呈现不明显的下降趋势,咸阳市的 SPI12 指数呈现不明显的上升趋势,表明在研究时段内关中地区整体的干旱愈发严重。

从图 3 可知,关中地区经常发生轻旱与中旱,但重旱与特旱的情况较少。关中地区在 1997 年间干旱情况十分严重,这与 1994—1997 年间降雨量偏少有着十分密切的关系,根据《中国气象灾害记录》记载,关中地区 1995 年全年降水严重偏少,其中上半年偏少达 6~8 成,9 月初至 12 月底降水偏少达 5~8 成,1997 年 4~7 月降水比常年偏少 3~9 成,8、9 月降水偏少 6~9 成^[27],与研究结果一致。从图 3 中还可知,近年来较为严重的干旱发生在 2014 年,这与报道的多个县区降水量偏少 5 成以上,出现大面积

未灌或少灌区域,部分地区的猕猴桃出现枯死现象的结果一致。

通过游程理论,对各市 SPI12 时间序列进行识别,得到宝鸡市、咸阳市、西安市、铜川市以及渭南市的干旱次数分别为 16 次、14 次、17 次、21 次以及 18 次。图 4 为不同地区干旱历时与干旱烈度的分布情况。关中地区整体的平均干旱历时为 7.55 月,其中宝鸡、咸阳、西安的平均干旱历时分别为 8.94 月、9.86 月以及 9.24 月,高于关中地区的平均干旱历时;渭南的平均干旱历时为 7.83 月,与关中地区的平均干旱历时相接近;铜川的平均干旱历时为 6.38 月,低于关中地区的平均干旱历时。关中地区的平均干旱烈度为 8.10,宝鸡、咸阳、西安、渭南的平均干旱烈度分别为 9.90、11.06、9.70 以及 9.24,均高于关中地区的平均干旱烈度;铜川的平均干旱烈度为 7.10,低于关中地区的平均值。宝鸡、咸阳以及西安的平均干旱历时与平均干旱烈度均较大,干旱情况较为严重;渭南市平均干旱历时较小,平均干旱烈度较大,且烈度的中位数远远小于平均值,表明渭南市多发小干旱事件,但也有极端干旱情况的出现;铜川市的平均干旱历时与平均干旱烈度均较小,表明铜川市的干旱情况较轻。

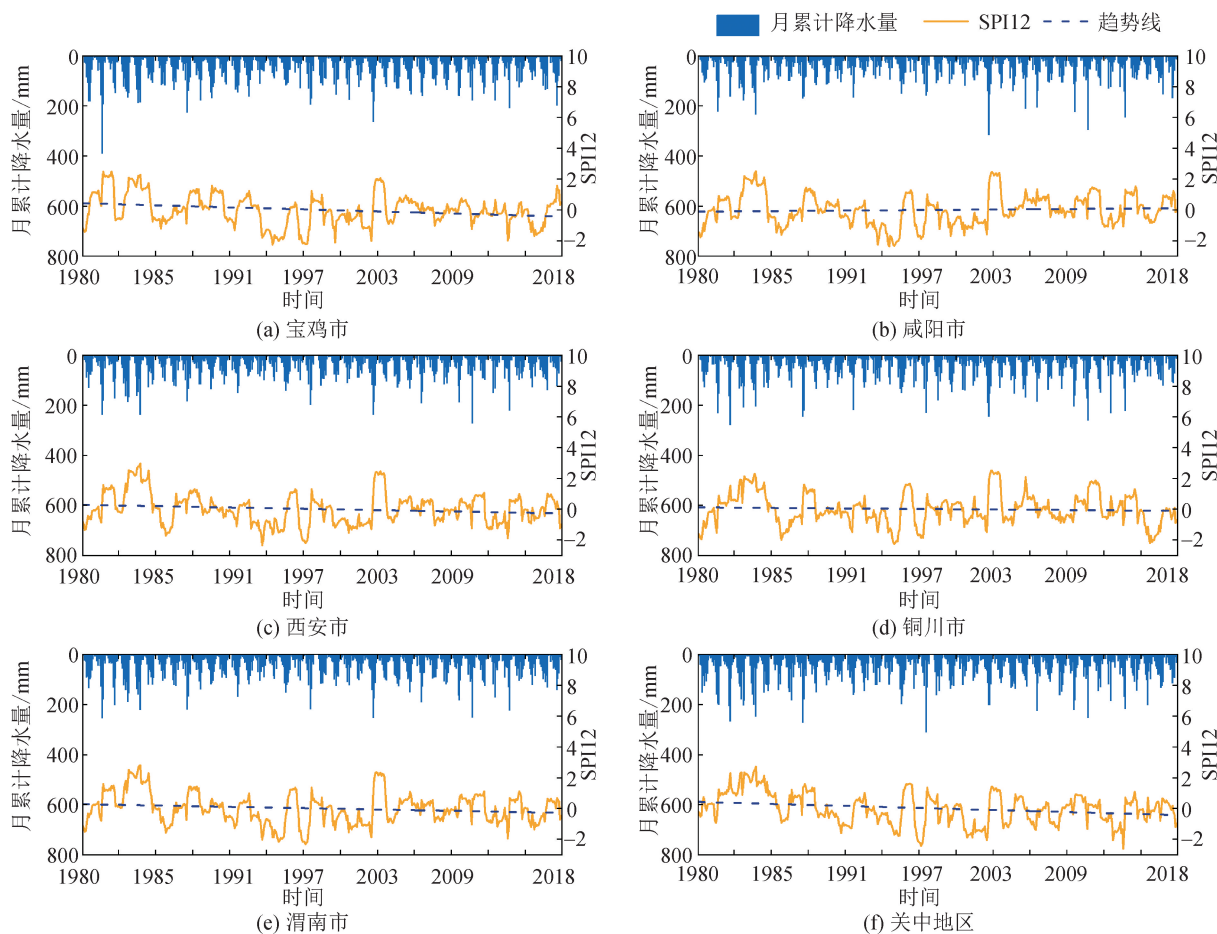


图 3 关中地区月累计降水量与 SPI12 指数变化图

Fig. 3 Monthly cumulative precipitation and SPI12 index changes in Guanzhong Area

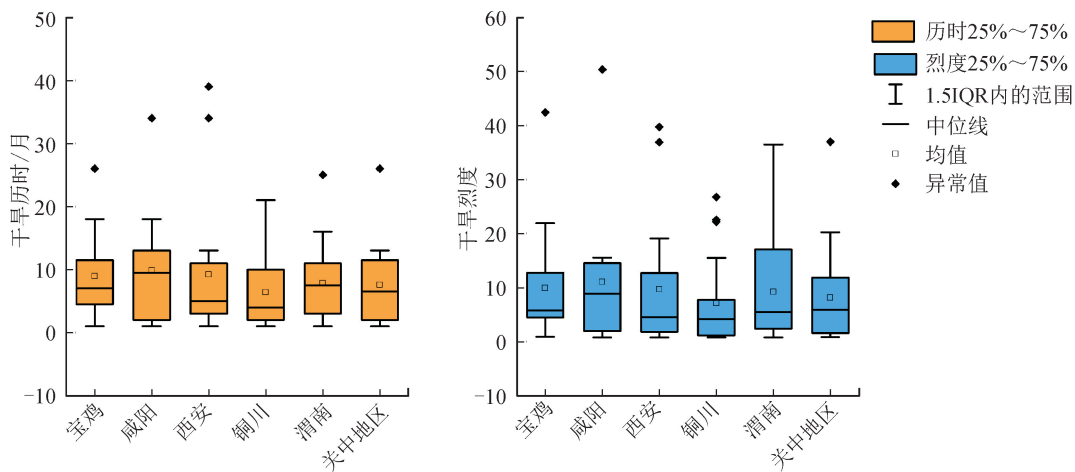


图 4 关中地区干旱特征分布箱线图

Fig. 4 Box plot of the drought characteristics distribution in Guanzhong Area

3.2 边缘分布

表 1 给出了 20 个测站识别出的干旱历时与干旱烈度的边缘分布函数与相关性检验。由表 1 可知,关中地区的干旱历时主要服从指数分布和广义帕累托分布,占有测站的 70%,其次是疲劳寿命分布以及逆高斯分布;干旱烈度主要服从指数分布

和广义帕累托分布,占有测站的 80%,其次是疲劳寿命分布以及逆高斯分布。采用 Kendall rank、Spearman's rank-order 以及 Pearson product-moment 三种相关系数进行检验,见表 1 的第 4~6 列。从表 1 中可以看出,除了扶风站,所有测站的 Kendall 值都在 0.8 以上, Pearson 相关系数都在

0.9 以上, Spearman 相关系数除长武站都在 0.9 以上, 且所有站点的拟合结果均通过显著性为 5% 的

K-S 检验, 表明所有测站的干旱历时与干旱烈度均有密切的相关关系。

表 1 干旱历时与干旱烈度边缘分布情况与相关性检验

Tab.1 Edge distribution and correlation test of drought duration and drought intensity

测站	边缘分布函数		Kendall rank	相关系数		是否通过 5% 检验
	干旱历时	干旱烈度		Spearman's rank-order	Pearson product-moment	
陇县	exponential	exponential	0.872 1	0.938 7	0.955 3	是
千阳	exponential	exponential	0.931 3	0.984 2	0.947 3	是
麟游	generalized pareto	exponential	0.863 0	0.951 2	0.964 8	是
扶风	generalized pareto	exponential	0.787 1	0.932 6	0.920 3	是
太白	exponential	exponential	0.878 3	0.964 1	0.915 3	是
长武	exponential	exponential	0.829 7	0.954 9	0.885 3	是
彬县	exponential	exponential	0.927 9	0.979 3	0.939 6	是
耀县	birnbaumsaunders	birnbaumsaunders	0.883 1	0.959 0	0.975 8	是
永寿	exponential	birnbaumsaunders	0.900 8	0.970 2	0.984 9	是
武功	inverse gaussian	generalized pareto	0.821 9	0.943 7	0.985 7	是
蒲城	generalized pareto	generalized pareto	0.886 4	0.970 0	0.953 5	是
渭南	exponential	exponential	0.847 1	0.946 7	0.945 3	是
洛川	inverse gaussian	inverse gaussian	0.887 3	0.964 9	0.941 7	是
黄龙	generalized pareto	generalized pareto	0.882 7	0.970 6	0.933 5	是
宜君	generalized pareto	generalized pareto	0.887 3	0.972 3	0.946 7	是
铜川	birnbaumsaunders	generalized pareto	0.870 3	0.956 2	0.925 6	是
白水	generalized pareto	exponential	0.817 1	0.938 7	0.930 8	是
合阳	nakagami	exponential	0.875 8	0.958 0	0.945 9	是
大荔	birnbaumsaunders	generalized pareto	0.940 0	0.988 1	0.953 9	是
华山	exponential	birnbaumsaunders	0.892 5	0.960 4	0.953 1	是

3.3 Copula 联合分布

采用 MvCAT 工具箱内的局部优化算法与贝叶斯框架下的马尔科夫链蒙特卡洛模拟两种方法进行参数估计, 并结合 R_{MSE} 、 N_{SE} 、 A_{IC} 三种拟合优度评价指标选择出最优的 Copula 函数, 结果见表 2, 其中 θ_1 、 θ_2 分别对应 Copula 函数中待定参数的最优值。从表 2 中可以看出, 有 30% 的测站采用局部优化算法, 有 55% 的测站采用马尔科夫链蒙特卡洛方法, 有 15% 的测站两种方法的最优情况相同。适合关中地区干旱历时与干旱烈度联合分布的 Copula 函数主要为 Gaussian、Clayton 以及 BB1 这三种函数。其中对 BB1 函数的参数估计更适合使用局部优化算法, 对 Gaussian 以及 Clayton 函数的参数估计更适合使用马尔科夫链蒙特卡洛模拟。

3.4 重现期分析

干旱重现期的计算结果结合了干旱发生的概率, 是一种可用来评估干旱风险的简单实用的方法^[28]。根据计算结果与克里金插值法绘制干旱历时与干旱烈度的联合重现期与同现重现期, 如图 5、图 6 所示。其中(a)、(b)、(c)、(d)4 个图分别为根据关中地区总体干旱特征分布情况确定的小干旱特征事件(干旱历时为 2 个月, 干旱烈度为 1.5)、平均干旱特征事件(干旱历时为 8 个月, 干旱烈度为 8)、严重干旱特征事件(干旱历时为 12 个月, 干旱烈度为 12)以及极端干旱特征事件(干旱历时为 26 个月, 干旱烈度为 20)下的重现期。

从图 5 中可以看出, 对于小干旱事件, 关中地区整体的联合重现期均在一年多; 平均干旱事件的短历时联合重现期主要分布在宝鸡以及西安市东部地

区,为 1 a 多,长历时联合重现期主要分布在铜川、咸阳东部、渭南西部以及西安北部地区,最长为 4.7 a;严重干旱事件的联合重现期自西向东呈增加趋势,联合重现期最短出现在宝鸡的扶风,为 2.19 a,联合重现期最长出现在铜川市的洛川测站,为 5.3

a;极端干旱事件长历时联合重现期主要分布在铜川东部与渭南西北部,最长联合重现期出现在铜川市的洛川测站,为 11 a,短历时联合重现期主要分布在宝鸡东南部与西安西部地区,最短联合重现期出现在西安市的武功测站,为 3.7 a。

表 2 关中地区 Copula 函数优选结果
Tab. 2 Optimization results of Copula function in Guanzhong Area

测站	Copula 函数	R_{MSE}	N_{SE}	A_{IC}	θ_1	θ_2
陇县	Gaussian	0.277 8	0.937 3	-83.348 1	0.960 6	
千阳*	Gaussian	0.148 6	0.976 6	-83.348 1	0.979 1	
麟游	Burr	0.244 3	0.948 8	-74.409 0	0.1517	
扶风*	Clayton	0.202 6	0.958 2	-72.853 6	6.011 0	
太白**	BB1	0.166 2	0.975 8	-90.455 9	3.414 2	1.578 0
长武**	BB1	0.237 7	0.954 7	-99.745 7	3.228 6	1.095 5
彬县*	Gaussian	0.137 7	0.984 7	-105.798 0	0.967 8	
耀县**	BB1	0.369 8	0.888 6	-72.192 1	3.486 1	1.113 3
永寿**	BB1	0.176 0	0.962 8	-67.509 4	18.855 5	1.000 0
武功*	Clayton	0.188 6	0.962 4	-67.849 2	5.781 3	
蒲城*	Gaussian	0.301 4	0.956 7	-145.008 0	0.999 8	
渭南*	Clayton	0.282 0	0.934 2	-89.198 8	5.222 2	
洛川**	BB1	0.300 3	0.938 0	-91.330 6	19.277 9	2.897 1
黄龙*	Clayton	0.381 1	0.921 7	-120.574 0	17.330 8	
宜君**	BB1	0.398 8	0.884 9	-81.117 5	11.035 0	1.160 7
铜川*	Clayton	0.395 3	0.907 6	-106.835 0	11.884 3	
白水*	Clayton	0.378 3	0.892 8	-90.885 0	5.791 6	
合阳*	t	0.279 1	0.941 9	-93.972 7	0.985 0	0.200 3
大荔	BB1	0.205 8	0.972 4	-112.018 0	34.901 2	3.638 9
华山*	Clayton	0.262 1	0.946 7	-78.787 6	28.245 5	

注:*表示采用贝叶斯框架下的马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法;**表示采用局部优化算法;无标记表示两种方法的最优情况相同。

从图 6 中可以看出,长同现重现期主要分布在铜川市,短同现重现期主要分布在宝鸡市。小干旱事件的短同现重现期主要集中在铜川市以及咸阳市东部地区,最短同现重现期出现在宝鸡市扶风站,为 1.1 a,长同现重现期主要集中在宝鸡市、西安市西部以及渭南市东部地区,最长同现重现期出现在铜川市的宜君站,为 1.6 a;平均干旱事件的短同现重现期主要集中在宝鸡市以及渭南市东部,最短同现重现期出现在宝鸡市扶风站,为 2 a,长同现重现期主要分布在铜川市,最长同现重现期出现在铜川的宜君站,为 5.5 a;严重干旱事件的短同现重现期主要分布在宝鸡市、西安市西部、咸阳市西南部以及渭南市东部地区,最短同现重现期出现在宝鸡市的扶风站,为 3.1 a,长同现重现期主要分布在铜川市以及渭南市西

部,最长同现重现期出现在铜川市白水站,为 10 a;极端干旱事件的同现重现期自西向东呈增加趋势,最短同现重现期出现在咸阳市的永寿站,为 10.6 a,最长同现重现期出现在铜川市白水站,为 138.9 a。

从图 5、图 6 中可以看出,联合重现期与同现重现期有着相似的分布规律,由于同现重现期的出现有着更高的要求,因此同现重现期随着烈度历时的增大而快速增加。关中地区最频发的为小干旱特征事件,几乎每年都会出现,其他干旱事件自西向东重现期逐渐增加,长重现期主要分布在铜川市以及渭南市西北部地区,短重现期主要分布在宝鸡市、西安市西部以及渭南市东部少部分地区。

关中地区干旱特征呈现此种变化的原因与降水分布有关,通过冯晶等^[29]对关中地区降雨特征的分

析可知,除咸阳市外,其他城市的降雨量均呈下降趋势,这与本文的研究结果一致,同时冯晶还指出,降雨自西到东呈增加趋势,因此采用基于降水数据的SPI12指数计算出的重现期也呈现西边重现期短、东边重现期长的变化特征。Zhang等^[9]通过计算干旱频率得到关中地区频发轻旱事件,这也与本文的研究结果一致。

本文通过重现期计算,得到关中西部、西安周边以及渭南市东部地区的水旱期较短,干旱较为严重;乔亮^[30]通过对关中地区旱灾累积程度的分析,认为宝鸡、西安、蓝田、韩城、潼关(宝鸡位于关中西部,西安和蓝田位于西安,韩城以及潼关位于渭南市东部地区)的旱灾累积程度最为严重,这也与本文的研究结果一致。

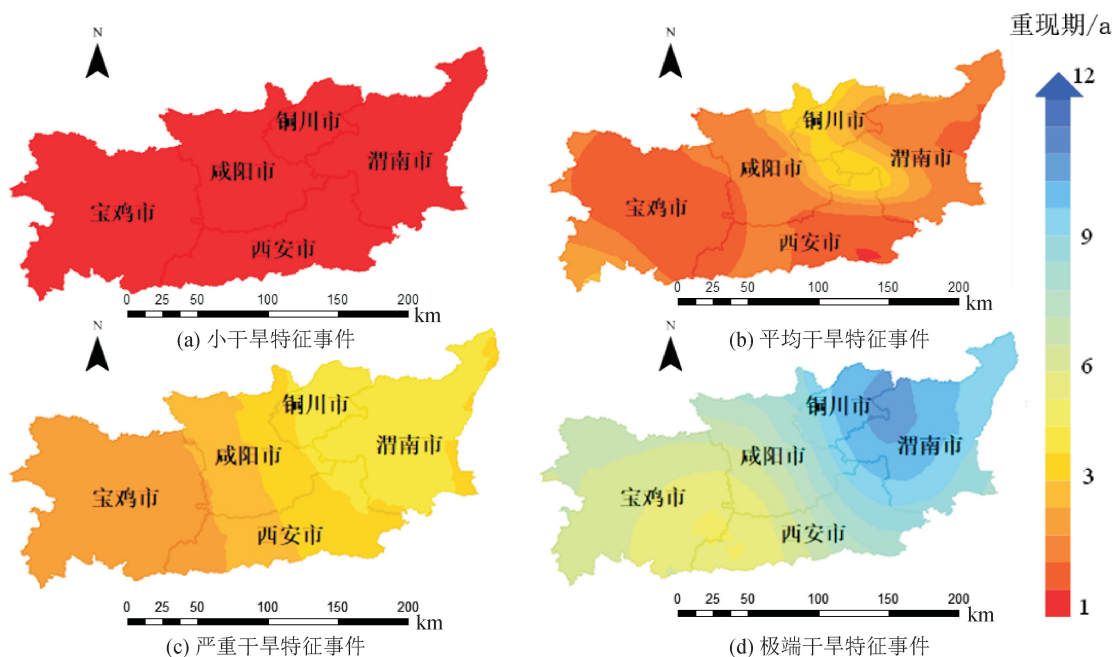


图5 关中地区干旱历时与干旱烈度联合重现期分布

Fig. 5 Distribution map of combined return period of drought duration and drought intensity in Guanzhong Area
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2017)1267号的标准地图制作,底图无修改。

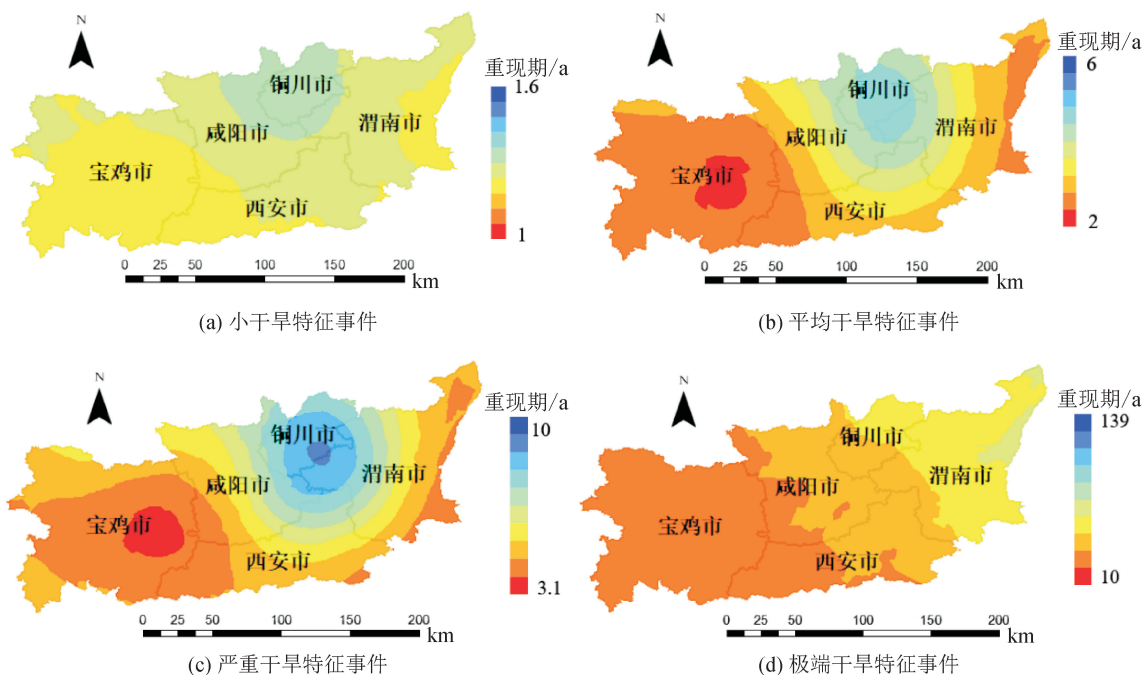


图6 关中地区干旱历时与干旱烈度同现重现期分布

Fig. 6 Distribution map of the co-occurrence return period of drought duration and drought intensity in Guanzhong Area
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2017)1267号的标准地图制作,底图无修改。

4 结 论

本文基于 SPI12 指数,结合游程理论,分析了关中地区的干旱特征变化情况,并利用 Copula 函数计算出联合特征重现期,得出以下结论。

1) 适合关中地区干旱历时与干旱烈度联合分布的 Copula 函数主要为 Gaussian、Clayton 以及 BB1 这三种函数。其中 BB1 函数的参数估计适合使用局部优化算法,Gaussian 以及 Clayton 函数的参数估计更适合使用马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法。

2) 关中地区整体的 SPI12 指数值呈现下降趋势,宝鸡市与渭南市的 SPI12 指数有较为明显的下降趋势,西安市和铜川市的 SPI12 指数呈现不明显的下降趋势,咸阳市的 SPI12 指数呈现不明显的上升趋势,说明近年来关中地区的干旱情况有加重的趋势。

3) 宝鸡市、咸阳市以及西安市的干旱烈度与历时均值较大,干旱情况较为严重,渭南市干旱特征平均值大、中位数小,表明有极端干旱的情况发生,但小干旱事件居多,铜川市干旱情况较轻,干旱特征值较小。

4) 基于干旱历时与干旱烈度的联合分布计算,关中地区频发小干旱特征事件,几乎每年都会出现,其他干旱事件的重现期自西向东逐渐增加,联合重现期与同现重现期有相同的变化趋势,长重现期主要分布在铜川市以及渭南市西北部地区,短重现期主要分布在宝鸡市、西安市西部以及渭南市东部少部分地区。

参考文献:

- [1] WANG T, TU X, SINGH V P, et al. Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6[J]. *Journal of Hydrology*, 2021(6):126091.
- [2] VERGNI L, TODISCO F, MANNOCCHI F. Analysis of agricultural drought characteristics through a two-dimensional Copula[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(8):2819-2835.
- [3] ZHANG B, WANG S, WANG Y. Copula-based convection, ermitting projections of future changes in multivariate drought characteristics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124 (14): 7460-7483.
- [4] TALLAKSEN L M, HISDAL H, VAN LANEN H A J. Space - time modelling of catchment scale drought characteristics[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3-4): 363-372.
- [5] 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.
- [6] SHARAFATI A, NABAEI S, SHAHID S. Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(3):1864-1884.
- [7] WU H, QIAN H, CHEN J, et al. Assessment of agricultural drought vulnerability in the Guanzhong Plain, China[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31 (5): 1557-1574.
- [8] 郭欣. 西安遭遇 37 年来最严重干旱[N]. *西安晚报*, 2014-8-5(1).
- [9] ZHANG Q, REN W, QIAN H, et al. Temporal-spatial evolution characteristics of meteorological drought in Guanzhong Basin based on SPEI drought index[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, 647(1): 012198.
- [10] 粟晓玲,梁箬. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. *水资源保护*, 2019,35(4):17-23.
SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong Area[J]. *Water Resources Protection*, 2019,35(4):17-23.
- [11] CHEN X D, SU Y, FANG X Q. Social impacts of extreme drought event in Guanzhong area, Shaanxi Province, during 1928 - 1931[J]. *Climatic Change*, 2021, 164:1-19.
- [12] 张世喆,朱秀芳,刘婷婷,等. 基于多维 Copula 的中国干旱特征及危险性分析[J]. *干旱区地理*, 2022, 45 (2):333-345.
ZHANG Shizhe, ZHU Xiufang, LIU Tingting, et al. Drought characteristics and risk hazard in China based on multidimensional Copula model[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(2): 333-345.
- [13] 李珍,李相虎,张丹,等. 基于 Copula 的洞庭湖—流域—长江系统水文干旱概率分析[J/OL]. *湖泊科学*, 1-16 [2022-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.P.20220217.1443.008.html>.
LI Zhen, LI Xianghu, ZHANG Dan. Copula based hydrological drought probability analysis in the Lake Dongting-catchment-Yangtze River system [J/OL]. *Journal of Lake Sciences*, 1-16 [2022-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.P.20220217.1443.008.html>.

- [14] 刘瑞琳,孙鹏,张强,等. 基于 Copula 的横断山区非平稳性气象干旱特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 213-223.
LIU Ruilin, SUN Peng, ZHANG Qiang, et al. Characteristics of non-stationary meteorological drought in Hengduan Mountains based on Copula[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 213-223.
- [15] 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.
- [16] LIU Y R, LI Y P, MA Y, et al. Development of a Bayesian-Copula-based frequency analysis method for hydrological risk assessment - the Naryn River in Central Asia [J]. Journal of Hydrology, 2019, 580:124349.
- [17] MIN A. Bayesian inference for multivariate Copulas using pair-Copula constructions[J]. Journal of Financial Econometrics, 2010, 8(4):511-546.
- [18] 王海科,徐盼盼,钱会. 关中地区干旱等级模糊综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 43-47, 54.
WANG Haike, XU Panpan, QIAN Hui. Fuzzy comprehensive evaluation of drought degree in Guanzhong Area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(3): 43-47, 54.
- [19] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, 17(22): 179-183.
- [20] YEVJEVICH V M. Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [D]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [21] NABAEI S, SHARAFATI A, YASEEN Z M, et al. Copula based assessment of meteorological drought characteristics: regional investigation of Iran[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276-277:1-10.
- [22] 王晓峰,张园,冯晓明,等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10):206-214.
WANG Xiaofeng, ZHANG Yuan, FENG Xiaoming, et al. Analysis and application of drought characteristics based on run theory and Copula function [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 206-214.
- [23] GUO H, BAO A, LIU T, et al. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1523-1538.
- [24] SKLAR A. Random variables, joint distribution functions, and copulas[J]. Kybernetika, 1973, 9(6): 449-460.
- [25] SADEGH M, RAGNO E, AGHAKOUCHAK A. Multivariate Copula analysis toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework[J]. Water Resources Research, 2017, 53(6): 5166-5183.
- [26] WALTZ R A, MORALES J L, NOCEDAL J, et al. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps[J]. Mathematical Programming, 2006, 107(3): 391-408.
- [27] 翟佑安. 中国气象灾害大典: 陕西卷[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [28] FILHO J, FILHO F, MARTINS E, et al. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012—2018 drought in northeast Brazil[J]. Water, 2020, 12(3):834.
- [29] 冯晶,钱会. 关中地区降水特征分析[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2015, 36(3): 8-12, 48.
FENG Jing, QIAN Hui. Analysis of precipitation characteristics in Guanzhong Area [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(3): 8-12, 48.
- [30] 乔亮. 关中地区干旱预警与应急水源配置研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
QIAO Liang. Study on the drought early warning and urgent water resources allocation in Guanzhong Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

(责任编辑 周 蓓)