

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221896

基于新型综合干旱指数的汾河上游干旱特征分析

武 乔, 赵雪花

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 汾河流域旱灾具有灾情重、影响范围广的特点, 对当地社会经济的发展有很大的阻滞作用, 因此准确评估流域内干旱状况具有重要意义。基于 SPI、SPEI、SRI 三种干旱指数, 用泰森多边形进行数据分组, 通过 Gaussian Copula 函数构建新型综合干旱指数 CI, 用 M-K 趋势检验法对 CI 年序列进行趋势检验, 并由游程理论提取干旱特征。研究发现, CI 可以很好地对水文干旱和气象干旱同时做出响应。年尺度 CI 序列的 M-K 趋势序列数为 -3.78, 汾河上游有向干旱发展的趋势。1970 年发生的干旱强度最小, 为 0.06; 2013~2016 年 4 年连旱, 干旱强度最大为 2.66。

关键词: 综合干旱指数; Copulas 函数; 水文干旱; 气象干旱; 汾河上游

中图分类号: P333; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0015-04

1 概况

汾河位于黄土高原, 起源于宁武县东寨镇管涔山下的水母洞, 汾河上游为发源地到兰村站。汾河地处干旱半干旱地区, 上游降水量年内分配不均, 但光热资源丰富, 蒸发量相应较大, 造成旱灾频发, 影响当地经济、农业生产。因此, 构建合适的综合干旱指标, 准确评估流域内干旱状况, 科学预测未来干旱的发生发展, 以减少干旱造成的损失十分必要。要准确评估干旱及其影响, 需要对其进行量化, 目前已从气象、水文、农业三个方向建立干旱指数, 气象干旱指数包括 SPI^[1]、SPEI^[2] 等; 水文干旱指数包括 PHDI^[3]、SRI^[4] 等; 农业干旱指数包括 SSI^[5] 等。干旱的成因复杂多样, 仅靠单一因素无法准确描述干旱现象, 综合考虑各种因素建立综合干旱指数成为研究的热点, 师小雨等^[6] 采用 FUZZ-EWM 法构建出一个综合干旱指数(DI); 张迎等^[7] 运用 Frank Copula 函数建立了一个新的综合干旱指数; 韩幸焯等^[8] 利用新安江模型模拟构建新型干旱指数; HAO Z 等^[9] 利用 Copula 函数综合 SPI 与 SSI 提出了一种可以同时检测气象、水文干旱的方法。但利用 Gaussian Copula 函数连接气象干旱指数、水文干旱指数建立新型水文、气象综合干旱指数的应用

研究相对较少。因此, 针对汾河上游干旱特征, 基于 SPI、SPEI、SRI 三种干旱指数, 用泰森多边形进行数据分组, 通过 Gaussian Copula 函数构建新型综合干旱指数并用 M-K 趋势检验法对 CI 年序列进行趋势检验, 再用游程理论提取干旱特征, 旨在为汾河上游流域旱灾治理提供依据。

2 研究材料与方法

2.1 研究数据

使用数据为汾河上游五寨站、太原站 1958~2016 年的气象数据与上静游站、兰村站、寨上站和汾河水库站 4 个水文站 1958~2016 年天然径流数据。数据均通过“三性”审查。以气象站为中心绘制泰森多边形(图 1), 将数据分为 4 组, 即太原气象数据与汾河水库水文数据结合、太原气象数

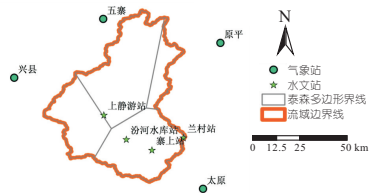


图 1 汾河上游水文站与气象站分布
Fig. 1 Location of hydrological stations and meteorological stations

收稿日期: 2022-09-13, 修回日期: 2022-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279020); 山西省水利科学技术研究与推广项目(2022GM023)

作者简介: 武乔(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: wuqiao03241998@163.com

通讯作者: 赵雪花(1974-), 女, 博士、教授, 研究方向为水文水资源, E-mail: zhaoxuehua@tyut.edu.cn

据与兰村水文数据结合、太原气象数据与寨上水文数据结合,五寨气象数据与上静游水文数据结合。

2.2 研究方法

2.2.1 单一干旱指数的构建

选用 2 种气象要素(降水、蒸散发)与 1 种水文要素(径流)计算单一干旱指数。降水量的分布规律通常为偏态分布,假定在某一特定时期降水量分布服从 Γ 概率分布,再对其进行标准正态化处理即可得出 SPI;假定在某特定时段降水量和潜在蒸散发量之差服从 log-logistic 概率分布,进行标准正态化处理得到 SPEI,其中潜在蒸散发量计算采用 Thornthwaite 方法;假设某段时间径流服从 log-normal 概率分布,对其标准正态化处理得到 SRI。标准正态化公式为:

$$D_{DI} = \begin{cases} W - \frac{c_0 - c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^2} & P \leq 0 \\ W = \sqrt{-2\ln P} & P \leq 0 \\ -\left(W - \frac{c_0 - c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^2}\right) & P > 0 \\ W = \sqrt{-2\ln(1 - P)} & P > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, D_{DI} 为干旱指数值; W 为累积概率加权矩; P 为求得的累计概率; $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 均为常数项。

2.2.2 基于 Copulas 函数的综合干旱指数构建

Copulas 函数为多元分布函数,用于一维边际分布的连接。Copulas 函数较多,选用其中隶属于 Meta-elliptical Copulas 的三维 Caussian Copula 函数连接 SPI、SPEI、SRI 三个干旱指数,形成新型综合干旱指数 Comprehensive Index(CI)。

根据 Sklar 理论,设 X_1, X_2, \dots, X_d 为具有边际分布 $F_{X_1}, F_{X_2}, \dots, F_{X_d}$ 的随机变量,若 X_1, X_2, \dots, X_d 间的相依性不能忽略,则存在一个 d-Copula 函数 C ,使得联合分布为:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_d) = C[F_{X_1}(x_1), \dots, F_{X_d}(x_d)] = C(u_1, u_2, \dots, u_d) \quad (2)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_d 为随机变量。

构建的 CI 服从正态分布,干旱等级划分参考文献[10]提出的干旱分类方式。

3 结果与分析

分别计算月尺度与年尺度下的 SPI、SPEI、SRI、CI,对 4 组数据 CI 与 SPI、SPEI、SRI 进行 Pearson、Spearman 相关性分析,通过计算可得 SPI、SPEI、SRI 与 CI 的 Pearson 相关系数均在

0.83 以上,Spearman 相关系数均在 0.80 以上,具有极强的相关性,说明新构造的 CI 具有可靠性。由表 1 可知,4 组数据中太原一寨上数据较其他 3 组数据相关性略高,因此选取太原一寨上数据的 CI 进行研究。

表 1 月尺度干旱指数 Pearson、Spearman 相关系数

Tab. 1 Pearson and Spearman correlation coefficient of

monthly scale drought index

干旱指数	太原—汾河水库		太原—兰村		太原—寨上		五寨—上静游	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
SPI	0.90	0.91	0.83	0.89	0.90	0.91	0.89	0.91
SPEI	0.90	0.90	0.88	0.88	0.90	0.90	0.89	0.91
SRI	0.83	0.80	0.84	0.80	0.85	0.82	0.84	0.77

3.1 汾河上游月尺度干旱特征分析

图 2 为月尺度下干旱指数的变化。颜色越浅,表示越湿润;越深,表示越干旱。由图 2 可知:①年内。1958~2016 年干旱指数的年内变化为浅色多集中于 7~9 月(夏季),向两边(1、12 月)逐渐过渡到深色,说明夏季湿润、春冬干旱,这符合汾河流域夏季多雨湿热、春冬季少雨干燥的特征;②年际间。1958~2016 年浅色色块有变少变浅的趋势,深色色块增加,说明汾河上游在 1958~2016 年有向干旱发展的趋势。进一步利用 M-K 趋势检验法进行干旱趋势检验,计算得到 M-K 趋势序列数 $U = -2.18$, U 小于 0,说明干旱指数序列呈下降趋势。干旱指数越小代表越干旱,验证了汾河上游在 1958~2016 年有向干旱发展的趋势的结论。图 2 中 1972 年为明显的干旱年,汾河志中记载 1972 年是一个大旱年,春、夏、秋三季连旱,符合实际情况。

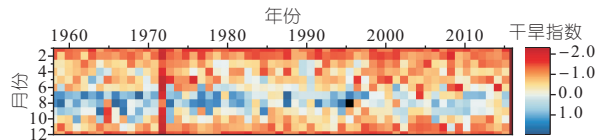


图 2 太原—寨上月尺度 CI 热点图

Fig. 2 Taiyuan-Zhaishang monthly scale CI hot spot map

为更直观地比较各干旱指数在干旱年的表现,比较 1965~1975 年的数据,结果见图 3。由图 3 可发现,1967 年 1~4 月,SRI 未显示水文干旱,而 CI、SPI、SPEI 三个指数均显示干旱;1972 年 1~9 月 SPI、SPEI 未显示明显的气象干旱,

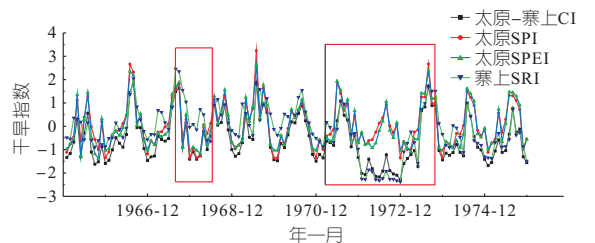


图 3 1965~1975 年月尺度干旱指数

Fig. 3 Monthly drought index from 1965 to 1975

CI、SRI 显示干旱,可看出 CI 指数能同时检测出气象干旱和水文干旱,说明综合干旱指数 CI 在干旱预警方面有很好的表现。

3.2 汾河上游年尺度干旱特征分析

对干旱进行年尺度分析(图 4),由图 4 可发现,年尺度干旱指数呈下降趋势,用 M-K 趋势检验法进行趋势检验,CI 年尺度序列的 M-K 趋势序列数 $U = -3.78$, U 小于 0,再次证明汾河上游有向干旱发展的趋势,与月尺度保持一致。

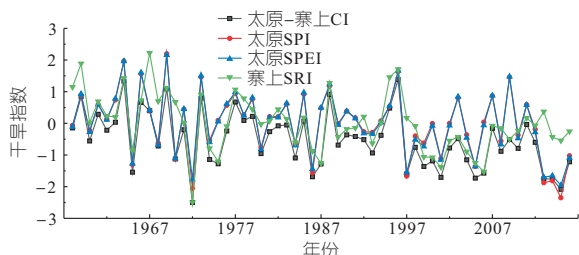


图 4 1958~2016 年年尺度干旱指数

Fig. 4 The annual drought index from 1958 to 2016

图 5 对比分析了 SPI、SPEI、SRI、CI 的干旱等级频率。由图 5 可看出,4 种干旱指数的等级频率存在一定差异。SPI、SPEI 均为气象干旱指标,二者差异较小,对 SPI、SPEI 的频率分析表明,正常等级的频率最高,约为 40%,其次为轻涝,占 20%,中涝、轻旱、中旱、重旱的频率均在 5%~15%之间,而特涝、重涝、特旱频率不足 5%;对水文干旱指数 SRI 的评价结果为正常等级频率(50%)明显高出其他 3 种指数 10%左右,中涝、轻涝、轻旱、中旱频率在 10%左右,特涝、重涝、特旱均在 5%以下,而重旱频率为 0%;分析综合干旱指数 CI 可知,正常等级的频率最高,约为 38%,轻旱、中旱、重旱频率在 10%~20%,中涝、轻涝、特旱均在 10%以下,特涝和重涝均为 0%。对比 4 种干旱指数发现 CI 在轻旱、中旱、重旱、特旱的频率均不低于 SPI、SPEI、SRI,说明 CI 对干旱的响应更加灵敏,可以很好地反映汾河上游的干旱情况。

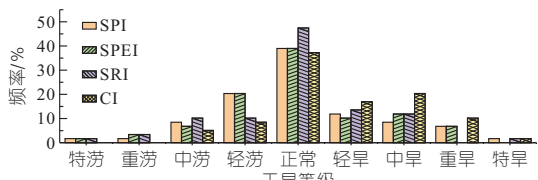


图 5 SPI、SPEI、SRI 与 CI 的干旱等级频率对比

Fig. 5 Drought grade frequency comparison of SPI, SPEI, SRI and CI

为进一步分析汾河上游的干旱特征,利用游程理论从 CI 序列中提取干旱特征,游程理论的粗粒性质,可用来揭示旱、涝等自然灾害的统计规律。设离散的干旱指数序列被某一给定阈值截

取,当在一个或多个时段内阈值大于干旱指数,就会有负游程。即负游程持续时间为干旱历时(年),CI 为 -1.035 直线下方柱状图面积为干旱强度,极值为干旱烈度峰值。考虑到干旱达到一定程度才会有影响,结合干旱发生的频率,选取 CI 为 -1.035 (轻旱与中旱分界线)作为干旱是否发生的阈值。由图 6 可发现,游程理论共识别出 10 次干旱,干旱历时为 1~4 年,其中干旱历时 1 年的干旱发生 5 次,分别在 1965、1970、1972、1984、1997 年;干旱历时 2 年的干旱发生 2 次,分别在 1974~1975、1986~1987 年;干旱历时 3 年的干旱发生 2 次,分别在 1999~2001、2004~2006 年;干旱历时 4 年的干旱发生 1 次,在 2013~2016 年,极限干旱历时为 4 年。同时发现 1958~2016 年识别出的干旱历时有逐渐增大的趋势,且干旱事件的发生逐渐密集。分析 10 次干旱事件的干旱强度,最大干旱强度为 2.66,为 2013~2016 年干旱事件的干旱强度;最小干旱强度为 0.06,为 1970 年干旱事件的干旱强度,平均干旱强度为 0.91。

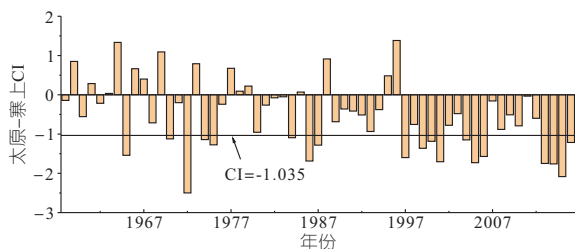


图 6 阈值为 -1.035 时游程理论识别干旱

Fig. 6 The threshold is -1.035, and the run-length theory identifies drought

干旱的另一重要研究对象为重现期。依据干旱等级的划分,选取 4 组阈值对干旱过程进行识别。以阈值等于 -0.525 (正常与轻旱分界线)为例,识别出的最长干旱历时为 5 年,发生了 1 次,重现期为 95.02 年,即约每 95 年可能发生连续 5 年均为干旱年;最短为 1 年,发生了 11 次,约每 3 年发生一次。其他各组阈值结果见表 2。由表 2

表 2 汾河上游不同阈值下干旱历时重现期

Tab. 2 Recurrence period of drought duration under different threshold in the upper reaches of Fenhe River

阈值	干旱历时/a	发生频次/次	干旱频率	重现期/a
-0.525(轻旱)	1	11	1.0	3.19
	2	2	0.3	8.96
	3	1	0.2	20.39
	4	1	0.1	44.20
	5	1	0.1	95.02
-1.035(中旱)	1	5	1.0	4.11
	2	2	0.5	14.75
	3	2	0.3	45.69
	4	1	0.1	139.67
-1.645(重旱)	1	4	1.0	10.83
	2	1	0.2	108.53
-2.095(特旱)	1	1	1.0	60.00

可看出,同一阈值下,干旱发生频次随干旱历时的增加而减少;同一干旱历时下,干旱发生频次随阈值的减少而减少。图 7 对比了不同阈值下干旱历时的重现期。由图 7 可看出:①同一阈值下,干旱重现期随着干旱历时的增加而单调增加,表明连续多年发生干旱的概率随连续年数的增加而减少;②同一干旱历时下,阈值越小,重现期越大,即干旱程度越严重,发生的概率越小。

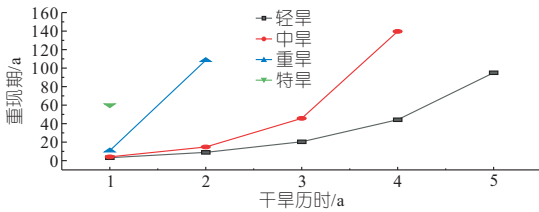


图 7 不同阈值下干旱历时的重现期

Fig. 7 Recurrence period of drought duration under different threshold

4 结论

a. 利用泰森多边形对水文、气象数据进行组合降低了数据处理难度,用 Copulas 函数构建了新型干旱指数 CI,分析得到新型干旱指数可以同时检测出水文干旱与气象干旱,且可以很好地分析汾河上游的干旱情况。

b. 研究新型干旱指数序列发现 1958~2016 年汾河上游有向干旱发展的趋势,并用游程理论进一步分析汾河上游干旱事件,发现连续多年发生干旱的概率随连续年数的增加而减少;干旱程度越严重,发生的概率越小。

参考文献:

- [1] BELAYNEH A, ADAMOWSKI J, KHALIL B, et al. Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models [J]. Journal of hydrology, 2014, 508(1):418-429.
- [2] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [3] MA M, REN L, SINGH V P, et al. Evaluation and application of the SPDI-JDI for droughts in Texas, USA [J]. Journal of hydrology, 2015, 521(2):34-45.
- [4] 邵进,李毅,宋松柏. 标准化径流指数计算的新方法及其应用[J]. 自然灾害学报,2014,23(6):79-87.
- [5] AGHAKOUCHAK A. A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought [J]. Hydrology and earth system sciences, 2014,18(7):2485-2492.
- [6] 师小雨,黄强,畅建霞,等. 基于 FUZZ-EWM 法的综合干旱指数构建与应用 [J]. 水利发展研究, 2018, 18(7):49-56,63.
- [7] 张迎,黄生志,黄强,等. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用 [J]. 水利学报, 2018, 49(6):703-714.
- [8] 韩幸焯,杜付然,李琼芳,等. 标准化综合干旱指数在北汝河流域干旱评价中的应用 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(6):19-22,27.
- [9] HAO Z, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model [J]. Advances in water resources, 2013, 57(9):12-18.
- [10] 赵雪花,赵茹欣. 水文干旱指数在汾河上游的适用性分析 [J]. 水科学进展, 2016, 27(4):512-519.

Analysis of Drought Characteristics in Upper Reaches of Fenhe River Based on New Comprehensive Drought Index

WU Qiao, ZHAO Xue-hua

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The drought in the Fenhe River Basin has the characteristics of serious disaster and wide range of influence, which has a great blocking effect on the development of local society economy, so it is of great significance to accurately evaluate the drought situation in the basin. Based on Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardized Runoff Index (SRI), the data were grouped with Tyson polygons. A new comprehensive drought index Comprehensive Index (CI) was constructed by Caussian Copula function. Mann-Kendall trend test was used to test the trend of CI annual series, and the run-length theory was used to extract drought features. It is found that CI can respond well to both hydrological and meteorological droughts. The number of M-K trend series of CI sequence is -3.78. There is a trend towards drought in the upper reaches of the Fenhe River. The intensity of drought in 1970 is the smallest, which is 0.06. Four years from 2013 to 2016 appeared continuous drought, and the maximum intensity is 2.66.

Key words: comprehensive drought index; Copulas function; hydrological drought; meteorological drought; upper reaches of Fenhe River