

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 04. 003

关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征

粟晓玲,梁 箐

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:根据陕西关中地区 22 个气象站和 3 个水文站 1961—2016 年的气象水文资料,计算了不同时间尺度的标准化降水蒸散发指数(SPEI)与径流干旱指数(SDI),运用 Gumbel Copula 函数构建了气象水文综合干旱指数(MHDI),探讨了 MHDI 的适用性,并分析了气象水文综合干旱时空分布特征。结果表明:MHDI 综合了 SPEI 与 SDI 的优点,可同时表征月尺度和年尺度的气象干旱与水文干旱;关中地区 MHDI 序列值有明显的下降趋势,干旱情况逐年加剧;MDHI 序列存在变异,年尺度变异点集中于 1986 年和 1990 年;年尺度的序列值主周期多集中在 20~22 a;泾河流域干旱发生频率最低,为 19.11%,北洛河流域干旱发生频率最高,为 47.97%,渭河流域干旱发生频率介于两者之间,为 26.42%。

关键词:综合干旱指数;标准化降水蒸散发指数;径流干旱指数;Gumbel Copula 函数;关中地区

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)04 - 0017 - 07

Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area//SU Xiaoling, LIANG Zheng(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the meteorological and hydrological data of 22 meteorological stations and 3 hydrological stations in Guanzhong area of Shaanxi Province from 1961 to 2016, the standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI) and streamflow drought index(SDI) at different time scales were calculated. The Gumbel Copula function was used to construct the meteorology-hydrology drought index(MHDI), and the applicability of MHDI was discussed. The spatial and temporal distribution characteristics of meteorological and hydrological comprehensive drought were analyzed. The results show that MHDI combines the advantages of SPEI and SDI, and can characterize meteorological drought and hydrological drought on both monthly and annual scales. The MHDI sequence values in Guanzhong area show a significant downward trend, and the drought situation increases year by year. There are variations in MDHI sequence, and anual scale variation points are concentrated in 1986 and 1990. The main period of annual MHDI sequence values is mostly concentrated in 20-22 years. The frequency of drought is the lowest in Jinghe River Basin(19.11%), the highest in Beiluo River Basin(47.97%), and 26.42% in Weihe River Basin.

Key words: MHDI; SPEI; SDI; Gumbel Copula function; Guanzhong area

干旱是全球发生频率最高、持续时间最长、影响面积最广的自然灾害^[1-3],严重威胁着人类生存和发展^[4-5],是我国最常见的灾种^[6]。通常将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱 4 类^[7-9],其中,气象干旱通常是指降水量少于蒸发量持续时间较长而导致的水分短缺的现象^[8],水文干旱是地下水和地表水量异常偏少的现象^[10]。干旱指数是监测、评价、研究干旱的发生、发展的基础,目前国内外常用的干旱指数有标准化降水指数

(standardized precipitation index, SPI)、径流干旱指数(streamflow drought index, SDI)、标准化土壤湿度指数(standardized soil moisture index, SSI)等。大多数干旱指数都只考虑单一因素对地区的干旱影响,未能考虑多因素共同影响下的区域干旱。为了克服区域干旱评价的片面性,近年来,国内外学者开始致力于综合干旱指数的研究。任怡等^[11]运用模糊综合评价法,将 Palmer 干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)、SPI 和标准化降水蒸散指数

基金项目:国家自然科学基金(51879222)
作者简介:粟晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文干旱分析。E-mail:suxiaoling17@126.com

(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)相结合,构建了综合干旱指数;Hao 等^[12]提出了基于气象干旱与农业干旱的多变量标准化干旱指数(multivariate standardized drought index,MSDI),考虑了降水和土壤湿度两方面的因素。但大多数学者致力于气象农业综合干旱指数的构建,仅有张迎等^[13]结合了 SPI 与标准化径流指数(standardized runoff index, SRI),构建了综合干旱指数 MSDI_p(multivariate standardized drought index, parametrically),同时从气象和水文两个方面描述区域干旱特征,但 MSDI_p仅综合了降水与土壤湿度两种变量。SPEI 基于降水和蒸散发,考虑了水分平衡对干旱的影响,既具有对温度敏感的特点,又具备 SPI 适合多尺度、多空间比较的优点^[8],故本文选取 SPEI 作为构建综合干旱指数的变量之一。

本文利用陕西关中地区 22 个气象站和 3 个水文站 1961—2016 年的气象与水文资料,分别计算 SPEI 与 SDI,基于 Gumbel Copula 函数构建气象水文综合干旱指数(meteorology-hydrology drought index, MHDI),探讨气象水文综合干旱时空分布特征,为关中地区防旱、抗旱提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 区域概况

关中地区位于陕西省中部,属于渭河流域,总面积 5.55 万 km²,包括西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川 5 市及杨凌示范区,共 54 个县(市、区),是陕西省经济最发达的地区。该地区平均海拔约 500 m,为典型的大陆性季风气候区,属暖温带半湿润气候,降水量较少,年平均降水量为 550 ~ 700 mm^[14],年平均蒸发量为 1 000 ~ 1 200 mm^[15]。近几十年来关中地区气象干旱逐年加剧,1980 年后气象干旱趋势更加严重^[16]。本文将关中地区划分为林家村以上渭河流域、张家山以上泾河流域和状头站以上北洛河流域 3 个区域进行研究。图 1 为关中地区水文、气象站点分布图。

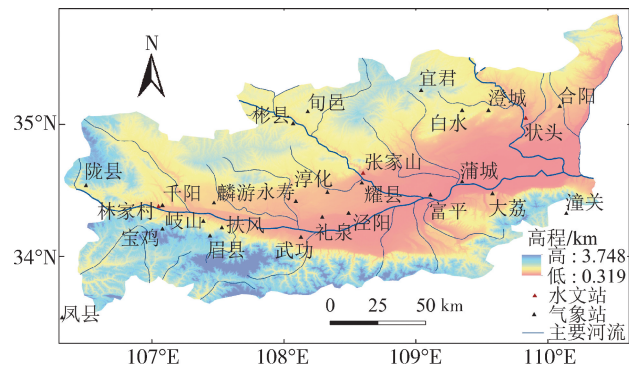


图 1 关中地区水文、气象站点分布

1.2 资料来源

各气象站的气象数据来自陕西省气象局和中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),主要包括逐月降水、最高和最低气温、平均气温、风速、平均相对湿度、日照时数(其中岐山站和耀县站资料缺失,计算时采用 22 个站的气象数据)。选取渭河林家村站、泾河张家山站、北洛河状头站 3 个水文站的逐月径流资料计算 SDI。

1.3 研究方法

综合考虑降水、潜在蒸散发以及径流对干旱的影响,利用 Gringorten 经验频率公式计算降水 R 与潜在蒸散发 ET_0 差值 $R - ET_0$ (记作 D)及径流 Q 的边缘分布,采用 Gumbel Copula 函数计算两变量的联合概率分布,构建该地区的 MHDI,并分析气象水文综合干旱时空分布特征。

1.3.1 边缘分布

采用单变量形式的 Gringorten 公式计算经验频率 $P(x_i)$ 作为该变量的边缘分布,其表达式为

$$P(x_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad (1)$$

式中: n 为观测值的总数; i 为观测值升序时的次序。

1.3.2 Gumbel Copula 函数

Copula 函数可连接多个不同边缘分布的变量构造其联合分布函数^[17],并能用来研究各变量的相关性^[18],且在转换过程中不会产生信息失真^[19]。在 Copula 函数众多分支中,Archimedean Copula 函数应用最为广泛^[13],而在 Archimedean Copula 函数中,Gumbel Copula、Clayton Copula 和 Frank Copula 函数最为常用。Gumbel Copula 和 Clayton Copula 函数适用于正相关的水文序列, Frank Copula 函数对两变量之间的相关性没有限制,由于本文研究的变量是降水与潜在蒸散发的差值与径流,属于正相关序列,故选取 Gumbel Copula 函数作为连接函数,构建 MHDI。

根据 Sklar 定理,令 F, G 分别为随机变量 x, y 的边缘分布函数, H 为联合分布函数,则对 $\forall x, y \in \mathbf{R}^+$,有 Copula 函数 C 使得:

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \quad (2)$$

若 F, G 连续,则 C 是唯一的,函数表达式为

$$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\} \quad (3)$$

式中: u, v 分别为两个变量的边缘累积概率; θ 为参数。 θ 可由 Kendall 秩相关系数 τ 求得:

$$\tau = 1 - \frac{1}{\theta} \quad (4)$$

1.3.3 MHDI 的构建

以关中地区各流域的降水与潜在蒸散发的差值

D 、径流序列 Q 为随机变量, d, q 为两变量的某一数值, 假设 D, Q 两随机变量相应的边缘分布分别为 $F(d)$ 和 $G(q)$, 则两者的联合分布 H 表达式为

$$H(d \leq D, q \leq Q) = C(F(d), G(q)) = p \quad (5)$$

则 MHDl 的表达式为

$$I = \varphi^{-1}(p) \quad (6)$$

式中: I 为 MHDl 序列值; φ 为标准正态分布函数; p 为累积联合概率。

MHDl 综合了 SPEI 与 SDI 两种干旱指数, 可同时表征气象干旱与水文干旱程度。根据干旱的严重程度, 参照 SDI 指数的等级划分方法, 将干旱划分为 5 个等级: $I > 0$ 为无旱, $-1 < I \leq 0$ 为轻旱, $-1.5 < I \leq -1$ 为中旱, $-2 < I \leq -1.5$ 为重旱, $I \leq -2$ 为特旱。

1.3.4 综合干旱时空特征分析方法

基于构建的 1961—2016 年不同时间尺度的 MHDl 序列, 分析关中地区各流域的综合干旱时空特征。采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法^[20] 分析综合干旱的趋势, M-K 突变检验法^[20] 计算 MHDl 序列的变异点, 小波分析法^[21] 判断 MHDl 序列的周期性; 统计月尺度下各流域不同等级干旱发生频率, 分析该地区气象水文综合干旱空间分布特征。

2 结果与分析

计算不同时间尺度的 SDI、SPEI 及 MHDl, 对比验证 MHDl 对于干旱事件捕捉的优越性, 并分析关中地区不同流域的气象水文综合干旱时空分布特征。

2.1 MHDl 的适用性

计算关中地区各流域的降水与潜在蒸散发的差值、径流之间的皮尔逊相关系数, 得出各流域两变量均呈正相关关系, 故利用 Gumbel Copula 函数构建关中地区各流域 MHDl, 同时以 $I = -1$ 作为干旱发生的阈值。

图 2 为关中地区各流域年尺度下 3 个指数的变化情况 (图中同时给出了干旱发生的阈值线), 可以看出, SPEI 值上下浮动频率较快, SDI 变化较为平稳。MHDl 的趋势和 SDI、SPEI 相近, 说明 MHDl 能够同时反映气象干旱与水文干旱; 在同一时间段内, MHDl 的值比单变量指数的值更小, 说明 MHDl 反映的干旱程度较单变量指数更严重; SPEI 比 SDI 更早捕捉到干旱的发生, SDI 比 SPEI 更晚捕捉到干旱的结束, 而 MHDl 兼具两者的优点, 既能较早地捕捉到干旱的发生, 又能较晚地捕捉到干旱的结束。

由图 2 可知, 1997 年为研究时段内的最干旱年, 其次是 1995 年, 陕西省 1995 年、1997 年发生的干旱使得粮食减产 80 万 t 以上^[22]。1997 年该地区各流域的 MHDl 均低于 -2 , 为特旱等级; 1995 年北

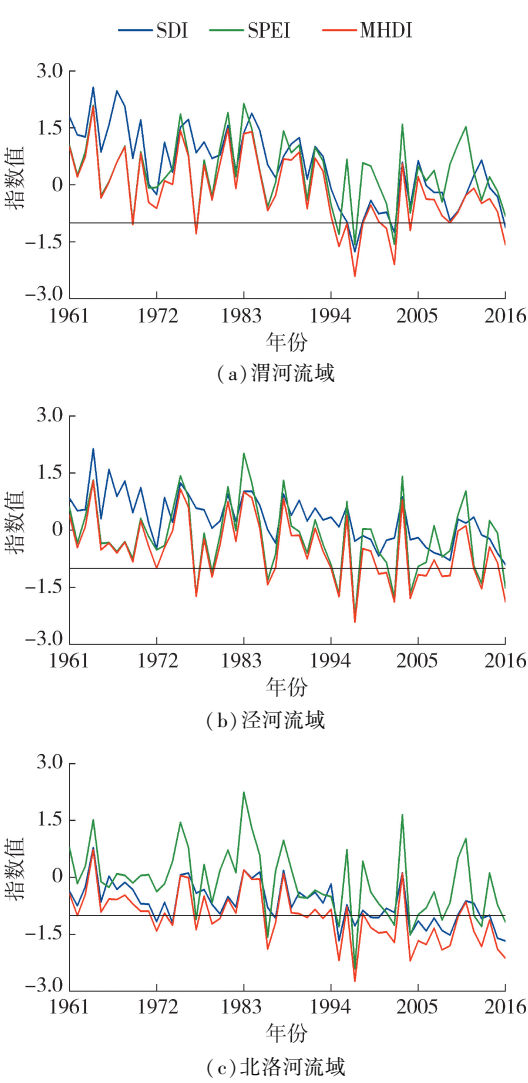


图 2 关中地区各流域年尺度 SDI、SPEI 和 MHDl 变化曲线
洛河流域的 MHDl 也低于 -2 , 为特旱等级, 渭河流域与泾河流域的 MHDl 也低于 -1.5 , 为重旱等级。

取 1995—1997 年为研究时段, 分析 MHDl 的适用性。关中地区 1995 年全年降水偏少, 持续干旱, 其中上半年降水偏少 6~8 成, 9 月初至 12 月底降水偏少 5~8 成^[22], 从图 3 可知, 1995 年上半年该地区各流域月尺度 MHDl 大部分低于干旱阈值, 且 5 月、6 月均为特旱; 8 月 MHDl 序列有上升趋势, 这是由于 1995 年 4—9 月陕西省实施人工降雨, 增加降水约 3.8 亿 m^3 ^[22], 旱情得到缓解。1997 年 4—7 月, 关中地区降水比常年偏少 3~9 成, 8—9 月降水偏少 6~9 成^[22], 从图 3 可知, 1997 年该地区各流域的月尺度 MHDl 均处于干旱状态, 5 月干旱程度最高, 各流域的 MHDl 均低于 -2.5 , 但 6 月、8 月干旱指数有回升趋势, 这是受人工降雨的影响 (陕西省 1997 年 3—6 月和 9—10 月, 人工增雨 1.35 亿 m^3 ^[22]), 旱情得到缓解。

分别计算不同时间尺度 MHDl 与 SPEI、SDI 的皮尔逊相关系数, 结果见表 2。由表 2 可知, 月尺度和年尺度 MHDl 与 SPEI、SDI 的相关系数较高, 且均

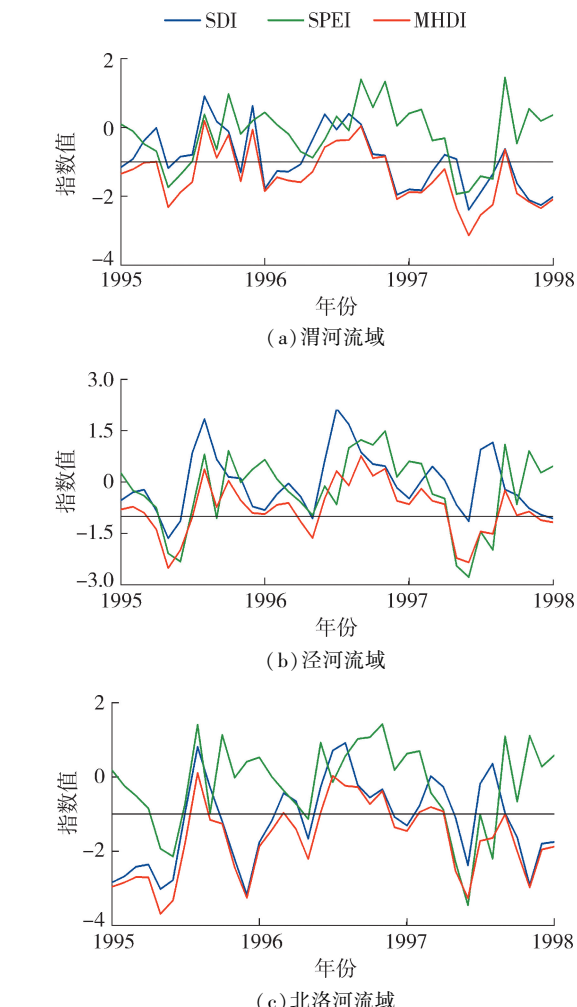


图3 关中地区各流域月尺度SDI、SPEI和MHD变化曲线
通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验,而3月、6月尺度相关系数较低且仅有北洛河流域6月尺度SPEI与MHD的相关系数通过显著性检验,其余均未通过显著性检验,说明MHD在月尺度和年尺度下与SPEI、SDI显著相关,而3月、6月尺度相关性较差,故MHD仅可用于描述月尺度和年尺度下的气象干旱与水文干旱特征。

表2 关中地区各流域不同时间尺度下SPEI、SDI与MHD的皮尔逊相关系数

流 域	SPEI与MHD			
	1月	3月	6月	12月
渭 河	0.824 **	-0.038	-0.224	0.865 **
泾 河	0.772 **	-0.051	-0.175	0.967 **
北洛河	0.616 **	-0.099	-0.275 **	0.903 **

流 域	SDI与MHD			
	1月	3月	6月	12月
渭 河	0.797 **	0.018	0.095	0.874 **
泾 河	0.712 **	-0.030	-0.121	0.736 **
北洛河	0.828 **	-0.046	-0.184	0.913 **

注:**表示通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验。
综上所述,MHD综合了SPEI与SDI的优点,既能及时捕捉干旱的开始,又能较晚地捕捉干旱的结束,可同时表征气象干旱与水文干旱特征,且在月

尺度与年尺度下MHD与单变量的指数值SDI、SPEI有显著相关性,故该综合干旱指数具有综合性、适用性等特点,可为关中地区的防旱、抗旱提供理论依据。

2.2 关中地区干旱时空特征

2.2.1 MHD序列趋势

表3为关中地区各流域不同时间尺度MHD的M-K趋势检验统计量值。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 条件下,若检验统计量 $|Z|\geq Z_{1-\alpha/2}=1.96$ 则通过显著性检验,由表3可知,MHD序列值关中地区6月尺度以及泾河流域3月尺度未通过显著性检验,其余流域各时间尺度的MHD序列值均呈显著下降趋势,干旱逐年加剧。

表3 关中地区各流域不同时间尺度MHD的M-K趋势检验

流 域	Z 值			
	1月	3月	6月	12月
渭 河	-7.21 *	-3.43 *	-0.94	-3.60 *
泾 河	-5.81 *	-2.12 *	-1.17	-3.07 *
北洛河	-7.04 *	-1.72	-1.47	-4.37 *

注:*表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

2.2.2 MHD序列变异点识别

图4~7为显著性水平 $\alpha=0.05$ 时关中地区各流域不同时间尺度的M-K法检验成果曲线。定义两个统计量 U_F 、 U_G 并进行序列分析。 U_F 、 U_G 无交点表示无变异点,若两条曲线有交点且交点位于显著性水平之间,则表明在该点对应的年份为显著变异点。由图4~7可以看出,1月尺度变异点多集中于1990年和1993年,3月尺度变异点集中于1983年和2000年,6月尺度变异点集中于1972年,年尺度变异点集中于1986年和1990年。

2.2.3 MHD序列周期性

选取Morlet小波为母小波对关中地区不同流域的年尺度MHD序列值进行连续小波变换,探讨其周期规律。在小波分析中探讨的两个主要特征为小波实部与小波方差。小波实部反映干旱指数序列周期的震荡变化,小波方差估计主周期,波峰所在点对应的尺度即为主周期。关中地区各流域年尺度MHD序列值小波周期特征见图8和图9。

由图8可以看出,渭河流域年尺度MHD序列值出现4~12a周期高值—低值2次震荡变化、3~8a周期低值—高值2次震荡变化,泾河流域年尺度MHD序列值出现5~15a周期低值—高值2次震荡变化,北洛河流域年尺度MHD序列值出现6~15a周期高值—低值—高值3次震荡变化。

由图9可以看出,关中地区各个流域年尺度MHD序列值的周期多集中在20~22a,且在时间序

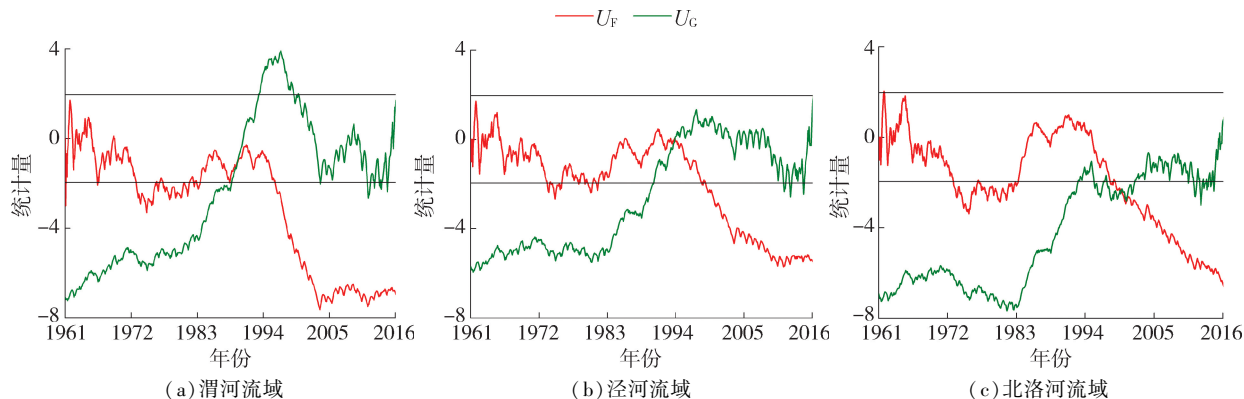


图 4 关中地区各流域 1 月尺度 M-HDI M-K 法检验成果

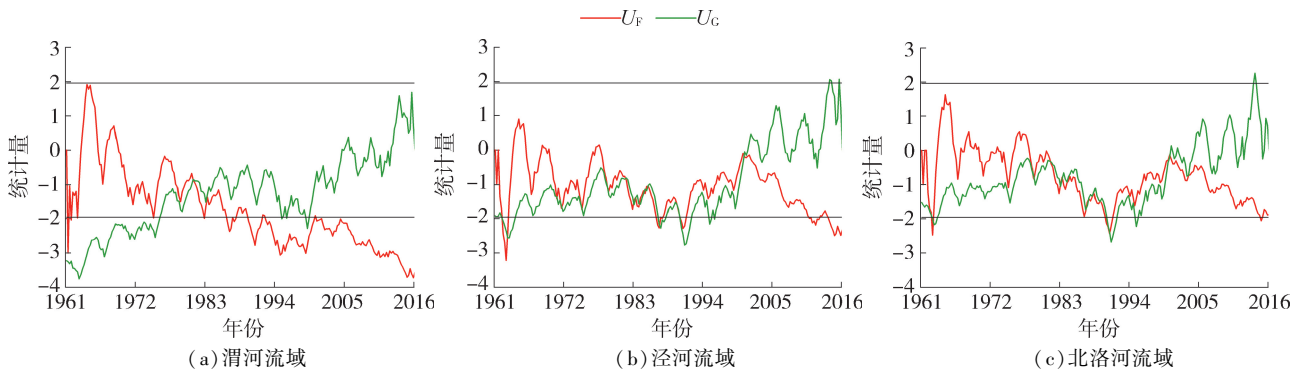


图 5 关中地区各流域 3 月尺度 M-HDI M-K 法检验成果

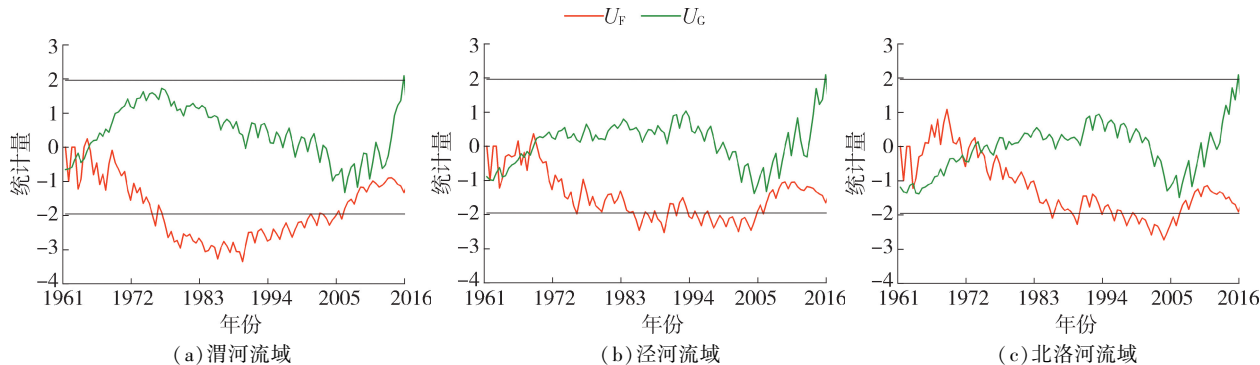


图 6 关中地区各流域 6 月尺度 M-HDI M-K 法检验成果

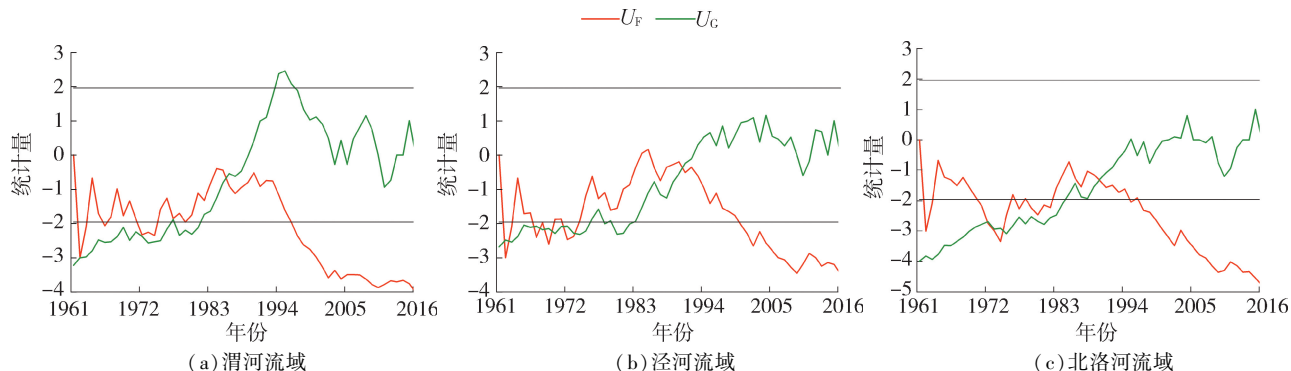


图 7 关中地区各流域年尺度 M-HDI M-K 法检验成果

列的后期波动能量不断增加,但未出现明显峰值。由于影响 M-HDI 的因素有径流、降水和潜在蒸散发,判断 3 个因素的周期性发现,径流序列的周期性与 M-HDI 序列周期性相似程度最高,故径流是影响

M-HDI 序列周期性的主要因素,而降水、径流和蒸散发均受到气候变化和人类活动的影响。

2.2.4 气象水文综合干旱频率统计

统计关中地区各流域月尺度 M-HDI 不同等级干

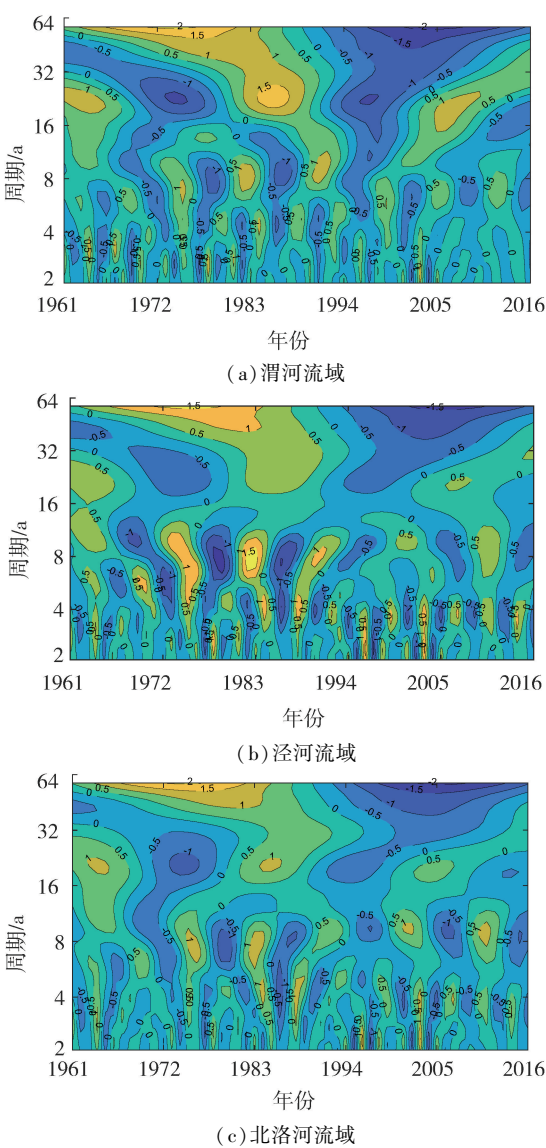


图8 关中地区各流域年尺度 MHD 序列值小波实部等值线

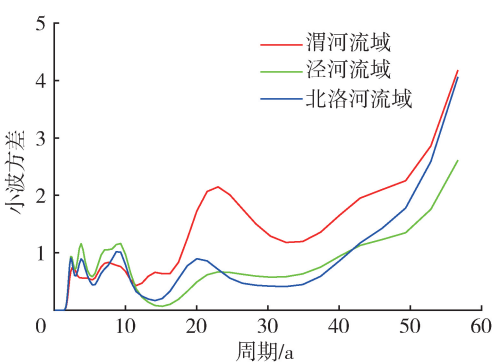


图9 关中地区各流域年尺度 MHD 序列值小波方差

旱的频率,结果如表4所示。从表4可知,渭河、泾河流域干旱发生频率相似,北洛河流域干旱发生频率较高;从不同等级的干旱发生频率来看,各流域轻旱、中旱发生的频率较高,重旱、特旱发生频率较低。干旱发生频率随着干旱等级的提升而减小。因干旱发生至一定程度才会对本地区造成一定的影响,以MHD 值为-1 作为干旱发生的阈值,统计该地区各

流域中旱、重旱、特旱的发生频率之和,渭河流域为26.42%,泾河流域为19.11%,北洛河流域为47.97%。

表4 关中地区月尺度 MHD 不同等级干旱发生频率 %

流域	轻旱	中旱	重旱	特旱
渭河	44.92	11.79	7.72	6.91
泾河	53.66	11.38	4.88	2.85
北洛河	37.80	26.02	14.02	7.93

3 结 论

a. MHD 综合了影响干旱的降水、潜在蒸散发与径流3个变量,且具备SPEI 善于捕捉干旱开始与SDI 善于捕捉干旱结束的优点;MHD 能够同时表征气象干旱与水文干旱,且月尺度和年尺度下MHD 与单变量的指数值SDI、SPEI 相关性显著,可为关中地区的防旱、抗旱提供理论依据。

b. 关中地区气象干旱与水文干旱相关性显著;MHD 序列值有明显的下降趋势,干旱情况逐年加剧;综合干旱序列值存在变异点,年尺度变异点集中于1986 年和1990 年;主周期多集中在20~22 a,且径流是影响MHD 序列周期性的主要原因;各流域轻旱、中旱发生的频率较高,重旱、特旱发生频率较低,干旱发生频率随着干旱等级的提升而减小;泾河流域干旱发生频率最低,为19.11%,北洛河流域干旱发生频率最高,为47.97%,渭河流域干旱发生频率介于前两者之间,为26.42%。

参考文献:

[1] HAN Lanying, ZHANG Qiang, MA Pengli, et al. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in southwestern China and underlying causes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3/4):517-528.

[2] 顾颖,刘静楠,林锦. 近60年来我国干旱灾害特点和情势分析[J]. 水利水电技术, 2010, 41(1):71-74. (GU Ying, LIU Jingnan, LIN Jin. Analysis on characteristics and situation of drought disasters during past 60 years in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(1):71-74. (in Chinese))

[3] 李茂松,李森,李育慧. 中国近50年旱灾灾情分析[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1):7-10. (LI Maosong, LI Sen, LI Yuhui. Studies on drought in the past 50 years in China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1):7-10. (in Chinese))

[4] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南2009—2014年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3):22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from

- 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (3): 22-29. (in Chinese))
- [5] 慈晖, 张强, 白云岗, 等. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. 水资源保护, 2015, 31 (2): 7-14. (CI Hui, ZHANG Qiang, BAI Yungang, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (2): 7-14. (in Chinese))
- [6] 冯平, 李绍飞, 王仲珏. 干旱识别与分析指标综述[J]. 中国农村水利水电, 2002 (7): 13-15. (FENG Ping, LI Shaofei, WANG Zhongjue. Summary on drought identification and analysis index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2002 (7): 13-15. (in Chinese))
- [7] 朱悦璐, 畅建霞. 基于 VIC 模型构建的综合干旱指数在黄河流域的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45 (2): 203-212. (ZHU Yuelu, CHANG Jianxia. Application of VIC model based standardized drought index in the Yellow River Basin [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2017, 45 (2): 203-212. (in Chinese))
- [8] 李勤, 张强, 黄庆忠, 等. 中国气象农业非参数化综合干旱监测及其适用性[J]. 地理学报, 2018, 72 (11): 67-80. (LI Qin, ZHANG Qiang, HUANG Qingzhong, et al. Nonparametric integrated agro-meteorological drought monitoring in China: new monitoring technique and applicability [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 72 (11): 67-80. (in Chinese))
- [9] MAITY R, SUMAN M, VERMA N K. Drought prediction using a wavelet based approach to model the temporal consequences of different types of droughts [J]. Journal of Hydrolgy, 2016, 539: 417-428.
- [10] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016, 27 (4): 492-500. (REN Liliang, SHEN Hongren, YUAN Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (4): 492-500. (in Chinese))
- [11] 任怡, 王义民, 畅建霞, 等. 陕西省水资源供求指数和综合干旱指数及其时空分布[J]. 自然资源学报, 2017, 32 (1): 137-151. (REN Yi, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. The spatial and temporal distribution of drought in Shaanxi Province [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (1): 137-151. (in Chinese))
- [12] HAO Zengchao, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model [J]. Advances in Water Resources, 2013, 57: 12-18.
- [13] 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. (ZHANG Ying, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (6): 703-714. (in Chinese))
- [14] 蔡明科. 关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22 (6): 33-37. (CAI Mingke. Comparative study on hydrologic-meteorological-drought characteristics of Guanzhong Areas [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22 (6): 33-37. (in Chinese))
- [15] 牛晨. 关中地区极端降水时空变化规律及频率分布研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [16] 谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29 (2): 224-229. (TAN Xuezhi, SU Xiaoling, SHAO Dongguo. Analysis of spatial and temporal characteristics of meteorological drought in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29 (2): 224-229. (in Chinese))
- [17] 王红瑞, 洪思扬, 秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33 (5): 1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (5): 1-4. (in Chinese))
- [18] 张丽静. 基于 Copula 函数的洪峰流量与降雨量相关性研究; 以临沂市许家崖水库为例[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12 (6): 74-77. (ZHANG Lijing. Correlation between reservoir peak flood and rainfall based on Copula function: a case study in the Xujiaya Reservoir of Linyi City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12 (6): 74-77. (in Chinese))
- [19] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008, 28 (3): 1-7. (GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28 (3): 1-7. (in Chinese))
- [20] 和鹏飞. 沙颍河流域气象水文干旱演变特征分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- [21] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013, 32 (9): 1413-1422. (SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: status and prospects [J]. Progress in Geography, 2013, 32 (9): 1413-1422. (in Chinese))
- [22] 翟佑安. 中国气象灾害大典: 陕西卷[M]. 北京: 气象出版社, 2005.

(收稿日期: 2018-11-12 编辑: 熊水斌)