

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.008

海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系

关不了¹,姜珊¹,赵勇¹,李海红¹,董义阳^{1,2},常奂宇^{1,2},何国华¹,韩昕雪琦³

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;

2. 清华大学水利水电工程系,北京 100084; 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:以标准化降水蒸散指数(SPEI)作为干旱反映指标,运用 Mann-Kendall 趋势检验法分析海河流域及站点的干旱变化情况,采用经验正交函数分析法解析海河流域干旱分布的主要模态,并通过交叉小波变换和皮尔逊相关分析探究年尺度、季尺度、月尺度下太阳黑子及大尺度环流因子与海河流域干旱的相关关系。结果表明:1960—2017 年海河流域 SPEI 在年尺度、季尺度、月尺度下分别以每 10 a 下降 0.16、0.015 和 0.004 的速率向干旱化发展;海河流域干旱分布第一模态为全域统一分布型,第二模态为南—北反向分布型,反映了纬度对干旱分布的影响;大气环流因子中的 Niño3.4 与海河流域干旱有较强的相关关系(年、季尺度下为负相关,月尺度下为正相关),而太阳黑子与海河流域干旱呈明显负相关,并对海河流域干旱事件有着深远影响。

关键词:干旱;SPEI;交叉小波变换;大气环流因子;太阳黑子;海河流域

中图分类号:P426.616 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0059-010

Spatial and temporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River Basin //

GUAN Buliao¹, JIANG Shan¹, ZHAO Yong¹, LI Haihong¹, DONG Yiyang^{1,2}, CHANG Huanyu^{1,2}, HE Guohua¹, HAN Xinxueqi³ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Water Conservancy and Construction Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: With the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) used as the drought reflection index, the Mann-Kendall (M-K) trend test was used to analyze the drought change of the Haihe River Basin, the empirical orthogonal function analysis method was used to analyze main modes of drought distribution, and cross wavelet transform and Pearson correlation analysis were adopted to study the correlations between sunspots, large-scale circulation factors, and drought in the Haihe River Basin on monthly, seasonal, and annual scales, respectively. The results show that from 1960 to 2017, the Haihe River Basin developed to aridity, with SPEI decreasing 0.16 per decade on annual scale, 0.015 per decade on seasonal scale, and 0.004 per decade on monthly scale, respectively; the first mode of drought distribution of the Haihe River Basin was the global uniform distribution pattern, and the second mode was the south-north inverse distribution pattern, reflecting the influence of latitude on the drought distribution; among the atmospheric circulation factors, Niño3.4 has a high correlation with drought in the Haihe River Basin (with negative correlation on the annual and seasonal scales and positive correlation on monthly scale), and sunspots have a significantly negative correlation with drought in the Haihe River Basin and also have a profound impact on the occurrence of drought events in the Haihe River Basin.

Key words: drought; SPEI; cross wavelet transform; atmospheric circulation factor; sunspot; Haihe River Basin

随着人类社会的不断发展和气候变暖的加剧,干旱造成的损失愈发严重^[1-2]。据统计,全球每年大约有 60 亿~80 亿美元的经济损失是由于干旱造成的^[3]。相比人烟稀少地区,干旱对人口稠密、发展

程度高的地区影响更大,甚至直接危害到人类的生命财产安全^[4]。由于干旱对人类所造成的巨大负面影响,使得对干旱时空分布及形成原因的研究变得更加重要和紧迫^[5]。

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(52025093);国家自然科学基金青年科学基金项目(51809282)

作者简介:关不了(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:2639477690@qq.com

通信作者:姜珊(1987—),女,工程师,博士,主要从事水文水资源管理研究。E-mail:jiangs@iwhr.com

目前,一系列干旱指标被用于评估干旱事件的严重程度,如帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)^[6]、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[7]、标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[8]等。其中,PDSI 基于水分平衡原理,计算更加可靠,但是步骤复杂,不同时空范围内参数不具有统一性,使其较难推广应用^[9];SPI 计算简便,且可以计算多个时间尺度的干旱,但其忽略了温度变化对干旱的影响^[10]。Vicente-Serrano 等^[8]于 2010 年提出了融合 PDSI 和 SPI 优点的 SPEI,该指数考虑了蒸散发影响,能够充分反映气温上升所造成的干旱,一经提出便得到了广泛应用。王飞等^[11]运用 SPEI 探索了黄河流域干旱时空格局,刘卫林等^[12-13]基于 SPEI 分析了鄱阳湖流域和南水北调中线水源区的干旱特征,表明 SPEI 具有良好的适用性。

海河流域不仅是国家主要粮仓,还是重要的工业和高新技术产业发展基地。环渤海经济圈和京津冀一体化等国家战略的提出对保障海河流域水安全提出了更高的要求。2017 年海河流域 GDP 占全国 GDP 总量的 11.5%,GDP 密度为 0.30 亿元/km²,流域内人均 GDP 为 6.644 万元,但海河流域降水量 1956—2015 年下降速率为 -1.09 mm/a,水资源量呈现显著的下降趋势^[14]。海河流域多年水资源利用率为 108%,其中地下水开发利用率达 126.3%^[15],本地水资源量早已不能够支撑经济社会发展。在此情况下,探究海河流域干旱分布情况对保障其水资源安全具有重要意义。针对海河流域的干旱研究,韩宇平等^[16]比较了 3 种干旱指数在海河流域的适用性,发现 PDSI 可较好地反映干旱特征;刘浏等^[17]、王文静等^[18]分别基于 SPI 和综合气象干旱指数探究了海河流域干旱特征,均发现海河流域干旱在持续时间和强度上趋于严重;严小林等^[19]研究了海河流域农业干旱情况,结果表明气温升高和降水减少是海河流域农业干旱加剧的主要原因。但过往研究主要集中于干旱指标适用性评价、干旱特征分析、农业干旱等方面,鲜有结合大尺度环流因子和太阳黑子对海河流域干旱进行分析。太阳黑子数量变化会引起全球接收能量的波动,通过改变大气环流、影响海温、改变海气耦合等方式对局地气候造成影响^[20]。大气环流因子反映大气环流的变化,可以通过遥相关来影响气候系统^[21]。这两者在大尺度范围内对海河流域干湿状况有深刻的影响。

综上所述,本文基于干旱指数 SPEI,并结合 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验,分析海河流域月、季、年 3 个时间尺度的干旱变化情况,使用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF) 分析解析海河流域干旱分布场的主要模态,利用交叉小波分析和皮尔逊相关分析探究海河流域干旱与太阳黑子和大气环流因子的相关关系,以增强对海河流域干旱状况的认识,并对未来干旱的预判提供有力支撑。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

海河流域位于渤海以西,处于中国心脏的位置^[22],主要包含海河、滦河、徒骇马颊河三大水系,总面积约为 31.8 万 km²,其中西部主要为山地,东部则以平原为主^[23]。流域属于典型的温带季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,1960—2017 年多年平均降水量为 523 mm。作为我国政治和经济发展的核心区域,海河流域战略地位十分重要,2000—2017 年流域内人口增长 23.3%,GDP 增长 8.1 倍。然而海河流域却是干旱灾害频发的地区,其干旱发生频率居全国首位,素有“十年九旱”之称^[24],极大影响了海河流域的经济社会发展。海河流域地形及气象站点位置如图 1 所示。

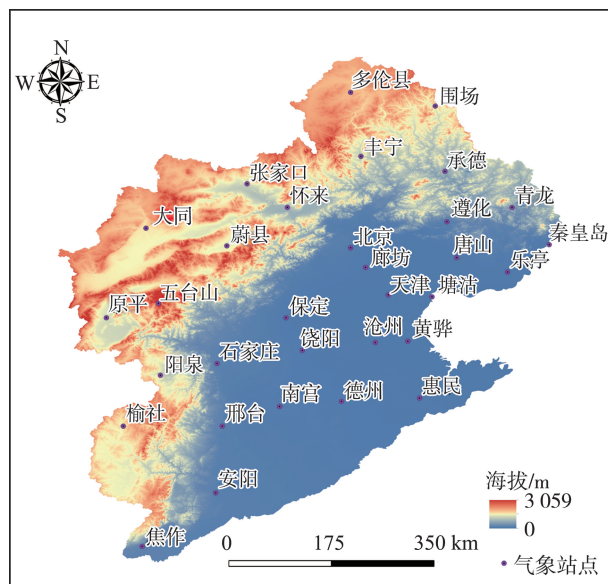


图 1 海河流域地形及气象站点位置

Fig. 1 Topography of the Haihe River Basin and location of meteorological stations

1.2 数据来源

选用海河流域 32 个气象站点数据,包括逐月降水和气温数据,时间序列为 1960—2017 年,数据来

自中国气象科学数据服务网;利用 1960—2017 年的 10 个全球大尺度气候因子数据,包括大西洋年代际振荡 (Atlantic multidecadal oscillation, AMO)、厄尔尼诺指数 (El Niño index) Niño3.4、太平洋北美指数 (Pacific North America index, PNA)、北太平洋遥相关指数 (North Pacific teleconnection index, NP)、厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-southern oscillation, ENSO)、北极涛动 (Arctic oscillation, AO)、南方涛动指数 (southern oscillation index, SOI)、太平洋年代际振荡 (Pacific decadal oscillation, PDO)、东太平洋/北太平洋振荡 (East Pacific/North Pacific oscillation, EP/NP)、北大西洋振荡 (North Atlantic oscillation, NAO) (<https://www.esrl.noaa.gov/>) 和太阳黑子数据 (<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>) 来探究海河流域干旱的主要控制要素。

2 研究方法

2.1 SPEI 的计算

考虑降水和潜在蒸散发的 SPEI 能够全面反映不同时间尺度和不同成因所导致的干旱,其中关于潜在蒸散发的计算主要有 Thornthwaite 公式^[25], Hargreaves 公式^[26] 和 Penman 法^[27] 3 种方式,本文选取仅以温度和降水作为输入的 Thornthwaite 公式进行计算。具体计算过程如下:

a. 计算海河流域潜在蒸散发 ET :

$$ET = 16K (10T/I)^m \quad (1)$$

其中 $m = 6.75 \times 10^{-7}I^3 - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 1.79 \times 10^{-2}I + 0.492$

式中: T 为月平均气温; I 为热量指数; K 为常数。

b. 计算海河流域逐月降水量和潜在蒸散发的差值 D_i :

$$D_i = P_i - ET_i \quad (2)$$

式中 P_i 、 ET_i 分别为 i 月的降水量和潜在蒸散发。

c. 对 D_i 进行正态化处理,并采用的三参数 Log-Logistic 概率分布函数对其进行拟合:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (3)$$

式中参数 α 、 β 、 γ 可以利用线性矩 (L-moment) 方法拟合得到。

d. D_i 概率密度的概率分布函数 $F(x)$ 为

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (4)$$

e. 对概率分布函数 $F(x)$ 进行标准化:

$$p = 1 - F(x) \quad (5)$$

则 SPEI 为

$$I_{SPEI} = \begin{cases} \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^3}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} & p \leq 0.5 \\ -\omega + \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^3}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} & p > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\omega = \sqrt{-2 \ln p}$ $c_0 = 2.515517$

$c_1 = 0.802853$ $c_2 = 0.010328$

$d_1 = 1.432788$ $d_2 = 0.189269$ $d_3 = 0.001308$

SPEI 分级情况如表 1 所示。

表 1 SPEI 干旱等级划分

Table 1 Drought classification of SPEI

等级	SPEI 范围	类型
I	> -0.5	无旱
II	$> -1.0 \sim -0.5$	轻旱
III	$> -1.5 \sim -1.0$	中旱
IV	$> -2.0 \sim -1.5$	重旱
V	≤ -2.0	特旱

2.2 M-K 趋势检验法

为有效分析 SPEI 是处于自然波动还是存在确定的变化趋势,本文运用 M-K 趋势检验法对海河流域 SPEI 进行趋势和突变分析,具体计算过程可参考文献[28]。

2.3 EOF 分析法

EOF 分析法是气候变化领域中广泛使用的空间分解方法^[29],其结果主要由空间模态和时间系数两部分构成,前者反映气候变量的空间分布特点,后者则反映时间变化。本文用 EOF 分析法提取海河流域干旱分布的主要模态,当海河流域模态系数 (C_{EOF}) 和时间系数 (C_{PC}) 变化趋势符号一致时,说明其干湿状况有正向发展的趋势 (变湿润),反之则有负向发展的趋势 (变干旱)。当主要模态通过 North 显著性检验时,说明海河流域干旱分布场可以由主要模态来表征。计算过程参考文献[30]。

2.4 相关分析

2.4.1 小波分析和交叉小波分析

小波变换是时间频率的局部化分析,能够较好地反映变量的时频变换情况。本文运用连续小波变换对不同时间尺度 SPEI 的时间序列进行时频分析,探究其周期变化情况。而交叉小波变换则是综合了小波分析和交叉谱分析,可以较好地呈现两个变量之间的周期相似性以及位相关系^[31]。本文基于交叉小波变换研究大尺度环流因子及太阳黑子与 SPEI 的相关关系,分析其对海河流域干旱的影响。计算过程参考文献[4]。

2.4.2 皮尔逊相关分析

为反映大尺度气候因子与不同时间尺度 SPEI

数据集之间的线性相关程度,本文利用皮尔逊相关分析法进行两者之间的相关性分析,皮尔逊相关系数的符号表示变量之间的正负相关关系,其绝对值介于0到1之间,绝对值越大相关程度越高。计算过程参考文献[32-33]。

3 结果与分析

3.1 SPEI 时空分布特征

计算海河流域 32 个气象站点多个时间尺度 SPEI,并采用泰森多边形法计算海河流域 SPEI 面平均值。从时间变化上来看,月尺度 SPEI-1(图 2(a))、季尺度 SPEI-3(图 2(b))和年尺度 SPEI-12(图 2(c))都具有显著下降趋势($Z_{\text{SPEI-1}} = -2.8811$, $Z_{\text{SPEI-3}} = -1.7921$, $Z_{\text{SPEI-12}} = -2.3746$),且均通过置信水平 95% 的显著性检验,下降速率分别为每 10 a 下降 0.004、0.015 和 0.16。对年尺度 SPEI-12 的 M-K 突

变检验表明,研究期内 SPEI-12 均值有较大降幅,突变点 1991 年前后的两个时期均值由 0.23 下降到 -0.28。在 1997 年之前海河流域少有干旱发生,干旱事件主要集中在 1997—2006 年,其间中旱事件较多,10 a 间干旱发生率达到 60%。研究结果与刘森等^[34]对京津冀地区的研究结果一致,连续干旱主要和降水减少及温度上升有关;郝振纯等^[35]对海河流域的研究再次印证了其气候升温变干的客观事实。从 SPEI-12 空间变化上来看(图 3),在选定的 32 个气象站点中,只有围场站呈现不显著的上升趋势,其余 31 个站点均为下降趋势,且其中有 10 个站点为显著下降;从流域整体来看,海河流域中部地区的下降趋势较北部和南部地区更为剧烈。

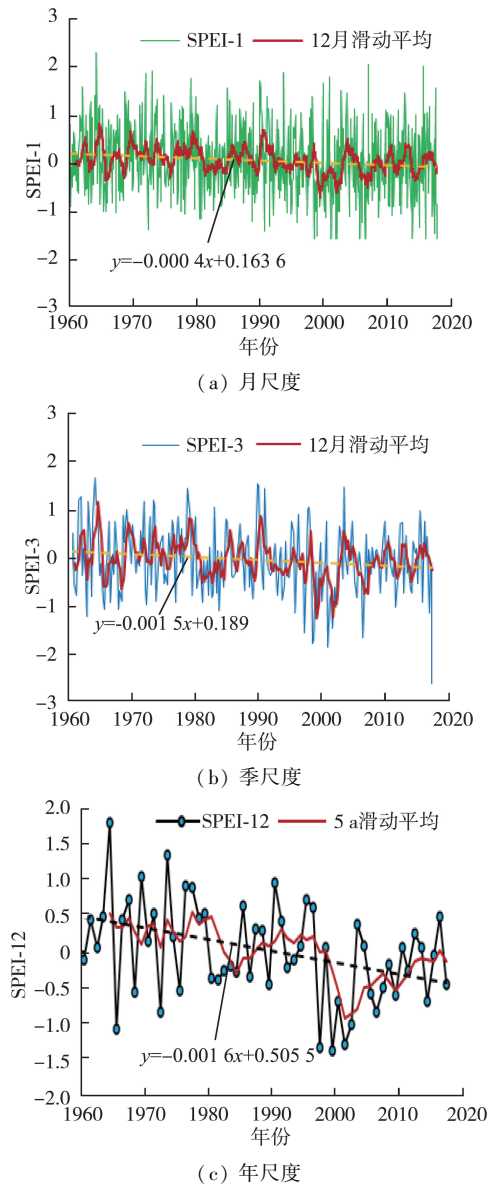


图 2 不同时间尺度 SPEI 时间变化

Fig. 2 Temporal variations of SPEI on different time scales

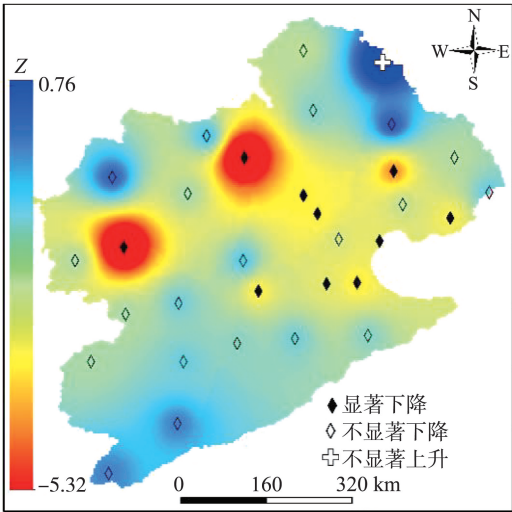


图 3 年尺度 SPEI-12 变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of SPEI-12 trend on annual scale

3.2 海河流域干旱分布主要模态

使用 EOF 分析法对海河流域不同时间尺度 SPEI 进行模态分解,分析海河流域干旱分布的主要模态,并进行 North 显著性检验。由表 2 可得,不同时间尺度下所提取的主要模态(特征值大于 1)的特征方差累计贡献率均超过 75%,其中前两个模态累计方差贡献率约为 60%,并且通过了 North 显著性检验。因此使用前两个模态来分析海河流域干旱的时空分布情况。

表 2 不同时间尺度 SPEI 模态特征方差贡献率

Table 2 Characteristic variance contribution rate of SPEI modes on different time scales

模态	特征值			累计方差贡献率/%		
	SPEI-12	SPEI-1	SPEI-3	SPEI-12	SPEI-1	SPEI-3
1	15.324	16.844	16.764	47.887	52.637	50.800
2	3.667	3.897	4.037	59.348	64.817	63.033
3	2.593	2.240	2.057	67.451	71.817	69.266
4	1.908	1.132	1.531	73.414	75.355	73.905
5	1.148		1.062	77.001		77.123

综合 3 个时间尺度, 模态 1 的方差贡献率约为 50%, 在主要模态中最高, 因此将模态 1 视为海河流域 SPEI 最主要的控制模态。根据图 4, 除 SPEI-3 的多伦县站点外, 模态 1 系数 (C_{EOF1}) 在整个海河流域空间范围内均为正, 说明 1960—2017 年海河流域干旱空间分布具有较强的一致性, 即同干同湿。海河流域中部地区的模态系数明显高于北部和南部地区, 说明在干旱事件发生的情况下, 中部地区的干旱程度显著高于海河流域其他地区。从时间变化上来看 (图 5), 模态 1 时间系数 (C_{PC1}) 在整个研究时域

内呈现明显的下降趋势, 说明海河流域整体上呈现愈发干旱的趋势。模态 1 反映出最干旱年份为 1999 年, 最湿润年份为 1964 年。从周期性上来看 (图 6, 图中黑线包围的区域表示通过 5% 显著性水平的标准红噪声检验, 下同), 在 95% 的置信水平下, 年尺度、月尺度、季尺度下 C_{PC1} 具有约 2 a 的周期, 除此之外, 季尺度下 C_{PC1} 还有约 4 a 和 8 a 的周期, 周期性并不明显。

如图 7 所示, 不同于模态 1 的同干同湿, SPEI-12 模态 2 系数 (C_{EOF2}) 的空间分布呈现出南正北负的

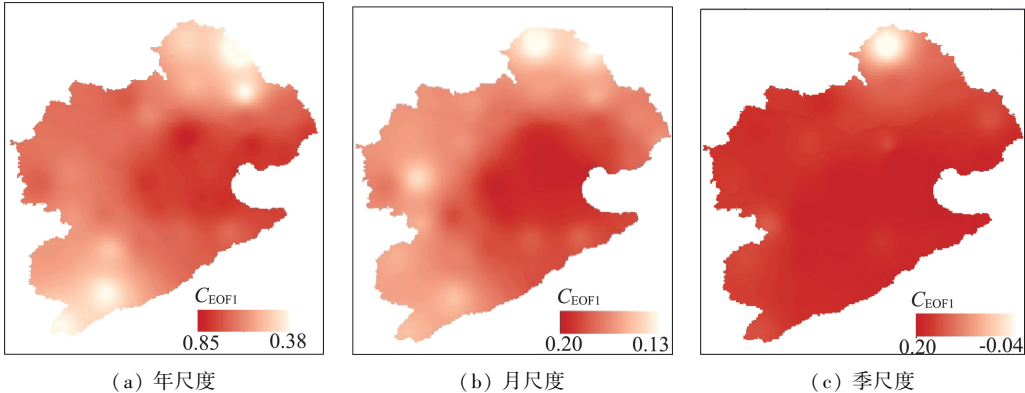


图 4 模态 1 空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of mode 1

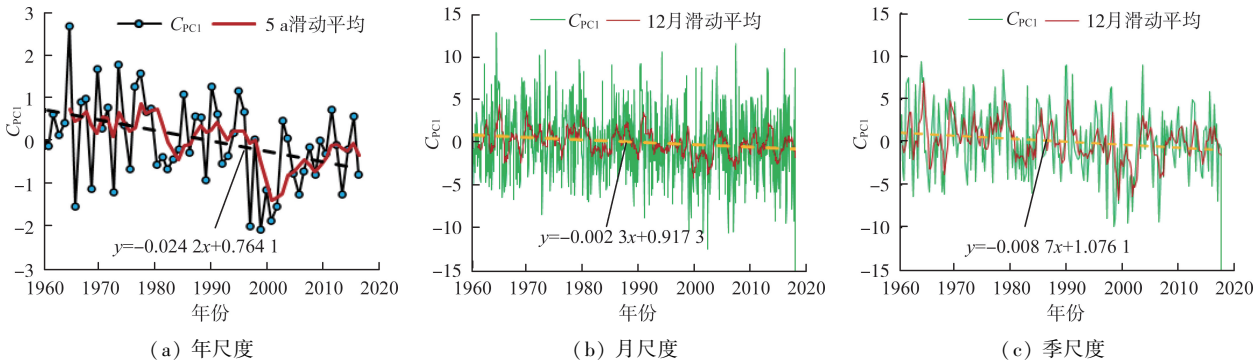


图 5 模态 1 时间系数变化趋势

Fig. 5 Trends of time coefficient of mode 1

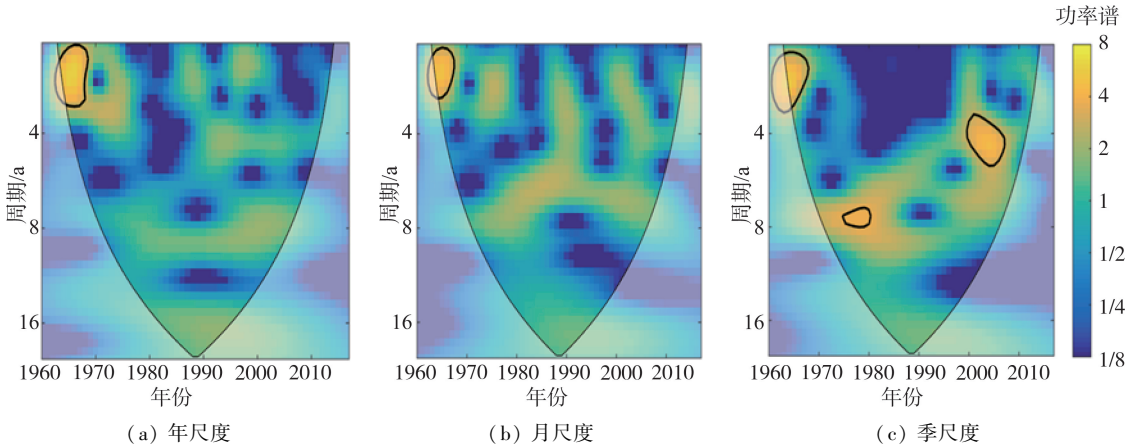


图 6 模态 1 时间系数连续小波功率谱

Fig. 6 Continuous wavelet power spectra of time coefficient of mode 1

特征,SPEI-1、SPEI-3 则呈现南负北正的特征,即在模态 2 的影响下,海河流域南北区域呈现截然相反的干湿变化情况。在整个研究时域内,模态 2 时间系数(C_{PC2})呈现增长的趋势(图 8),说明海河流域年尺度干旱分布场在模态 2 影响下北部地区有变干旱的趋势,而南部地区则有湿润化的趋势(月、季尺度下则与之相反)。从周期上来看(图 9),在 95% 的置信水平下, C_{PC2} 的周期性较 C_{PC1} 更为显著,年尺度下 1962—1976 年具有 3 ~ 5 a 的周期,1976—1992

年具有 4 ~ 8 a 的周期;月尺度下 1976—1996 年具有 2 ~ 8 a 的周期;季尺度下 1968—1992 年具有 4 ~ 12 a 的周期。

3.3 SPEI 与影响因子相关关系

3.3.1 SPEI 与大气环流因子相关关系

采用皮尔逊相关分析法计算海河流域不同时间尺度 SPEI 与大尺度环流因子(AMO、Niño3.4、PNA、NP、ENSO、AO、SOI、PDO、EP/NP 和 NAO)之间的相关系数(表 3)。与 SPEI 相关性最强的大尺度环流

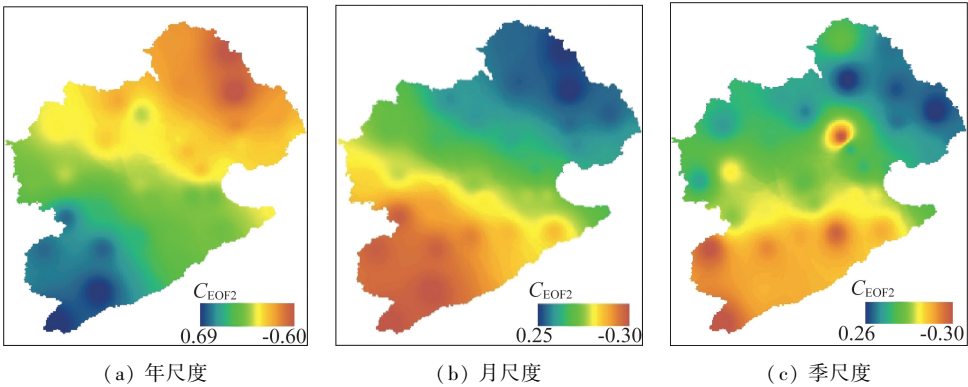


图 7 模态 2 空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of mode 2

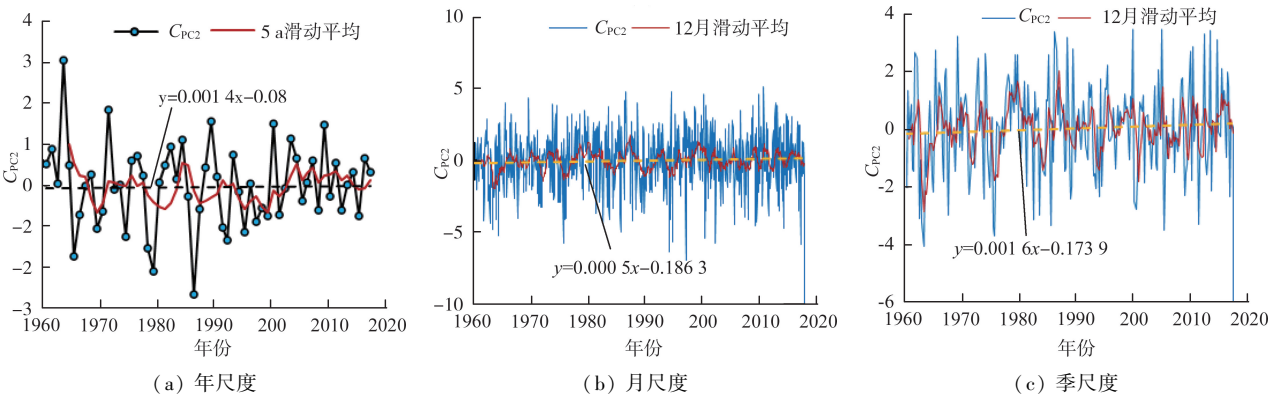


图 8 模态 2 时间系数变化趋势

Fig. 8 Trends of time coefficient of mode 2

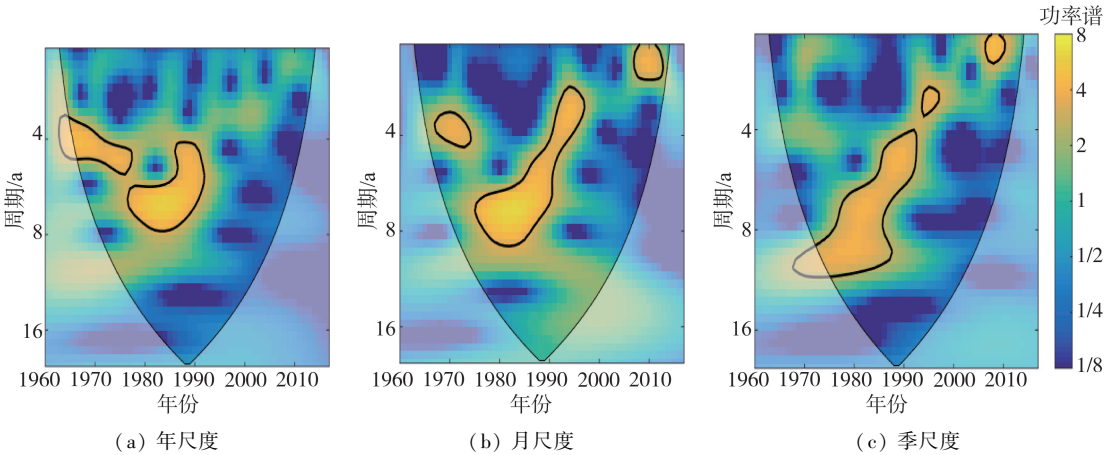


图 9 模态 2 时间系数连续小波功率谱

Fig. 9 Continuous wavelet power spectra of time coefficient of mode 2

因子为 AMO,其相关关系均通过 1% 显著性水平检验,说明 AMO 对海河流域干旱分布的影响最大,其中 SPEI-1 与 AMO 相关关系最强,其次是 SPEI-12 和 SPEI-3。

从表 3 中可以看出,AMO、Niño3. 4、PNA、NP、ENSO 是前 5 个与 SPEI 线性相关性最强的大尺度

环流因子,但通过交叉小波分析发现,与皮尔逊相关分析结果不同,Niño3.4 是与 SPEI 相关性最强的大尺度环流因子(图 10)。这可能是由于皮尔逊相关分析为线性分析,而交叉小波分析为非线性分析。与线性分析相比,非线性分析更为复杂,可能出现变化方向不定,增减不一的情况。

表 3 大尺度环流因子与 SPEI 皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient of large scale circulation factors with SPEI

类型	AMO	Niño3.4	PNA	NP	ENSO	AO	SOI	PDO	EP/NP	NAO
SPEI-12	-0.37 **	-0.14	-0.13	0.12	-0.06	-0.07	0.07	-0.07	0.01	-0.04
SPEI-1	-0.38 **	-0.02	-0.16	0.12	-0.10	-0.04	0.01	-0.06	-0.032	-0.03
SPEI-3	-0.27 *	-0.06	-0.08	0.04	0.05	-0.10	0.06	-0.05	-0.01	-0.11

注: * 表示通过 5% 显著性检验, ** 表示通过 1% 显著性检验。

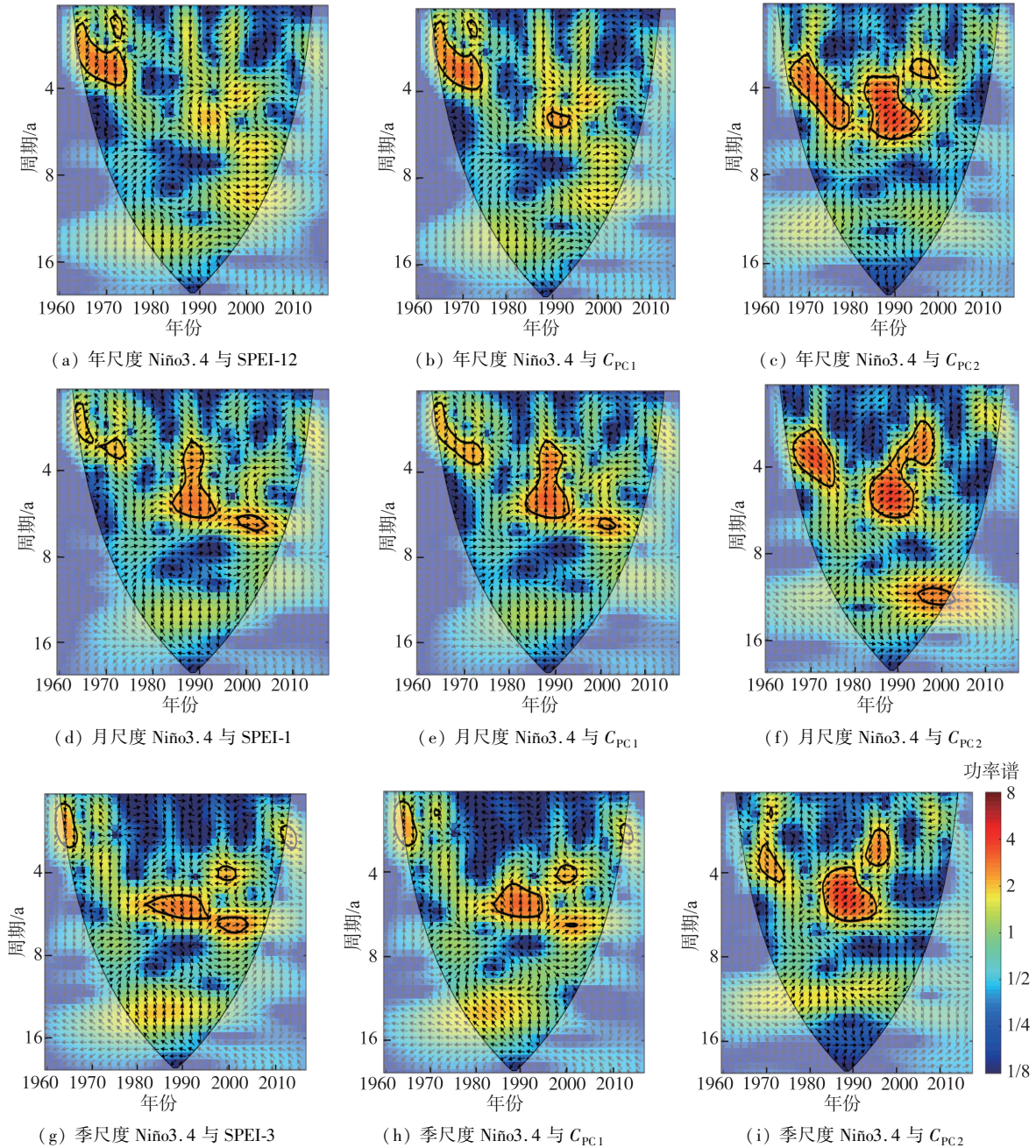


图 10 Niño3.4 与 SPEI 及时间系数的交叉小波变换

Fig. 10 Cross wavelet transform of Niño3.4 with SPEI and time coefficient

厄尔尼诺反映了赤道东太平洋海水异常增温现象,其作为一级外部作用力,改变了热带和副热带环流,并通过遥相关将影响扩展到中高纬度地区^[36],会增加华北地区干旱的可能性。在厄尔尼诺现象频发的年份,中国夏季降水的特点是南方降水较多,北方降水较少^[37],因此,厄尔尼诺现象发生时,处在北方的海河流域容易发生夏季干旱。图 10 为 Niño3.4 与 SPEI 和 C_{PC} 的交叉小波变换,图中“←”表示气候因子与 SPEI、 C_{PC} 之间为反位相,“→”表示为同位相,“↓”表示气候因子变化落后 SPEI 和 C_{PC} 变化 3 月,“↑”则表示其超前 3 月,箭头每变化 90°,相位相差 3 月。从图 10 可以看出 Niño3.4 与 SPEI 和 C_{PC1} 交叉小波变换结果相似,再次验证了模态 1 是控制海河流域干旱变化的主要模态。年尺度下 Niño3.4 与 SPEI-12 和 C_{PC1} 在 1964—1974 年存在显著震荡,有 0~4 a 的共振周期,且近似负相位,表明 Niño3.4 指数越大,海河流域发生干旱的可能性越大;月尺度下 Niño3.4 与 SPEI-1 和 C_{PC1} 在 1984—1994 年有 3~6 a 的共振周期,为正相位,表明月尺度下 Niño3.4 指数越小,海河流域发生干旱的可能性越大;季尺度下 Niño 3.4 与 SPEI-3 和 C_{PC1} 在 1982—1996 年有 5~6 a 的共振周期,且为负相位。年尺度下 Niño3.4 与 C_{PC2} 在 1982—1994 年有 2~6 a 的共振周期,两者呈显著负相位,说明 Niño3.4 值越大,海河流域北部会发生更多的干旱事件,而南部地区则会保持湿润;月尺度下 Niño3.4 与 C_{PC2} 在 1966—1976 年有 3~5 a 的共振周期,且 C_{PC2} 的变化超前 Niño3.4 1.5 月;季尺度下 Niño3.4 与 C_{PC2} 在 1984—1996 年有 4~6 a 的共振周期, C_{PC2} 的变化超前 Niño3.4 1.5 月,与月尺度 C_{PC2} 相同。总的来说, Niño3.4 对 C_{PC2} 的影响最强,说明 Niño3.4 主要控制海河流域干旱分布的第二模态。

3.3.2 SPEI 与太阳黑子相关关系

太阳黑子与 SPEI 和 C_{PC} 的交叉小波变换分析显示,年尺度下太阳黑子与 SPEI-12 和 C_{PC1} 在 1972—2004 年有 8~13 a 的共振周期,在 1980—2004 年的共振周期上,太阳黑子变化先超前 SPEI-12 1.5 月,随后逐渐变为落后 1.5 月,且两者呈负相位,表明海河流域干旱状况随着太阳黑子数量的减少而缓解。月尺度下太阳黑子与 SPEI-1 和 C_{PC1} 在 1972—1990 年有 7~12 a 的共振周期,太阳黑子变化超前 SPEI-1 和 C_{PC1} 3 月;季尺度下太阳黑子与 SPEI-3 和 C_{PC1} 在 1970—1994 年有 7~13 a 的共振周期。年尺度下太阳黑子与 C_{PC2} 在 1962—1998 年有 5~13 a 的共振周期,在 1962—1984 年的共振周期上 C_{PC2} 变化超前太阳黑子 3 月。月尺度下太阳黑子

与 C_{PC2} 在 1964—2008 年有 6~13 a 的共振周期,且太阳黑子变化超前 C_{PC2} 3 月;季尺度下太阳黑子与 C_{PC2} 在 1960—2000 年有 7~13 a 的共振周期,与月尺度相似,太阳黑子变化超前 3 月。

图 11 为太阳黑子与 Niño3.4 的交叉小波变换,图中“←”表示太阳黑子与 Niño3.4 为反位相,“→”表示为同位相,“↓”表示气太阳黑子变化落后 Niño3.4 变化 3 月,“↑”则表示其超前 3 月,箭头每变化 90°,相位相差 3 月。从图 11 可见太阳黑子与 Niño3.4 在 1966—2014 年有 8~14 a 的共振周期,且在 1966—1990 年两者呈同相位,表明厄尔尼诺现象发生概率随着太阳黑子数量的增多而增大,在 1990—2014 年太阳黑子变化落后 Niño3.4 3 月。太阳黑子数量反映太阳活动的变化,其对气候系统的演变有着深刻影响,无论是海温、海气耦合还是大气环流变化都会受到太阳活动的影响,即地球所接收总能量的波动引起了上述一系列变化,进而局地气候也会随之发生改变。太阳黑子与 Niño3.4 交叉小波变换显著性区域几乎横跨整个研究时域,说明选取的太阳黑子、大尺度环流因子彼此之间存在着复杂的联系。

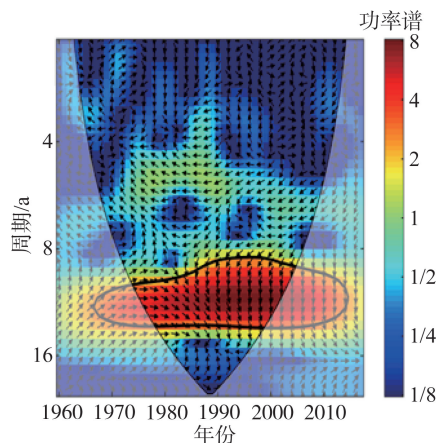


图 11 太阳黑子与 Niño3.4 的交叉小波变换

Fig. 11 Cross wavelet transform of sunspot with Niño3.4

4 结 论

a. 1960—2017 年海河流域整体呈现显著干旱的趋势,年、季、月尺度下, SPEI 下降速率分别为每 10 a 下降 0.16、0.015 和 0.004,年尺度下干湿状况在 1991 年前后发生了突变, SPEI-12 均值由 0.23 降低到 -0.28。

b. 海河流域干旱分布主要有两种表现形式。全域统一分布型表现为全流域呈现一致的干湿状况,即同干同湿,由大尺度气候因子的影响所造成,其特征方差贡献率约为 50%,是最主要的控制模态;南—北反向分布型表现为南部和北部地区呈现

出相反的干湿状况,说明干旱分布还受到纬度的影响,其特征方差贡献率超过 10%。

c. 大尺度环流因子中的 Niño3.4 与海河流域干旱相关性较强(年、季尺度下为负相关,月尺度下为正相关),而太阳黑子与海河流域干旱呈明显负相关,在不同时间尺度下具有不同的共振周期,其对海河流域干旱事件的发生有着深远影响。

参考文献:

- [1] DAI Aiguo. Recent climatology variability and trends in global surface humidity[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (15): 3589-3606.
- [2] MONTASERI M, AMIRATAEE B. Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37 (2): 998-1013.
- [3] ISDR. 2009 Global assessment report on disaster risk reduction[R]. Geneva:United Nations, 2009.
- [4] 邹磊,余江游,夏军,等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱时空变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43 (2): 329-338. (ZOU Lei, YU Jiangyou, XIA Jun, et al. Temporal-spatial variation characteristics of drought in the Weihe River Basin based on SPEI[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43 (2): 329-338. (in Chinese))
- [5] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36 (3): 8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 (3): 8-13. (in Chinese))
- [6] MERABTI A, MARTINS D S, MEDDI M, et al. Spatial and time variability of drought based on SPI and RDI with various time scales [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32 (3): 1087-1100.
- [7] 黄生志,黄强,王义民,等. 基于 SPI 的渭河流域干旱特征演变研究[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24 (1): 15-22. (HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Evolution of drought characteristics in the Weihe River Basin based on standardized precipitation index [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24 (1): 15-22. (in Chinese))
- [8] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23 (7): 1696-1718.
- [9] 王理萍,王树仿,王新华,等. 五种干旱指数在云南省的适用性分析[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36 (7): 117-124. (WANG Liping, WANG Shufang, WANG Xinhua, et al.

Feasibility study of five drought indices for use in Yunnan Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36 (7): 117-124. (in Chinese))

- [10] 王佳瑞,孙从建,郑振婧,等. 近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41 (13): 5340-5351. (WANG Jiarui, SUN Congjian, ZHENG Zhenjing, et al. Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (13): 5340-5351. (in Chinese))
- [11] 王飞,王宗敏,杨海波,等. 基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2018, 48 (9): 1169-1183. (WANG Fei, WANG Zongmin, YANG Haibo, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River Basin based on SPEI [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2018, 48 (9): 1169-1183. (in Chinese))
- [12] 刘卫林,朱圣男,刘丽娜,等. 基于 SPEI 的 1958 — 2018 年鄱阳湖流域干旱时空特征及其与 ENSO 的关系[J]. *中国农村水利水电*, 2020 (4): 116-123. (LIU Weilin, ZHU Shengnan, LIU Lina, et al. Temporal and spatial characteristics of drought and its relationship with ENSO in Poyang Lake Basin based on SPEI from 1958 to 2018 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020 (4): 116-123. (in Chinese))
- [13] 石卫,雷静,马立亚,等. 基于 SPEI 的南水北调中线水源区干旱时空特征[J]. *人民长江*, 2019, 50 (7): 92-97. (SHI Wei, LEI Jing, MA Liya, et al. Spatio-temporal drought characteristics in water source area of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion based on SPEI [J]. *Yangtze River*, 2019, 50 (7): 92-97. (in Chinese))
- [14] 马梦阳. 海河流域降水变化规律及其对水资源量的影响[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2019.
- [15] 韩冬梅. 海河流域干旱事件演变规律及发展趋势预估[D]. 邯郸:河北工程大学, 2015.
- [16] 韩宇平,马海娇,严登华. 典型干旱指标在海河流域的适用性评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37 (1): 6-14. (HAN Yuping, MA Haijiao, YAN Denghua. Applicability evaluation of typical drought indexes in the Haihe River Basin [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2016, 37 (1): 6-14. (in Chinese))
- [17] 刘浏,王素芬,刘丽丽. 海河流域干旱特征时空演变规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33 (增刊 1): 157-159. (LIU Liu, WANG Sufen, LIU Lili. Spatio-temporal characteristics of droughts in Haihe River Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33 (Sup1): 157-159. (in Chinese))

- [18] 王文静,延军平,刘永林,等. 基于综合气象干旱指数的海河流域干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2), 336-344. (WANG Wenjing, YAN Junping, LIU Yonglin, et al. Characteristics of droughts in the Haihe Basin based on meteorological drought composite index [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 336-344. (in Chinese))
- [19] 严小林,张建云,鲍振鑫,等. 海河流域农业干旱演变趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 221-225. (YAN Xiaolin, ZHANG Jianyun, BAO Zhenxin, et al. Analysis of evolution of agricultural drought in Haihe River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(3): 221-225. (in Chinese))
- [20] OGUNTOYINBO J S. Drought prediction [J]. Climatic Change, 1986, 9(1/2): 79-90.
- [21] HASSAN W U, NAYAK M A. Global teleconnections in droughts caused by oceanic and atmospheric circulation patterns [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(1): 014007.
- [22] 杨贵羽,王知生,王浩,等. 海河流域 ET_0 演变规律及灵敏度分析 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 409-415. (YANG Guiyu, WANG Zhisheng, WANG Hao, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 409-415. (in Chinese))
- [23] 严登华,袁喆,杨志勇,等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析 [J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 34-41. (YAN Denghua, YUAN Zhe, YANG Zhiyong, et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 34-41. (in Chinese))
- [24] 卢路,刘家宏,秦大庸. 海河流域 1469-2008 年旱涝变化趋势及演变特征分析 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 8-11. (LU Lu, LIU Jiahong, Qin Dayong. Analysis of drought/waterlogging variation tendency and evolution features in Haihe River Basin from 1469 to 2008 [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 8-11. (in Chinese))
- [25] PEREIRA A R, PRUITT W O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration [J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(3): 251-257.
- [26] WANG Qianfeng, SHI Peijun, LEI Tianjie, et al. The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(13): 3760-3769.
- [27] TONG Siqin, LAI Quan, ZHANG Jiquan, et al. Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980-2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent [J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 1557-1565.
- [28] TABARI H, TALAEE P H, NADOUSHANI S S M, et al. A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran [J]. Quaternary International, 2014, 345: 158-166.
- [29] DAI Aiguo, TRENBERTH K E, QIAN Taotao. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [30] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(7): 699-706.
- [31] 王学凤,路洁,曹永强. 辽宁省近 54 年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究 [J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1514-1524. (WANG Xuefeng, LU Jie, CAO Yongqiang. Analysis of drought and flood characteristics in Liaoning Province and its response to atmospheric circulation in the last 54 years [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1514-1524. (in Chinese))
- [32] 武英娇. 基于 SPEI 的中国东部干旱变化特征及其与东亚夏季风和海表温度的关系 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [33] 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))
- [34] 刘森,周园园,鲁春霞. 1958—2017 年京津冀地区气候干旱变化特征 [J]. 水资源研究, 2020, 9(1): 73-81. (LIU Miao, ZHOU Yuanyuan, LU Chunxia. Climate drought characters in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1958-2017 [J]. Journal of Water Resources Research, 2020, 9(1): 73-81. (in Chinese))
- [35] 郝振纯,闫龙增,鞠琴,等. 海河流域不同地貌气候变化时空分析 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 56-60. (HAO Zhenchun, YAN Longzeng, JU Qin, et al. Spatiotemporal characteristics of climate variation in different kinds of landforms of Haihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 56-60. (in Chinese))
- [36] WANG Shanshan, HUANG Jianping, HE Yongli, et al. Combined effects of the Pacific decadal oscillation and El Niño-southern oscillation on global land dry-wet changes [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6651.
- [37] XIAO Mingzhong, ZHANG Qiang, SINGH V P. Influences of ENSO, NAO, IOD and PDO on seasonal precipitation regimes in the Yangtze River Basin, China [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(12): 3556-3567.

(收稿日期: 2021-07-10 编辑: 施业)