

基于 SPI 指数的宁夏中部干旱带 1960—2012 年干旱特征研究

胡悦^{1,2}, 杜灵通^{1,2}, 侯静^{1,2}, 刘可^{1,2}, 朱玉果^{1,2}

(1. 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要: 研究宁夏中部干旱带的干旱特征可为区域农牧业发展和防灾减灾提供科学决策依据。利用 1960—2012 年的各站点气象观测资料, 计算标准化降水指数 (SPI), 并借助集合经验模态分解、功率谱分析和重新标度极差分析等方法, 对近 50 年来的干旱特征和变化趋势进行了研究。研究结果表明, 宁夏中部干旱带在 1960—2012 年间发生中旱以上的干旱事件达到了总干旱次数的 30% 以上; 干旱波动周期的多尺度分解显示, 该区域存在着 0.5 a 尺度的轻旱, 1 a 尺度的中旱, 3 a 尺度的重旱和 10 a 尺度的特旱; 平均干旱强度的年际波动周期特征中, 有平均超过 65% 的贡献来自于 3.25—4 a 左右的干旱周期波动, 而平均超过 14% 的贡献来自于 5.78—6.5 a 左右的干旱周期波动; 总体来看, 宁夏中部干旱带的干旱趋势处于增强态势, 且具有长程依赖性, 即未来还将持续干旱, 但不同季节的干旱趋势特征又表现出一定的差异。

关键词: 干旱; 标准化降水指数; 集合经验模态分解; 功率谱分析; 宁夏中部干旱带

中图分类号: S162.1 **文献标志码:** A

Drought characteristics in arid zone of middle Ningxia from 1960 to 2012 base on SPI index

HU Yue^{1,2}, DU Ling-tong^{1,2}, HOU Jing^{1,2}, LIU Ke^{1,2}, ZHU Yu-guo^{1,2}

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China,

Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of

Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: With the purpose to provide scientific basis for regional agricultural development and disaster prevention and mitigation, by using the meteorological data from three in-situ stations during 1960 to 2012, the drought characteristics and variation trends in arid zone of middle Ningxia were studied by the method of standardized precipitation index (SPI), along with ensemble empirical mode decomposition (EEMD), power spectrum analysis and rescaled range analysis (R/S). The results showed that more than 30% of drought events, which happened in arid zone of middle Ningxia from 1960 to 2012, were moderate or even more serious drought. The multi-scale decomposition of drought period showed that there existed four time scales for the change cycle of different intensities of drought, i.e., 0.5 a for mild drought, 1 a for moderate drought, 3 a for severe drought, and 10 a for extreme drought. The EEMD analysis showed that the inter-annual fluctuation of drought was mainly derived from a 3.25—4 a period which contributed more than 65% to the whole variance, and followed by a 5.78—6.5 a period which contributed more than 14%. On the whole, the drought in arid zone of middle Ningxia is enhancing currently and this trend has a long-range dependence. Therefore, this region will keep a sustained drought in the future, but the characteristic of drought trend in various seasons is different.

Keywords: drought; standardized precipitation index; ensemble empirical mode decomposition; power spectrum analysis; arid zone of middle Ningxia

收稿日期: 2015-12-24
基金项目: 国家自然科学基金(41201438); 宁夏高等学校科学研究重点项目(NGY2014001); 宁夏大学研究生创新项目(GIP2015041)
作者简介: 胡悦(1992—), 女, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事遥感灾害研究。E-mail: 365493815@qq.com。
通信作者: 杜灵通(1980—), 男, 宁夏同心人, 博士, 副研究员, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: dult80@qq.com。

全球气候变暖现已成为一个不争的事实,气候变暖使得各类灾害频发,严重威胁着人类社会的经济和环境的可持续发展。在各类灾害中,旱灾是我国目前主要的农业气象灾害,平均每年受灾面积最高可达 2 200 万 hm^2 ^[1]。宁夏是中国西部典型的生态脆弱区和气候变化敏感区^[2],干旱半干旱的气候特征导致了宁夏干旱灾害频发,而中部干旱带又是宁夏干旱灾害最为严重的区域,频发的气象干旱事件常常导致该地区的农牧生产受损。因此,研究其干旱变化特征和未来演化趋势,不仅可为地方政府抗旱行动提供决策支持,而且可为区域生态建设提供理论依据。

旱灾因其具有影响范围广、持续时间长、发生频率高的特点,引起了国内外学者的广泛关注,并开发了一系列的监测指标对区域干旱灾害开展研究。目前国内外发展成熟的气象干旱监测和评估指标有标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)和地表湿润指数等。马柱国等^[3]利用地表湿润指数对我国北方极端干旱的分布特征进行了研究,发现东北和华北两个地区在近 10 年中极端干旱频率显著增加。白桦等^[4]使用 12 月标准化降水指数(SPI12)评估了渭河流域气象干旱程度及水文旱涝演变规律。黄妙芬^[5]用帕默尔干旱指数分析了中国黄土高原西北部地区的干旱特征。现有的研究和实践应用证明,标准化降水指数是一种简单易行且监测效率较高的指数,适宜于不同气候区的干旱监测与变化特征分析。

为了挖掘时间序列气候数据的内在特征和变化趋势^[6],近年来发展起了许多新的分析方法,集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD),通过对时间序列数据的有效分解,可从不同尺度上探索时间序列数据的内在波动特征和趋势变化^[7-8];以傅里叶变换为基础的功率谱分析能够有效判断时序数据的波动周期^[6];而重新标度极差(Rescaled Range Analysis, R/S)分析构建的赫斯特指数(Hurst, H),能用于判断时间序列数据是否具有自相似和长程依赖性,广泛用于分析预测气候要素的未来变化趋势^[9]。这些气候诊断技术和方法,为现在的气候学研究,特别是干旱变化特征研究提供了强有力的手段。为此,本研究基于标准化降水指数和这些先进的气候诊断技术与分析方法,对宁夏中部干旱带的气候干旱内在特征和演变趋势展开研究,以期对区域农牧业和经济社会发展提供科学依据。

1 研究区概况、数据及方法

1.1 研究区概况

宁夏位于中国西北地区的东部,处在东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区的交汇过渡带。宁夏的气候特征南北差异较大,根据自然地理特征和农牧业生产特征可将全省划分为北部引黄灌区、中部干旱带和南部山区三个地理单元(图 1)。中部干旱带在行政区划上包括盐池、同心和红寺堡 3 个县(区)的全境及中宁、灵武、海原、利通区、沙坡头区等县(市、区)的部分区域,由于气候为典型大陆性气候,年平均降水量在 200 ~ 400 mm 之间,日照强烈、蒸发量大,故被称为中部干旱带。中部干旱带是农牧交错区,自然植被主要为干草原和荒漠草原,农业以旱作为主,辅以少量扬黄灌溉和井灌区。地带性土壤为棕钙土和灰钙土,腐殖质层较薄,肥力低。由于降水量少,且年内降水分布不均匀,常发生气象干旱,干旱灾害也是中部干旱带最主要的自然灾害之一,对区域农牧业生产影响很大。

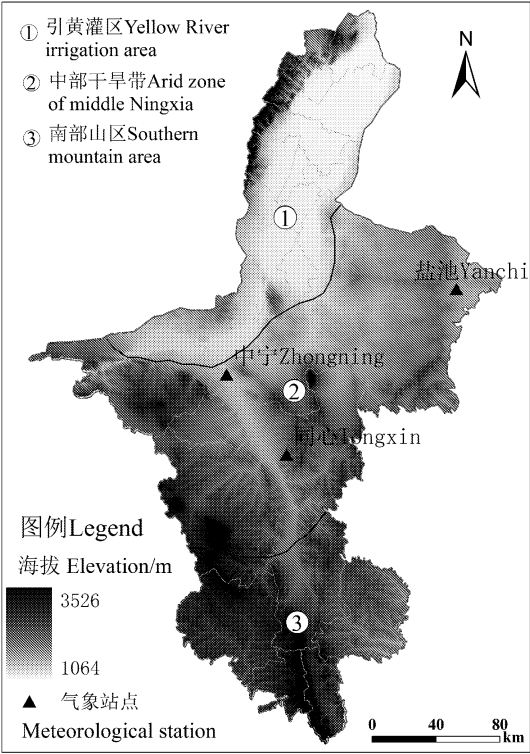


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 数据来源

宁夏中部干旱带上有盐池、中宁、同心、韦州和兴仁堡 5 个常规气象站,其中韦州和兴仁堡的数据序列较短,且区域代表性不强。虽然中宁县境内大部分属于引黄灌区,但由于中宁气象站位于县境南

侧,其降水特点和地理位置更接近于中部干旱带的盐池和同心,因此也作为中部干旱带的典型站点^[10]。本文选取了基本均匀分布于研究区的盐池、中宁和同心 3 个典型气象站开展研究,从中国气象科学数据共享网(<http://www.esiience.gov.cn/>)获取了 3 个气象站 1960 年 1 月到 2012 年 12 月的逐月气象观测数据,观测要素包括降水量和平均气温。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数 标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)是一种应用广泛的气象干旱指数,他是表征某时段降水量出现的概率多少的指标,适合于月以上时间尺度的干旱监测与评估。由于 SPI 采用 Γ 函数的标准化降水累积频率分布来描述降水量的变化,因此其值在不同地区和不同时间段之间具有可比性。由于自然降水量是一种偏态分布,所以在计算标准化降水指数时,先将偏态概率分布的降水量进行了正态标准化处理,再用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级^[11-12],计算公式如下^[13]:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \tag{1}$$

式中, $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308, S$ 为概率密度系数, $t = \sqrt{\ln(1/G(x)^2)}$, $G(x)$ 是与 Γ 函数相关的降水分布概率, x 为降水量,当 $G(x) > 0.5$ 时, $S = 1$; 当 $G(x) \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。 $G(x)$ 由 Γ 分布函数概率密度积分公式求得:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx, x > 0 \tag{2}$$

式中, γ, β 分别为形状和尺度参数。

本研究利用盐池、中宁和同心 3 个县 1960—2012 年的逐月降水资料,计算了逐月标准化降水指数,并按照 SPI 数值的大小划分出不同的干旱等级,根据《气象干旱等级 GB/T20481 - 2006》中的分级标准分为特旱 ($SPI \leq -2.0$)、重旱 ($-2.0 < SPI \leq -1.5$)、中旱 ($-1.5 < SPI \leq -1.0$)、轻旱 ($-1.0 < SPI \leq -0.5$) 和无旱 ($-0.5 < SPI$)。

1.3.2 集合经验模态分解方法 集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)是基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)发展起来的一种自适应时间序列分析技术,其改进了经验模态分解中由于信号间隔不连续而引起的模态混叠问题,适用于非线性、非平稳的时间序列数据分析^[14],如分析时间序列气候要素,提取干旱灾害等气候变化的信息^[15-17]。EEMD 在原始信号中加入若干次白噪声,把信号和噪声的组合作为一

个待分解信号,再利用 EMD 将原始数据分解成不同尺度的内在模态分量(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个残余趋势分量(RES),步骤如下^[18]:

1) 通过给目标信号序列 $x(t)$ 加上一组有限振幅的白噪声 $w(t)$ 来获得一个总体序列 $X(t)$:

$$X(t) = x(t) + w(t) \tag{3}$$

2) 对 $X(t)$ 进行 EMD 分解,得到第一个 IMF 分量 c_1 ,代表原始序列中最高频的分量。用 $X(t)$ 减去 c_1 ,得到去掉高频成分的残余序列 r_1 ,同理可得 $c_2, c_3, \dots, c_n$,直到 r_n 满足预先给定的终止准则,分解终止,得到 $X(t)$:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \tag{4}$$

3) 将不同的白噪声 $w_i(t)$ 加入到目标信号中,并重复以上步骤: $X_i(t) = x(t) + w_i(t)$,分解后得到各自的 IMF 分量组:

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij} + r_{in} \tag{5}$$

4) 取相应 IMF 的均值作为最终的 IMF 组:

$$c_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij} \tag{6}$$

其中, N 为总体的个数。

本研究利用集合经验模态分解法对 1960—2012 年盐池、中宁和同心县的 SPI 数据进行分解,获取干旱信号的时间尺度特征,分解过程中将扰动白噪声与原始信号的信噪比设置为 0.2,集合平均次数设置为 150。

1.3.3 功率谱分析方法 功率谱是一种提取序列数据周期的分析方法,用于研究信号在频域中的各种特征。功率谱分析是以傅里叶变换为基础的频域分析方法,将时间序列数据的总能量分解到不同频率的分量上,根据不同频率波的方差贡献诊断出序列数据的主周期,从而确定序列数据隐含的各个显著周期^[6]。目前功率谱分析方法已在气象分析和气候变化研究中得到广泛应用^[19-22],计算公式如下^[23]:

1) 自相关系数计算:

$$r(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{t=1}^{n-j} \left(\frac{x_t - \bar{x}}{S} \right) \left(\frac{x_{t+j} - \bar{x}}{S} \right) \tag{7}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t \tag{8}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \tag{9}$$

2) 粗谱估计:

$$E(k) = \frac{1}{m} \left[r_0 + 2 \sum_{j=1}^{m-1} r(j) \cos\left(\frac{k\pi}{m}j\right) + r(m) \cos(k\pi) \right] \tag{10}$$

式中, $t = 1, 2, \dots, n, n$ 为序列长度, $j = 1, 2, \dots, m,$

m 为最大时滞, $\bar{x}$ 为序列的均值, S 为序列的标准差, k 为不同波数。则主周期 T_k 与相应波数 k 和时滞 m 的关系为: $T_k = 2m/k$ 。

1.3.4 赫斯特指数 重新标度极差分析方法是组成分形理论的重要部分,最早由水文学家 Hurst 在研究尼罗河水文流量时提出,通过计算赫斯特指数 (H) 来分析时间序列数据的分形特征和长期记忆过程^[24],计算公式如下^[25]:

考虑一个时间序列 $x(t), t = 1, 2, \cdots, N$, 对于任意正整数 $n \geq 1$, 定义均值序列:

$$\langle x \rangle_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t) \quad n = 1, 2, \cdots, N \quad (11)$$

1) 计算累积离差:

$$X(t, n) = \sum_{\mu=1}^t (x(\mu) - \langle x \rangle_n) \quad 1 \leq t \leq n \quad (12)$$

2) 计算极差:

$$R(n) = \max_{1 \leq t \leq n} X(t, n) - \min_{1 \leq t \leq n} X(t, n) \quad (13)$$

3) 计算标准差:

$$S(n) = \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - \langle x \rangle_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

考虑比值 $R(n)/S(n) \triangleq R/S$, 若 $R/S \propto n^H$ 存在, 则说明时间序列 $x(t)$ 存在 Hurst 现象, H 为 Hurst 指数, 由 n 、 R/S 的对数序列通过最小二乘法

拟合得到, 值在 0 – 1 之间。 $0 < H < 0.5$ 时, 表示时间序列数据在未来会发生逆转; $0.5 < H < 1$ 时, 表示时间序列数据具有长持续性。本研究利用赫斯特指数, 判断宁夏中部干旱带未来干旱发展的趋势和长程依赖性。

2 结果与分析

2.1 干旱强度及频次变化

在计算 1960—2012 年盐池、中宁和同心 3 县逐月 SPI 的基础上, 依据 SPI 值大小划分不同的干旱等级, 统计近 53 年间不同干旱等级发生的频次(表 1)。结果表明, 盐池县共发生轻旱以上等级干旱 215 次; 中宁县共发生轻旱以上等级干旱 206 次; 同心县共发生轻旱以上等级干旱 189 次。从发生干旱的等级来看, 近 53 年盐池、中宁和同心 3 县发生的干旱事件中, 超过中旱以上的干旱事件达到了总干旱次数的 30% 以上; 其中中旱平均发生周期在 0.93—1.2 a 之间, 基本上为年年有中旱, 特大干旱发生周期在 8.83—17.67 a 之间, 基本上为十年一大旱。尽管不同等级干旱的发生在近 53 年间存在不均性, 但从总体干旱强度和发生频率来看, 中部干旱带各县是宁夏发生干旱频率较高的地区, 这与人通过空间遥感数据研究的结果一致^[26]。

表 1 1960—2012 年干旱情况统计
Table 1 Statistics of drought conditions from 1960 to 2012

地区 Area	SPI 范围 Range of SPI	干旱分级 Grade of drought	发生次数 Frequency	占总次数百分比/% Percentage of total	平均周期/a Average period
盐池 Yanchi	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	轻旱 Mild drought	135	62.79%	0.39
	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	中旱 Moderate drought	57	26.51%	0.93
	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	重旱 Severe drought	17	7.91%	3.12
	$\text{SPI} \leq -2.0$	特旱 Extreme drought	6	2.79%	8.83
中宁 Zhongning	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	轻旱 Mild drought	143	69.42%	0.37
	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	中旱 Moderate drought	44	21.36%	1.20
	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	重旱 Severe drought	16	7.76%	3.31
	$\text{SPI} \leq -2.0$	特旱 Extreme drought	3	1.46%	17.67
同心 Tongxin	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	轻旱 Mild drought	110	58.20%	0.48
	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	中旱 Moderate drought	54	28.57%	0.98
	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	重旱 Severe drought	21	11.11%	2.52
	$\text{SPI} \leq -2.0$	特旱 Extreme drought	4	2.12%	13.25

2.2 干旱灾害多尺度变化特征

采用集合经验模态分解分别对宁夏中部干旱带的盐池、中宁和同心 3 县 1960—2012 年的逐月 SPI 数据进行逐步分解, 3 县均可分解获得 8 个具有不同波动周期的固有模态函数分量 (IMF1 – 8) 和一个残余趋势分量 (RES) (图 2)。其中各 IMF 分量分别包含了由高到低的不同频率信息, 即盐池、中宁和同心 3 县的 SPI 序列数据包含有多个时间尺度的波动

特征, 且各个 IMF 组分分别体现原始序列的不同波动周期的局部化特性, 最后分解残余的趋势项表示的是原始数据序列总体上随时间变化的趋势。在 8 个 IMF 分量中, 由于 IMF1 代表的是 EEMD 分解时模型添加的白噪声信息, 所以图 2 中剔除高频分量 IMF1。从图中可以看出, 其余各 IMF 分量均有其相对稳定的准周期, 在相同的时间段内, 不同时间尺度的准周期振荡随着时间也呈现出或强或弱的非均匀变化。

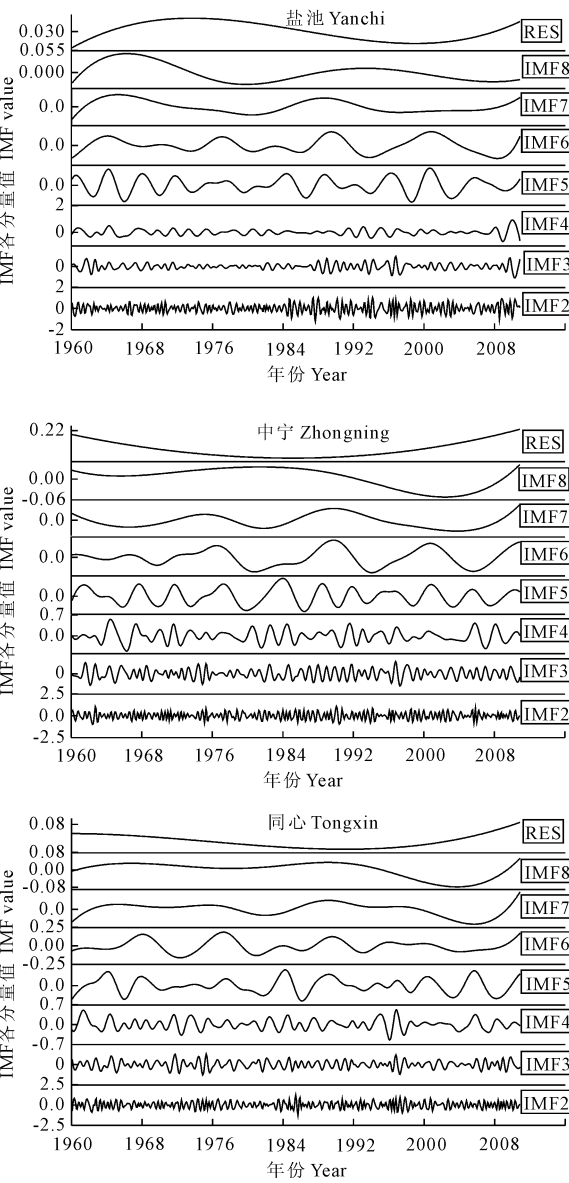


图 2 1960—2012 年逐月 SPI 的 EEMD 分解结果

Fig.2 EEMD decomposition results of monthly SPI from 1960 to 2012

通过求取 IMF2 – 8 各分量的平均周期,发现盐池、中宁和同心 3 县的 SPI 均存在 0.5 ~ 35 a 的多种时间尺度波动周期(表 2)。其中 IMF2 分量的波动周期为 0.55 ~ 0.57 a,与发生轻旱的频率(0.37 ~ 0.48 a)基本一致,故可推断 IMF2 分量为发生轻旱的波动;IMF3 分量的波动周期为 1.12 ~ 1.23 a,与发生中旱的频率(0.93 ~ 1.20 a)基本一致,因此其可能为发生中旱的波动;IMF4 则是发生重旱的波动;而约十年一遇的特旱则与 IMF6 分量的周期基本一致。研究计算了每个 IMF 分量对原始信号的方差贡献率,用于量化表征每种尺度信号波动频率和振幅对原始数据总体特征的影响程度,同时用皮尔逊相关系数来衡量每个 IMF 分量和原始序列的相关性,结果如表 2 所示。从中可以看出,IMF2 的方差贡献率最高,随着 IMF 分量周期的增大,其方差贡献率也相应的降低,同时 IMF 分量与原始序列的相关系数也随着降低。这一结果表明,宁夏中部干旱带盐池、中宁和同心 3 县的干旱灾害存在着 0.5 a 尺度的轻旱,1 a 尺度的中旱,3 a 尺度的重旱和 10 a 尺度的特旱。

2.3 基于功率谱的年际干旱周期分析

通过 EEMD 分解后获取的 IMF 各分量的波动周期,是从 IMF 分量的波谱曲线中主观判别出来的,由于各 IMF 分量波谱并不是具有稳定周期和振幅的波动函数,因此计算出的 IMF 分量的周期存在一定的主观性。为获取年际干旱的准确周期,本研究利用功率谱分析方法,从时序信号的频率域对盐池、中宁和同心 3 县的干旱发生周期进行定量分析。由于年平均 SPI 序列数据的 IMF1 和 IMF2 分量的方差贡献率最大(表 3),因此,利用功率谱重点分析了盐池、中宁和同心 3 县的年平均 SPI 原始序列以及 IMF1、IMF2 两个高频分量序列。

表 2 中部干旱带各县逐月 SPI 序列 EEMD 分解的各 IMF 分量特征

Table 2 IMF component characteristics for EEMD decomposition of monthly SPI in arid zone of middle Ningxia

地区 Area	IMF 分量 IMF Component	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	RES
盐池 Yanchi	波动周期 Period of fluctuation/a	0.56	1.23	2.26	4.40	8.83	21.20	26.50	
	相关系数 Correlation coefficient	0.481**	0.357**	0.270**	0.223**	0.116**	0.108**	0.069	0.019
	方差贡献率 Variance contribution/%	17.10	10.10	5.50	3.34	0.92	0.73	0.06	0.00
中宁 Zhongning	波动周期 Period of fluctuation/a	0.55	1.20	2.40	5.30	10.60	17.67	35.33	
	相关系数 Correlation coefficient	0.489**	0.385**	0.322**	0.211**	0.147**	0.105**	0.052	0.012
	方差贡献率 Variance contribution/%	18.49	10.42	5.36	3.09	0.89	0.37	0.11	0.31
同心 Tongxin	波动周期 Period of fluctuation/a	0.57	1.12	2.21	5.78	9.64	13.25	35.33	
	相关系数 Correlation coefficient	0.504**	0.387**	0.294**	0.227**	0.168**	0.161**	0.137**	-0.022
	方差贡献率 Variance contribution/%	19.10	9.45	4.00	3.49	0.81	0.47	0.15	0.01

注 (Note): * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

表 3 年平均 SPI 各分量方差贡献率

Table 3 The variance contribution ratio for each component of average annual SPI

地区 Area	方差贡献率/% Variance contribution				
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	RES
盐池 Yanchi	71.57	14.03	8.14	3.80	2.47
中宁 Zhongning	74.93	14.07	8.74	1.42	0.85
同心 Tongxin	67.35	18.64	5.94	3.08	4.98

功率谱的分析结果显示(图 3),盐池县年平均 SPI 原始序列主要存在一个 4 a 的准周期;同心存在 5.78、3.25 a 和 2.36 a 的准周期,其中 5.78 a 的准周期最强;而中宁县则表现出 6 个不同的准周期特征,

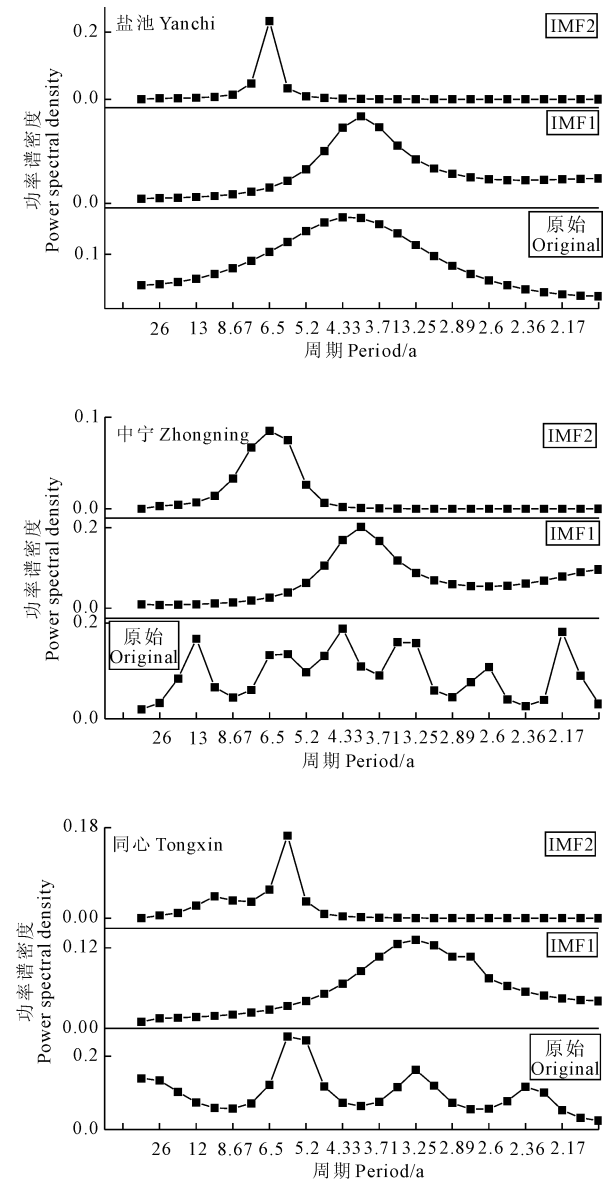


图 3 中部干旱带各县年平均 SPI 序列功率谱分析结果

Fig.3 Power spectrum analysis results of annual SPI in arid zone of middle Ningxia

但最强的为 13、4.33 a 和 2.17 a 的准周期。对原始年平均 SPI 序列方差贡献率在 67.35% ~ 74.93% 的 IMF1 分量和方差贡献率在 14.03% ~ 18.64% 的 IMF2 分量分析的结果显示,盐池、中宁和同心 3 县年平均 SPI 的 IMF1 分量存在 3.25 ~ 4 a 的准周期,而 IMF2 分量存在 5.78 ~ 6.5 a 的准周期。这一结果说明,在宁夏中部干旱带各县的平均干旱强度年际波动周期特征中,有平均超过 65% 的贡献来自于 3.25 ~ 4 a 左右的干旱周期波动,而平均超过 14% 的贡献来自于 5.78 ~ 6.5 a 左右的干旱周期波动。

2.4 干旱趋势分析

为了探讨宁夏中部干旱带近 50 年来干旱的变化趋势特征,本研究利用一元线性回归对盐池、中宁和同心 3 县全年 SPI 平均值的变化趋势进行了分析,同时也分析了各站点春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月到次年 2 月)SPI 平均值的变化趋势,以此来探讨宁夏中部干旱带不同地区、不同季节干旱演变特征,结果如表 4 所示。从全年 SPI 平均值的变化趋势来看,3 县的 SPI 值在近 50 年中均呈现降低趋势,而 SPI 值越低则表征该县气象干旱越严重,由此可知在近 50 年中,宁夏中部干旱带的气象干旱一直处于增强的趋势,且以同心县为最强,一元线性回归斜率为 -0.0050。但不同季节的干旱趋势特征又表现出差异,其中 3 县的春旱、秋旱表现为增强趋势;盐池和中宁的冬旱有所减弱,但同心的冬旱在近 50 年基本不变;盐池、同心的夏旱在减弱,但中宁的夏旱却在增强。但近 50 年的干旱线性趋势中,只有同心的春旱增强趋势通过 $P < 0.05$ 的显著性检验,秋旱增强趋势通过 $P < 0.01$ 的极显著性检验,其他趋势均未通过显著性检验。

同时,研究计算了近 50 年盐池、中宁和同心 3 县全年及四个季节 SPI 均值的赫斯特指数,用于分析宁夏中部干旱带干旱趋势的长程依赖性和持续性,并依据赫斯特值的大小,划分出较弱持续($0.5 < H \leq 0.6$)、中等持续($0.6 < H \leq 0.7$)、较强持续($H > 0.7$)和较弱逆转($0.4 \leq H < 0.5$)等不同的持续特征。从表 4 可以看出,3 县年干旱强度均具有持续的增强趋势,且同心达到了中等持续;从季节来看,盐池和中宁 2 县春旱增强的趋势在未来会出现较弱逆转,而同心春旱增强的趋势则继续保持较弱的持续性;夏、秋和冬季的赫斯特指数均大于 0.5,即这三个季节盐池、中宁和同心 3 县的干旱会继续保持当前 50 年的趋势,并表现出不同的持续性。

表 4 近 50 年干旱变化趋势及持续特征

Table 4 Variation trend and persistence of drought in recent 50 years

地区 Area	年/季 Year/Season	回归斜率 Regression slope	拟合优度 R^2 Goodness of fitting	显著性 P Significance	干旱趋势 Drought trend	Hurst 指数 Hurst index	趋势持续性 Persistence of trend
盐池 Yanchi	全年 Annual	-0.0020	0.0110	0.4360	增强 Enhanced	0.5291	较弱持续 Low persistence
	春 Spring	-0.0050	0.0160	0.3510	增强 Enhanced	0.4718	较弱逆转 Low reversion
	夏 Summer	0.0010	0.0010	0.7910	减弱 Weakened	0.5776	较弱持续 Low persistence
	秋 Autumn	-0.0090	0.0520	0.1000	增强 Enhanced	0.7152	较强持续 Strong persistence
	冬 Winter	0.0040	0.0200	0.3120	减弱 Weakened	0.5461	较弱持续 Low persistence
中宁 Zhongning	全年 Annual	-0.0020	0.0120	0.4310	增强 Enhanced	0.5974	较弱持续 Low persistence
	春 Spring	-0.0050	0.0200	0.3010	增强 Enhanced	0.4670	较弱逆转 Low reversion
	夏 Summer	-0.0020	0.0030	0.6900	增强 Enhanced	0.5819	较弱持续 Low persistence
	秋 Autumn	-0.0080	0.0480	0.1130	增强 Enhanced	0.7392	较强持续 Strong persistence
	冬 Winter	0.0070	0.0560	0.0870	减弱 Weakened	0.6122	中等持续 Medium persistence
同心 Tongxin	全年 Annual	-0.0050	0.0700	0.0550	增强 Enhanced	0.6048	中等持续 Medium persistence
	春 Spring	-0.0120	0.0740	0.0480 *	显著增强 Enhanced at 0.05 level	0.5293	较弱持续 Low persistence
	夏 Summer	0.0030	0.0070	0.5390	减弱 Weakened	0.6297	中等持续 Medium persistence
	秋 Autumn	-0.0140	0.1280	0.0080 * *	极显著增强 Enhanced at 0.01 level	0.6711	中等持续 Medium persistence
	冬 Winter	0.0000	0.0000	0.9950	不变 Invariant	0.5384	较弱持续 Low persistence

注: * 和 * * 分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 显著水平。
Note: * and * * indicate significance at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

3 结 论

本研究利用宁夏中部干旱带盐池、中宁和同心 3 县 1960—2012 年的气象资料,在计算标准化降水指数(*SPI*)的基础上,利用集合经验模态分解、功率谱分析和重新标度极差分析等方法,对中部干旱带近 50 年来的干旱变化特征进行了研究,研究取得如下几点结论:

1) 不同干旱等级的统计结果表明,在 1960—2012 年间,中部干旱带盐池、中宁和同心 3 县发生的干旱事件中,超过中旱以上的干旱事件达到了总干旱次数的 30% 以上;其中中旱平均 0.93—1.2 a 发生一次,为年年有中旱,特大干旱 8.83—17.67 a 发生一次,为十年一大旱。

2) 集合经验模态分解获取的干旱灾害多尺度变化特征表明,宁夏中部干旱带盐池、中宁和同心 3 县的干旱灾害存在着 0.5 a 尺度的轻旱,1 a 尺度的中旱,3 a 尺度的重旱和 10 a 尺度的特旱。

3) 功率谱分析得出,在宁夏中部干旱带各县的平均干旱强度年际波动周期特征中,有平均超过 65% 的贡献来自于 3.25—4 a 左右的干旱周期波动,而平均超过 14% 的贡献来自于 5.78—6.5 a 左右的

干旱周期波动。

4) 宁夏中部干旱带的干旱趋势总体处于增强态势,但不同季节的干旱趋势特征又表现出差异,盐池、同心的夏早在减弱,但中宁的夏旱却在增强;盐池和中宁的冬早在减弱,但同心的冬旱基本不变。赫斯特指数分析显示,中部干旱带各县年平均干旱强度的增强趋势均具有长程依赖性,即未来还将持续干旱。

参 考 文 献:

[1] 徐建文,居辉,刘勤,等.黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报,2014,34(2):460-470.
[2] 陈晓光,李剑萍,韩颖娟,等.宁夏近 20 年来植被覆盖度及其与气温降水的关系[J].生态学杂志,2007,26(9):1375-1383.
[3] 马柱国,华丽娟,任小波.中国近代北方极端干湿事件的演变规律[J].地理学报,2003,58(s):69-74.
[4] 白桦,穆兴民,王飞,等.渭河流域气象及水文旱涝演变规律分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):237-241.
[5] 黄妙芬.黄土高原西北部地区的旱度模式[J].气象,1990,17(1):23-28.
[6] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
[7] Wu Z H, Schneider E K, Kirtman B P, et al. The modulated annual cycle: an alternative reference frame for climate anomalies[J]. Climate

