

# 基于 SPEI 渭北黄土台塬区干旱时空演变特征

刘 宇<sup>1,2</sup>, 李雯晴<sup>1,2</sup>, 刘 招<sup>2,3</sup>, 余玉聪<sup>1,2</sup>, 尤烽骅<sup>1,2</sup>, 杨 舟<sup>1,2</sup>

(1.长安大学 水利与环境学院, 西安 710054; 2.长安大学

旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3.长安大学 水与发展研究院, 西安 710054)

**摘 要:**基于 1969—2016 年渭北黄土台塬区 10 个气象站实测资料,计算不同时间尺度标准化降水蒸散指标(SPEI),采用 Mann-Kendall 检验、Morlet 小波分析、R/S 分析等方法,研究了区域干旱时空演变特征。结果表明:(1) 48 a 来渭北黄土台塬区年及四季干旱均呈增强趋势,未来有很大可能继续向干旱化发展;(2) 年干旱在 1991 年发生显著突变,春、夏、秋、冬季干旱分别在 1996 年、2010 年、2002 年、1978 年发生显著突变;(3) 年及春、夏、秋季均明显存在着 4~18 a 的短周期和 20 a 以上的长周期,冬季明显存在 3~11 a 的短周期和 12~30 a 的长周期;(4) 轻旱、中旱、重旱、极旱发生频率自西向东分别呈“高一低一高一低”、“逐渐增高”、“逐渐降低”和“中间高两边低”的分布规律,且干旱发生频率整体上符合轻旱>中旱>重旱>极旱的规律;(5) 春季干旱演变对年干旱演变的贡献率最大。研究结果有助于了解区域干旱演变特征,为水文生态建设及社会经济可持续发展提供科学支撑。

**关键词:**干旱; SPEI 指数; Morlet 小波分析; R/S 分析; 渭北黄土台塬区

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0109-09

## Spatial and Temporal Evolution Characteristics of the Drought in Weibei Loess Tableland Area Based on SPEI

LIU Yu<sup>1,2</sup>, Li Wen Qing<sup>1,2</sup>, Liu Zhao<sup>2,3</sup>, Yu Yucong<sup>1,2</sup>, You Fenghua<sup>1,2</sup>, Yang Zhou<sup>1,2</sup>

(1.School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2.Key Laboratory of

Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710054, China; 3.Institute of Water and Development, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:**Based on the measured data of 10 meteorological stations in the Weibei loess tableland area from 1969 to 2016, the standardized precipitation evapotranspiration indices (SPEI) at different time scales were calculated, and the spatial and temporal evolution characteristics of regional drought were studied by Mann-Kendall test, Morlet wavelet analysis, R/S analysis and other methods. The results show that: (1) the annual and seasonal drought in the Weibei loess tableland area had been increasing in the past 48 years, and it is likely to continue to develop toward aridity in the future; (2) the annual drought had a significant mutation in 1991, while the drought in spring, summer, autumn and winter had a significant mutation in 1996, 2010, 2002 and 1978, respectively; (3) there were obvious short cycles of 4~18 years and long cycles of more than 20 years in spring, summer and autumn, and there were obvious short cycles of 3~11 years and 12~30 years in winter; (4) from west to east, the occurrence frequencies of light drought, medium drought, severe drought and extreme drought showed the distribution patterns of 'high-low-high-low', 'gradually increasing', 'gradually decreasing' and 'low on both sides of the middle high', respectively; moreover, the frequency of drought from big level to small level was moderate drought, mild drought, extreme drought and heavy drought; (5) the contribution rate of spring drought evolution to annual drought evolution was the largest. These results are helpful to understand the characteristics of regional drought evolution and provide scientific support for hydrologic ecological construction and sustainable development of social economy.

**Keywords:**drought; SPEI index; Morlet wavelet analysis; R/S analysis; Weibei loess tableland area

收稿日期:2020-04-19

修回日期:2020-04-30

资助项目:高等学校学科创新引智计划("111"计划)项目(B08039);陕西省重点研发计划项目(2019SF-237);中央高校基本科研业务费资助项目(300102299206;300102269201);西安市建设科技计划项目(SJW2017-11)

第一作者:刘宇(1996—),男,河南周口人,硕士研究生,从事水文学及水资源方向研究。E-mail:liuyu961030@163.com

通信作者:刘招(1975—),男,陕西礼泉人,教授,从事水文学及水资源方向研究。E-mail:lz975@163.com

在全球气候变化的背景下,洪涝、高温、干旱等极端气候灾害事件频繁发生,远高于同期多年平均气候灾害发生频率<sup>[1]</sup>。政府间气候变化专业委员会(IPCC)于 2013 年发布的第五次评估报告中指出<sup>[2]</sup>,干旱在世界范围内不仅影响范围呈增大趋势,而且发生频率呈增加趋势,对区域水文生态环境和社会经济可持续发展造成了严重影响<sup>[3]</sup>。干旱是自然界最为普遍的危害,具有发展慢、范围广、发生频率高和持续时间长等特点<sup>[4]</sup>,据推算,全球因干旱所造成的经济损失远超其他自然灾害,每年约为 60~80 亿美元<sup>[5]</sup>。2010 年中国西南地区遭受了严重干旱,春季干旱显著降低了总初级生产力(GPP)和植被指数,这一影响直到 8 月才完全消除,干旱使该地区 2010 年 GPP 和净初级生产力(NPP)分别减少了 65, 46 TgC/a<sup>[6]</sup>。相关统计表明,全球因气象灾害所死亡的人数占自然灾害死亡人数的 61%,在中国平均每年发生的旱灾所占自然灾害的比例最大,占受灾总面积的 55%,1950—2008 年中国年均受旱面积为 21.57 万 km<sup>2</sup>,成灾面积为 9.56 万 km<sup>2</sup>,因干旱所造成的粮食损失为 158 亿 kg<sup>[7]</sup>。因此,明晰干旱时空变化特征对水文生态建设和社会经济发展具有至关重要的意义。

近年来,国内外众多学者采用不同评价方法对于旱进行了研究分析。李红梅等<sup>[8]</sup>研究了不同干旱指数在青海高原干旱监测的适用性,结果表明标准降水指数(SPI)对于旱监测效果最好,K 指数次之,PA 指数和 MCI 指数最差;茅海洋等对<sup>[9]</sup>帕默尔干旱指数(PDSI)干旱指数与降水 Z 指数进行了对比分析,结果表明 PDSI 干旱指数更适合贵州省干旱分析。鉴于 SPI 指数、PDSI 指数良好的适用性,得到较为广泛的应用,但 SPI 指数、PDSI 指数存在一定的缺陷,如 SPI 指数未考虑潜在蒸散量对干旱的影响,PDSI 指数在干旱等级划分上具有较强的主观性<sup>[10]</sup>。为了更加精确地对干旱进行监测分析,Vicente-Serrano 等在 2010 年提出了融合 SPI 和 PDSI 指数优点的 SPEI 指数,SPEI 指数不仅表现出 SPI 指数的多时间尺度特征,又保留了 PDSI 指数对潜在蒸散量较为敏感的优点,因此在世界各地干旱研究中得到了广泛应用。

黄土塬地区是我国典型生态环境脆弱区,区域气候干旱,水资源短缺,地形破碎、植被退化、土壤质地疏松,不断加剧的土壤侵蚀和水土流失,使得水资源、生态环境和经济发展的矛盾日益突出,严重制约着区域水文生态建设和社会经济发展<sup>[11]</sup>。但目前大多数针对的干旱研究主要集中在黄土高原,对更为特殊的黄土塬干旱研究相对较少,针对黄土塬地区多时间尺度干旱空间时空分布特征的研究更少。鉴于此,本研究选用有塬

周沟谷深切,塬面侵蚀较轻,沟蚀强烈特色的渭北黄土台塬区作为研究对象<sup>[12]</sup>,并选用空间分布较为均匀,能够准确、真实地反映渭北黄土台塬区干旱演变规律的 10 个气象站,通过计算不同时间尺度 SPEI 指数,分析渭北黄土台塬区多时间尺度干旱时空变化特征,以期为渭北黄土台塬区水资源高效利用、水文生态建设和社会经济发展提供科学支撑。

## 1 研究区概况及数据来源

以关中平原渭河以北黄土台塬区作为研究对象(简称渭北黄土台塬区),研究区域西起宝鸡县、陇县,东至韩城市、宜川县,南与渭河北面平原相连,北接黄土高原丘陵沟壑区,包含 35 个县区。研究区域年降水量在 300~900 mm,多年平均降雨量为 576 mm,时空分布不均,雨热同季,干旱威胁大;区内多年平均蒸发量约为 1 100 mm,处于北温带和亚热带,整体属大陆季风性气候。选取黄土台塬区空间分布较为均匀,能够准确、真实地反映台塬区干旱变化规律的长武、武功、咸阳等 10 个气象站点(图 1),所用降水、温度等数据来源于中国气象数据共享服务中心(<http://cdc.nmic.cn/>)。

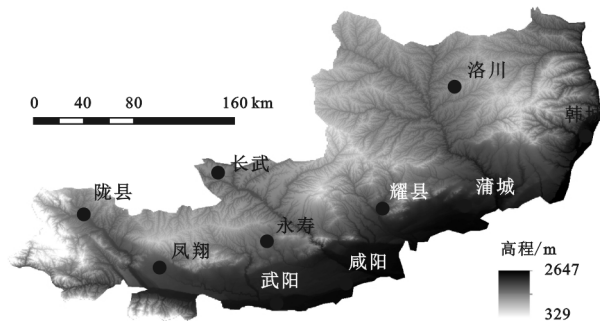


图 1 研究区域位置、DEM 及气象站点分布示意图

## 2 研究方法

### 2.1 标准化降水蒸散指数

标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)是在标准化降水指数(SPI)基础上引入了潜在蒸散量对干旱的影响,用来刻画气象干旱的指标。通过 3 个参数 log-logistic 概率分布函数来计算不同时段降水量与潜在蒸散量差值,得到不同时间尺度的 SPEI 指数,具体计算过程参考文献<sup>[13]</sup>。其中,潜在蒸发蒸腾(PET)指在水量充足的条件下的蒸腾量与蒸发量,目前常用 Thornthwaite, Hargreaves 或 Penman-Monteith 方程计算 PET,本文采用 Vicente-Serrano 推荐的 Thornthwaite 方法计算 PET,公式如下:

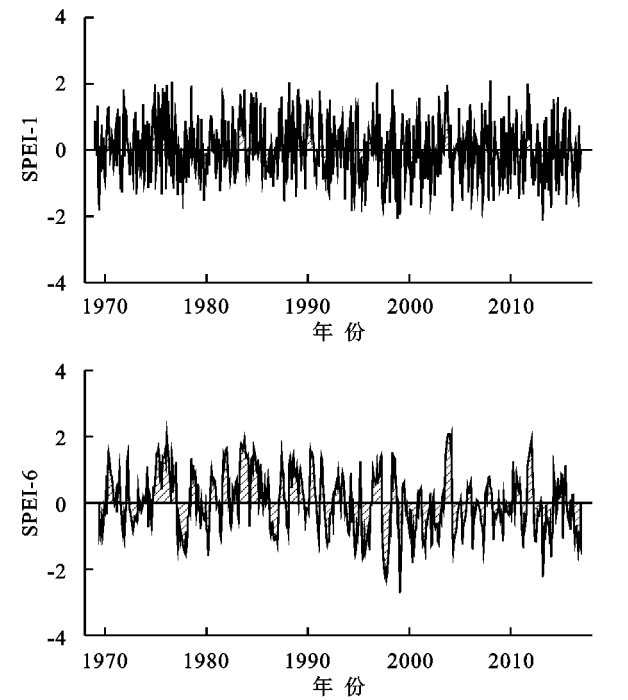
$$PET = 16 \times \left( \frac{10T_i}{H} \right)^4 \quad (1)$$

$$H=\sum_{i=1}^{12}H_i=\sum_{i=1}^{12}(\frac{T_i}{5})^{1.51}\tag{2}$$

式中:PET 为潜在蒸发蒸腾量; $H$  为年热量指数; $T_i$  为月平均温度。

SPEI 指数具有多时间尺度特征,能够反映不同时间尺度降水、气温等对区域干旱综合影响,可用于干旱状况的监测。依据国家气候中心 2006 年发布的《气象干旱等级》<sup>[14]</sup>,对 SPEI 指标进行干旱等级划分(表 1)。

为更合理地反映渭北黄土台塬区年及四季干旱变化特征,本文对渭北黄土台塬区不同时间尺度 SPEI 指数进行研究分析(图 2)。短时间尺度中,SPEI-1 在 1969—2016 年波动幅度最大,主要与月气温、水分变化有关,反映月尺度上干旱演变规律;



SPEI-3 主要受季节降水、温度的影响,反映四季干旱演变规律;SPEI-6 波动幅度较 SPEI-1,SPEI-3 长,反映干湿季演变规律。长时间尺度中,由于短时间的强降水无法决定区域的干湿程度,此时 SPEI-12 变化相对稳定,能较好地体现干旱年际演变特征<sup>[15]</sup>。因此,本文重点分析能够反映季尺度和年尺度干旱演变规律的 SPEI-3 和 SPEI-12 指数。

表 1 基于 SPEI 的干旱等级划分标准

干旱等级	干旱类型	SPEI 值范围
1	无干旱	$SPEI>-0.5$
2	轻度干旱	$-1.0<SPEI\leq-0.5$
3	中等干旱	$-1.5<SPEI\leq-1.0$
4	严重干旱	$-2.0<SPEI\leq-1.5$
5	极端干旱	$SPEI\leq-2.0$

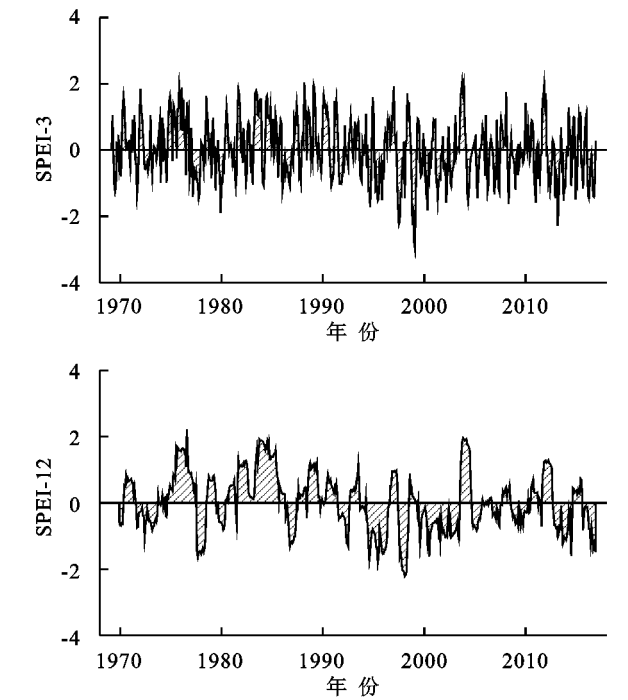


图 2 1969—2016 年不同时间尺度 SPEI 变化

2.2 其他方法

基于 1969—2016 年不同时间尺度的 SPEI 序列,分析了渭北黄土台塬区干旱时空演变特征。采用线性回归、10 a 滑动平均法<sup>[16]</sup>分析年及四季 SPEI 指数的变化趋势;采用 Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 法)、滑动 T 检验及累积距平法<sup>[17]</sup>分析干旱突变发生年份;采用 Morlet 连续复小波分析<sup>[18]</sup>研究干旱变化周期;采用 R/S 分析法<sup>[19]</sup>预测未来干旱变化趋势;采用数理统计和反距离加权法研究分析干旱频率时空变化特征。

3 结果与分析

3.1 SPEI 指数变化特征

从年际变化看(图 3),渭北黄土台塬区 1969—

2016 年平均 SPEI-12 指数呈现明显的波动震荡,整体以 0.012 1/a 速率减少,说明渭北黄土台塬区干旱有增强趋势。年平均 SPEI-12 指数有明显波动特征,在 1990 年、2002 年和 2012 年出现转折,呈“上升—下降—上升—下降”的波动趋势。渭北黄土台塬区 1969—2016 年干旱期主要集中在 1994—2002 年和 2013—2016 年,其中 1995 年和 2016 年干旱强度较大,年均 SPEI-12 指数分别为-1.23(中度干旱)、-0.89(轻度干旱);相对湿润期主要集中在 1974—1990 年,年平均 SPEI-12 值数在 1984 年、1976 年和 1983 年相对较大,分别为 1.65,1.43,1.09。总的来说,48 a 来渭北黄土台塬区干旱有增强趋势,且具有明显的波动特征,1974—1990 年为相对湿润期,1994—2002 年为干旱期。

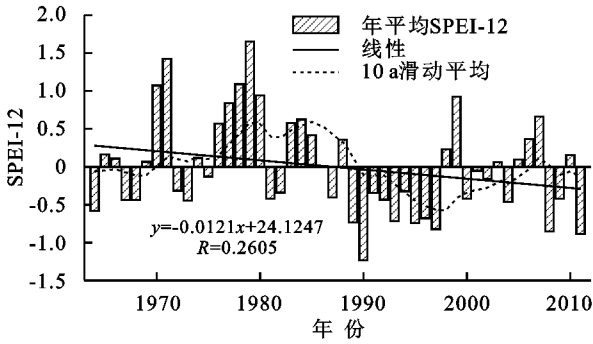
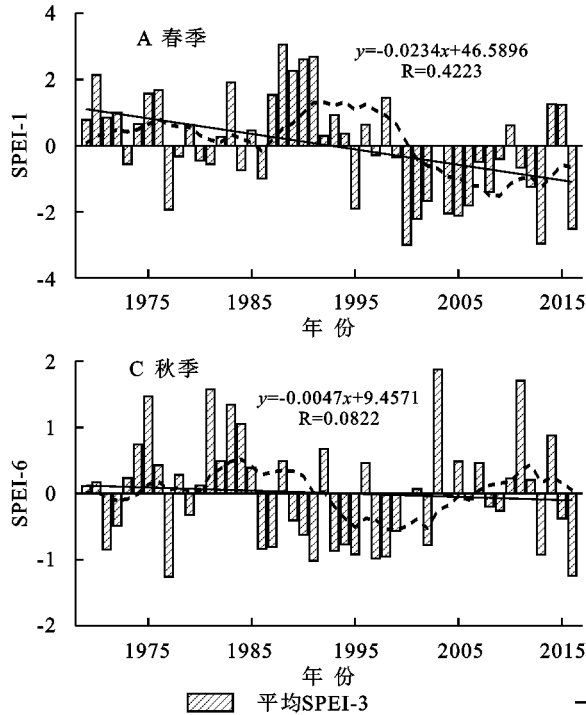


图 3 1969—2016 年 SPEI-12 年际变化特征

从季节变化看(图 4),春、夏、秋、冬四季均呈下降



趋势,下降速率分别为 0.023 4/a,0.007 7/a,0.004 7/a 和 0.007 3/a,其中春季 SPEI-3 指数呈“上升一下降—上升一下降”的波动趋势,在 2000 年之后有变干旱趋势,干旱期集中在 2000—2013 年;夏季 SPEI-3 指数波动幅度较小,无干旱年份集中在 1978—1993 年、1995 年、1997 年较为干旱;秋季 SPEI-3 指数在 1986—1999 年以小于-0.5 为主即以干旱为主,2000 年以后干旱情况有所好转;冬季 SPEI-3 指数波动幅度较小,多无干旱,湿润期主要集中在 1971—1978 年和 2000—2012 年。

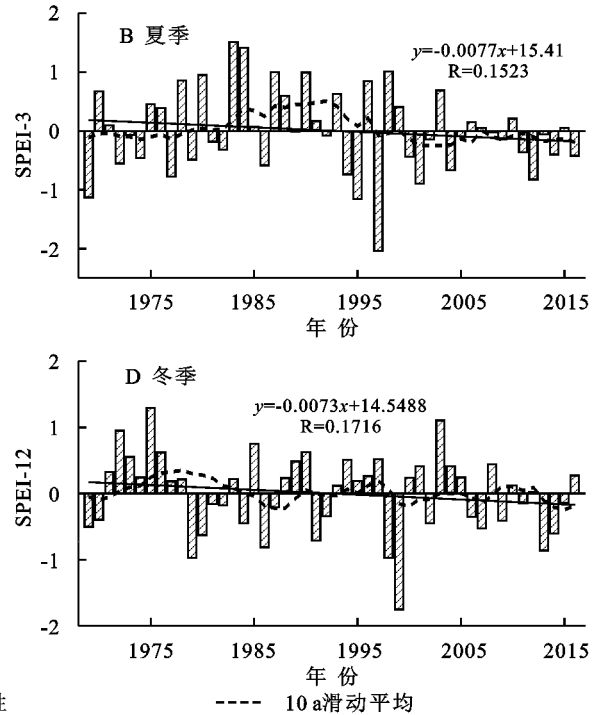


图 4 1969—2016 年 SPEI-3 季节变化特征

### 3.2 干旱频率时空变化特征

3.2.1 干旱频率时间变化特征 根据 SPEI 指数评估等级,选用 SPEI-12 对 48 a 来渭北黄土台塬区干旱事件发生频率进行统计分析,得到不同年代干旱发生频率和不同季节干旱发生频数(图 5)。由图 5A 可知,渭北黄土台塬区 1969—2016 年无干旱和干旱发生频率分别为 69.38%和 30.62%,其中,干旱主要以轻度干旱为主(18.23%),中等干旱发生频率次之(9.20%),极端干旱最少(1.06%)。1980s 干旱发生频率最小(12.50%),且无严重干旱和极端干旱发生;1990s 严重干旱和极端干旱发生频率均最大分别为 5.83%和 5.00%;2000s 干旱发生频率最大(42.5%)是干旱发生最少年代(1980s)的 3.4 倍。

由图 5B 可知,四季干旱频次整体上无较大差异,春季和冬季发生的干旱频次最多,均为 46 次;其次为夏季(41 次);秋季最少(40 次)。从不同干旱等

级在四季内的分布情况可知,轻度干旱发生频次最多,中等干旱次之,极端干旱最少。此外,冬季发生轻度干旱和极端干旱次数均最多分别为 30 次和 3 次,夏季是发生严重干旱最多的季节(6 次),秋季是发生中等干旱次数最多的季节(16 次)。

3.2.2 干旱频率空间变化特征 本研究以年尺度为例对渭北黄土台塬区不同等级干旱空间分布特征进行分析(图 6)。由图 6 可知,不同等级干旱发生频率空间分布上有较大的差异。轻度干旱发生频率自西向东呈“高一低—高一低”的分布规律,其中,陇县轻度干旱发生频率最高(19.12%),武功发生频率最低(11.33%);中等干旱发生频率自西向东呈“逐渐增高”的分布规律;严重干旱发生频率自西向东呈“逐渐降低”的分布规律;研究区域内极端干旱发生频率小于 3%,发生频率相对较高的主要集中在永寿、咸阳、耀县,均位于研究区域中部,呈“中间高两边低”的分布规律,且东部略高于西部。



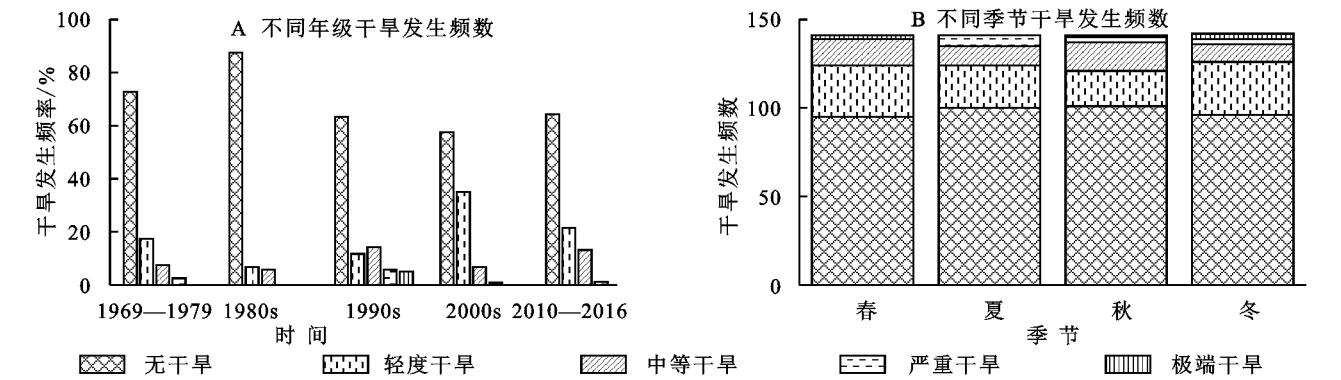


图 5 1969—2016 年渭北黄土台塬区不同年际干旱发生频率及不同季节干旱发生频数

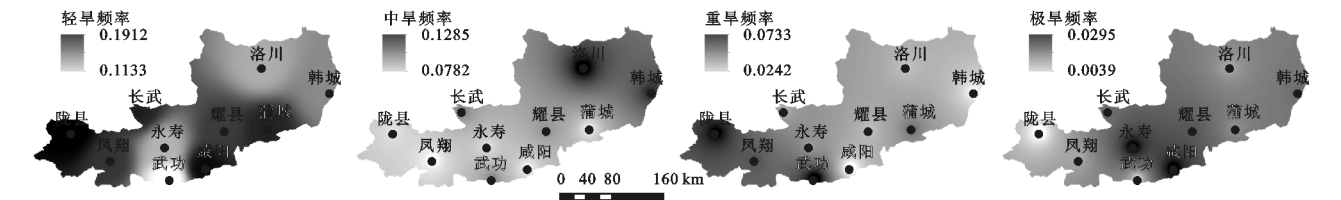


图 6 渭北黄土台塬区各等级干旱频率空间分布

3.3 干旱突变分析

渭北黄土台塬区年平均 SPEI-12 指数年际变化 M-K 检验曲线(图 7A)。UF 曲线显示年平均 SPEI-12 指数经历了下降上升和下降的趋势,其中 UF 值在 1969—1994 年(除 1973 年、1974 年)为正值,表明 SPEI-12 指数在此期间总体呈上升趋势,该时期为相对湿润期;1994 年之后,UF 值均小于 0,尤其 2002 年 UF 值(−2.21)超出  $\alpha=0.05$  的置信区间,说明

SPEI-12 指数呈显著的下降趋势,该时期为相对干旱期。在  $\alpha=0.05$  的置信区间内,UF 和 UB 曲线相交于 1991 年、2010 年、2012 年,为精准确定突变年份,对 SPEI-12 指数进行滑动 T 检验(图 7B),由图 7B 可知,在 1991 年、2010 年、2012 年 3 年中,仅 1991 年滑动 T 检验值超出  $\alpha=0.05$  的置信区间,即在 1991 年存在显著突变,也表明了渭北黄土台塬区年际干旱自 1991 年开始加剧。

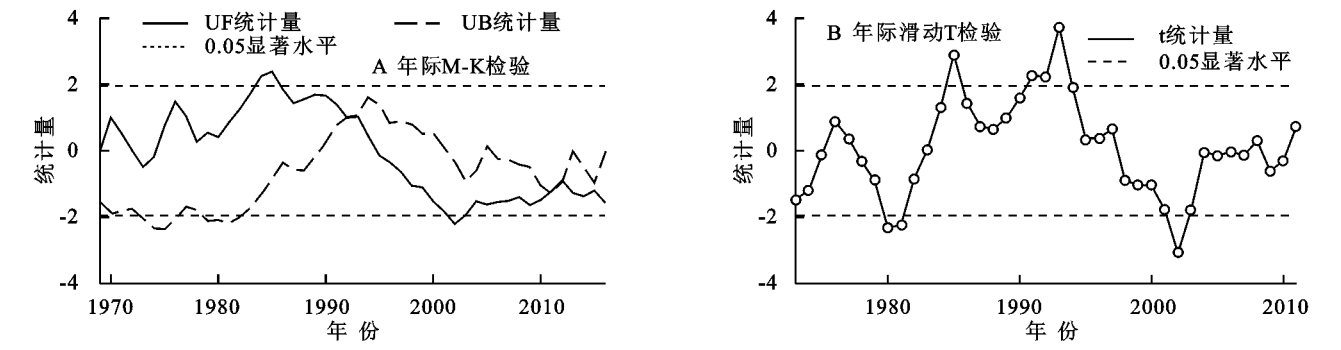


图 7 1969—2016 年渭北黄土台塬区 SPEI-12 年际变化突变检验

渭北黄土台塬区四季平均 SPEI-3 指数变化检验曲线(图 8),由春季 SPEI-3 指数年际变化可知,在  $\alpha=0.05$  的置信区间内,UF 和 UB 曲线相交于 1996 年,且 1996 年滑动 T 检验值超出  $\alpha=0.05$  的置信区间,即在 1996 年存在显著突变。由夏季 SPEI-3 指数年际变化可知,在置信区间内,UF 和 UB 曲线相交于 2010 年、2014 年、2015 年,为精准确定突变年份,对夏季 SPEI-3 指数进行滑动 T 检验,仅 2010 年滑动 T 检验值超出  $\alpha=0.05$  的置信区间,即在 2010 年干旱存在显著突变。

秋季 SPEI-3 指数的 UF 和 UB 曲线交点较多有

1986—1988 年、2002 年、2015 年,对秋季 SPEI-3 指数进行滑动 T 检验,仅 2002 年滑动 T 检验值超出  $\alpha=0.05$  的置信区间,即在 2002 年干旱存在显著突变。冬季 SPEI-3 指数的 UF 和 UB 曲线交点有 1978 年、1987 年、1997 年等,对冬季 SPEI-3 指数进行滑动 T 检验,有 1978 年、1997 年滑动 T 检验值超出  $\alpha=0.05$  的置信区间,即在 1978 年、1997 年干旱存在显著突变,为进一步确定更可能的突变点,对平均 SPEI-3 进行了累积距平分析(图 9),结果表明冬季 SPEI-3 指数在 1978 年突变,综合考虑冬季在 1978 年存在显著干旱突变。

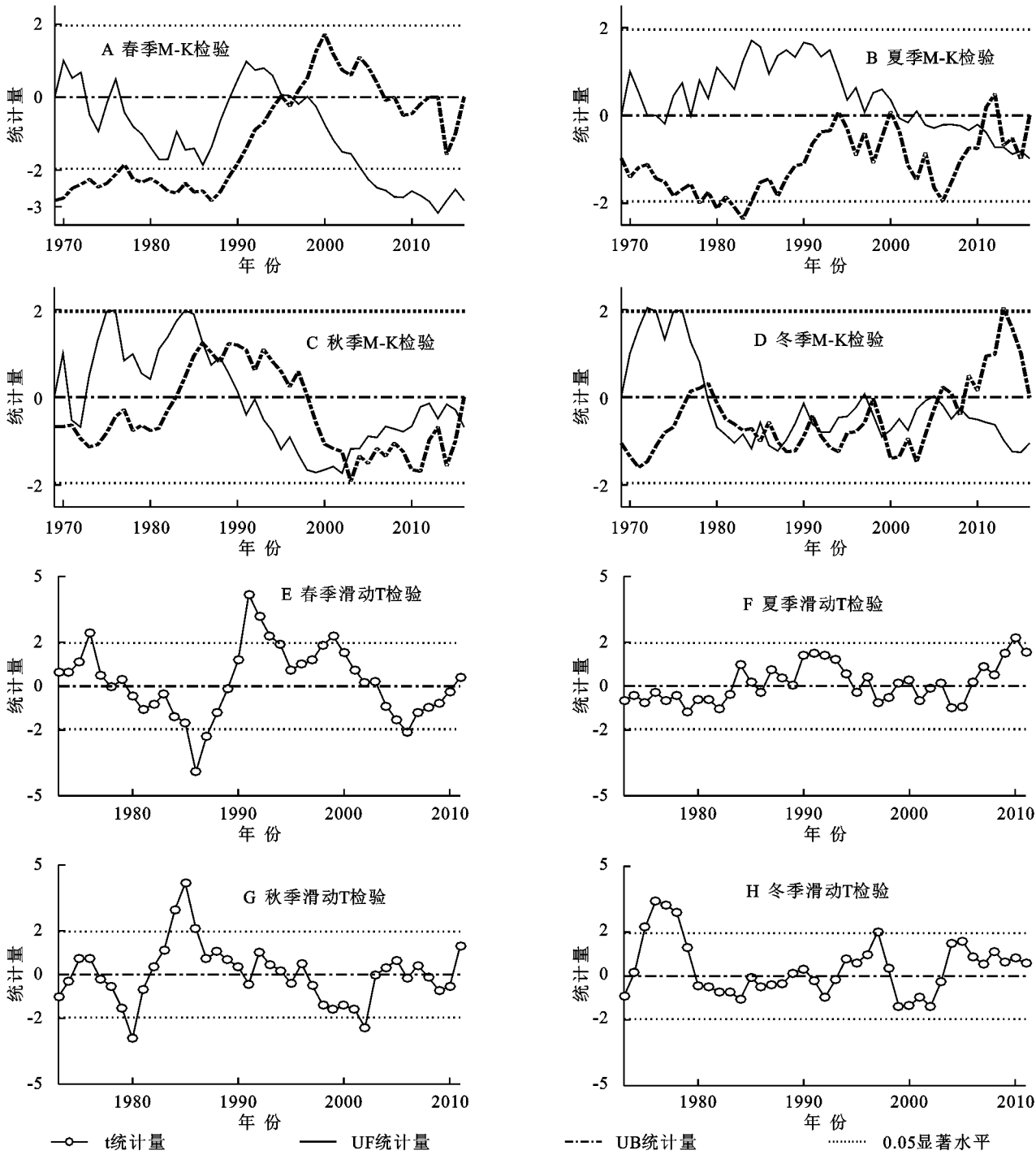


图 8 1969—2016 年渭北黄土台塬区四季 SPEI-3 指数变化突变检验

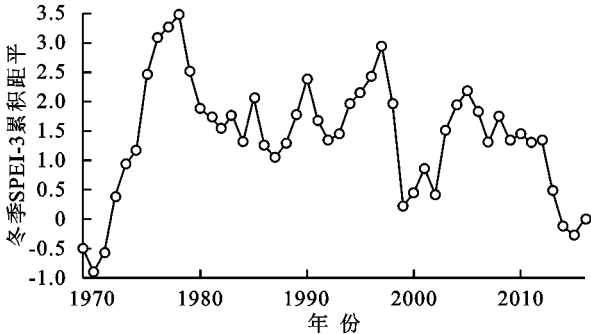


图 9 1969—2016 年渭北黄土台塬区冬季 SPEI-3 指数累积距平

3.4 干旱周期分析

Morlet 小波分析中,小波系数实部正负表示丰枯,当小波系数实部值等值线中心为正时,表示偏湿润,反之表示偏干旱;小波方差用来反映不同时间尺度 SPEI 指数的能量波动的分布特征,并用来绘制不同时间尺度 SPEI 指数演变的主要周期。

由图 10 可知,在年尺度上,明显存在 4~18 a 的短周期和 20 a 以上的长周期;依据小波分析图可知,第一主周期和第二主周期分别对应 11 a,7 a 特征时间尺度,另外可能存在更大时间尺度的主周期,但由

于时间序列较短,未能表现出来;在 11 a 和 7 a 特征时间尺度上,SPEI-12 分别经历了 6 个和 10 个丰—枯变化周期,平均变化周期分别为 8 a 和 4.8 年。在季节尺度上,春、夏、秋三季的变化周期与年际相似,第一主周期和第二主周期分别为 6 a 和 11 a,6 a 和 12 a,15 a 和 11 a,并均可能存在更大的时间尺度周期。冬季明显存在着 3~11 a 的短周期和 12~30 a 的长周期;最大峰值对应着 16 a 时间尺度为第一主周期,21 a 时间尺度对应着第二峰值为第二主周期;16 a 特征时间尺度上,SPEI-3 平均周期为 10.7 a 左右,大约经历了 4.5 个丰—枯变化周期;在 22 a 特征时间尺度上研究区域干旱的变化周期为 13.7 a 左右,大约 3.5 个丰—枯变化周期。

3.5 干旱持续性分析

对于渭北黄土台塬区干旱未来变化趋势的预测,采用 R/S 分析法(表 2)。年际 SPEI-12 的 Hurst 指数为 0.855>0.5,表明干旱具有持续性,即未来渭北黄土台塬区的年际 SPEI-12 指数变化趋势将维持过去下降趋势一致,干旱化将继续加剧。四季 SPEI-3 的 Hurst 指数均>0.5,表明未来四季的 SPEI-3 指数将维持原来的下降趋势。四季变化趋势强度不同,春季 SPEI-3 的 Hurst 指数最大(0.877),持续性最强,表明未来春季 SPEI-3 指数下降的可能性高于其他季节;秋季和夏季 SPEI-3 的 Hurst 指数次之分别为 0.789,0.720,表明未来秋季和夏季 SPEI-3 指数将维持原来的下降趋势,干旱化将加剧;冬季 SPEI-3 的 Hurst 指数最小(0.698),表明未来冬季 SPEI-3 指数下降的可能性相较于其他季节最小,即未来干旱化加剧可能性最小。

表 2 1969—2016 年 SPEI 的 Hurst 指数

ln(n)与 ln(R/S) 双对数回归方程	Hurst 指数(H)	相关系数 (R)
年际: $y=0.348+0.855x$	0.855	0.999
春季: $y=-0.380+0.877x$	0.877	0.999
夏季: $y=-0.302+0.720x$	0.720	0.992
秋季: $y=-0.329+0.789x$	0.789	0.993
冬季: $y=-0.233+0.698x$	0.698	0.987

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究通过计算不同时间尺度的 SPEI 指数,对渭北黄土台塬区干旱时空演变特征进行了研究。发现四季 SPEI-3 指数中,仅春季 SPEI-3 指数下降速率(0.023 4/a)高于年 SPEI-12 指数下降速率(0.012 1/a),并均呈“上升—下降—上升—下降”的波动趋势;年际干旱在

1991 年发生显著突变,与 4 个季节中春季发生干旱突变年份(1996 年)最为接近;年主周期和春季主周期较为接近;春季 SPEI-3 的 Hurst 指数(0.877)与年 SPEI-12 的 Hurst 指数(0.855)最为接近。因此,可以认为春季干旱趋势变化在年际干旱趋势变化中起主导作用,即春季干旱演变对年干旱演变的贡献率最大。

本文对 1969—2016 年渭北黄土台塬区干旱时空变化进行研究发现,区域干旱整体呈增强趋势,春季干旱趋势变化与年际较为相似,陇县和长武干旱发生频率最高。此结论与大范围的研究成果具有一致性,如郭梦等<sup>[20]</sup>基于 SPEI 指数研究了陕西省干旱变化特征,结果表明全省正在向干旱化发展;孙艺杰等<sup>[15]</sup>对黄土高原干旱特征进行研究,结果表明春季干旱趋势变化与年际较为相似,说明此研究成果具有一定的合理性。

我国北方地区干旱化形成原因十分复杂,尤其是近年来气候变化、人类活动加剧,使得气候变暖、水资源过度利用、土地利用类型改变和城市群的扩张等,这都将对干旱化产生了较大的影响<sup>[21]</sup>,究竟是那种影响因素起主导作用有待研究。此外,温度升高是造成渭北黄土台塬区不断向干旱化发展的主要原因之一,温度升高可延长农作物的可生长期,并对冬季小麦安全越冬较为有利,但导致病虫卵安全越冬,将给病虫防治工作带来巨大困难,关于渭北黄土台塬区不断向干旱化发展对区域农业生产的定量影响有待研究<sup>[22]</sup>。总的来说,在变化环境下不同影响因素对渭北黄土台塬区干旱的贡献率及其对农业生产的影响有待更进一步的研究。

4.2 结论

(1) 1969—2016 年渭北黄土台塬区年及四季 SPEI 指数呈减小趋势,年 SPEI-12 指数整体以 0.012 1/a 速率减少,四季 SPEI-3 指数下降速率分别为 0.023 4,0.007 7,0.004 7,0.007 3/a,年及四季 SPEI 指数的 Hurst 指数均大于 0.5,表明未来年及四季干旱将继续维持增强趋势。

(2) 年尺度上,年际干旱发生频率有较大的差异,2000s 干旱发生频率(42.5%)是 1980s 的 3.4 倍;季尺度上,四季干旱发生频率无较大差异,整体上符合轻旱>中旱>重旱>极旱的规律;干旱发生频率空间分布上有较大差异,轻旱、中旱、重旱和极旱发生频率分别呈自西向东呈“高一低—高一低”、“逐渐增高”、“逐渐降低”和“中间高两边低”的分布规律。

(3) 突变分析表明,年及四季 SPEI 指数均发生了由大到小的显著突变,年际干旱自 1991 年开始加剧,春、夏、秋、冬四季干旱分别在 1996 年、2010 年、2002 年、1978 年发生显著突变。

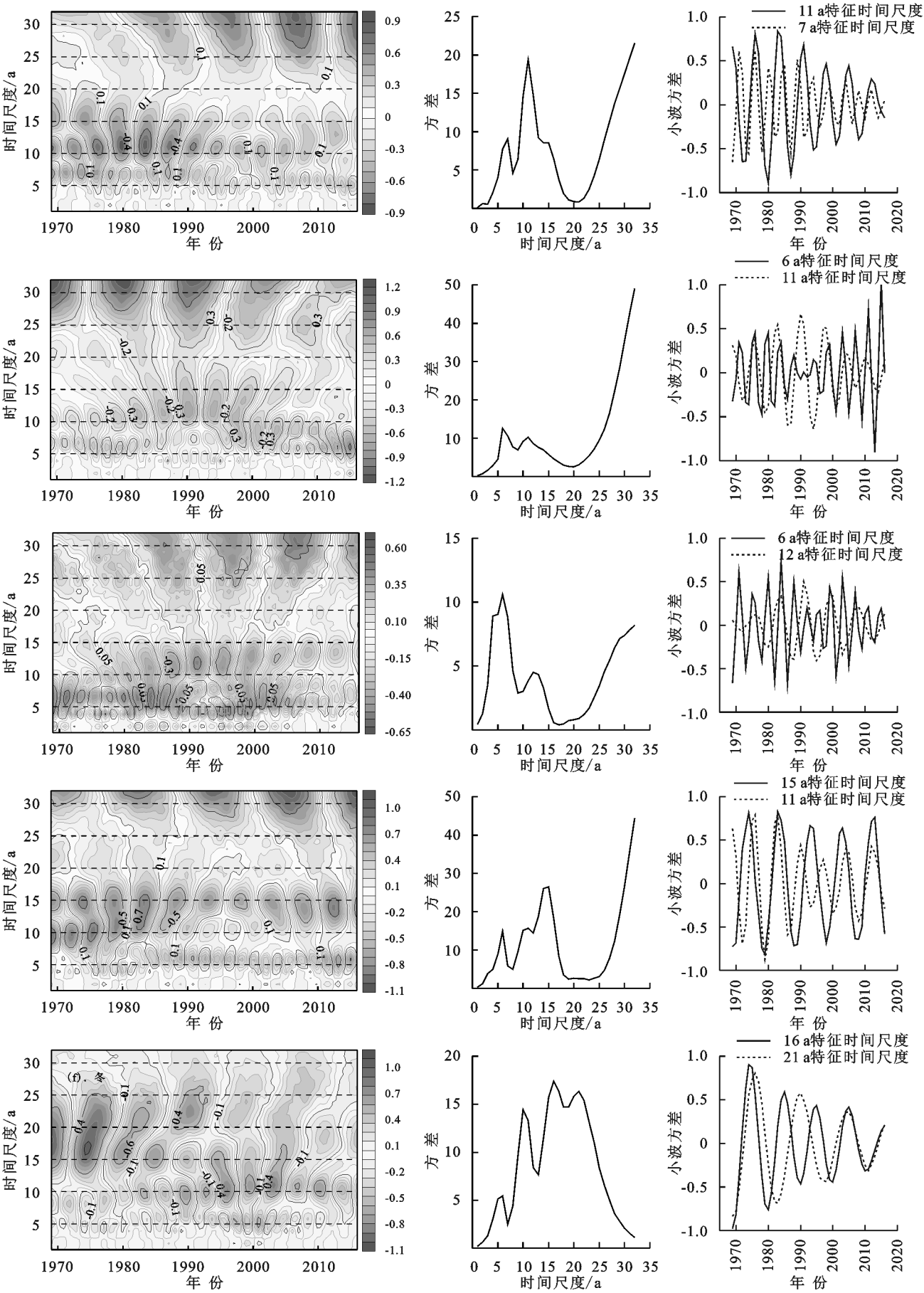


图 10 小波系数实部、方差和特征时间尺度



(4) 小波分析表明,年及春、夏、秋季 SPEI 指数周期性变化特征有一定的相似性,均明显存在着 4~18 a 的短周期和 20 a 以上的长周期,还可能存在着更大尺度的周期;冬季存在着 3~11 a 的短周期和 12~30 a 的长周期。

#### 参考文献:

- [1] 杨涛,陆桂华,李会会,等.气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J].水科学进展,2011,22(2):279-286.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):1835-1848.
- [4] 袁星,马凤,李华,等.全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J].大气科学学报,2020,43(1):1-13.
- [5] 姚玉璧,张强,李耀辉,等.干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J].资源科学,2013,35(9):1884-1897.
- [6] Zhang L, Xiao J, Li J, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China[J]. Environmental Research Letters, 2012,7(4):045706.
- [7] 翁白莎,严登华.变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J].资源科学,2010,32(2):309-316.
- [8] 李红梅,李林,李万志.气象干旱监测指标在青海高原的适用性分析[J].干旱区研究,2018,35(1):114-121.
- [9] 茅海祥,聂云,杨群,等.1980—2018 年贵州省 PDSI 干旱指数与降水 Z 指数对比分析[J].现代农业科技,2020(7):202-204,208.
- [10] 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.
- [11] 冉大川,罗全华,刘斌,等.黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J].水利学报,2004,35(5):7-13.
- [12] 黄晓阳,金晓斌,郭贝贝,等.黄土台塬区农用地整治分区研究[J].资源科学,2014,36(3):438-445.
- [13] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等.1901—2012 年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J].中国沙漠,2015,35(6):1666-1673.
- [14] 中华人民共和国国家标准 GB/T 20481—2006.气象干旱等级[M].北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J].地理研究,2019,38(7):1820-1832.
- [16] 张克新,董小刚,廖空太,等.1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J].水土保持研究,2020,27(2):185-192.
- [17] 冯文文,柳凤霞,钱会,等.气候变化背景下武功地区降水特征[J].水土保持研究,2020,27(2):200-205.
- [18] 张营营,胡亚朋,张范平.黄河上游天然径流变化特性分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):104-109.
- [19] 文广超,王文科,段磊,等.巴音河流域德令哈市气象站近 60 年来降水变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):18-24.
- [20] 郭梦,张奇莹,钱会,等.基于 SPEI 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):127-132,138.
- [21] 马柱国,符淙斌,杨庆,等.关于我国北方干旱化及其转折性变化[J].大气科学,2018,42(4):951-961.
- [22] 程国锋,窦慎,许玮.渭北旱塬区气温变化与冬小麦物候的响应[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):112-115.
- ~~~~~
- (上接第 108 页)
- [29] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [30] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2014:109-200.
- [31] 刘兆羽,盛虎,董莹莹.基于加权平均值的时变 Hurst 指数估计方法研究[J].信息技术,2019,43(11):1-4,9.
- [32] 周伟,刚成诚,李建龙,等.1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].地理学报,2014,69(1):15-30.
- [33] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [34] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J].中国环境科学,2016,36(5):290-300.
- [35] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化[J].地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.
- [36] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [37] Zhang J T, Ru W, Li B. Relationships between vegetation and climate on the Loess Plateau in China[J]. Folia Geobotanica, 2006,41(2):151-163.