中国生态农业学报 2018 年 8 月 第 26 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2018, 26(8): 1236−1248

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171024

徐泽华, 韩美. 山东省干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1236−1248
XU Z H, HAN M. Spatio-temporal distribution characteristics of drought in Shandong Province and it relationship with ENSO[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1236−1248

山东省干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性*

徐泽华, 韩 美**

(山东师范大学地理与环境学院 济南 250358)

摘 要: 基于山东省 15 个气象台站 1964—2010 年的逐月降水和平均气温资料, 采用标准化降水蒸散指数(SPEI)定量分析了山东省不同时间尺度干旱发生频率, 利用 Mann-Kendall 非参数检验法和 Arcgis 软件, 对近 50 年山东省干旱的时空变化趋势进行分析。为了研究厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)对山东省干旱的影响, 运用连续小波(CWT)、交叉小波变换(XWT)和小波相干谱(WTC)分析 SPEI 与 ENSO 指数(多变量 ENSO 指数, MEI)的相关关系和周期特征。结果表明: 多时间尺度的 SPEI 值可以较好地反映山东省的干旱情况; 不同时间尺度的 SPEI 值随时间变化的敏感性存在明显差异, 时间尺度越小, 变化幅度越大。近 50 年山东地区呈现明显的增暖趋势, 其中东部增温最为显著, 降水减少和温度升高使山东气候趋于“暖干化”, 加剧山东省干旱程度。空间变化趋势上, 山东省年 SPEI 和山东省年降水的空间分布具有一致性, 总体有西部变湿润、东部变干的趋势。在干旱发生时间尺度上, 月尺度干旱发生频率高于年尺度干旱发生频率, 四季中春、秋季干旱最为严重。春旱和秋旱以鲁西和鲁西北平原发生频率最高, 各地区之间差异明显。ENSO 暖事件时, 山东易旱; ENSO 冷事件时, 干旱减少。SPEI 存在 1~2.5 a 尺度的年际振荡周期特征, 呈现了与 MEI 指数相似的变化特征。高能量区, SPEI 和 MEI 存在 5~6 a 的共振周期, SPEI 较 MEI 提前 1~2 个月; 低能量区, SPEI 与 MEI 存在 3~3.8 a 呈负相位的共振周期。

关键词: 山东省; SPEI; 干旱; ENSO 事件; 多变量 ENSO 指数; 小波分析

中图分类号: P429 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)08-1236-13

Spatio-temporal distribution characteristics of drought in Shandong Province and it relationship with ENSO*

XU Zehua, HAN Mei**

(School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Drought is the most devastating natural disaster in the world. In recent years, prolonged droughts with huge impacts had caused enormous economic losses in China. Shandong Province belongs to a semi-humid climate, with complex and diverse underlying surfaces and sparse surface vegetation that is sensitive to climate change. Due to uneven distribution of precipitation during the year, drought and flood disasters in Shandong Province have been frequent, with significant impact on agricultural production and socio-economic development. Given the above, it was pivotal to study the spatial and temporal changes in drought in Shandong Province for application in drought monitoring and water resources management. Based on monthly precipitation and average temperature data from 15 meteorological stations in Shandong Province from 1964–2010, the frequency of drought at different time-scales in Shandong Province was quantitatively analyzed using standardized precipitation evapotranspiration index

* 国家自然科学基金面上项目(41371517)和山东省科技攻关计划(2013GSF11706)资助
** 通信作者: 韩美, 研究方向为资源与环境。E-mail: hanmei568568@126.com
徐泽华, 研究方向为气候变化。E-mail: 944571456@qq.com
收稿日期: 2017-11-09 接受日期: 2018-04-20
* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371517) and Shandong Science and Technology Research Program (2013GSF11706).
** Corresponding author, E-mail: hanmei568568@126.com
Received Nov. 9, 2017; accepted Apr. 20, 2018

(SPEI). Using the Mann-Kendall non-parametric test method and Arcgis platform, the trends in temporal and spatial variation of drought in Shandong Province in the recent 50 years were analyzed. In order to study the impact of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) on drought in Shandong Province, the continuous wavelet (CWT), cross wavelet transform (XWT) and wavelet coherence spectrum (WTC) were used to analyze the correlation between SPEI and ENSO index with the periodic characteristics. The results showed that SPEI at multiple time-scales reflected drought condition in Shandong Province. The sensitivity of time-varying SPEI was obviously different. The smaller the time-scale was, the greater the variation range was. In the recent 50 years, Shandong Province had an obvious warming trend, which was most significant in the eastern part of the province. Decrease in precipitation and increase in temperature induced warm and dry climate in Shandong, which aggravated drought conditions in the province. The spatial distributions of SPEI and annual precipitation in Shandong Province were consistent with the trend in spatial change, and the trend in the west had become more humid and in the east more dry. On the time scale of drought occurrence, the frequency of monthly drought was higher than that of annually drought, with spring and autumn having the most severe droughts across the four seasons. The highest frequency of drought occurred in West Shandong and Northwest Shandong Plain, with distinctive difference among different regions. With ENSO warm events, Shandong became prone to drought and ENSO cold events reduced droughts conditions. The annual-inter-annual oscillation cycle characteristics of SPEI was 1.0–2.5 years, showing similarity with the characteristics of Multiple ENSO Index (MEI). In high energy sector, the resonance period was 5.0–6.0 years for SPEI and MEI, but 1–2 months ahead of MEI. In low energy sector, there was a negative phase resonance period for SPEI and MEI of 3.0–3.8 years. The study provided a quantitative basis for understanding the spatial and temporal changes in drought in Shandong Province under global climate change. It also was helpful to decision-makers by improving preparedness and adoption of appropriate policies for agricultural management.
Keywords: Shandong Province; SPEI; Drought; ENSO event; Multiple ENSO index; Wavelet analysis

干旱是全球造成损失最大的自然灾害，也是对人类社会影响最为严重的气象灾害之一，近些年中国干旱灾害频发，干旱持续时间长，影响范围大，造成了巨大经济损失[1]。研究表明，近50年中国北方地区持续干化，其中华北地区干旱化趋势严重，降水减少和温度升高是形成当前华北地区显著干化的主要原因[2]。山东省作为华北地区重要省份，是中国重要的农产区，素有“粮棉油之库，水果水产之乡”之称，粮食产量居全国第2位，并拥有全国最大的蔬菜基地[3]。由于降水量年内分配不均，使山东省旱涝灾害频繁，给农业生产和社会经济发展带来重大影响[4]。因此研究近50年山东干旱变化的规律，为山东省干旱预警，对山东省粮食安全、生态环境建设以及社会经济发展具有重要的现实意义[5]。

由于干旱形成原因和影响因素的不同，导致干旱指数的选取无法统一[6]，常用的干旱指数包括Palmer干旱指数(PDSI)、CI指数、Z指数以及标准化降水指数(SPI)等[7]。PDSI可以较好地监测区域干旱程度，对温度的响应也比较灵敏，但是PDSI指数存在一定的局限性，比如，主要适用于干旱、半干旱区域，在旱情等级界定上有主观因素，在判断极端旱情时可能会滞后几个月[8]。标准化降水指数(SPI)计算过程简便，具有多时间尺度，适用于旱涝监测评估，但是无法反映温度对干旱趋势变化的影响。Vicente-Serrano等[9]在SPI的基础上引入潜在蒸散，提出了新的监测与评估干旱的气候指数SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index)，该指数在考虑了与干旱直接相关的降水条件影响的同时，也考虑了温度对干旱程度的影响，比单纯考虑降水的SPI指数、Z指数及降水距平指数等对干旱有更真实的反映。相关学者[10-14]运用SPEI指数对全国、东北地区及我国云南省、河南省和北京等区域干旱时空特征进行分析，得到了很好的验证。张玉静等[6]应用SPEI指数对华北冬麦区干旱时空分布特征进行研究，得出SPEI指数在华北地区的干旱监测与分析中具有较好适用性的结论。

但鲜有学者将SPEI指数与厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)相结合，探讨ENSO对干旱的影响。本文将SPEI指数应用于山东省，结合山东省15个地面气象观测站1964—2010年逐月降水量和平均气温的实测资料，应用Mann-Kendall非参数统计检验法和Arcgis软件对山东省干旱时间变化及其空间分布格局进行分析，同时基于连续小波分析较长时间SPEI序列的年际代振荡特征基础上，采用交叉小波变换(cross wavelet transform, XWT)和小波相干谱(Wavelet coherence, WTC)探讨山东省干旱与ENSO的相关关系，以期更好地服务于山东省的干旱监测和水资源管理，并为农业生产提供相应服务。

1　研究区域概况

山东省位于中国东部沿海、黄河下游，介于114°47′~122°43′E, 34°23′~38°24′N，东西长约700 km、南北宽约420 km，陆地总面积15.67万km^2，东临黄海并与朝鲜半岛、日本列岛隔海相望，北隔渤海与辽东半岛相对，西连亚欧大陆。山东的地势，中部为隆起的山地，东部和南部为和缓起伏的丘陵区，北部和西北部为平坦的黄河冲积平原。山东省地形以平原丘陵为主，平原、盆地约占全省面积的63%；山地、

丘陵约占34%; 河流、湖泊约占3%。山东省属典型的暖温带季风气候区, 夏季盛行偏南风, 高温多雨; 冬季刮偏北风, 寒冷干燥; 春季天气多变, 干旱少雨多风沙; 秋季天气晴朗, 冷暖适中。全省年均降水量一般为550~950 mm, 其分布特点是东南多西北少。年平均气温11~14 ℃, 由东北沿海向西南内陆递增。特殊的地理和气象特点使全省气象灾害多, 造成的损失大[4]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文数据来源于中国气象数据共享网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do), 选用山东省15个气象站点(图1)1964—2010年月平均气温和月降水数据, 个别站点缺失的数据按照邻近站点线性回归法进行插补, 数据可靠性和连续性均能满足研究的需求。DEM数据为美国国防部国家测绘局发布的SRTM数据(http://www.cgiar-csi.org/)。本文分别以年、季、月作为研究尺度, 季节的定义为: 3—5月为春季, 6—8月为夏季, 9—11月为秋季, 12月和翌年1—2月为冬季。ENSO现象的相位和强度采用多变量ENSO指数(MEI)(https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html), 并选取1964—2010年逐月数据。

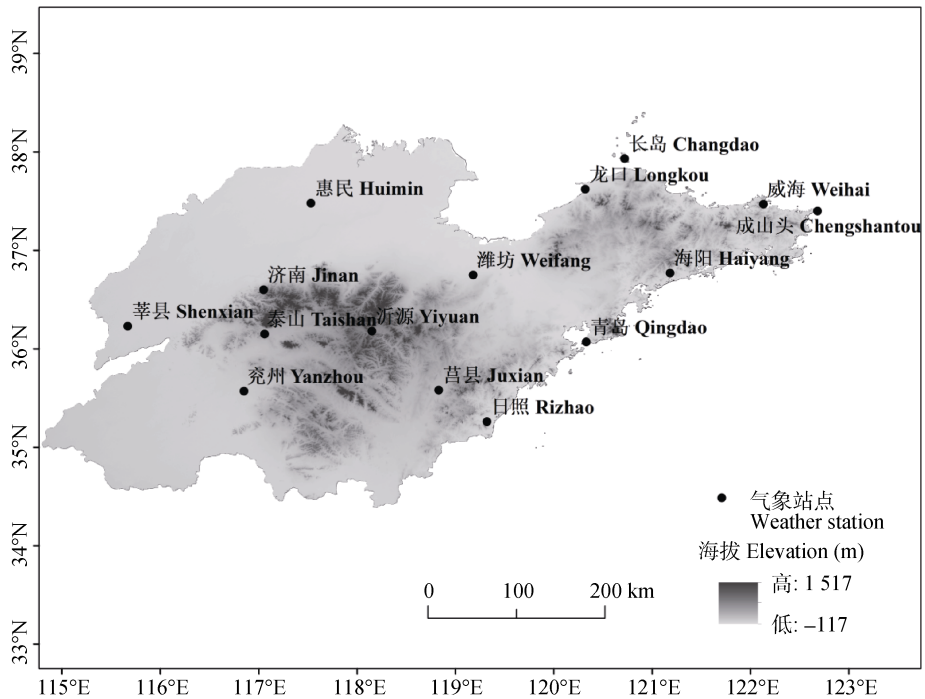

图 1 山东省气象站点分布图

Fig. 1 Distribution map of meteorological stations in Shandong Province

2.2 研究方法

2.2.1 SPEI 计算

SPEI 的假设是历史同月的累积水分亏缺量(即降水量减去蒸散量)序列服从三参数 Log-logistic 分布。其主要计算步骤如下[9]。

第一步计算潜在蒸散量(PET)。采用Vicente-Serrano推荐的Thornthwaite方法:

$$\mathrm{PET}=16.0\left(\frac{10T_i}{H}\right)^A \tag{1}$$

$$H=\sum_{i=1}^{12}H_i=\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \tag{2}$$

式中: PET为潜在蒸散量; T_i为月平均温度; H为年热量指数; A为常数, 由H决定, A=0.49+0.179H–0.000 077 1H^2+0.000 000 675H^3。

第二步, 计算逐月降水量与蒸散量的差额:

$$D_i=P_i-\mathrm{PET}_i \tag{3}$$

式中: D_i为降水量与蒸散量的差值, P_i为月降水量, PET_i为月蒸散量。

第三步采用3个参数的Log-logistic概率分布对D_i数据序列进行正态化, 计算每个数值对应的SPEI指数:

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

式中: 参数 α、β、γ 的计算采用式(5)-(7)。

$$\alpha=\frac{(\omega_0-2\omega_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \tag{5}$$

$$\beta=\frac{2\omega_1-\omega_0}{6\omega_1-\omega_0-6\omega_2} \tag{6}$$

$$\gamma=\omega_0-\alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)1 \tag{7}$$

式中: Γ为阶乘函数, ω_0、ω_1、ω_2为数据序列D_i的概率加权矩:

$$\omega_s = \frac{1}{N}\sum_{i-1}^{N}(1-F_i)^s D_i \tag{8}$$

$$F_i = \frac{i-0.35}{N} \tag{9}$$

式中: N为参与计算的月份个数。最后对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \tag{10}$$

当累计概率 $P \leqslant 0.5$ 时:

$$\omega = \sqrt{-2\ln(P)} \tag{11}$$

$$\mathrm{SPEI} = \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \tag{12}$$

式中: c_0=2.515 517, c_1=0.802 853, c_2=0.010 328, d_1=1.432 788, d_2=0.189 269, d_3=0.001 308。

表 1 给出了国际上通用的基于 SPEI 指数的干旱等级划分标准, 利用该标准, 即可以确定站点在某一年发生干旱的程度[15]。

表 1　SPEI 值的干旱等级分类

Table 1　Classification scales of meteorological drought for SPEI

干旱等级分类 Drought level classification	SPEI 值 SPEI value
正常 Normal	−0.5<SPEI
轻度干旱 Mild drought	−1.0<SPEI≤0.5
中度干旱 Moderate drought	−1.5<SPEI≤−1.0
严重干旱 Severe drought	−2.0<SPEI≤−1.5
极端干旱 Extreme drought	SPEI≤−2.0

2.2.2　干旱发生频率

计算干旱发生频率 p 的公式如下[16]:

$$p = n/N \times 100\% \tag{13}$$

式中: n 为数据序列中干旱发生的次数, N 为数据序列数。

2.2.3　Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall趋势分析法用来检验干旱趋势, Mann-Kendall检验中样本不需要遵循一定的分布, 也不会受到极少数异常值的影响, 在水文、气象等非正态分布的数据中有很大的适用性, 具有计算方便等特点[17]。Mann-Kendall统计量Z, 大于0时是上升趋势, 小于0时是下降趋势。Z的绝对值在大于等于1.28、1.64和2.32时, 分别表示通过了信度90%、95%和99%的显著性检验。本方法在MATLAB软件中编程实现。

3　结果与分析

3.1　山东省多尺度干旱特征

从图2可以看出, 不同时间尺度的SPEI值随时间变化的敏感性存在明显差异, 时间尺度越小, 变化越显著, 其值也会发生较大变化。月尺度SPEI (SPEI-1)受每月温度和水分变化的影响, 能较为准确地反映土壤含水量, 可用于制定农业排水灌溉期; 季尺度SPEI(SPEI-3)主要受季节气温和降水的影响, 能较好地反映土壤下层含水量[13]。SPEI-1对短期降水和温度变化比较敏感, 数值波动性较大。SPEI-3波动周期相对较长, 能更好地体现干湿季节变化规律。年尺度SPEI(SPEI-12)相对聚拢、稳定, 可反映干旱年际变化特征, 对于下层土壤水分和河流径流量等有较好地反映[12,18]。据山东气象灾害大典记载, 山东干旱出现几率高, 地理范围广且持续时间长。月尺度SPEI值波动频率较高, 波动幅度较大, 充分体现了山东省月季尺度旱涝频繁交替的特性。年尺度SPEI值表征的干旱与山东省历史干旱年份情况较为一致: 1968年全省大旱, 春旱和伏旱尤为严重; 1981年全省特大干旱, 降水量比常年偏少37%, 1982年旱情在上年严重干旱的基础上继续发展; 1989年全省大旱, 受灾面积大、时间长且灾情重; 1992年全省严重干旱, 1—7月降雨较常年同期偏少52%; 1997年全省严重干旱, 青岛地区发生有气象记录以来最严重的大范围干旱; 1999年全省大旱, 鲁西北、鲁西南、半岛和鲁中等地区农田受旱严重[19]; 2002年全省干旱, 降水量比常年偏少37.9%[20]。季尺度SPEI值和年尺度SPEI值在这几个时期保持较大的负值, 与历史记录中较大规模的干旱有很好的对应关系。综上说明多时间尺度的SPEI值可以有效地反映山东省的旱涝程度。

3.2　山东省降水和气温时空变化对干旱的影响

从图3a可以看出山东年降水气候倾向率为−7.54 mm·(10a)$^{-1}$, 呈现下降趋势, 但没通过显著性水平检验, 表明下降趋势不够明显; 山东年平均气温(图3b)以0.32 ℃·(10a)$^{-1}$的速率显著上升(P<0.01), 增温趋势明显。降水减少和温度升高使山东气候趋于“暖干化”, 加剧山东地区干旱程度。

利用山东省15个站点的月平均气温和月降水资料, 计算了每个站点温度和降水2个变量1964—2010年的Mann-Kendall统计量Z, 从图4可以看出, 1964—2010年山东降水和气温变化速率空间差异明显, 除莘县站外, 山东西部和鲁中山地降水呈上升趋势, 其中济南站Z>1.64, 通过了置信度95%的显著性检验, 上升趋势显著, 其他大部分地区降水呈下降趋势。IPCC第4次评估报告中指出近100年全球平均气温约上升0.74 ℃[21], 我国近50年来平均温度

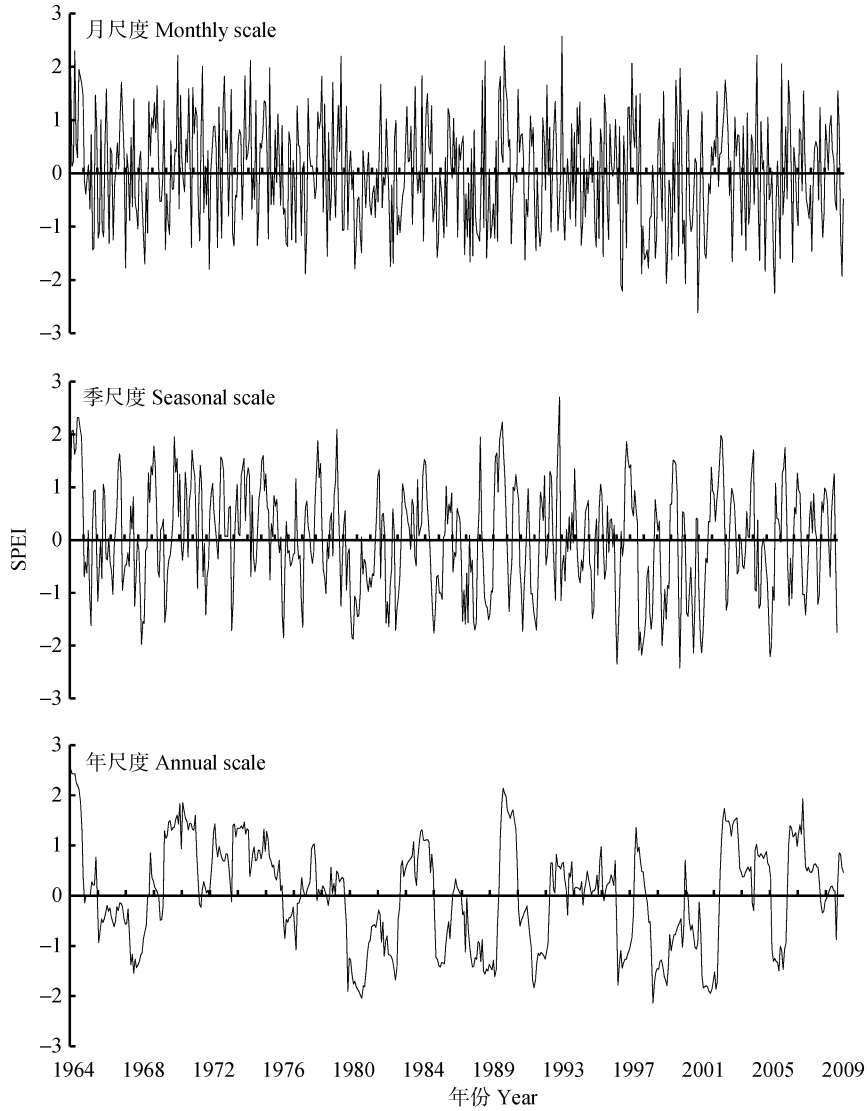

图 2 1964—2010 年山东多时间尺度标准化降水蒸散指数(SPEI)长期动态特征

Fig. 2 Long term dynamic characteristics of multi temporal scale standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Shandong from 1964 to 2010

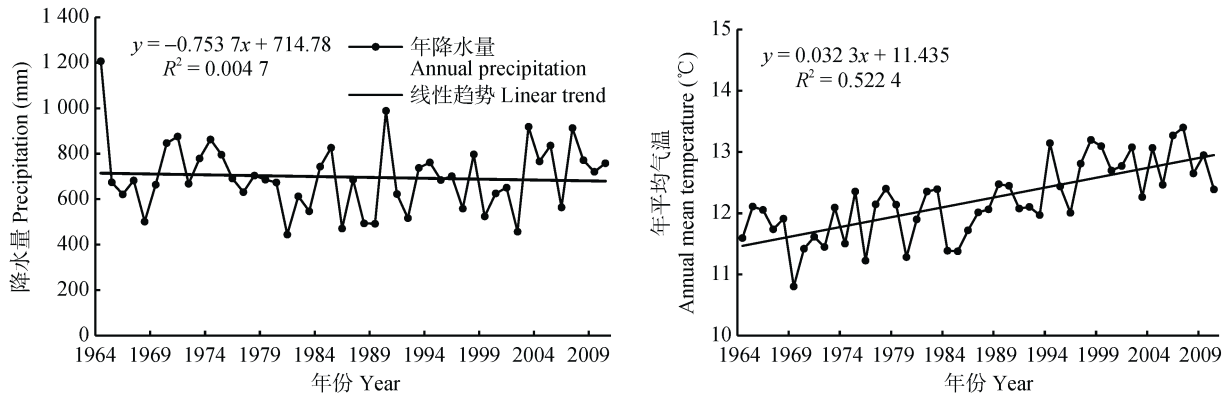

图 3 1964—2010 年山东省年降水量(a)和年平均气温(b)年际变化

Fig. 3 Interannual variations of annual precipitation (a) and annual mean temperature (b) in Shandong Province from 1964 to 2010

升高 1.1 ℃，增温率为 0.22 ℃·(10a)$^{-1}$[6]。我国山东地区增温明显，增温率为 0.32 ℃·(10a)$^{-1}$，增温率超过全国的平均水平。如图 4b 所示，山东省全区域气温都呈显著上升趋势(通过了置信度 99%的显著性检验)，其中东部区域增温速率较大，这与张玉静等[6]的研究结果相一致。

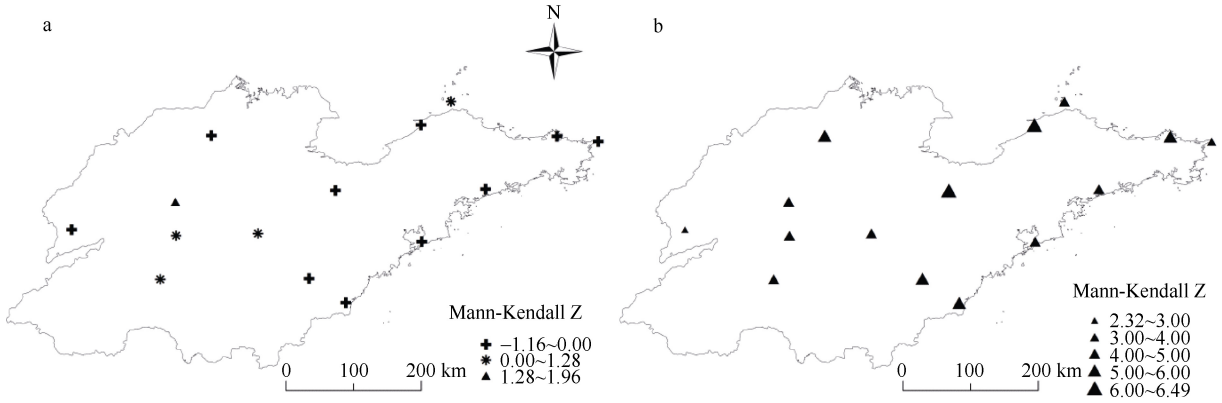

图 4　1964—2010 年山东省年降水(a)和气温(b)变化趋势空间分布特征

Fig. 4　Spatial distribution characteristics of annual precipitation (a) and air temperature (b) in Shandong Province from 1964 to 2010

星号(加号)代表上升(下降)趋势不显著，正三角代表上升；形状大小表示通过了不同的显著性检验。Asterisks (plus) represents no significant increase (decline) trend. Positive triangle represents rise. Size of marks indicates significance level.

3.3　山东省干旱空间变化特征

为进一步分析山东省干旱变化趋势的空间分布特征，将各气象站47年季节尺度和年尺度SPEI值的Mann-Kendall统计量Z值使用Arcgis软件制作成SPEI的Z值空间分布图(图5)。从图5可以看出各季节干旱变化趋势存在明显差异，春季大致呈现西升东降的规律，西部呈湿润化态势，东部呈干旱化态势，其中济南站湿润化趋势显著($P<0.05$)。夏季西部和鲁中山地呈湿润化趋势，但都没有通过显著性检验($P>0.05$)，其他地区除长岛和威海呈微弱湿润化趋势外，都呈现干旱化态势。秋季全省都呈干旱化态势，沿海地区除青岛站呈微弱干旱化趋势外，其他地区都呈较显著的干旱化态势($P<0.1$)。冬季除东部和东南部等小部分地区外，其他地区都呈干旱化态势。年尺度上，除鲁中山地呈湿润化态势外，其他地区均有变干的态势，其中潍坊站和成山头站变干趋势显著($P<0.05$)。

总体而言，除秋季全区域呈干旱化态势外，其他季节和年尺度上全省各地区均有变干或湿润化的态势，且空间格局典型，春夏和年尺度上，大致有胶东半岛呈干旱化趋势，西部内陆呈湿润化趋势的规律，而冬季与之相反。

3.4　山东省干旱空间分布特征

季节尺度上，春旱主要发生在鲁西地区和胶东半岛东部地区，各地区之间差异明显(图 6a)。干旱发生频率最大值出现在莘县和日照地区，达38%以上，沂源和莒县地区干旱发生频率最低，在 30%左右。夏旱较春旱发生频率低，但地区差异较大(图 6b)，干旱发生频率最大值为龙口和青岛地区，达 40%以上；胶东半岛东部和鲁东南地区干旱发生频率最低，在 28%左右，其他地区为29%~34%。秋旱发生频率空间差异较大(图 6c)，高频地区主要集中在鲁西北地区，发生频率均在36%以上，青岛地区干旱发生频率最低，仅为27.66%，秋旱整体发生频率高于夏季。冬旱高频地区主要集中在鲁东地区(图 6d)，尤其是鲁东的海阳地区，干旱发生频率达 40%以上，其他地区干旱发生频率稳定在 26%~30%，整体干旱发生频率低于秋季。

年尺度干旱发生频率整体偏低(图 6e)，地区差异较小，济南和兖州干旱发生频率较高，达 36%以上，莘县和长岛地区干旱发生频率最低，在 26%左右。其他大部分地区干旱发生频率稳定在29%~31%。

月尺度干旱发生频率整体偏高(图6f)，均在31%以上，鲁西北平原和胶东半岛东部地区干旱发生频率较低，为31%~33%，其他大部分地区干旱发生频率稳定在34%~36%，青岛地区干旱发生频率最高，达35.99%，惠民干旱发生频率最低，为31.91%，整体干旱发生频率高于年尺度。

3.5　山东省严重及以上干旱空间分布特征

春季严重及以上干旱主要分布在胶东半岛中西部和鲁东南地区，鲁中西和胶东半岛东部发生频率较低(图7a)，其中莒县和青岛地区发生频率最高，均在10%以上。鲁中山地的泰山地区发生频率最低，仅为2.13%，各地区之间差异显著。夏季严重及以上干旱各地区间差异较小(图7b)，潍坊和日照地区发生频率最高，都在10%以上。龙口地区发生频率最低，仅为4.25%，其他地区发生频率稳定在6%~9%。秋季严重及以上干旱主要分布在鲁西南和胶东半岛西部地区(图7c)，发生频率最高的是青岛和兖州地区，为10.64%。鲁西北平原和胶东半岛东部地区发生频率

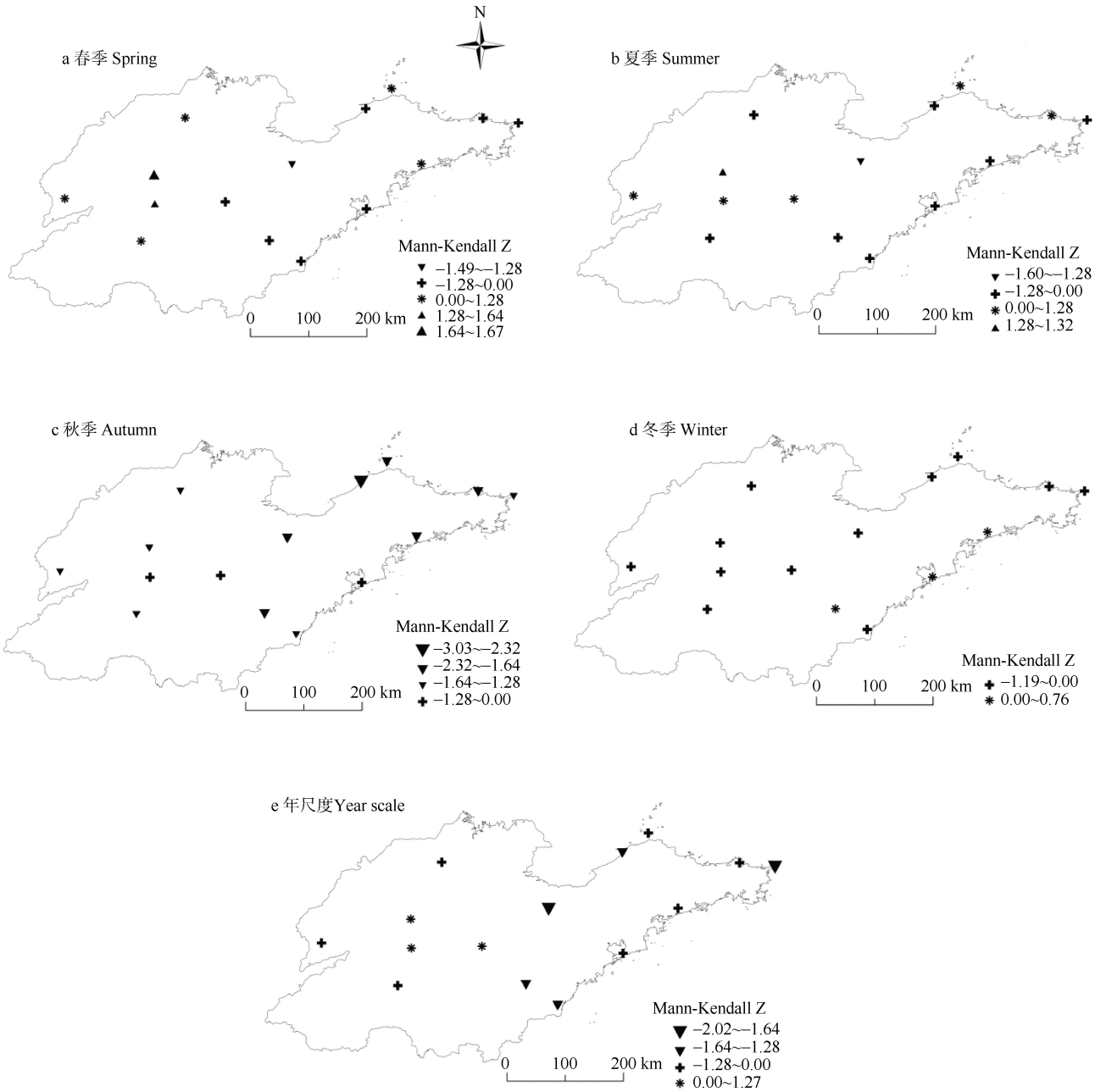

图 5 山东省 1964—2010 年四季和年的干旱指数变化趋势

Fig. 5 Variation trends of drought indexes in four seasons and years in Shandong Province from 1964 to 2010

星号(加号)代表上升(下降)趋势不显著；正三角代表上升，倒三角代表下降；形状大小表示通过了不同的显著性检验。Asterisks (plus) represents no significant increase (decline) trend. Positive triangle represents rise, and inverted triangle represents decline. Size of marks indicates significance level.

较低，均在 5%以下。其他地区在 6%~9%，各地区之间差异较夏季大。冬季严重及以上干旱主要分布在鲁西南地区(图 7d)，其中莘县干旱发生频率最高，达 13.04%。鲁西北和胶东半岛南部发生频率整体较低，均在 7%以下，其他地区干旱发生频率在 8%~11%，地区间差异较大。

年尺度上，严重及以上干旱主要分布在鲁西和鲁西北地区(图 7e)，其中莘县和济南地区发生频率最高，达 12.77%。干旱发生频率最低的为鲁西南的兖州和胶东半岛的龙口，仅为 4.26%。其他地区在 6%~10%，地区间差异明显。

月尺度上，严重及以上干旱呈现北高南低的规律(图 7f)。位于鲁西的莘县和长岛干旱发生频率最高，均为 6.21%，位于鲁中山地的泰山干旱发生频率最低，仅为 4.08%，其他地区干旱发生频率在 4%~6%，地区之间差异很小。

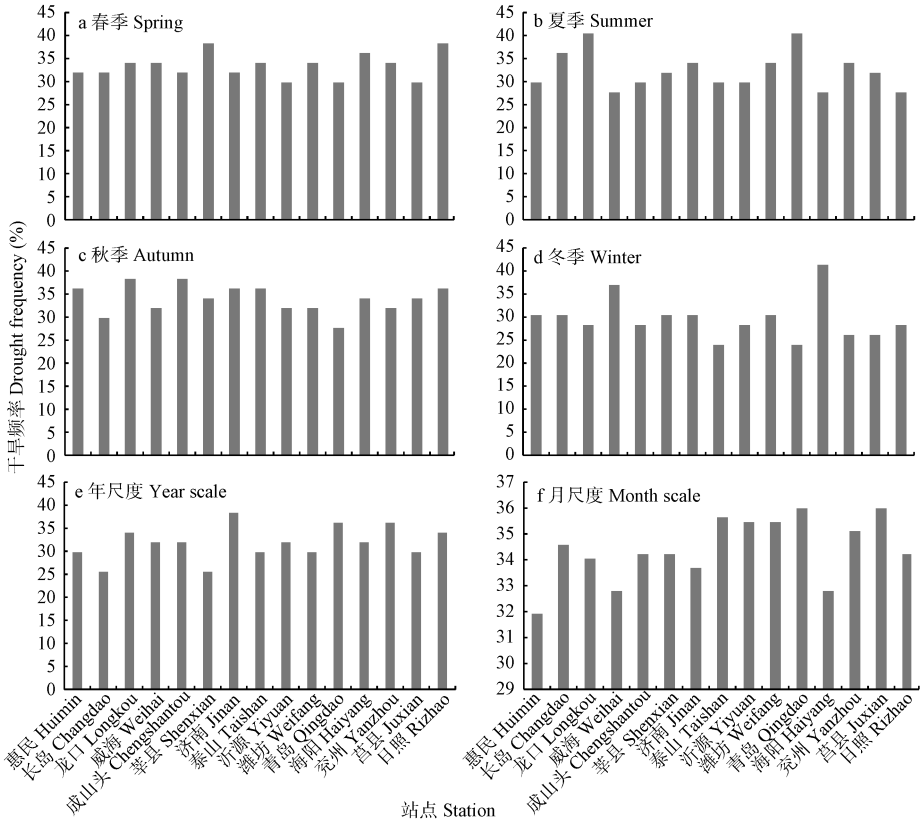

图 6　山东省 1964—2010 年各尺度干旱发生频率

Fig. 6　Drought occurrence frequencies at different scales in different stations of Shandong Province from 1964 to 2010

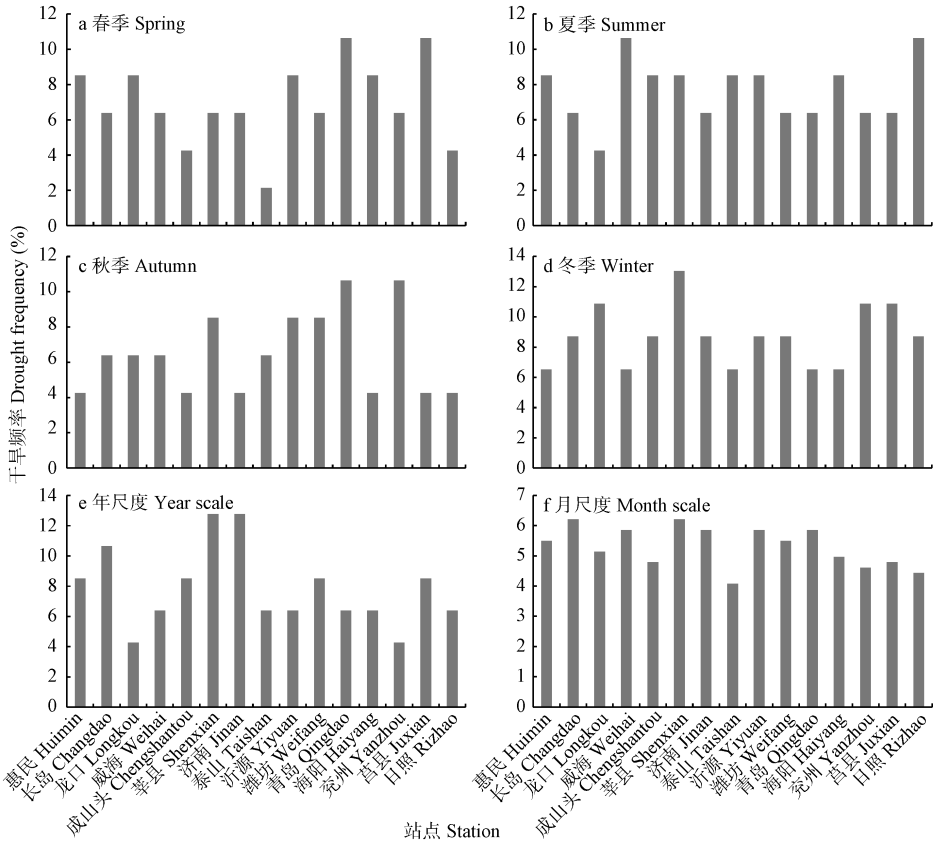

图 7　山东省 1964—2010 年各尺度重度及以上干旱发生频率

Fig. 7　Occurrence frequencies of severe drought at different scales in different stations of Shandong Province from 1964 to 2010

3.6 ENSO 对山东干旱的影响

赵永平等[22]发现ENSO通过影响东亚季风环流和太平洋副热带高压，对中国从沿海到内陆的气候都产生不同程度的影响。因此，本文分析了ENSO事件对山东省干旱的影响。对1964—2010年ENSO暖事件和ENSO冷事件与山东省月尺度SPEI值进行统计(表2)，ENSO冷暖事件对应月份见http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php，SPEI值为历时月份的月均值。研究结果如下：ENSO暖事件时，SPEI月均值为–0.024；ENSO冷事件时，SPEI月均值为0.011；ENSO冷暖事件时，SPEI月均值为–0.007；ENSO非冷暖事件时，SPEI月均值为0.021。虽然ENSO冷暖事件和非ENSO冷暖事件中SPEI月均值的绝对值普遍偏小，在干旱等级分类中属于“正常”，但SPEI的数值越大，越趋向于“湿润”，值越小，越趋向于“干旱”。从结论可以明显看出，ENSO暖事件时，SPEI月均值明显小于ENSO冷事件时的SPEI月均值；ENSO冷暖事件时，SPEI月均值明显小于非ENSO冷暖事件时的SPEI月均值，说明ENSO冷暖事件变化对山东省干旱有一定的影响。

表 2 1964—2010 年 ENSO 冷暖事件及对应山东省标准化降水蒸散指数(SPEI)

Table 2 ENSO warm and cold events and the corresponding standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) values of Shandong Province from 1964 to 2010

ENSO	起止时间(年-月) Time (year-month)	历时 Duration (month)	SPEI	ENSO	起止年月(年-月) Time (year-month)	历时(月) Duration (month)	SPEI
ENSO 暖事件 ENSO warm events	1964-01—1964-02	2	0.93	ENSO 冷事件 ENSO cold events	1964-05—1965-01	9	0.62
	1965-06—1966-04	11	–0.03		1967-12—1968-04	5	–0.31
	1968-11—1969-06	8	0.62		1970-07—1972-01	19	0.38
	1969-08—1970-01	6	–0.34		1973-06—1974-07	14	0.02
	1972-05—1973-03	11	0.00		1974-10—1976-03	18	0.28
	1976-09—1977-02	6	–0.23		1984-10—1985-06	9	0.08
	1977-09—1978-01	5	–0.06		1988-05—1989-05	13	–0.25
	1979-10—1980-02	5	–0.04		1995-08—1996-03	8	–0.19
	1982-04—1983-06	15	–0.09		1998-07—2001-02	32	–0.31
	1986-09—1988-02	18	0.02		2007-08—2008-06	11	0.09
	1991-06—1992-07	14	–0.21		2010-07—2010-12	6	–0.34
	1994-10—1995-03	6	0.16				
	1997-05—1998-05	13	0.16				
	2002-06—2003-02	9	–0.26				
	2004-07—2005-04	10	–0.09				
	2006-09—2007-01	5	–0.92				
	2009-07—2010-04	10	0.25				

3.7 基于连续小波的 SPEI 值和 ENSO 指数的振荡特征

ENSO指数采用多变量ENSO指数(MEI)，MEI指数是将海温、经向风、纬向风、海平面气压、海平面附近温度以及天空云量6个参数通过一套计算方式换算得到[23]。连续小波变换反映了信号自身的时间尺度变换特征。图8中黄色与蓝色分别表示能量密度的峰值和谷值，反映了主导波动组分时频变换的局部性和动态性特征[24]，黑色细实线为小波边界效应影响锥，粗黑实线表示通过置信水平为95%的红噪声检验。从图8中可以看出，表征山东省干旱的年SPEI和MEI指数在不同时间段呈现出各种振荡周期和不同的显著性水平。SPEI在1986—1992年存在1.0~2.5 a的震荡周期(通过置信水平为95%的红噪声检验)，MEI在1968—1974年、1983—1990年和1990—1999年分别存在1.8~4.0 a、3.0~5.5 a和4.0~6.0 a的震荡周期(通过置信水平为95%的红噪声检验)。对比可知，SPEI干旱指数和MEI指数在一定时段存在时频域相关。

3.8 SPEI 值与 ENSO 指数的关系

运用MATLAB软件对表征山东省干旱的年SPEI和ENSO(MEI)的时间序列进行交叉小波变换和相干小波变换，进一步分析SPEI与ENSO相关指数周期之间的共同特征。交叉小波变换和相干小波变换分别重点突出SPEI变化与MEI指数在时频域中高能量区和低能量区的相互关系(图9)。图中箭头方向反映了SPEI与MEI指数动态的相位关系，其中由左向右的箭头表示SPEI与MEI指数动态同相位，由右指向

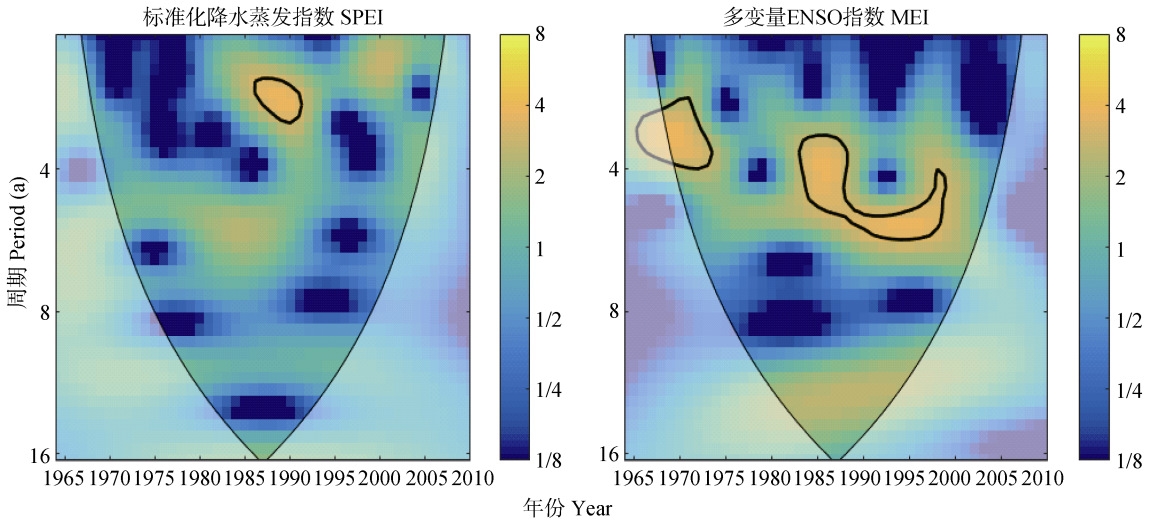

图 8　1964—2010 年山东省标准化降水蒸散指数(SPEI) (a)和多变量 ENSO 指数(b)连续小波变换

Fig. 8　Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) (a) and Multivariate ENSO Index (MEI) (b) continuous wavelet transform in Shandong Province from 1964 to 2010

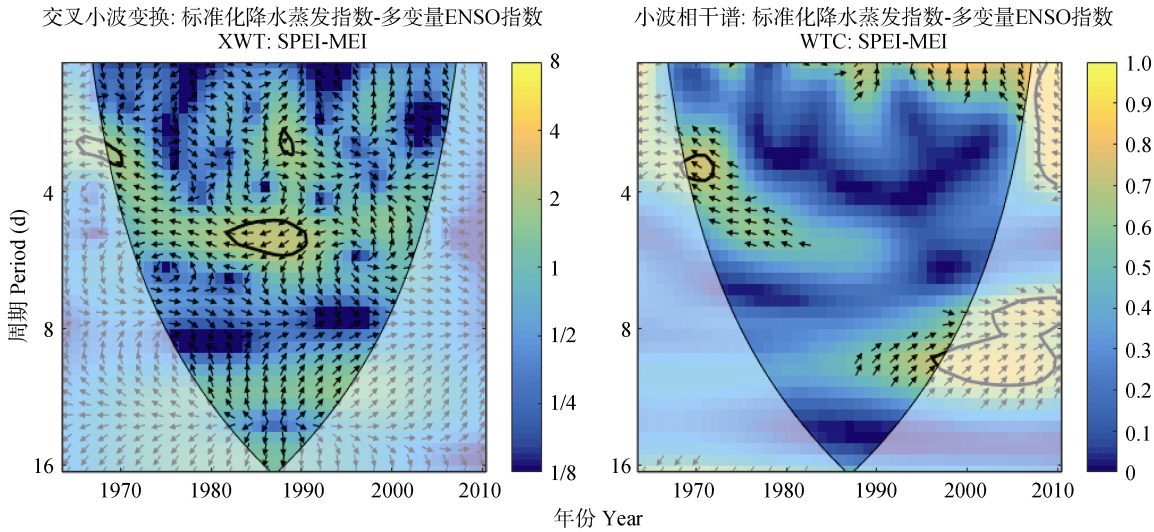

图 9　1964—2010 年山东省标准化降水蒸散指数(SPEI)与 Multivariate ENSO Index 的交叉小波(a)和相干小波(b)功率谱

Fig. 9　Cross wavelet (a) and coherent wavelet (b) power spectrum of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) value and Multivariate ENSO Index (MEI) in Shandong Province from 1964 to 2010

左的箭头表示反相位，垂直向下表示SPEI的小波变换提前MEI指数90°，垂直向上则表示MEI指数比SPEI提前90°。黑色细实线为小波边界效应影响锥，在该曲线以外的功率谱由于受到边界效应的影响而不予考虑；粗黑实线表示通过置信水平为95%的红噪声检验[25]。从图9a中可以看出，交叉小波功率谱高能量区在1987—1989年表现出2.0~2.8 a的共振周期(小波交叉功率谱相关性通过了显著性水平α=0.05下的红色噪音标准谱检验)；5.0~6.0 a的共振周期主要表现在1982—1990年，SPEI与MEI呈负相位变化，同时提前1~2个月(平均位相角左向下约45°)。小波相干功率谱低能量区(图9b)，SPEI与MEI在1968—1972年存在3.0~3.8 a呈负相位的共振周期(小波相干谱相关性通过了显著性水平α=0.05下的红色噪音标准谱检验)。

4　讨论

SPEI指数在山东地区的干旱监测与分析中具有较好的适用性，能准确地反映山东省干旱变化的时空特征，并识别气候变暖背景下研究区干旱发生年份，如1966、1968、1981、1983、1988、1989、1992、1997、1999和2000年，山东发生大旱，全省受旱面积超过了总耕地面积的1/2[19]，这在图2中得到了较好的反映。

降水减少和温度升高使近 50 年山东气候朝着暖干方向发展[26]，加剧了山东省的干旱程度。主要

表现在：季节尺度上，秋季的全域干旱化；春季和夏季，山东省东部区域呈干旱化趋势，干旱化分布范围广、旱象较为严重；冬季除东部和东南部等地区外，其他地区呈干旱化趋势。年尺度上，与春、夏季基本一致，山东省东部大范围区域呈干旱化态势。SPEI 融合了降水和温度对于区域干旱的影响，当温度的空间变化趋势较为一致时，降水的空间变化格局对 SPEI 的空间变化有着重要影响，从图 4 和图 5 可知，山东省全域气温都呈现上升趋势，山东省年 SPEI 和山东省年降水的空间分布具有明显的一致性。

不同尺度干旱来说，月尺度干旱发生频率最高，年尺度干旱发生频率最低。对于季节性干旱，山东省春秋季干旱较为严重，夏季次之，冬季最弱。山东春季降水量稀少，约占年降水量的 15%，而春季恰是山东主要粮食作物小麦的返青生长成熟期，需水量较大，因此山东多春旱；早秋是山东秋收作物的生长成熟期，需水量较大，秋旱发生几率也较高，仅次于春旱。干旱是山东省的主要自然灾害，造成的经济损失仅次于洪涝灾害，1997 年，山东遭遇百年不遇的大旱，不仅导致农作物生长发育不良而大幅减产或绝产，而且造成部分工厂企业停产，直接经济损失达 172.4 亿元[19]。王海军等[27]研究得出华北地区的气温在 20 世纪 90 年代中期表现出明显的增温趋势，气温偏高使土壤蒸发加快，进一步加快了旱情的发展。

大气环流的规律性运动和异常是形成山东干旱和特大干旱的主要原因，常年9月至翌年5月，受东亚槽后西北下沉气流影响，西南暖湿气流很少有机会到达山东，降水稀少，加之天气晴朗，空气干燥，因此多干旱发生。ENSO现象[28]是赤道东南太平洋海面温度异常的强信号，反映的是全球尺度的气候振荡，被认为是年际尺度最显著的气候信号之一，它的发生往往会引起全球性气候异常。卢爱刚等[29]利用中国各地区1949—1990年间旱灾的受灾面积比和成灾面积比，分别与ENSO指数进行相关分析，指出华北地区对ENSO响应的程度最为强烈。本文从月尺度的干旱入手，探讨ENSO冷暖事件变化对应SPEI-1数值的变化，发现ENSO暖事件时，SPEI月均值明显小于ENSO冷事件时的SPEI月均值，ENSO冷暖事件时，SPEI月均值明显小于非ENSO冷暖事件时的SPEI月均值。这可能是因为ENSO暖事件时，赤道东太平洋海温增高、西太平洋海温降低，导致东亚季风减弱，西太平洋副热带高压位置南移，使得中国主要季风雨带偏南，并且在南方徘徊的时间较长，从而使中国夏季和秋季北方地区特别是华北地区降水减少，干旱频发。而ENSO冷事件时期的原因可能正好相反，北方地区特别是华北地区夏季和秋季多雨的可能性增加，干旱减少[30]。进一步研究年尺度SPEI值和ENSO多元指数MEI的振荡特征发现，SPEI在1.0~2.5 a尺度上明显，MEI在1.8~4.0 a尺度上明显，虽然尺度上不能完全对应，但有交叉，说明SPEI和MEI有相似的震荡周期变化。SPEI与MEI的相关性主要体现在5.0~6.0 a的年际尺度上，说明ENSO对山东省干旱在较短年际周期交替上有着重要的作用。SPEI与MEI在1968—1972年存在3.0~3.8 a呈负相位的共振周期，说明MEI对山东地区干旱有着积极地促进作用。

本文从区域气候变化和ENSO现象等方面探讨了其对干旱的影响，但这不足以阐述干旱发生的所有原因，形成干旱的原因还有很多，如水资源不足，降水量年际变化大、年内分配不均，保水工程和土壤储水能力低等。

5 结论

本文基于 SPEI 指数对山东省近 50 年不同时间尺度的干旱特征进行了分析，从干旱发生频率角度定量分析了山东省干旱的空间分布特征，揭示了山东省干旱发生的时空变化特征及干旱发生的机制原因。有以下主要结论：多时间尺度的 SPEI 值可以较好地反映山东省的干旱情况，不同时间尺度的 SPEI 值随时间变化的敏感性存在明显差异，时间尺度越小，变化越显著。近 50 年山东地区呈现明显的增暖趋势，降水减少和温度升高使山东气候趋于“暖干化”，加剧山东省干旱程度。空间变化趋势上，山东省年 SPEI 和山东省年降水的空间分布具有明显的一致性。在干旱发生尺度上，月尺度干旱发生频率高于年尺度干旱发生频率，春秋季干旱较为严重，夏季次之，冬季最弱。春旱和秋旱以鲁西和鲁西北平原干旱发生频率最高，各地区之间差异明显。ENSO 暖事件时，山东易旱；ENSO 冷事件时，干旱减少。MEI 和 SPEI 有相似的震荡周期变化，并在较短年际上对山东干旱有促进作用。

参考文献 References

[1] 王东，张勃，安美玲，等. 基于SPEI的西南地区近53a干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 1003–1016
WANG D, ZHANG B, AN M L, et al. Temporal and spatial distributions of drought in southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration index[J].

Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1003–1016

[2] 马柱国, 符淙斌. 1951–2004 年我国北方干旱化的基本事实[C]//全国旱情监测技术与抗旱减灾措施交流研讨会论文集. 青岛: 中国水利技术信息中心, 2009: 2429–2439
MA Z G, FU C B. The basic facts of drought in northern China from 1951 to 2004[C]//National Drought Monitoring Technology and Drought Mitigation Measures Papers. Qingdao: China Water Conservancy Technical Information Center, 2009: 2429–2439

[3] 姜德娟, 李志, 王昆. 1961~2008 年山东省极端降水事件的变化趋势分析[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1118–1124
JIANG D J, LI Z, WANG K. Trends of extreme precipitation events over Shandong Province from 1961 to 2008[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1118–1124

[4] 王庆, 马倩倩, 夏艳玲, 等. 最近 50 年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2014, 34(2): 220–228
WANG Q, MA Q Q, XIA Y L, et al. Spatial-temporal variations and influential factors of summer precipitation in Shandong region during the last 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(2): 220–228

[5] 张勃, 张耀宗, 任培贵, 等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 999–1006
ZHANG B, ZHANG Y Z, REN P G, et al. Analysis of drought spatial-temporal characteristics based on SPEI in eastern region of Gansu in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 999–1006

[6] 张玉静, 王春乙, 张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7097–7107
ZHANG Y J, WANG C Y, ZHANG J Q. Analysis of the spatial and temporal characteristics of drought in the North China Plain based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7097–7107

[7] 翟禄新, 冯起. 基于SPI的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847–857
ZHAI L X, FENG Q. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 847–857

[8] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677–688
ZHOU D, ZHANG B, REN P G, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 677–688

[9] 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

[10] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643–649
LI W G, YI X, HOU M T, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 643–649

[11] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5882–5893
SHEN G Q, ZHENG H F, LEI Z F. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961–2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5882–5893

[12] 许玲燕, 王慧敏, 段琪彩, 等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1024–1034
XU L Y, WANG H M, DUAN Q C, et al. The temporal and spatial distribution of droughts during summer corn growth in Yunnan Province based on SPEI[J]. Resources Science, 2013, 35(5): 1024–1034

[13] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1547–1558
SHI B L, ZHU X Y, HU Y C, et al. Spatial and temporal variations of drought in Henan Province over a 53-year period based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Geographical Research, 2015, 34(8): 1547–1558

[14] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5467–5475
SU H X, LI G Q. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467–5475

[15] 张强, 邹旭恺, 肖风劲. GB/T20481—2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
ZHANG Q, ZHOU X K, XIAO F J. GB/T20481—2006 Classification of Meteorological Drought Category[S]. Beijing: China Standard Press, 2006

[16] 张调风, 张勃, 王小敏, 等. 基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析——以甘肃省黄土高原区为例[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 13–20
ZHANG T F, ZHANG B, WANG X M, et al. Temporal and spatial analysis of drought for recent 50 years in Loess Plateau of Gansu Province based on meteorological drought composite index[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 13–20

[17] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 589–594
QIN N X, JIANG T, XU C Y. Trends and abruption analysis on the discharge in the Yangtze Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 589–594

[18] 张岳军, 郝智文, 王雁, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1418–1424
ZHANG Y J, HAO Z W, WANG Y, et al. Multiscale characteristics of drought based on SPEI and SPI in association with climate index in Taiyuan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9): 1418–1424

[19] 温克刚, 王建国, 孙典卿. 中国气象灾害大典. 山东卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006
WEN K G, WANG J G, SUN D Q. China Meteorological Disaster Ceremony (Shandong Coils)[M]. Beijing: Meteorology Publish House, 2006

[20] 山东省水利厅. 2002 年山东省水资源公报[EB/OL]. (2004-05-12). http://www.sdwr.gov.cn/zwgk/ggsjkf/sjkfml/szygb/
Department of Water Resources of Shandong. Shandong water resources bulletin 2002[EB/OL]. (2004-05-12). http://www.sdwr.gov.cn/zwgk/ggsjkf/sjkfml/szygb/

[21] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers[R]. Paris: IPCC, 2007

[22] 赵永平, 陈永利. 一百多年来 ENSO 事件分类和 ENSO 循环研究[J]. 海洋湖沼通报, 1998, (3): 7–12
ZHAO Y P, CHEN Y L. The classification of ENSO events over recent one hundred plus years[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1998, (3): 7–12

[23] D'ODORICO P, YOO J C, OVER T M. An assessment of ENSO-induced patterns of rainfall erosivity in the Southwestern United States[J]. Journal of Climate, 2000, 14(21): 4230–4242

[24] 王亚敏, 张勃, 郭玲霞, 等. 地磁 Ap 指数与太阳黑子数的交叉小波分析及 R/S 分析[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 747–752
WANG Y M, ZHANG B, GUO L X, et al. Cross wavelet analysis and R/S analysis of relationship between geomagnetic Ap index and sunspot number[J]. Scientia Geographica Sinca, 2011, 31(6): 747–752

[25] 赵一飞, 邹欣庆, 张勃, 等. 黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1325–1332
ZHAO Y F, ZOU X Q, ZHANG B, et al. Precipitation variation in association with climate indices in Loess Plateau of Gansu Province, Northwest China[J]. Scientia Geographica Sinca, 2015, 35(10): 1325–1332

[26] 廉丽姝, 李为华, 朱平盛. 山东省近 40 年气候变化特征[J]. 气象科技, 2006, 34(1): 57–61
LIAN L S, LI W H, ZHU P S. Analysis of climate change in Shandong Province since 1961[J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34(1): 57–61

[27] 王海军, 张勃, 赵传燕, 等. 中国北方近 57 年气温时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 643–650
WANG H J, ZHANG B, ZHAO C Y, et al. The Spatio-temporal characteristics of temperature change in recent 57 years in northern China[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 643–650

[28] 李芬, 张建新, 郝智文, 等. 山西降水与 ENSO 的相关性研究[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 420–430
LI F, ZHANG J X, HAO Z W, et al. Correlation analysis of rainfall and ENSO in Shanxi[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 420–430

[29] 卢爱刚, 葛剑平, 庞德谦, 等. 40a 来中国旱灾对 ENSO 事件的区域差异响应研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 535–542
LU A G, GE J P, PANG D Q, et al. Asynchronous response of droughts to ENSO in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 535–542

[30] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年降雨侵蚀力影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1573–1580
CHEN S F. Impact of ENSO on rainfall erosivity in Shaoguan City during 1951–2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(10): 1573–1580