

Application of Global SPEI Database and Its Multi-Scale Correlation with Circulation Factors

Ying Hou, Fang Zheng*, Hongxue Mu

College of Resources and Environment Sciences, Ningxia (China-Arab) Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Ningxia University, Yinchuan Ningxia
Email: hollying@nxu.edu.cn, *zhengf05@163.com

Received: Jan. 24th, 2017; accepted: Feb. 18th, 2017; published: Feb. 21st, 2017

Abstract

Taking upper reaches of Shiyang River as an example, the multi-time scale cross-wavelet transformation was used to study SPEI, sunspot, climate factors (precipitation, maximum temperature and hours of sunshine) and large-scale circulation factors (PDO, NAO, Nino3.4 and SOI) as well as their relationships in the upper reaches of the Shiyang River. The results show that there is a significant correlation between SPEI and climate factors utilizing the method of cross wavelet coherence, and the precipitation change plays a major role in SPEI change. The applicability of global SPEI database in this region was tested. Results of continuous wavelet transformation show that SPEI12 has significant 2 - 3 years periods; SPEI48 has significant 8 - 11 years periods. The significant coherence was found between SPEI at different time-scales and sunspot and four large-scale circulation factors. There are the common patterns of 8 - 12 years oscillation circle between SPEI at different time-scales and sunspot during the whole period (1950-2000). NAO, PDO and SPEI48 in the upper reaches are significant correlated with at the scales of quasi-10 years during the period from 1970 to 1999. ENSO (El Nino-Southern Oscillation), SOI and SPEI1 (1 month scale SPEI) or SPEI12 (12 months scale SPEI) in the upper reaches are significant correlated with at the scales of quasi-3 years (1960's) and 4 - 6 years during the period from 1985 to 1995.

Keywords

SPEI, Circulation Factors, Cross Wavelet Transform, Shiyang River

全球SPEI数据的应用及其与环流因子的多尺度分析

侯 迎, 郑 芳*, 穆红雪

宁夏大学资源环境学院, 宁夏(中阿)资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏 银川

作者简介: 侯迎(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事气候与水资源、气候与环境演变研究。

*通讯作者。

摘要

以石羊河上游水源区为例, 运用交叉小波对标准化降水蒸散指数(SPEI)数据集数据、气象资料、太阳黑子数以及多条环流因子资料进行多尺度分析。结果表明: 研究区上游SPEI值与临近气象站气象资料在多时间尺度上具有稳定的显著小波相关性, 验证了全球SPEI数据集在该区的适用性。较短时间尺度SPEI以2~3年尺度的振荡周期为主, 较长时间尺度SPEI表现出较强的8~11年尺度平稳、显著的振荡周期。此外, SPEI与太阳黑子数和环流因子存在多时间尺度的显著关联性: 各时间尺度SPEI与太阳黑子数在整个研究期内具有极显著的8~12年主共振周期; 较长时间尺度SPEI与NAO和PDO在准10年共振周期上显著相关(1970s~1990s); 而ENSO (El Nino-Southern Oscillation)对SPEI的影响主要表现在短时间尺度的高频段上, 存在准3年(1960s)和4~6年(1985~1995年)显著性的共振周期。

关键词

SPEI, 环流因子, 交叉小波, 石羊河

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱是我国主要的自然灾害之一, 每年造成大量的经济损失。干旱指标是研究干旱的基础, 也是衡量干旱程度的关键环节[1], 但不同干旱指标适用的地区与时间尺度也有所差异[2]。通常采用的指标有: ZI (Z 指数) [1]、CI (综合气象干旱指数) [3] [4]、SPI (标准化降水指数) [5] [6] [7]、PDSI (帕尔默干旱指数) [8]及 SPEI (标准化降水蒸发指数)等。SPEI 是由 Vicente-Serrano 等[9]在 SPI 的基础上引入潜在蒸散构建的一种新的干旱指数, 适用于气候变暖背景下的干旱监测与评估。如, 通过气象资料计算多重时间尺度的 SPEI 值, 对渭河流域[2]、鄱阳湖流域[10]、内蒙古[11]等地区乃至中国[12]的干旱化的空间分布、干旱趋势变化及干旱发生的频率等进行分析, 该干旱指数在我国得到验证和应用。

小波分析利于分析单个时间序列的时频域局部化特征, 缺陷在于不能反映两者在时域和频域上的位相结构和细部特征[13]。在此基础上发展起来新的多信号多尺度分析技术—交叉小波变换, 较好地用于气候变化对北极涛动[14]、副热带高压[15]、ENSO (El Nino-Southern Oscillation) [16] [17]的响应, 地表温度对太阳活动的响应[18], 径流变化的对气候要素的响应等[19] [20] [21]。在河西走廊, 刘志方等[22]分辨多时间尺度下黑河出山径流量与气象要素间的变化周期、丰枯阶段和突变年, 侯迎等[21]利用交叉小波分析石羊河上游气候变化对地表径流的多尺度影响, 该方法能突出两序列在时域空间的显著共振周期以及时频相关性[23]。石羊河是河西走廊上较大的内陆河, 上游山区是河西走廊的武威和下游民勤的重要水源地, 对水源区干旱灾害的多时间尺度特征、干湿演变规律以及干旱产生的原因进行分析, 具有重要的实际意义。本文以石羊河上游作为研究区, 基于全球 SPEI 数据集数据, 运用连续小波和交叉小波变换方法, 探讨该数据集在该区的适用性, 并分析其与大尺度环流因子在时频空间的多时间尺度共振周期及相关关系, 为该流域水资源的合理开发利用提供理论依据和技术支持。

2. 数据和方法

2.1. 数据

数据来自于全球 SPEI 最新数据集 v2.4 (<http://digital.csic.es/>), 为验证该数据集在石羊河上游的适用性, 选择乌鞘岭气象站附近的格点(102.75°E, 37.25°N)数据, 见图 1。包括: 1 月、12 月和 48 月尺度的逐月 SPEI 值, 分别用 SPEI1、SPEI12 和 SPEI48 表示。经一致性和 t 检验, 我们认为 1932 年后的数据一致性较好, 因此选择的时段为 1932~2014 年。气象资料为乌鞘岭气象站的逐月降水量、温度、平均最高温度和日照时数, 时段为 1951~2015 年, 资料来源于中国气象数据共享服务网。NAO 指数、PDO 指数及 Nino3.4 指数等环流因子资料来自美国国家海洋大气局(NOAA)的地球物理数据中心(NGDC)。

2.2. 方法

SPEI 的具体计算方法和过程见文献[9]。连续小波变换(CWT)采用复 Morlet 小波[24], 交叉小波变换和小波相干谱的计算方法见文献[23], 检验方法为显著性水平为 0.05 的红噪声标准谱的检验, 在通过检验的区域即认为两个时间序列相关性显著[25]。

3. 结果与分析

3.1. SPEI 数据集在研究区的适用性

交叉小波变化重点突出 SPEI 值与乌鞘岭气象站气象资料在时频域中的相关关系, 即通过小波相干关系探讨全球 SPEI 数据集在研究区的适用性。图 2 为 SPEI1 与各气象因子的交叉小波凝聚谱。图中黑色细实线为小波边界效应影响锥, 粗黑线表示通过显著性水平为 0.05 的红噪声检验。箭头表示两者之间的位相关关系, \rightarrow 表示二者为同相位, 即为正相关关系。 \leftarrow 表示二者为反相位, 即为负相关关系。 \downarrow 表示相位提前 90° , \uparrow 表示相位落后 90° [17]。

结果显示: 年 SPEI1 与降水量在 1960s 和 1980s 的 2~4 年周期上呈现显著的正相关关系, 在 1960s~1980s 的 8~12 年周期上也呈现显著的正相关关系(图 2(a))。夏季降水量占年降水量比例最高, 夏季 SPEI1 与降水量在整个时频空间呈现稳定、显著的正相关关系, 具体表现为: 1960s~1980s 的年际周期(2~6 年)的正相关, 1960s~2000s

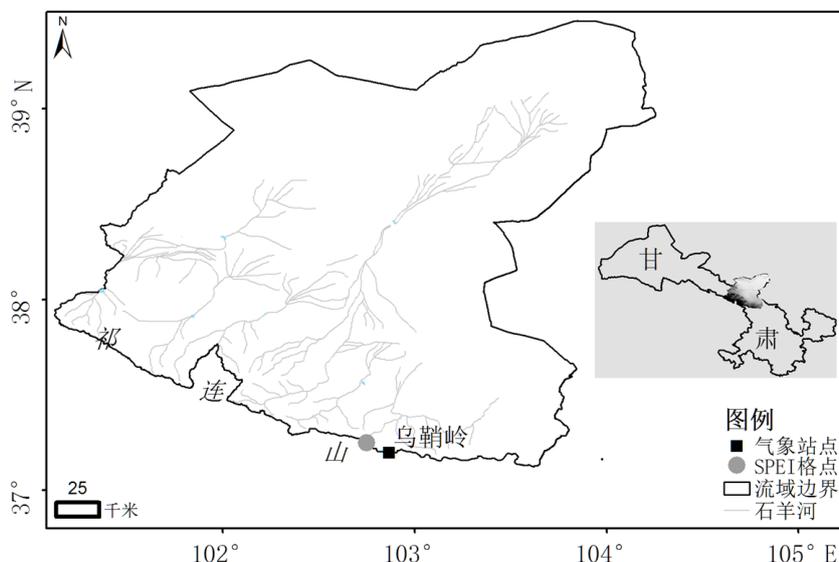


Figure 1. Map of selected SPEI and meteorological station in Shiyang River

图 1. 石羊河流域及 SPEI 格点和气象站点

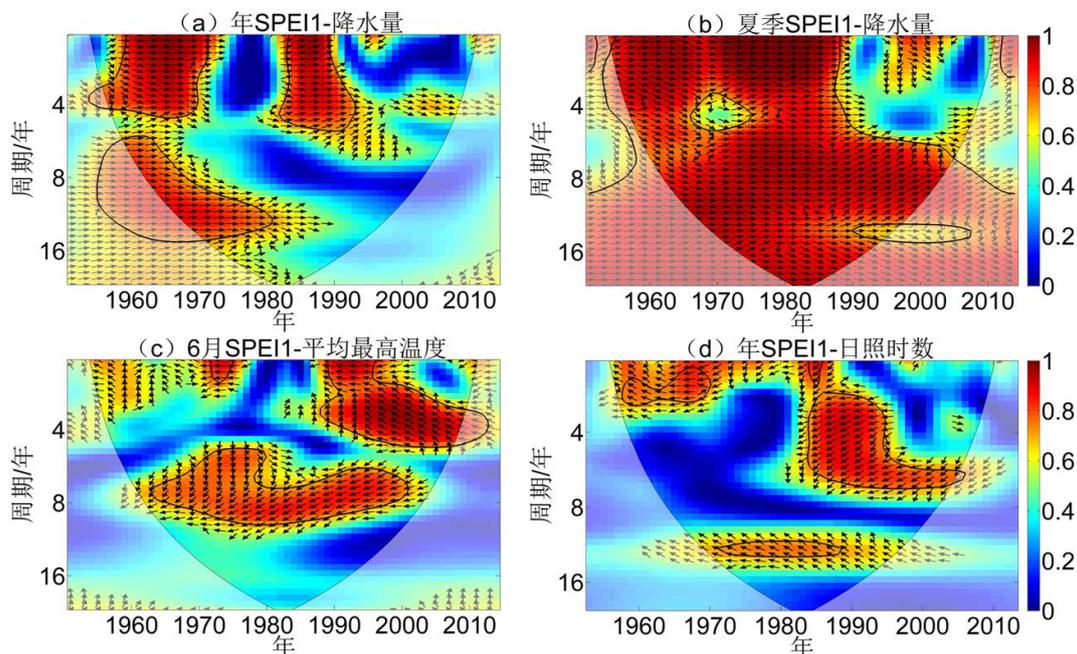


Figure 2. Cross wavelet coherence between SPEI and different weather factors in the research area

图 2. 研究区 SPEI 与乌鞘岭气象资料的交叉小波凝聚谱

的年代际周期(10~16年)的正相关(图 2(b))。以 6 月份 SPEI1 与平均最高温度的交叉小波分析为例, 结果表明: 二者在 1950s~1970s 年的准 2 年周期上呈现负相关关系, 但基本上未达到显著性水平; 在 1960s~1980s 的 2~5 年周期上呈现显著的负相关关系, 在 1960s~1990s 的 6~10 年周期上也呈现显著的负相关关系(图 2(c))。年 SPEI1 与日照时数在 1960s~1980s 的准 2~3 年周期上呈现显著的负相关关系, 在 1980s、1990s 的 4~6 年周期上呈现显著的负相关关系, 在 1960s~2000s 的准 12 年周期上也呈现负相关关系, 高值区在 1970s 和 1980s (图 2(d))。

研究区 SPEI 值与临近气象站的气象资料具有较好的、稳定的小波相干关系, 并且 SPEI 与降水量的关系较其他气象因子更显著, 以降水量对研究区 SPEI 的正向作用为主。此外, SPEI 与降水量正相关均为同期的相关关系, SPEI 与最高温度和日照时数的负相关大概为滞后 3~4 月的相关关系。较多的降水量使得同期 SPEI 值增大, 较高的最高温度和日照时数可能促使蒸发量增大, 从而对 SPEI 值产生滞后的负向影响。因此, 我们认为全球 SPEI 数据集在研究区有较好的适应性, 可用于随后的分析。

3.2. 干湿趋势和周期分析

从图 3(a) 12 月尺度的 SPEI 曲线可知, 研究区呈现“湿-干-湿”的变化趋势, 1950s 前研究区由干旱逐渐湿润, 1950s 后直到 20 世纪末呈现长达半个世纪的干旱化过程, 21 世纪以后干旱化得的缓解。48 月尺度的 SPEI 曲线呈现一致的趋势变化, 但干旱化趋势更为显著(图 3(b))。梁丹等[26]基于河西地区 12 个气象站点观测数据计算 SPEI 指数, 同样表明河西走廊地区以不同的速率变干。SPEI 低通滤波曲线显示, 1930s、1960s、1970s 和 1990s 较干旱, 1940s、1950s、1980s 和 2000s 较湿润, 其中在 1930s 后期和 1960s 中期为极端干旱时期(图 3(a))。48 月尺度的滤波曲线显示相似的干旱期, 且 1930s 后期和 1960s 中期更加干旱。

不同尺度 SPEI 在不同时域中, 表现不同显著性水平的振荡周期。SPEI12 在 1960s 和 1990s 显示出 2~3 年尺度显著的主振荡周期, 在 1940~1980 年表现出准 10 年振荡周期, 但未达到显著水平(图 4(a))。SPEI48 在高频频段上, 小波功率谱能量较小, 几乎无通过显著性检验。但在 1940~2005 年表现出极强的 8~11 年尺度平稳、显著的主振荡周期。

3.3. SPEI 与太阳活动的多尺度分析

图 5 为各时间尺度 SPEI 与太阳黑子数的交叉小波功率谱。在高频段, 各尺度 SPEI 与太阳黑子数几乎无通过显著性检验的交叉小波能量区, 但在整个研究期内, 二者具有极显著的 8~12 年主共振周期, 且随着 SPEI 时间尺度的增大, 共振周期的显著性也在增大。位相差表明在不同时间尺度上太阳活动对研究区 SPEI 的影响在 1957 年前后发生突变, 此前太阳活动对 SPEI 的影响表现为负相关, 此后太阳活动对 SPEI 的影响表现为正相关。王涛等[27]对天山中西部降水与太阳黑子变化交叉小波分析显示二者在 1770~2000 年在准 10 年尺度上关联性显著, 并且太阳活动对天山中西部降水变化的影响同样是随着时间变化的, 在不同时段影响各异。

3.4. SPEI 与环流因子的多尺度分析

图 6 为各时间尺度 SPEI 与 NAO 和 PDO 指数的交叉小波功率谱。SPEI1 与 NAO 在高频段的交叉小波能量谱时有通过显著性检验, 但维持时间较短且无稳定的相关关系(图 6(a))。SPEI48 与 NAO 在高频段上, 几乎无通过显

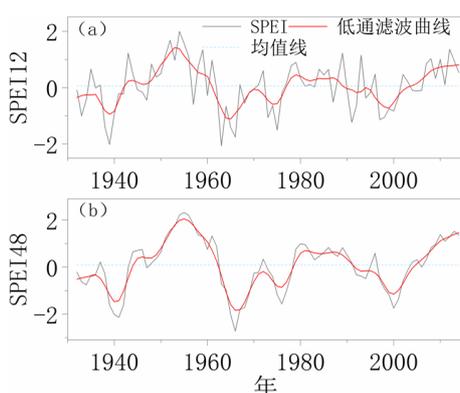


Figure 3. SPEI at different time scales and its low-pass filter series

图 3. 不同尺度 SPEI 及其低通滤波曲线

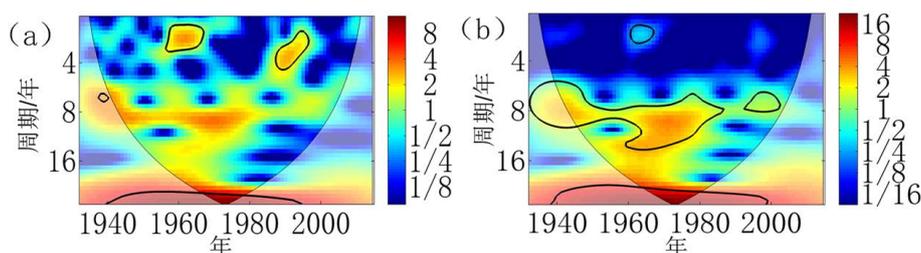


Figure 4. Continuous wavelet power spectrum of (a) SPEI12 and (b) SPEI48

图 4. 连续小波转换功率谱: (a) SPEI12, (b) SPEI48

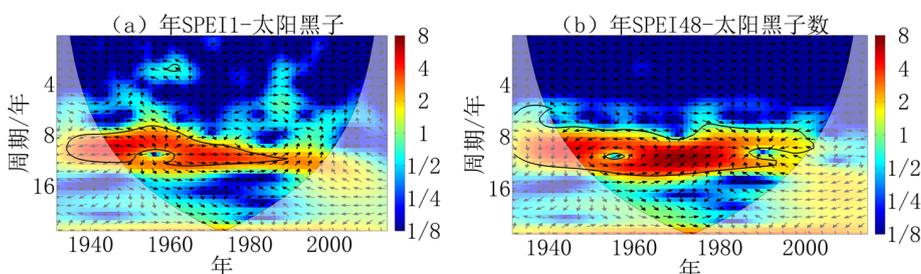


Figure 5. Cross wavelet transform between SPEI and sunspot in the research area

图 5. 研究区不同尺度 SPEI 与太阳黑子数的交叉小波功率谱

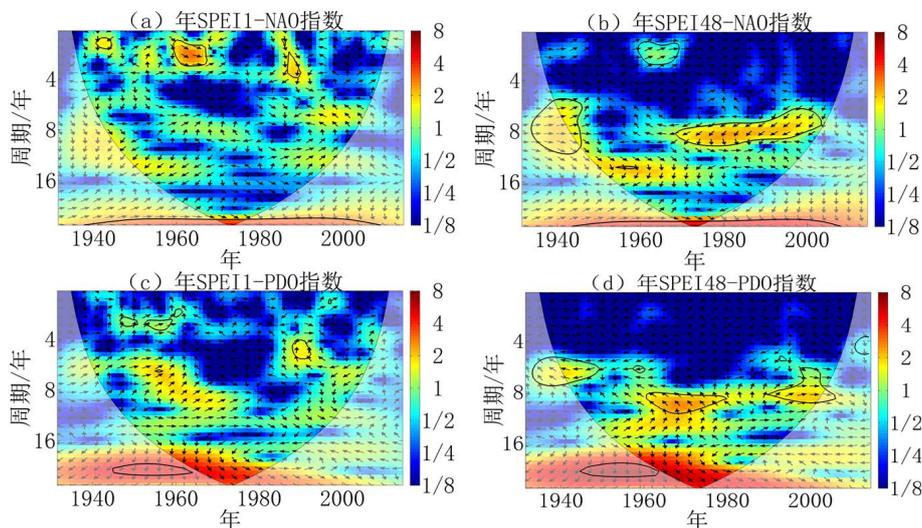


Figure 6. Cross wavelet transform between NAO, PDO and SPEI in the research area
图 6. 研究区不同尺度 SPEI 与 NAO 和 PDO 的交叉小波功率谱

显著性检验的交叉小波能量区；但在 1940s 和 1970s~1990s 二者具有显著的准 8 年主共振周期，其中在 1940s 二者维持时间较短的显著正相关关系，而在 1970s~1990s 二者显著负相关；此外在 1950s、1960s 二者具有准 14 年共振周期，但未达到显著水平(图 6(b))。苏宏新等[17]通过计算北京地区 SPEI 发现其与 NAO 存在通过显著性检验的 80~100 个月共振周期。

SPEI1 与 PDO 在高频段的交叉小波能量谱有一些通过显著性检验，但维持时间短，未形成稳定的相关关系(图 6(c))。SPEI48 与 PDO 在高频段上无通过显著性检验的交叉小波能量区，但几乎在整个研究期内，二者表现出显著的 8~10 年共振周期，高能量区在 1960~1980 年和 1990~2005 年的准 10 年主共振周期。此外，在 1980s 末期之前 SPEI48 与 PDO 显著负相关，此后二者显著正相关(图 6(d))。北京地区 SPEI 与 PDO 在 1965~1995 年同样表现出年际共振周期(100~120 个月) [17]。综上，短时间尺度 SPEI 与 NAO 和 PDO 的相关作用较弱，几乎无通过显著性检验的交叉小波能量区。较长时间尺度 SPEI 与 NAO 和 PDO 的关联性更强，主要表现准 10 年共振周期的显著相关(1970s~1990s)，同北京地区 SPEI 与环流因子的分析结果相似[17]。

图 7 展示了不同时间尺度年均 SPEI 与 Nino3.4 和 SOI 指数的交叉小波能量谱和交叉小波凝聚谱。交叉小波能量谱显示 SPEI1 与 Nino3.4 存在 3 个共振周期，分别为：准 3 年显著的震荡周期(1960s)；4~6 年显著的主共振周期(1985~2000 年)，高能量区主要集中在 1980s 后期，位相差表明在这两个共振周期内二者表现为负相关；准 14 年周期，但未达到显著性水平(图 7(a))。交叉小波凝聚谱显示 SPEI1 与 Nino3.4 在准 3 a 周期上呈现负相关(1970s 和 1980s)，高能量区主要集中在 1980s 后期(图 7(b))。

交叉小波能量谱显示 SPEI12 与 SOI 存在 2 个显著共振周期，分别为：准 3 年显著的震荡周期(1960s)；4~6 年显著的主共振周期(1985~1995 年)，高能量区集中在 1980s 后期，位相差表明在这两个共振周期内二者表现为正相关(图 7(c))。交叉小波凝聚谱显示 SPEI12 与 SOI 在准 3 年周期上呈现显著正相关(1980s 和 1990s)，高能量区主要集中在 1980s 后期；在准 6 年周期上呈现显著正相关(1950s)；但在准 12 年周期上呈现显著负相关关系(1945~1955 年，图 7(d))。

李耀辉和李栋梁[28]指出青海东部、甘肃中部、宁夏和陕北的降水和温度是夏季我国西北地区对 ENSO 影响反映最强烈的区域。ENSO 事件对甘肃季风区的降水量的影响明显，厄尔尼诺事件使这些地区的降水量明显减少[29]。蓝永超等[30]研究表明在 El Nino 现象发生年，整个祁连山区均出现气温偏高、降水减少及径流偏枯的现象，尤以东段和中段地区受到 ENSO 的影响最为明显。同样，ENSO 对本研究区的干旱产生影响，并且这

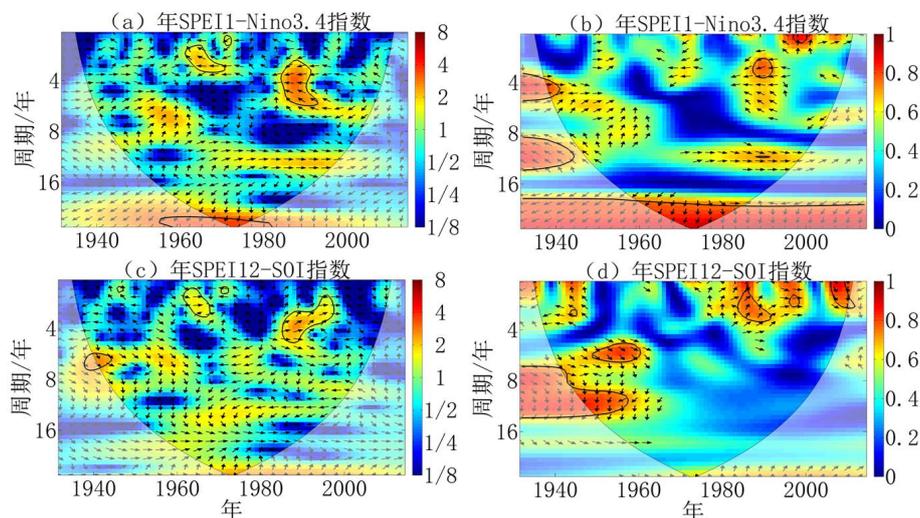


Figure 7. Cross wavelet transform (a), (c) and wavelet coherence (b), (d) between SPEI and Nino3.4 and SOI in the research area

图7. 不同尺度 SPEI 与 Nino3.4 和 SOI 指数的交叉小波功率谱(a), (c)和小波凝聚谱(b), (d)

种影响主要表现在短时间尺度 SPEI 的高频段上,对长时间尺度 SPEI 的低频段上作用较弱。在华北的北京地区,其干旱序列的年际短周期同样主要受 ENSO 的影响[17]。

4. 结论

以全球 SPEI 数据集、气象资料以及多条环流因子资料为基础,分析 SPEI 数据集在研究区的适用性,在时频域中的周期变化特征及其与环流因子的关系,得出以下结论:

(1) 研究区 SPEI 值与临近气象站的气象资料具有较好的小波相关关系,并且 SPEI 与降水量的关系较其他气象因子更显著,特别是夏季 SPEI 与降水量在整个时频空间呈现稳定、显著的正相关关系,以降水量对研究区 SPEI 的正向作用为主。全球 SPEI 数据集在研究区有较好的适用性。

(2) 在 1930s、1960s、1970s 和 1990s 研究区较干旱,其中 1930s 后期和 1960s 中期为极端干旱时期。较短尺度 SPEI 以 2~3 年尺度的振荡周期为主,较长尺度 SPEI 表现出极强的 8~11 年尺度平稳、显著的振荡周期。

(3) 各尺度 SPEI 与太阳黑子数在整个研究期内具有极显著的 8~12 年主共振周期。短尺度 SPEI 与 NAO 和 PDO 的相关作用较弱,几乎无通过显著性检验的交叉小波能量区。较长尺度 SPEI 与 NAO 和 PDO 的关联性更强,表现在准 10 年共振周期(1970s~1990s)的显著相关。而 ENSO 对 SPEI 的影响主要表现在短尺度 SPEI 的高频段上,具体为准 3 年显著的震荡周期(1960s),4~6 年显著的主共振周期(1985~1995 年),对长尺度 SPEI 和低频段上的作用较弱。

基金项目

国家自然科学基金项目(51309134);宁夏大学人才引进科研启动基金(BQD2012011)。

参考文献 (References)

- [1] 刘占明, 陈子燊, 黄强, 等. 7 种干旱评估指标在广东北江流域应用中的对比分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1007-1015. LIU Zhanming, CHEN Zishen, HUANG Qiang, et al. Comparative analysis of seven drought evaluation indices in the Beijiang River Basin, Guangdong. Resources Science, 2013, 35(5): 1007-1015. (in Chinese)
- [2] 李洁, 莫淑红, 沈冰, 等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱特征分析[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 70-76. LI Jie, MO Shuhong, SHEN Bing, et al. Analysis of drought characteristics of the Weihe River Basin based on SPEI. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 70-76. (in Chinese)

- [3] 段莹, 王文, 蔡晓军. PDSI、SPEI 及 CI 指数在 2010/2011 年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1126-1139.
DUAN Ying, WANG Wen and CAI Xiaojun. Applied analyses on palmer, SPEI and CI indices of drought process in Yangtze-Huaihe River Basins during winter of 2010/spring of 2011. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1126-1139. (in Chinese)
- [4] 王文, 李亮, 蔡晓军. CI 指数及 SPEI 指数在长江中下游地区的适用性分析[J]. 热带气象学报, 2015, 31(3): 403-416.
WANG Wen, LI Liang and CAI Xiaojun. Adaptability of modified CI and Spei over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(3): 403-416. (in Chinese)
- [5] 李思诺, 翁白莎, 严登明, 等. SPI 和 SPEI 在阿克苏河流域的适用性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 101-107.
LI Sinuo, WENG Baisha, YAN Dengming, et al. Applicability analysis of SPI and SPEI in Aksu River Basin. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 101-107. (in Chinese)
- [6] 刘敏, 秦鹏程, 刘可群, 等. 洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SP 干旱指数的响应研究[J]. 气象, 2013, 39(9): 1163-1170.
LIU Min, QIN Pengcheng, LIU Kequn, et al. Response of Lake Water Level of Honghu Lake to SPEI/SPI drought indices at different time scales. Meteorological Monthly, 2013, 39(9): 1163-1170. (in Chinese)
- [7] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 121-126.
DU Lingtong, TIAN Qingjiu, HUANG Yan, et al. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 121-126. (in Chinese)
- [8] ZHAO, H., GAO, G., AN, W., et al. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015(25): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.022>
- [9] VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S. and LÓPEZ-MORENO, J. I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI. Journal of Climate, 2010(23): 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- [10] 李斌, 李洁. 基于 SPEI 的鄱阳湖流域旱涝特征分析[J]. 水资源研究, 2016, 5(5): 488-494.
LI Bin, LI Jie. Analysis on drought and waterlogging characteristics in the Poyanghu Basin based on SPEI. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(5): 488-494. (in Chinese)
- [11] LIU, S. L., KANG, W. P. and WANG, T. Drought variability in Inner Mongolia of northern China during 1960-2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4996-0>
- [12] 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 Weiguang, YI Xue, HOU Meiting, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 643-649. (in Chinese)
- [13] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 22-26.
SHAO Jun. Multi-scale correlation analysis of hydrological time series based on cross wavelet transform. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 22-26. (in Chinese)
- [14] 关学锋, 孙卫国, 李敏姣, 等. 1965-2012 年新疆北部地区气候变化及其对北极涛动的响应[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 681-689.
GUAN Xuefeng, SUN Weiguo, LI Minjiao, et al. Climate change in North Xinjiang and its response to arctic oscillation during the period of 1965-2012. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 681-689. (in Chinese)
- [15] 余丹丹, 张韧, 洪梅, 等. 基于交叉小波与小波相干的西太平洋副高与东亚夏季风系统的关联性分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 755-769.
YU Dandan, ZHANG Ren, HONG Mei, et al. Correlation analysis between the West Pacific subtropical high and the East Asian summer monsoon system based on cross wavelet and wavelet coherence. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(6): 755-769. (in Chinese)
- [16] 赵强, 严华生. 太平洋—印度洋海温异常对陕西夏季降水年际变化的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1608-1617.
ZHAO Qiang, YAN Huasheng. Influence of Pacific-Indian Ocean SSTA on interannual variation of summer precipitation in Shaanxi. Plateau Meteorology, 2014, 33(6): 1608-1617. (in Chinese)
- [17] 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 Hongxin, LI Guangqi. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467-5475. (in Chinese)
- [18] 赵新华, 冯学尚. 太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性[J]. 科学通报, 2014, 59(14): 1284-1292.
ZHAO Xinhua, FENG Xueshang. Periodicities of solar activity and the surface temperature variation of the Earth and their correlations. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(14): 1284-1292. (in Chinese)
- [19] 柏玲. 气候变化对天山南坡典型流域径流过程的影响[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2016.
BO Ling. Climate change and its impacts on runoff process for typical river basin in the southern slopes of Tianshan Mountains.

Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese)

- [20] 董煜, 张立山, 陈学刚. 精河流域径流变化特征及其对降水变化的响应[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 60-64.
DONG Yu, ZHANG Lishan and CHEN Xuegang. Runoff characteristic and its responses to precipitation change in Jinghe River. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 60-64. (in Chinese)
- [21] 侯迎, 郑芳, 邵议. 基于交叉小波的多尺度气候变化及其对径流的影响[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 564-571.
HOU Ying, ZHENG Fang and SHAO Yi. The multi-timescale climate change and its impact on runoff based on cross-wavelet transformation. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(6): 564-571. (in Chinese)
- [22] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1137-1146.
LIU Zhifang, LIU Youcun, HAO Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1137-1146. (in Chinese)
- [23] GRINSTED, A., MOORE, J. C. and JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004(11): 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- [24] 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.
WEI Fengying. Modern diagnosis of climate statistics and its prediction. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [25] JEVREJEVA, S., MOORE, J. C. and GRINSTED, A. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D21): 4677. <https://doi.org/10.1029/2003JD003417>
- [26] 梁丹, 赵锐锋, 李洁, 等. 4种干旱指标在河西走廊地区的适用性评估[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 194-204.
LIANG Dan, ZHAO Ruifeng, LI Jie, et al. Applicability assessment of four drought indexes in Hexi Corridor regions. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(36): 194-204. (in Chinese)
- [27] 王涛, 霍彦峰, 罗艳. 近300a来天山中西部降水与太阳活动的小波分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 708-717.
WANG Tao, HUO Yanfeng and LUO Yan. Precipitation and sunspots in the central-west Tianshan Mountains in recent 300 years. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 708-717. (in Chinese)
- [28] 李耀辉, 李栋梁. ENSO循环对西北地区夏季气候异常的影响[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 930-935.
LI Yaohui, LI Dongliang. Effects of ENSO cycle on the summer climate anomaly over northwest China. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 930-935. (in Chinese)
- [29] 张冲, 赵景波, 罗小庆, 等. 近60年 ENSO事件与甘肃气候灾害相关性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 106-113.
ZHANG Chong, ZHAO Jingbo, LUO Xiaoqing, et al. Correlation between ENSO events and climate impacts in Gansu for 60 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(11): 106-113. (in Chinese)
- [30] 蓝永超, 康尔泗, 张济世, 等. 近50年来 ENSO与祁连山区气温降水和出山径流的对应关系[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 141-145.
LAN Yongchao, KANG Ersi, ZHANG Jishi, et al. Relationship between ENSO circle and air temperature, precipitation and runoff in the Qilian mountain region in the past 50 years. Advance in Water Science, 2002, 13(2): 141-145. (in Chinese)