



Research Article

1960–2020年陕北气候多尺度变化及影响因素分析

Multi-Scale Climate Change and Its Influencing Factors in Northern Shaanxi during 1960–2020

Si Wen Xue^{1,2,*}, Zhou Qi^{1,2}¹College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, Shaanxi, China²Shaanxi Provincial Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji 721013, Shaanxi, China

ARTICLE INFO

Article History

Received 02 April 2021

Accepted 26 April 2021

Keywords

CEEMDAN method
wavelet analysis
BP neural network
multi-scale
Northern Shaanxi
climate

ABSTRACT

Based on the observed data of precipitation and air temperature in Northern Shaanxi during 1960–2020, the characteristics of precipitation and air temperature at multiple time scales in Northern Shaanxi were analyzed by using CEEMDAN (Adaptive Complete Set Empirical Model) and back propagation neural network time series model. At the same time, the cross-wavelet and wavelet coherence methods were used to explore the factors affecting climate change in Northern Shaanxi. The results show that there are certain rules of precipitation and temperature in the decadal, interannual, seasonal and monthly scales in Northern Shaanxi. The interdecadal fluctuations of precipitation and temperature were dominant, and the periods were about 12–23 years and 13–21.1 years, respectively. According to the analysis of trend term, in addition to the stable fluctuation of precipitation in Northern Shaanxi, the temperature showed a fluctuating upward trend. Arctic oscillation index, Pacific decadal oscillation index, Niño 3.4 Region sea surface temperatures index and relative number of sunspots all have a certain influence on the climate change in Northern Shaanxi.

关键词

CEEMDAN法
交叉小波
小波相干
BP神经网络
多尺度
陕北地区
气候

摘要

基于1960年—2020年陕北地区降水和气温观测数据,利用CEEMDAN(自适应完全集合经验模态分解)以及BP神经网络时间序列模型等方法,分析陕北地区多时间尺度降水和气温特征,同时,运用交叉小波和小波相干法探索了影响陕北气候变化的因素。结果表明:陕北降水和气温在年代际、年际、季节和月尺度上均存在一定的规律;降水和气温变化都以年代际波动为主导,周期分别为12a~23 a、13a~21.1a左右;从趋势项分析,陕北除降水平稳波动之外,气温呈波动上升趋势。AO指数、PDO指数、SST指数以及太阳黑子相对数均对陕北气候变化有一定的影响。

© 2021 The Authors. Published by Atlantis Press B.V.

This is an open access article distributed under the CC BY-NC 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

近几十年全球气候呈现出明显的变暖趋势,全球平均气温在1971年—2010年间存在每10年上升0.09℃~0.13℃的趋势[1],部分温度带明显北移,寒温带范围缩小,冰川萎缩[2]。在气候变暖的宏观背景下,区域气候也发生着一定变化[3]。区域气候条件变化会直接影响陆-气水循环结构,进而导致区域水资源问题更加突出[4,5]。中国大部分地区出现变干或变湿,且降水呈现极端化,夏季城市内涝频繁发生[6,7]。以中国东北、华北、西北和青藏高原为代表的亚洲中高纬度地带是全球最显著的气候变暖区[8,9]。

在研究内容上,学者们对陕北气候的研究主要集中在与ENSO事件的关系[10]、多模态分量分解[11]、与植被覆盖动态变

化的相互响应[12]、气候感知[13]、气候区划[14]、气候变化对农作物的影响[15]以及气候时空变化特征[16]等方面,而对陕北气候多尺度变化特征及影响因素研究的学者较少。

在研究方法上,多数运用线性回归分析、距平分析、小波分析、正交分解等方法,对气温或降水变化进行趋势、突变或周期性分析[17–19],主要分析温室气体、太阳活动、火山爆发、土地利用变化、SST(NINO3.4区海表温度距平平均值)、PDO(太平洋年际震荡指数)以及人类活动对气温和降水的影响。气候变化具有非线性、非平稳性变化特征[20]。大多数学者研究发现不同因素周期变化的非线性影响使得运用线性趋势法拟合区域气候变化存在缺陷[21]。而CEEMDAN模型可以将非平稳、非线性的序列转换为平稳序列[22]。因此,一些学者运用CEEMDAN模型来对降水量、水文干旱、蒸发及径流时间序列进行分解[21,23]。

陕北地区位于半湿润区向半干旱区、干旱区的过渡地带,受西风环流、高原季风和东亚季风环流的共同影响,是中国典型生态脆弱区和气候敏感区[24,25]。以该地区作为对象,运用CEEMDAN模型对降水和气温信号进行分解,分析其气

*Corresponding author. Email: 1213268775@qq.com

国家自然科学基金“区域气候变化风险感知与应对”(41771215)和陕西省科技统筹计划项目(2016KTCL03-17)

第一作者:薛斯文,女,1996-,陕西延安人,硕士研究生,从事全球变化与水资源利用研究 Email: 1213268775@qq.com通讯作者:周旗,男,1963-,重庆荣昌人,博士,教授,主要研究全球变化与可持续发展研究, Email: 2675963235@qq.com

候多尺度变化规律, 揭示影响该区域气候变化特征的主要因素, 对该区域生态建设和防灾减灾具有重要的理论和现实意义. 本文拟在前人研究的基础上, 选取1960年-2020年陕北地区降水和气温观测数据, 利用CEEMDAN、BP神经网络时间序列模型和交叉小波和小波功率谱等方法, 揭示陕北地区多尺度降水和气温变化规律及影响因素. 拟解决以下问题: (1) 陕北气候在年代际、年际、季节以及月尺度上是如何变化的? 以年代际还是年际变化为主导? (2) 陕北地区气候年际变化与AO、PDO、SST、太阳黑子相对数之间存在怎样的关系? 以上四者是如何影响陕北气候年变化的?

1. 研究区概况

陕北地区位于黄土高原中部, 地理位置35° 21'N~39° 34'N, 107° 15'E~111° 14'E, 包括榆林、延安两市, 辖25个县 [26]。受季风活动影响, 西北部气温干燥, 呈现为半干旱季风气候类型, 年平均气温和降水量分别为 7℃-9℃和 350mm~500mm; 东南部属暖温带干旱季风气候, 年平均气温和降水量分别为8.5℃~12℃ 和 500mm~650mm [27]。属于我国黄土高原的中心地带, 地势西北高, 东南低, 属于干旱半干旱区, 受水汽条件和特殊地形地貌影响, 该地区暴雨、干旱、洪水、水土流失、泥石流等自然灾害频发[3]。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

1960年-2020年陕北地区9个气象站点日降水量和气温数据, 来源于中国气象数据网http://data.cma.cn. 各站点数据质量相对完整, 部分站点缺测数据进行均值插补处理. PDO和AO数据均来源于NOAA网站 (http://www.noaa.gov); 太阳黑子数据来自太阳影响数据分析中心网站 (http://sidc.oma.be), 以上数据统一采用1960年-2020年的年平均值. SST指数数据来源于NINO3.4区, 5° S~5° N、170° W~120° W区域内, 海

表温度距平的区域平均值. DEM数据来源于地理空间数据平台 (http://www.gscloud.cn/sources/), 空间分辨率为30m。

2.2. 研究方法

本文首先整理了陕北 9 个站点 (见图1) 的日降水量和气温数据, 将日降水量求和, 气温取平均值由日数据逐步归并为月、季和年数据. 之后取 9 个站点的年、季、月平均气温数据的平均值来代替陕北 1960 年-2020 年各个年份的气温数据, 至于陕北近 60 年来各年、季、月的降水数据直接为 9 个站点每年季、月平均降水数据之和。

由于EMD和EEMD模型分别存在模态混淆 (混频)、噪声残留以及模态个数的均一化分解. Marcelo A.Colominas等人提出了自适应性噪声的完全集合经验模态分解 (CEEMDAN), 解决了上述两种模型存在的问题 [28]。因此, 为了对陕北地区年际和年代际气候变化规律进行分析, 本文运用CEEMDAN模型对陕北近60年来经上述处理的降水和气温信号进行分解, 进而模拟陕北地区近60年来气候在年代和年际尺度的变化趋势和周期. 具体步骤如下:

令 $E_k(\cdot)$ 为通过EMD产生的第 k 阶模态算子, $M(\cdot)$ 为产生将要被分解的序列的局部均值的算子, $w(i)$ 为均值为零, 方差为1的白噪声, $x^{(i)} = x + w^{(i)}$. $\langle \cdot \rangle$ 是在实现中求取平均值的算子, 可以看出 $E_1(x) = X - M(x)$ [21], 则:

- (1) 使用EMD计算 $x^{(i)} = x + \beta_0 E_1(w^{(i)})$ 的局部均值, 以求得第1个残差 [29]:

$$r_1 = (Mx^{(i)}) \tag{1}$$

- (2) 在第一阶段 ($k = 1$) 计算第一阶模态:

$$d_1 = x - r_1 \tag{2}$$

- (3) 将 $r_1 + \beta_2(w^{(i)})$ 的实现的局部均值的平均值作为第2个残差的估计值, 定义第2阶模态为 [21]:

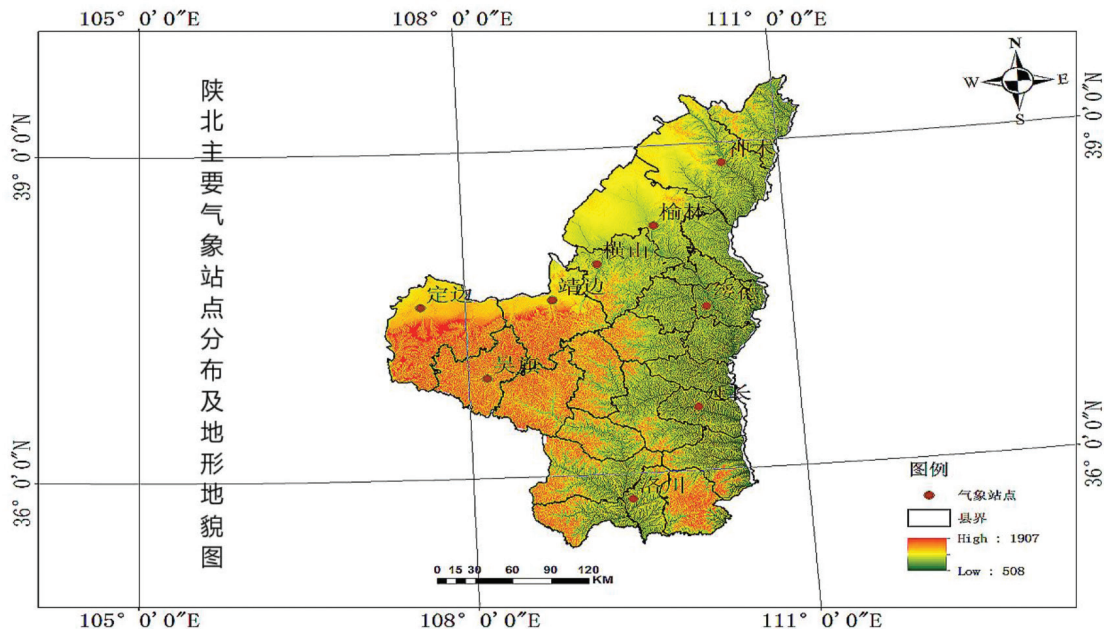


图1 陕北气象站点及地形地貌示意图.

$$d_2 = r_1 - r_2 = r_1 - \left\langle M \left[r_1 + \beta_1 E_2(w^{(i)}) \right] \right\rangle \quad (3)$$

(4) 对于 $k = 3, \dots, K$, 计算第 k 个残差 [31]:

$$r_k = \left\langle M \left[r_{k-1} + \beta_{k-1} E_k(w^{(i)}) \right] \right\rangle \quad (4)$$

(5) 计算第 k 阶模态 [21]:

$$d_k = r_{k-1} - r_k = r_{k-1} - \left\langle M \left[r_{k-1} + \beta_{k-1} E_k(w^{(i)}) \right] \right\rangle \quad (5)$$

(6) 返回第4步计算下一个 k [21]。

时间序列分析基本思想是根据系统有限长度的运行记录, 建立能够比较精确地反映时间序列中所包含的动态依存关系的数学模型, 并借以对系统的行为进行模拟 [30]。虽然BP神经网络在内部验证中表现出出色的预测性能, 但它不能很好地预测系统外部发生的变化 [31]。因此, 为了较为准确的表征陕北近60年来的气候变化趋势, 我们运用BP神经网络时间序列模型对陕北近60年来的年际气候变化趋势只做一个简单的模拟。BP神经网络时间序列模型在误差反向传播过程中, 对网络各层的连接权值和阈值逐层进行修正更新, 其拓扑结构主要由输入层、隐层和输出层构成, 各层之间的刺激脉冲强度通过Sigmoid函数关于 $(0, 1)$ 的连续取值反应 [32]。虽然BP神经网络有多种算法, 本文采用Levenberg-Marquardt算法利用梯度求最大(小)值, 这一算法同时具有梯度法和牛顿法的优点, 是使用最广泛的非线性最小二乘算法, 主要用模型函数 f 对待估参数向量 p 在其领域内做线性近似, 利用泰勒展开, 忽略掉二阶以上的导数项, 优化目标方程转化为线性最小二乘问题, 具体步骤可参照相应的文献 [33]。BP神经网络时间序列模型的运用为模拟陕北地区近60年来气候年际、季节、月变化, 为分析陕北气候多尺度变化特征提供依据, 具体操作时通过对数据的反复训练确保运用BP神经网络模型得出的近60年陕北气候年际、季节、月变化趋势拟合优度在0.8以上。

在分析陕北多尺度气候变化影响因素的时主要运用了交叉小波和小波相干法。交叉小波分析是将交叉谱分析和小波变换相结合的信号分析方法 [10] 能够从多时间尺度分析两个具有一定物理关系的时间序列在时频域中的内在联系。小波分析可以直观观察气象序列的整体特征和局部变化, 交叉小波功率谱可以揭示它们共同的高能量值区及位相关关系, 小波相干谱可以用来度量时-频空间中两个时间序列在低能量值区的局部相关密切程度 [34]。对于任意两个时间序列 X 和 Y 之间的交叉小波功率谱 (XWT) 定义为 [34]:

$$W_n^{XY} = W_n^* W_n^{Y*} \quad (6)$$

式中: W_n^{Y*} 小波变换系数的复共轭, 交叉小波功率 W_n^{XY} 值越大, 两者在不同时频域上的相关性越显著。

小波相干谱定义为:

$$R_n^2(S) = \frac{|S - (s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2}{S \cdot (s^{-1} |W_n^X(s)|^2) \cdot (s^{-1} |W_n^Y(s)|^2)} \quad (7)$$

式中: S 被称为平滑算子, $| \cdot |$ 平滑算子 [35], 两个时间序列在某一频率上波振幅的交叉积与各个振幅乘积之比, $|S - (s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2$ 为两时间序列在某一频率下波振幅的交叉积; $S(s^{-1} |W_n^X(s)|^2)$ 为振动波的振幅。

由于线性相关系数相对较小, 仅表明两个变量关系较弱, 易忽略多时间尺度的一致性和相关性 [31]。因此, 选择小波相干和

交叉小波这两种方法, 分别对陕北地区降水、气温和PDO、AO以及太阳黑子相对数的非线性相关关系进行探讨。小波相干和交叉小波法的相应公式见参考文献 [33]。

3. 结果分析

运用神经网络时间序列模型对陕北地区气温和降水的年、季、月变化趋势进行模拟, 并分析陕北地区近60年来气候多尺度变化特征。至于陕北气温和降水的年变化趋势中还增加了CEEMDAN模型去判断陕北年际降水量和气温变化的周期, 也对神经网络时间序列模型的年际变化趋势做了验证。至于陕北气候的年代变化趋势由于资料缺失我们仅用CEEMDAN模型来模拟和预测。表1主要反映1960年-2020年陕北地区年降水量和年平均气温多时间尺度的平均周期和方差解释量, 其中IMF1和IMF2是反映年际尺度变化的分量; IMF3、IMF4和IMF5为反映年代际尺度变化的分量; RES为趋势项。

3.1. 陕北近60年气候年际变化趋势

对于降水和气温的神经网络时间序列模型, 本文对降水和气温模拟时都设置了神经元数10个, 隐层7个。

最终由降水的拟合结果 (见图2) 可以发现: 陕北的降水自1960年-2020年都集中在350到550mm之间, 个别年份存在极端降水现象。 $R = 0.909 > 0.5$, 值很高, 说明降水的BP神经网络时间序列模型拟合结果较好 [35]。概括起来, 陕北1960年-2020年的降水大致呈四个阶段: 1960年-1971年降水呈波动下降趋势, 其中, 在1964年陕北地区降水接近750mm, 这与1964年延安地区有131天的降水这一资料符合; 1971年-1996年降水变幅较小, 整体呈波动上升趋势, 平均降水量为423mm; 1996年-2002年降水呈下降趋势, 说明这段时间陕北有变干趋势; 之后的2002年-2020年近20年陕北降水波动上升, 最高可达581mm, 这段时间平均降水量为451mm。总之, 陕北地区近60年降水量整体呈波动上升状态, 最高降水量约为704mm, 最低为273mm, 平均降水量430mm。对陕北地区降水进行CEEMDAN降水分解, 可将陕北降水分解为5个模态分量和一个趋势分量, 气温的分解结果与降水一致。IMF1-IMF2主要反映降水的年际变化特征。存在准2a、4a、6a的变化周期。其中, IMF1主要反映陕北近60年来降水量准2a的变化周期, 从1960到2013年降水量每2年产生一次震荡, 2013年-2020年有轻微的波动上升。IMF2主要反映4a、6a的变化周期, 1960年-1995年降水量呈4年为周期的变化, 1995年-2013年降水量呈准6a周期的波动上升, 2013年以后降水量略微上升。

至于气温大致与降水的变化趋势一致 (图3)。IMF1-IMF2反映气温的年际变化周期为准2a、4a、6a、7a。其中, 气温呈波动上升趋势的时间段为1971-1975、1988-2001以及2012-2020这三个阶段; 呈波动下降趋势的时间段是1960-1971、1975-1988以及2001-2012这三个阶段。

总的来说, 气温在这60年呈上升趋势, 平均气温为9.2摄氏度。IMF1反映陕北2a、4a准周期的气温变化, 从1960年-1978年主要存在2a准周期的上下震荡, 1978-2014年呈4a准周期的震荡, 2014年以后有轻微的上升。IMF2反映陕北6a、7a为准周期的气温变化。其中, 1960年-1996年主要呈6a准周期的上下震荡, 1996年-2014年呈6a周期的上下震荡, 2014年以后有轻微的下降, 说明陕北气温近60年来以6-7a为尺度会有稍微的下降。 $R = 0.96$, 接近于1, 说明神经网络时间序列模型能较好反映陕北近60年气温变化规律 [10]。

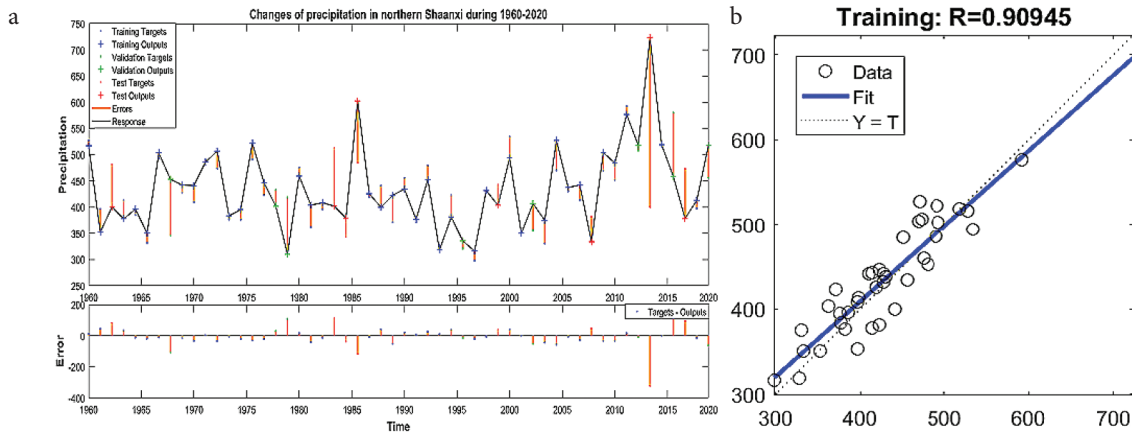


图2 | 陕北1960-2020 年降水变化趋势拟合结果 (a) 与拟合优度 (b).

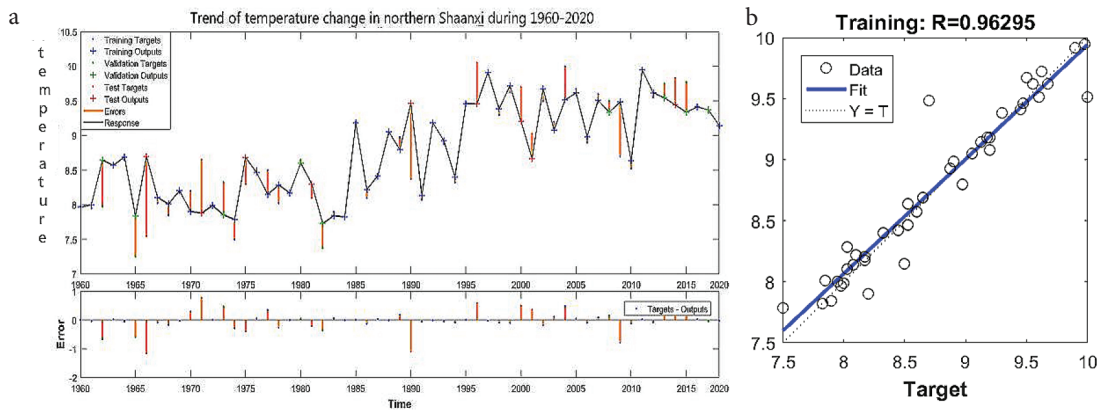


图3 | 陕北1960-2020年气温变化趋势拟合结果 (a) 与拟合优度(b).

3.2. 陕北近60年气候季节变化趋势

如图4所示，春季降水量从1960年-2020年经历了上升-下降-上升-下降-上升5各阶段，观点分别在1980年、1990年、2007年、2013年. 降水量最小为21mm，最大为118mm，总体上呈上升趋势。夏季降水量近60年来变化趋势与春季降水量一致，但拐点在1984年、1993年、1999年和2008年，说明夏季降水量拐点时间与春季降水量不同。秋季降水量与春夏季的变化趋势均有所不同，大致可以分为4个阶段：1960年-1971年降水量波动上升，1971年-1974年波动下降，1974年-2012年缓慢波动上升，2012年-2020年的降水量缓慢下降。总体上，陕北近60年来秋季降水量呈下降趋势。冬季降水量近60年来变化不大，大致在20mm-130mm附近来回震荡，最大值为130mm，最小值为40mm。主要呈3个阶段的变化趋势：1960年-1978年降水量波动上升，1978年-1989年降水量波动下降，1989年-2020年波动上升，总体上陕北近60年来冬季降雨量呈上升趋势(图4陕北四季的就是拟合结果都很好，R均大于0.8)。

气温的变化趋势可以由图5大致可以发现春、夏、秋、冬四季均呈上升趋势(拟合优度R都大于0.8)。其中，春季的气温大致有3次峰值，3次谷值。至于夏季气温近60年来变化幅度较大。最高接近18℃，最低为12℃。大致呈4个阶段的变化趋势。1960年-1966年夏季气温急剧下降(从16.8℃跌至13.1℃)，1966年-1988年气温缓慢波动上升，1988-1996年气温急剧下降(从15.2℃跌至12℃)，1996年-2020年气温波动上升，中间2007年又有一次大幅下降，之后均为波动上升趋势。

秋季气温主要呈4个阶段的变化趋势。总体上缓慢上升，大致在14℃到17.5℃之间变化。1960-1974年波动下降，1974年-1995年气温缓慢上升，1995年-2012年下降，2012年-2020年波动上升。至于冬季气温总体上呈波动上升趋势。

3.3. 陕北近60年气候各月份变化趋势

降水月变化趋势可以分为三类，第一类为波动上升，第二类为上下震荡，第三类为缓慢下降(上升)(图6)。图7各月份降水变化趋势模拟结果都非常好，拟合优度大于0.8，误差也较小。其中，1月份、2月份降水量呈波动上升趋势。1月份降水量最大为29mm，最小为2mm，从1960年-1997年降水波动上升，1997年-2012年陕北降水波动下降，2012年之后波动上升；2月份降水量一直呈波动上升趋势，1992年前降水量从2mm波动上升至19mm，1992年后变化幅度较小，降水量一直在5mm-28mm之间震荡；第二类上下震荡主要出现在3月份、4月份、5月份、6月份、8月份、9月份、10-11月份这7个月。震荡范围大致分别为20mm-52mm、18mm-50mm、20mm-60mm、12mm-110mm、40-90mm、25-50mm、5mm-45mm。其中，振幅较大的月份为6、9月份，振幅都在50mm及以上。至于第三类为12月份，降水量呈下降趋势。

气温的变化趋势主要可以分为3类，一类是波动上升，另一类是先下降后上升，最后一类是上下震荡(图7)。图7各月份气温变化趋势拟合优度R都在0.8及以上。其中，波动上升主要

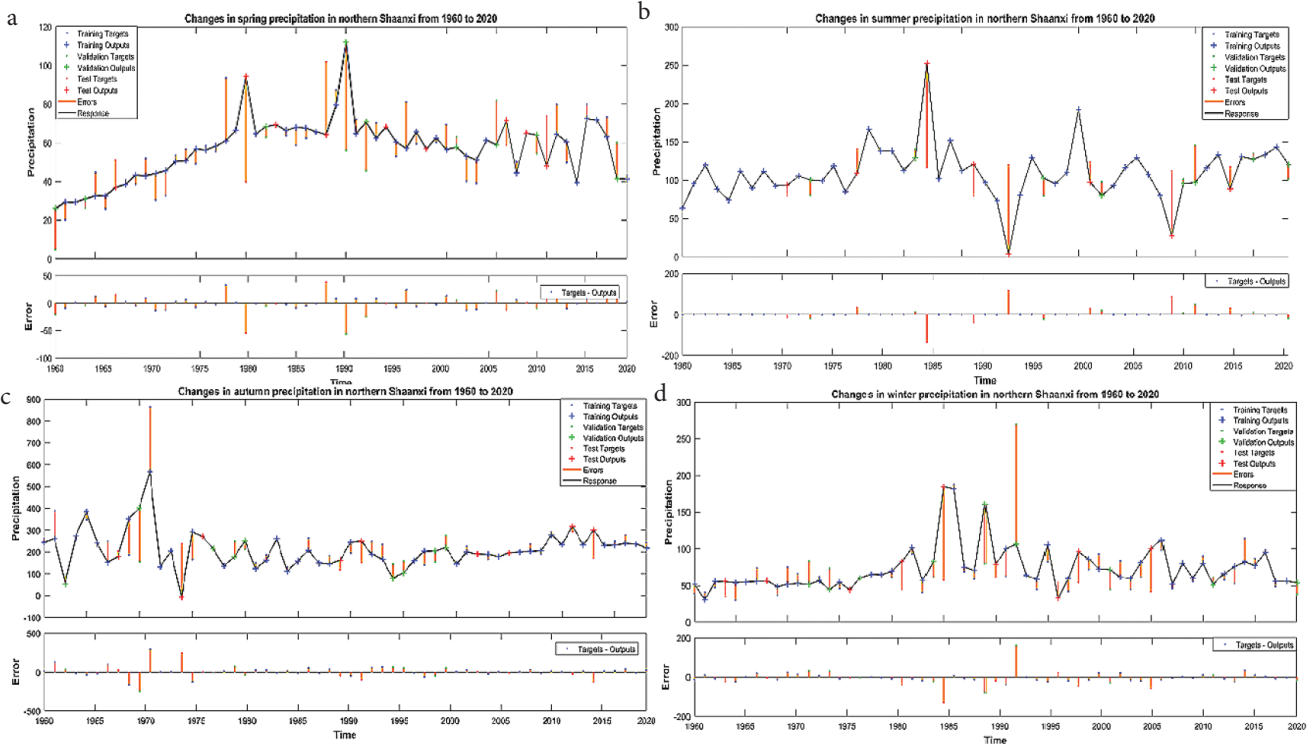


图4 | 陕北1960–2020年降水变化趋势拟合结果 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季.

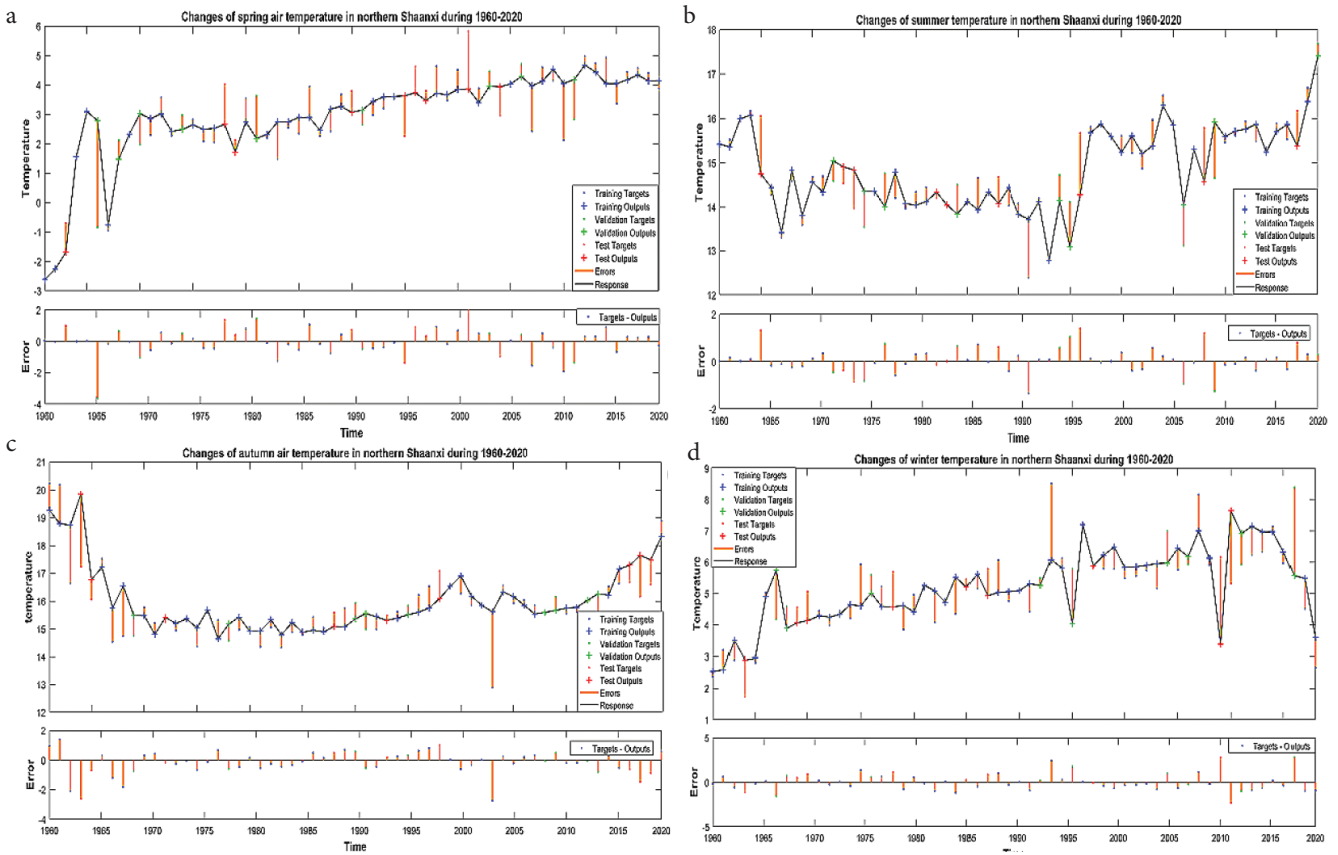


图5 | 陕北1960–2020年气温变化趋势拟合结果 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季.

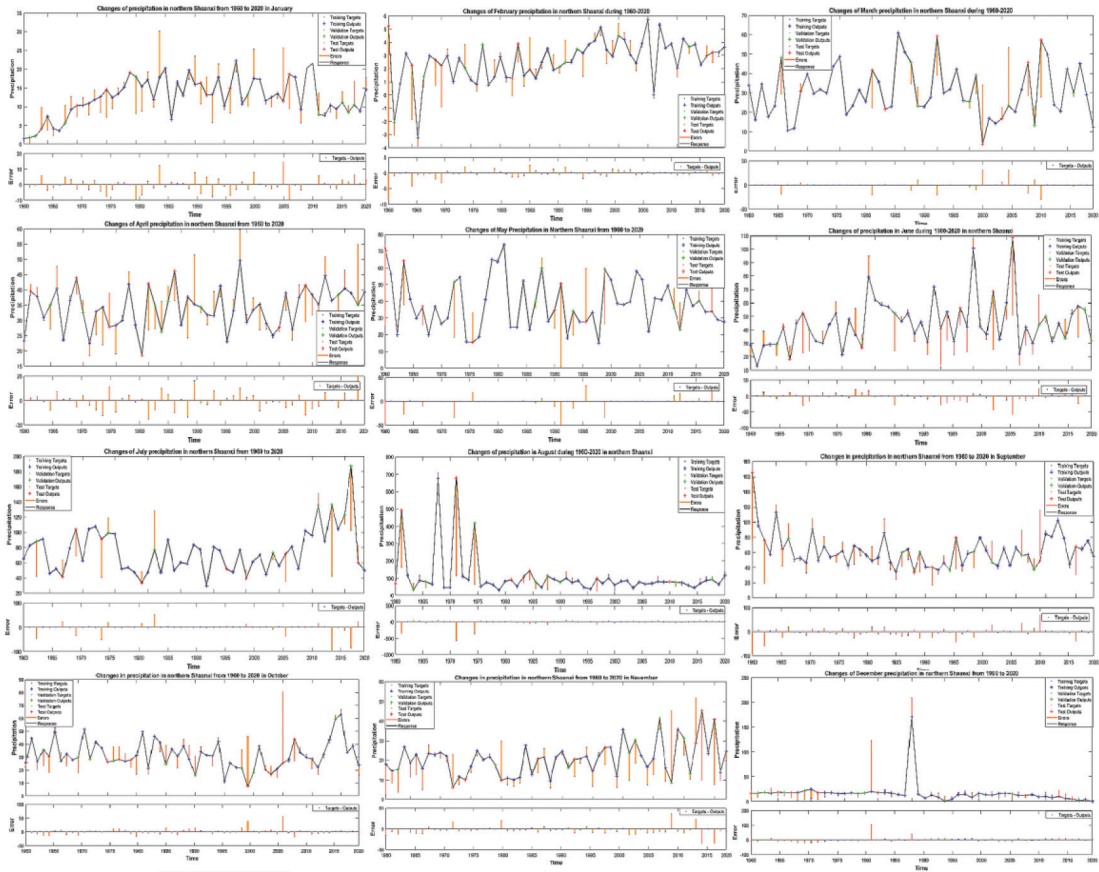


图6 陕北1960–2020年各个月份降水量变化趋势拟合结果(1–12月).

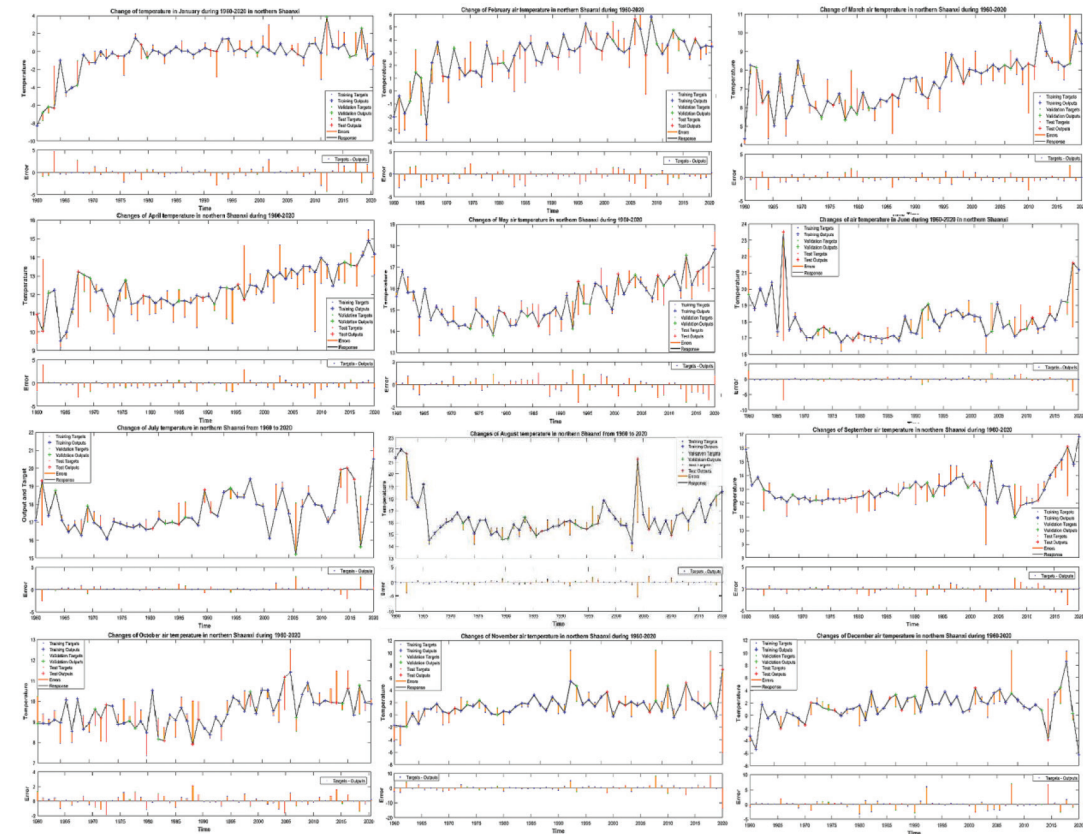


图7 陕北1960–2020年各个月份气温变化趋势拟合结果(1–12月).

出现在1、3、4、5月份、先下降后上升发生在7月份，其余月份均为上下震荡。其中，5月份峰值主要发生在1962年、1994年和2014年，谷值出现在1978和1999年。先下降后上升发生在7月份，拐点在1972年，最高值出现在1976年，气温为23.2℃，最低值出现在2006年，最低值为15.1℃。至于6月份、8–12月份呈上下震荡趋势。8月份的震荡范围为13.9℃–17.9℃。9月份的震荡范围集中在11℃–17℃。1960年–2008年气温变化幅度不大，2008年以后急剧上升。11月份气温的震荡范围集中于–1℃–6℃。12月份气温主要在–2℃–5℃震荡，主要在1960年–1992年缓慢上升，1992年–2020年来回震荡。

3.4. 陕北近60年气候年代际变化趋势

图8中 IMF3–IMF5反映陕北降水量的年代际变化特征。主要有准8a、12a以及23a的变化周期。其中，大致变化规律为：1960年–1973年呈下降趋势，1973年–1985年上升，1985年–2000年下降，2000年–2020年上升。IMF3主要指示准8a周期的变化，主要从1960年持续到1997年，1997年–2016年主要变化周期为12a，2006年以后缓慢上升。IMF4主要反映准12a、23a的变化周期，1960年–1972年降水量呈缓慢下降趋势，1972年–1984年缓慢上升，1984年–2007年呈波动下降趋势，期间降水量变化周期为23a，2007年–2020年轻微上升。IMF5主要反映准23a的降水量变化周期，1960年–1975年呈下降趋势，1975年–1985年缓慢上升，1985年–2000年缓慢下降，2000年–2020年缓慢上升。

陕北降水的余项 (RES) 反映了该区降水的基本变化趋势。从1960年–2020年这60年间，陕北降水量呈先下降后上升的趋势，下降和上升的时间拐点出现在1990年。说明陕北地区先变干旱后变湿润，这与李双双等研究得出的结论具有一致性[10]。

气温的变化规律与降水大体一致。由图8可得，IMF3–IMF5指示了陕北气温的年代变化趋势，主要周期为准8a、12a、20a以及21.1a，主要趋势为：1960–1971呈下降趋势，1971–1975上升，1975–1988下降，1988–2001上升，2001–2012下降，2012–2020年上升；RES反映了近60a气温波动变化规律，1960年–1975年下降，1975年–2020年呈上升趋势，说明降水滞后于气温对全球变暖的响应。IMF3反映陕北气温准8a周期的变化趋势，主要变化趋势为1960年–2015年陕北气温波动上升，2015–2020年气温缓慢下降。IMF4表征准12a的变化周期，主要变化趋势为下降–上升–下降–上升，拐点在1973年、2000年、2007年。IMF5反映陕北气温20a、29a的准周期

变化。其中，1960年–1980年存在20a的变化周期，1980–2009年存在29a的准周期变化，2009年–2020年呈缓慢上升趋势。

在方差贡献率上，RES对陕北的气温和降水贡献率都较低。其中，降水量各模态IMF1、IMF2、IMF3、IMF4和IMF5的方差贡献率分别为13.11%、19.65%、14.75%、22.84%、29.61%，降水量的RES（余项）方差贡献率为0.03%，说明陕北降水变化趋势在年代际上更为显著，主要为准12a–23a的周期；气温各模态IMF1、IMF2、IMF3、IMF4和IMF5的方差贡献率分别为26.68%、9.80%、18.96%、24.43%、19.83%、0.30%（表1），余项的方差贡献率为0.30%，说明气温变化趋势也在年代际上更为显著，主要周期为13a–21.1a。

此外，陕北气温1975前有轻微下降，之后持续上升，而降水呈现高位下降–波动上升–波动下降–阶梯上升的趋势，这与相关参考文献的结论陕北气候呈冷干化–暖湿化–冷湿化–暖干化–冷湿化–暖湿化交替变化一致[35]。

4. 影响因素

NIN03.4区海表温度距平平均值(SST)是和PDO（太平洋年际震荡）都对北半球地区的气温和降水量变化具有一定影响[36, 37]；至于北极涛动(AO)是北半球20°N以北地区大气环流变化的主要模态[37]，它在冬季与我国35°N以北地区(特别是东北)地表气温异常存在显著的同向变化关系[38]；此外，一些研究表明：太阳黑子相对数的变化是影响我国北方地区极端气候事件发生的主要原因之一[39, 40]。因此，我们选取了PDO、AO、SST指数以及太阳黑子相对数作为研究陕北近60a来气候变化的因子，主要采用交叉小波功率谱和小波凝聚谱来分析。

图9、图10中小波相干系数越大，表明两者相关性越高。“→”表示两者关系为同相位变化（正相关），“←”

表1 降水量和气温序列本征模函数的方差解释量

项	降水模态权重系数w	项	气温模态权重系数w
IMF1	13.11%	IMF1	26.68%
IMF2	19.65%	IMF2	9.80%
IMF3	14.75%	IMF3	18.96%
IMF4	22.84%	IMF4	24.43%
IMF5	29.61%	IMF5	19.83%
RES	0.03%	RES	0.30%

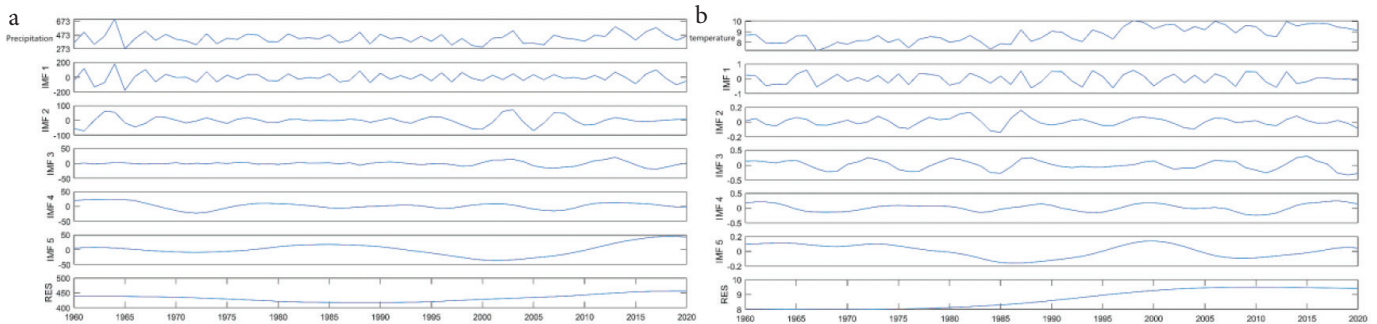


图8 | 1960–2020年陕北CEEMDAN模型分解结果：(a)降水，(b)气温。

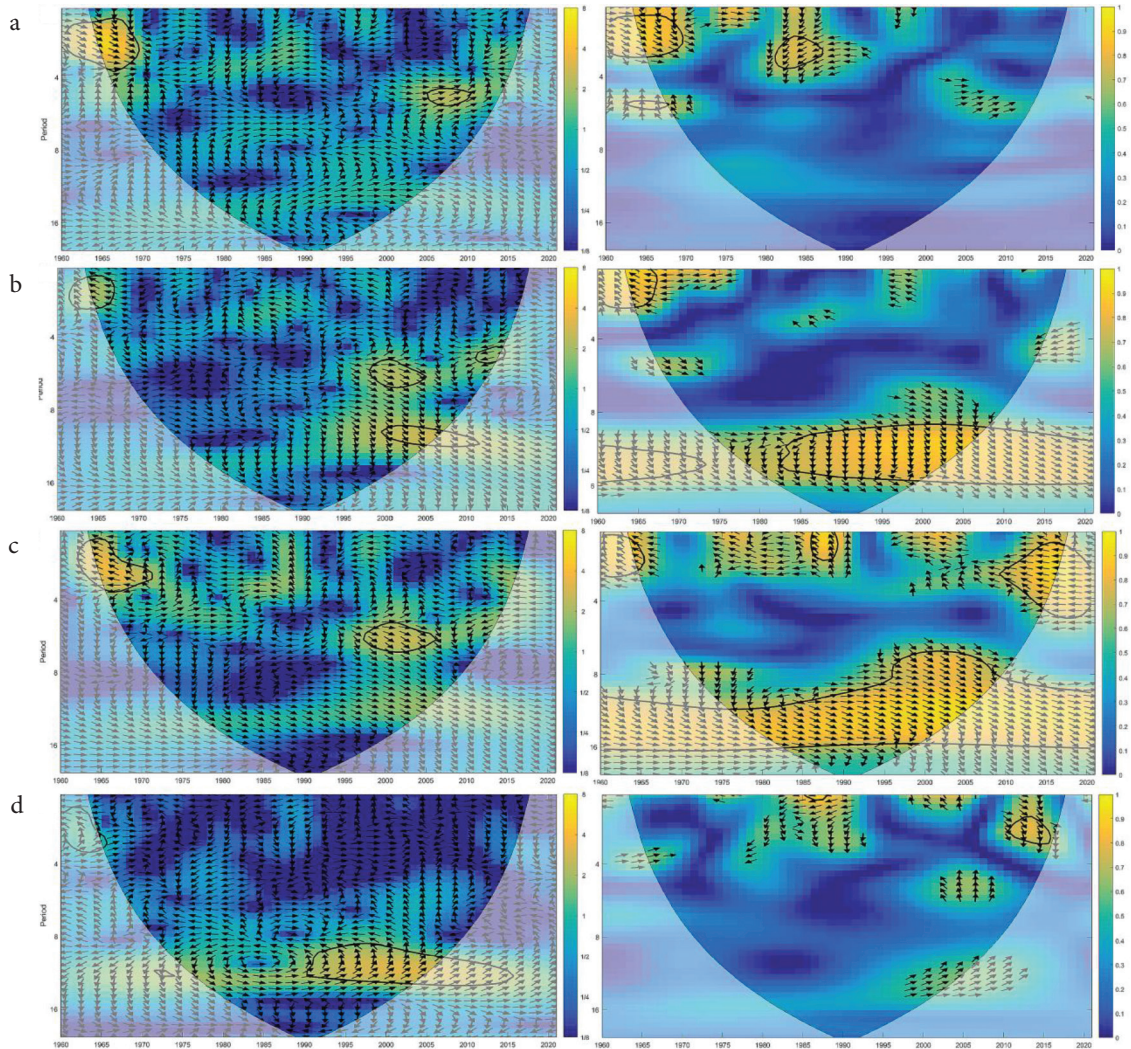


图9 | 陕北1960-2020年总降水量与各指数交叉小波和小波相干分析结果：(a) AO指数，(b) PDO，(c) SST指数，(d) 太阳黑子相对数。

表示两者反相位变化（负相关），“↑”表示陕北气候变化超前相应指数相位90°，“↓”表示陕北气候变化滞后相应指数相位90° [41]。

4.1. 陕北气候与PDO、AO的关系

交叉小波能量谱中颜色越偏黄色表示能量谱密度值越大。图8为1960年-2020年陕北地区降水量与PDO的交叉小波谱和小波凝聚谱，交叉小波谱表明该区的降水量与PDO间存在着显著的3a~4 a共振周期；小波凝聚谱表明该区的降水量与PDO存在着10a~16a的强凝聚性共振周期，并且二者之间呈正相关关系，这与PDO指数的变化周期较为一致。值得一提的是，交叉小波谱中显示，1985年-2002年陕北地区年降水量与PDO的相位差箭头竖直向下，说明该区年降水量的变化周期滞后于PDO约1.5个周期，这一研究结果与刘向培等的降水与PDO指数间滞后时间为4个月时相关系数最大类似[42]。图9为1960年-2020年陕北地区气温与太平洋年代际振荡的交叉小波谱和小波凝聚谱。两者的交叉小波谱表明：该区的年气温与PDO间在 $\alpha = 0.01$ 水平上无显著关系，但小波凝聚谱结果显示，该区1967年-1973年气温与PDO之间存在着3~4 a的强凝聚共振周期，并且二者呈负相关关系，说明1960年-2020年陕北地区

的平均气温与PDO间可能存在着某种关联，这与一些学者对北方黄河流域的研究结果一致性较强[43]。总而言之，陕北近60年来气温与PDO指数呈负相关关系，降水为正相关，说明陕北气候变化与PDO指数之间的关系较为复杂，可能用孙旭光等学者的研究结果PDO位相的变化对厄尔尼诺-南方涛动的年际变率有明显的调制作用来解释较为合理，PDO在1976年/1977年从冷相位转为暖相位、1997年/1998年由暖相位转为冷相位都会对厄尔尼诺-南方涛动产生一定的作用，进而影响陕北气候变化[44]。

至于AO与降水之间存在着显著的遥相关关系，周期为2a~4a，小波凝聚谱显示二者在1980年~1990年间有2a~6a强凝聚共振周期，呈负相关关系；气温与AO间也存在2a~5a以及8a~9a的共振周期，以2a~5a为主；气温与AO之间的强凝聚共振关系在2010年~2014年间有所体现，周期约为3a~4a，且二者呈负相关。这说明AO对陕北地区的气温变化有一定的影响，具体表现在：北极涛动与黄土高原冬季温度主要为正相关，在夏季AO指数与中国气温的相关较弱，黄土高原大部分地区相关系数均未通过显著性检验[45]。同时，气温与AO指数的共振周期变化与杨含雪等指出北半球降水与AO之间呈现准3a周期的遥相关关系类似[46]。AO指数对陕北近60年来降水的影响可以分夏季和冬季来解释：夏季北极涛

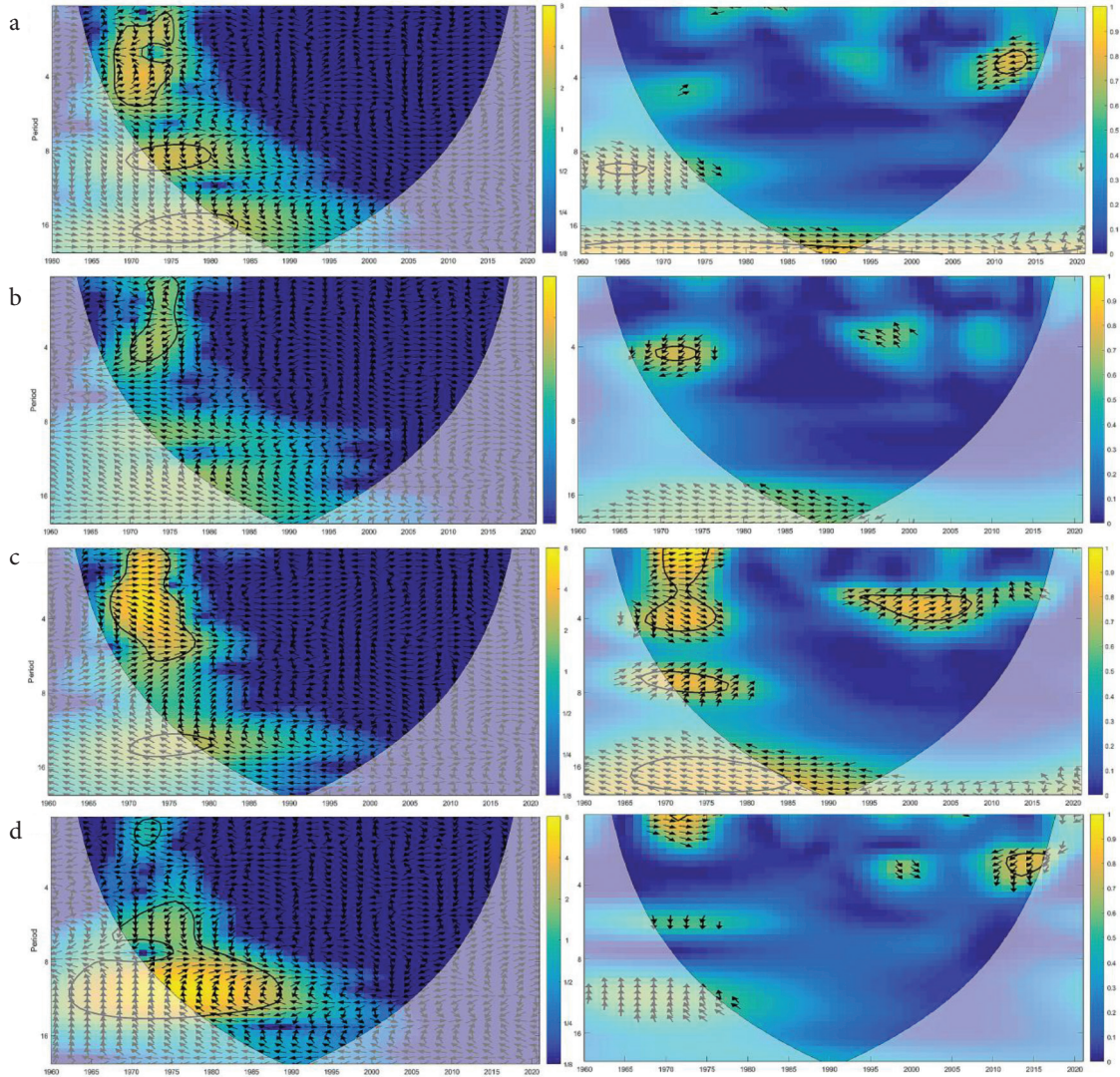


图10 陕北1960–2020年平均气温与各指数交叉小波和小波相干分析结果：(a) A0指数，(b) PDO，(c) SST指数，(d) 太阳黑子相对数。

动在 45°N 以南为正异常，副高明显偏北，有利于水汽向黄土高原偏北的地区输送，夏季北极涛动典型负异常中心位于新地半岛附近，在黄土高原地区主要为偏北风异常，偏南风的水汽输送较弱，不利于形成大范围的降水过程；冬季A0指数在黄土高原地区850h Pa以偏南风异常为主，有利于黄土高原地区增暖和增湿。冬季典型负异常年在华北和东北地区850h Pa存气旋式环流异常，黄土高原以偏北风异常为主，不利于水汽输送[47]。

4.2. 陕北气候与NIN03.4区SST指数的关系

由于NIN03.4区SST指数通过影响大气环流和洋流，从而对次年全国降水产生影响[48]。因此，我们有必要用NIN03.4区的SST指数来研究影响陕北气候变化的因素。由图10的小波交叉谱可以发现陕北1960年–2020年降水量与SST之间存在 $2\text{a}\sim 4\text{a}$ 和 $5\text{a}\sim 6\text{a}$ 的共振周期，气温与SST之间也存在 $2\text{a}\sim 7\text{a}$ 的共振周期；至于凝聚小波谱显示降水与SST在1976年~2009年之间存在 $7\text{a}\sim 16\text{a}$ 的强凝聚共振周期，且二者呈负相关，这说明降水与SST在长时间序列上为存在一定的关联，这与李启芬1981年以来中国夏季降水变化特征及其与SST和前期环流的联

系的研究结果类似[49]。至于气温与SST之间的强凝聚共振周期在1966年~1976年间存在 $2\text{a}\sim 5\text{a}$ 和 $7\text{a}\sim 8\text{a}$ 的强凝聚共振周期，1995年~2009年间存在 $3\text{a}\sim 4\text{a}$ 的强凝聚共振周期，均为正相关，与一些论文的研究结果较为一致[50]。SST指数指代NIN03.4海区海表温度距平的平均值，当海温连续三个月正距平在 0.5°C 以上可以视作一次厄尔尼诺事件。据相关学者研究表明厄尔尼诺事件的发生会导致陕北地区1953年—2009年的降水减少影响明显，榆林、绥德、延安地区与正常年份相比降水量分别减少为61.59mm、76.1mm、73.33 mm[11]；厄尔尼诺事件对升温影响明显，榆林、绥德、延安地区与正常年份相比平均气温分别增加为 0.23°C 、 0.13°C 、 0.11°C ，这说明SST指数的变化与陕北降水变化呈负相关[11]，与气温变化呈负相关，与本文的研究结果一致。

4.3. 陕北气候与太阳黑子相对数的关系

陕北降水与太阳黑子相对数之间存在 $8\text{a}\sim 12\text{a}$ 的共振周期，至于气温与太阳黑子之间存在 $8\text{a}\sim 14\text{a}$ 的共振周期，都在0.05的水平上显著（见图9、图10），这与太阳黑子平均变化周期大约为11 a具有一致性。而小波凝聚谱显示太阳黑子相对数

与降水、气温分别呈一般显著的2a~3a负、3a~4a正相关凝聚共振周期，这与相关学者的研究结果降水与太阳黑子之间的关系复杂类似[51]。具体来说，太阳黑子出现极值的年份与辽宁省夏季降水量距平的极值年份在大多数时段具有较好的对应关系，两者呈负相关[52]，这与本文的研究太阳黑子相对数与陕北降水量呈负相关关系一致；此外，从夏季降水量与太阳黑子相对数量的比较可以看出，相对数量在峰、谷阶段的降水量都比较大，随着太阳黑子相对数量的减小，降水量下降趋势明显[53]。太阳黑子峰、谷年对长白山地区冬季异常偏冷年也有一定的指示意义，这说明太阳黑子相对数的异常年份也会对我国气温变化造成一定的影响[54]。

5. 结论

运用1960年-2020年陕北地区9个气象站点处理后的逐年总降水量和平均气温数据，结合CEEMDAN分解法，对陕西气候变化规律多尺度特征进行分析，选取AO指数、PDO指数、SST指数以及太阳黑子相对数这四个因素来分析对陕北气候变化的影响状况，得到结论如下：

- (1) 陕北气温1975年前有轻微下降，之后持续上升，而降水呈现高位下降-波动上升-波动下降-阶梯上升的趋势。夏季降水量近60年来变化趋势与春季降水量一致至于秋季降水量与春夏季的变化趋势均有所不同，大致可以分为4个阶段冬季降水量近60年来变化不大，大致在20mm-130mm附近来回震荡；气温在春、夏、秋、冬四季均呈上升趋势北。
- (2) 降水量月变化可以分为3类：1月份、2月份和4月份陕北近60年来的降水量呈波动上升趋势；8月份降水量有轻微的上升，12月份降水量呈下降趋势；其余月份均表现为上下震荡。气温月变化也可以分为3类：一类是波动上升，另一类是先下降后上升，最后一类是上下震荡。其中，波动上升主要出现在1-5月份、先下降后上升发生在7月份，其余月份均为上下震荡。
- (3) 利用CEEMDA模型对1960年-2020年气温和降水信号进行分解，获得5个模态分量，降水和气温变化都以年代波动为主导，周期分别为12 a~23 a、13 a~21.1 a左右；从趋势项分析，陕北除降水平稳波动之外，气温呈波动上升趋势。降水量与PDO、AO间分别存在着显著的3 a~4 a正相关、2 a~4a的负相关共振周期，降水量与SST之间的正相关共振周期为2 a~4a、5 a~6a，与太阳黑子存在8 a~12a负相关共振周期；AO、PDO、SST指数以及太阳黑子相对数与气温分别主要存在2~5a的负相关共振周期、3 a~4 a的负相关强凝聚共振周期、2 a~7a正相关共振周期以及8 a~14a正相关共振周期。
- (4) AO、PDO、SST指数以及太阳黑子相对数会影响陕北地区降水量和气温。

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare they have no conflicts of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China "Regional Climate Change Risk Perception and Response"

(41771215) and Science and Technology Coordinated Plan Project of Shaanxi Province (2016KTCL03-17). The authors appreciate the time and effort of the editors and reviewers in providing constructive comments which have helped to improve the manuscript.

REFERENCES

- [1] IPCC Core Writing Team. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC; 2014.
- [2] Zheng Jy, Yin Yh, Li By. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geogr Sin* 2010;65:3-12.
- [3] Wang Y, Feng Q. Extreme temperature index in Northern Shaanxi during 1960-2013. *J Desert Res* 2016;36:1097-105.
- [4] Zhang Q, Zhao Yd, Zhang Cj, Li Yh, Sun Gu, Gao Qz. Water cycle and water resource problems in arid area of Northwest China. *Arid Meteorol* 2008;26:1-8.
- [5] Li F, Zhang G, Dong L. A review of the impacts of climate change on water cycle and water resources. *Sci Geogr Sin* 2013;33:457-64.
- [6] Hu Y, Wang S, Song X, Wang J. Precipitation changes in the mid-latitudes of the Chinese mainland during 1960-2014. *J Arid Land* 2017;9:924-37.
- [7] Na Yt, Qin Fy, Jia Gs, Yang J, Bao Yh. Change trend and regional differentiation of precipitation over the Mongolian Plateau in recent 54 years. *Arid Land Geogr* 2019;42:1253-61.
- [8] Stocker T, Qin D, Plattner GK. Climate change 2013: the physical science basis. New York, USA: Cambridge University Press; 2013.
- [9] Jiang DB, Fu YH. Estimation of future climate change in China under the background of 2°C global warming. *Chinese J Atmos Sci* 2012;36:234-46.
- [10] Shen Y, Li S, Yan J, Wu Y, Wang C. Characteristics and influencing factors of climate change in Shaanxi under pole symmetric modal decomposition. *Arid Land Geogr* 2021;44:36-46.
- [11] Wei J, Zhao J. Effects of El Nino/La Nina events on climate in northern Shaanxi during the past 57a. *Water Bull Soil Conserv* 2012;32:210-14.
- [12] Ma L. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its response to climate factors in the Loess Plateau of Northern Shaanxi based on ESTARFM model. Northwestern University; 2019.
- [13] Sun LF. Study on farmers' perception and adaptation behavior to climate change in the loess hilly region of northern Shaanxi Province. China: Shaanxi Normal University; 2018.
- [14] Liu HM. ArcGIS based climate regionalization for planting suitability of jujube in northern Shaanxi. Yulin Meteorological Observatory, Shaanxi Province; 2014.
- [15] Yingxia Z, Quanju W, Bin H, Jihong Z, Shuai T. Effects of temperature and CO₂ concentration on the yield of winter wheat in northern Shaanxi. *J Soil Water Conserv* 2017;31:292-7.
- [16] Wang B, Liu Q, Luo L, et al. Change characteristics of soil surface temperature and air temperature in the mountainous region of southern Sichuan from 1981 to 2011. *Arid Land Geogr* 2019;42:1322-9.
- [17] Chen Y, Jia Z, Bai S. Annual variation of winter temperature and its causes in Xinjiang. *Arid Land Geogr* 2019;42:223-39.
- [18] Ma L, Li H, Liu T, Liang L. Abrupt temperature change and a warming hiatus from 1951 to 2014 in Inner Mongolia, China. *J Arid Land* 2019;11:192-207.

- [19] Ding YH, Wang HJ. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China. *Sci Bull* 2016;61:1029–41.
- [20] Bai L, Liu ZH, Chen ZS, Xu JH. Runoff nonlinear variation and responses to climate fluctuation in the headwater region of the Kaidu River. *Resour Sci* 2017;39:1511–21.
- [21] Wei L, Xu Z, Zhang ZQ. Multi-scale analysis and prediction of precipitation in flood season in Haihe River Basin. *Water Resour Plan Des* 2017;60–63+86.
- [22] Cheng C. Study on the driving effect of complexity characteristics of regional water resources system on drought risk and its optimal allocation. China: Northeast Agricultural University; 2018.
- [23] Wang D, Yin S, Wang H, Meng D. Climate change in northern Shaanxi in recent 50 years. *Arid Zone Res* 2011;28:262–7.
- [24] Wei ZF, Ren ZY, Zhang C, Zhang JQ. Spatial characteristics of desertification in Shaanxi-Gansu-Ningxia Loess Plateau during 1999–2010. *J Desert Res* 2014;34:1230–6.
- [25] Zhang H, Pan L, Lu S, G HY. Changes of precipitation and temperature in Shaanxi Province from 1901 to 2012. *J Desert Res* 2015;35:1674–82.
- [26] Wei ZF, Wang DG, Zhang C, Liu XF, Zhang H. Response of vegetation cover to climate change and human activities in Northwest China during 1999–2010. *J Desert Res* 2014;34:1665–70.
- [27] Cao M, Qiu H. Geography in Shaanxi Province. Beijing: Beijing Normal University Press; 2018.
- [28] Colominas MA, Schlotthauer G, Torres ME. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing. *Biomed Signal Process Control* 2014;14:19–29.
- [29] Ding Z, Zhang J, Zhao Y. Study on the variation characteristics of annual runoff in the source region of the Yellow River based on CEEMDAN. *Haihe Water Resour* 2016;1–6.
- [30] Zhao X, Zhang M, Shi Y, Wang K, Wei Y. Denoising analysis of motor bearing vibration signal based on improved CEEMDAN algorithm. *J Electron Measure Instrum* 2020;34:159–64.
- [31] Deng Y, Zhou X, Shen J, Xiao G, Hong H, Lin H, et al. New methods based on back propagation (BP) and radial basis function (RBF) artificial neural networks (ANNs) for predicting the occurrence of haloketones in tap water. *Sci Total Environ* 2021;772:145534.
- [32] Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlin Processes Geophys* 2004;11:561–6.
- [33] Ghaderpour E, Vujadinovic T. The potential of the least-squares spectral and cross-wavelet analyses for near-real-time disturbance detection within unequally spaced satellite image time series. *Remote Sens* 2020;12:2446.
- [34] Wang J, Shi B, Bayanbin. Evolution characteristics of the sediment flux into the sea from the Yellow River in the past 70 years. *Res Soil Water Conserv* 2020;27:57–62.
- [35] Wang D, Zhou Y, Wang Y, Wang W, Meng D. Multi-index optimization of typical precipitation forecast by ANN: a case study in the western part of Taihu Lake. *J Hydrol* 2020;40:35–9.
- [36] Wang Y, Liu Y, Zhang H, Wang H, Guo J, Zhang E, et al. Temperature variability inferred from tree-ring records in Weichang region, China, and its teleconnection with large-scale climate forcing. *Climate Dyn* 2019;52:1533–45.
- [37] Gutzler DS, Kann DM, Thornbrugh C. Modulation of ENSO-based long-lead outlooks of Southwestern U.S. winter precipitation by the Pacific decadal oscillation. *Weather Forecast* 2002;17:1163–72.
- [38] Zuo J. Relationship between AO/NAO and SST and their impact on climate anomalies in China. Lanzhou: Lanzhou University; 2010.
- [39] Gong DY, Wang SW. Long-term variability of the Siberian high and the possible influence of global warming. *Acta Geogr Sin* 1999;54:125–33.
- [40] Wang X, Jiang R, Xie J, Zhao Y. Study on the characteristics and driving mechanism of precipitation change in flood season in Xi'an. *J Nat Disast* 2020;29:138–48.
- [41] Rong X, Pang J, Han J. Study on the distribution trend and climate background of droughts and floods in Shanxi Province during 1958–2012. *J Arid Land Resour Environ* 2018;32:97–102.
- [42] Li S, Kong F, Han L, Yan J, Wang C, Wu Y. Spatio-temporal variation of extreme precipitation and its influencing factors on the Loess Plateau in Northern Shaanxi province. *Geogr Res* 2020;39:140–51.
- [43] Feng XL, Liu CH, Lin PF, Bai WR, Yu D. Multi-scale characteristics of temperature variation in the source region of the Yellow River from 1953 to 2017. *Clim Environ Res* 2020;25:333–44.
- [44] Li M, Deng Y, Ge C, Wang G, Chai X. Characteristics of meteorological drought and its relationship with large-scale climatic factors in the Loess Plateau during 1961–2017. *Ecol Environ Sci* 2020;29:2231–9.
- [45] Xin M, Yu Z, Huilin L, Hua B, Songying G, Lili S. Characteristics of temperature variation and its relationship with AO in Northeast China. *J Arid Meteorol* 2017;35:383–90.
- [46] Yang H. Relationship between EAP wave train and AO/NAO in summer in the Northern Hemisphere and its impact on persistent precipitation in China. Chengdu University of Information Technology; 2018.
- [47] Zhang Y, Zhang Y. The influence of the Arctic Oscillation on the temperature and precipitation of the Loess Plateau. In: The 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S7 East Asian climate, extreme climate event variation mechanism and climate prediction. China Meteorological Society; 2018, p. 5.
- [48] Wang J. Modern physical geography. Beijing: Higher Education Press; 2002, pp. 97–101.
- [49] Li Q, Wu Z, Wang X, Zhang D, Xiao M. Variation characteristics of summer precipitation in China since 1981 and its relationship with SST and previous circulation. *Plateau Meteorol* 2020;39:58–67.
- [50] Jing G, Shengnan L, Lihong J, Weiyi M, Lijun J. Analysis of extreme temperature variation and its influencing factors in Tacheng area, Xinjiang. *Arid Land Geogr* 2021;44:346–59.
- [51] Lei Z, Jun X, Yin Z, Yunfeng Q. Temporal and spatial evolution of precipitation and its driving forces in Haihe River Basin. *Water Resour Protect* 2021;37:53–60.
- [52] Liang ZR. Analysis of the relationship between summer precipitation and relative number of sunspots in Liaoning Province. *Hydrology* 2020;40:86–91.
- [53] Chen Y, Liu J, Zhang P, Xu M, Hai J. Climate change and its relationship with related factors in Shandong Province in recent 40 years. *Yellow River* 2016;38:81–6.
- [54] Zhang L, Cheng K, Zhang L, Ruan W. Analysis on climatic characteristics of winter abnormally cold years in Changbai Mountains. *Meteorol Disast Prev* 2019;26:1–5.