

# 甘肃省降水集中度的变化特征及其与环流指数遥相关分析

张克新<sup>1</sup>, 苏志华<sup>1</sup>, 刘金林<sup>1</sup>, 曹立国<sup>2</sup>

(1. 贵州财经大学 管理科学与工程学院, 贵阳 550025; 2. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:**降水的年内分配对作物生长、水资源利用和全球水循环具有重要的意义,而降水集中指数(Precipitation Concentration Index, PCI)能很好地表征降水在一年内的集中分散程度大小,被广泛应用于相关研究。基于甘肃省 27 个气象台站 1961—2017 年的逐月、逐日降水数据,采用 Sen 斜率来计算 PCI 值的变化趋势,并采用交叉小波和相干小波变换等方法来分析研究区 PCI 与若干气候环流指数之间的相互关系。结果表明:甘肃省多年平均 PCI 值为 20.3,最大值为 26.3(1980 年)、最小值为 16.6(2016 年),表明年降水分布处于中高集中度范围。从长期趋势来看,研究区年 PCI 值呈下降趋势,变化递减率为  $-0.54/10$  a;但年内降水还是集中在某几个月份内。甘肃省年平均 PCI 值的空间变化趋势由西北向东南逐渐增大,这说明东南部年降水呈现出逐渐趋于集中的趋势,而该地区西北部年降水分配却有逐渐趋于均匀的趋势。从四季来看,该区域春、夏、秋季的 SPCI 值空间分布格局基本一致,但空间差异明显,SPCI 值呈现出东南部低而西北部相对较高的空间分布特征;冬季 SPCI 值在整个研究区域内空间变化差异最显著;说明甘肃东南部和中部地区的降水在冬季分布相对均匀,而西北部冬季降水具有高度集中性,也就是降水可能发生在某一个月内。交叉小波变换和小波相干谱分析表明:甘肃省年降水集中度与大气环流指数 PDO, AO, ENSO 和 SS 等存在共振周期,但相关性在不同时域中却存在一定差异,这说明该地区年 PCI 变化的重要因素之一是受到大气环流指数的影响。

**关键词:**降水集中度;变化特征;大气环流;甘肃省

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0261-07

## Characteristics of Variation of Precipitation Concentration Index and Its Teleconnection Relationships with Large-scale Atmospheric Circulations in Gansu Province

ZHANG Kexin<sup>1</sup>, PENG Jiaoting<sup>1</sup>, SU Zhihua<sup>1</sup>, LIU Jinlin<sup>1</sup>, CAO Ligu<sup>2</sup>

(1. School of Management Science and Engineering, Guizhou University of Finance and Economics,

Guiyang 550025, China; 2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The precipitation concentration index (PCI) is a powerful indicator for temporal precipitation distribution and is also very useful for the assessment of seasonal precipitation changes. The primary objectives of this study are to investigate and analyze the temporal-spatial variability patterns of annual and seasonal PCI values based on monthly precipitation data. These data were collected from 27 meteorological stations located throughout Gansu Province, for the period of 1961—2017. Additionally, the possible teleconnection with the largescale circulation pattern was investigated. The results reveal that the variation trend of annual PCI values had decreased at a rate of  $-0.54/\text{decade}$  in Gansu Province over the past 57 years. The regularity of the annual precipitation pattern increased in spring, summer, and autumn from southeast to northwest of Gansu Province. However, the winter precipitation dispersion and the pattern in the considered period were more regular than those of the other seasons. Furthermore, the relationship between the PCI and PDO, AO, ENSO, and SS presented significant periodic variations with PCI, indicating that changes in the PCI appeared to

收稿日期:2020-09-08

修回日期:2020-11-23

资助项目:贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2021]139);贵州省科技计划项目(黔科合基础—ZK[2021]—一般 189)

第一作者:张克新(1980—),男,甘肃民勤人,博士,研究方向为区域气候变化研究或人工放射性核素示踪应用研究。E-mail: xbsdzkx2008@163.com

通信作者:曹立国(1986—),男,辽宁桓仁人,博士,研究方向为核素示踪应用和气候变化与区域响应。E-mail: lgcao@snnu.edu.cn

be rather complex and possibly related to global atmospheric characteristics. These results presented in this study indicate that the PCI is an essential feature for water resource planning, prediction of risk due to droughts or floods, and the management of natural resources.

**Keywords:** precipitation concentration index; temporal-spatial variability; atmospheric circulation index; Gansu Province

降水既是全球水分循环的重要构成部分,也是区域水资源评价的重要内容。近百年的全球变暖,对降水的影响尤为明显,也影响了降水事件的时空分布<sup>[1]</sup>;随着全球很多区域极端气候事件(干旱、洪涝、雪灾和高温等)的频发,也使得降水时空分布的非均匀性随之发生显著的变化<sup>[2]</sup>,且也存在着很大的区域差异。北半球中高纬度降水增加、赤道地区降水变率增大;而中国、澳大利亚和太平洋岛国等地区降水却呈减少趋势<sup>[3]</sup>。我国西北干旱半干旱地区气候变化较为显著,有研究表明近 50 a 来西北干旱半干旱地区气温上升明显,降水量略有增加<sup>[4-5]</sup>。降水的年内变化(日、月和季节降水变化)对农作物生长、水资源利用及管理具有重要意义,同时也是全球变暖背景下水循环发生变化的关键过程之一。但以往的研究往往采用月、年降水量来分析降水的时空分布及其变化特征<sup>[5-6]</sup>。虽然这些变量在一定程度上能够反映出降水的基本变化特点,也在气候及水文过程的研究中不可或缺,但在描述降水量的年内月份分配特征或集中程度上却存一定的局限性。鉴于某一年内降水的分配对这一年内农作物生长、土壤侵蚀、水资源利用及水循环等都存在影响,有许多学者尝试采用新的降水指数来对上述问题进行深入研究<sup>[7-12]</sup>。Zhang 等<sup>[8]</sup>于 2003 年提出降水集中期(Precipitation Concentration Period, PCP)与降水集中程度(Precipitation Concentration Degree, PCD)的概念,成为近些年来评价区域降水年内分配均匀与否的重要指标之一。国内许多学者对不同区域(全国范围<sup>[7,9-10]</sup>、长江流域<sup>[11]</sup>、渭河流域<sup>[12]</sup>、西南地区<sup>[13]</sup>和宁夏等<sup>[14]</sup>)的 PCD 和 PCP 做了研究。国外普遍采用的是由 Oliver<sup>[15]</sup>在 1980 提出并经过 De Luis<sup>[16]</sup>改进的降水集中指数(Precipitation Concentration Index, PCI),它能更好的表征一年内降水的集中程度,也被国内外学者广泛应用<sup>[7,17-20]</sup>。与其他研究降水集中程度的指数相比,PCI 的物理意义更直观,计算更为简洁。考虑到目前对季节降水集中度研究的文献报道较少<sup>[21]</sup>,且研究区域分布也极不均匀。为此,本文基于甘肃省 1961—2017 年逐日、逐月降水数据,采用 Oliver<sup>[15]</sup>降水集中度的定义,对甘肃省年降水集中程度的年和季节变化特征进行探究;同时,还对该地区

PCI 与若干大气环流指数的遥相关进行分析。这将对甘肃省年降水月份分配均匀与否的年际变化与季节变化有更加深入的理解和认识,进而为该区域水资源的合理利用提供一些理论依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

从中国气象科学数据共享服务网(<http://www.cma.gov.cn/>)上获取甘肃省 27 个气象站 1961 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日逐日降水数据和同期的逐月降水数据;并从 NOAA 网站(<http://www.cpc.noaa.gov/>)下载月平均北极涛动(AO)指数序列;太平洋年代际振荡(PDO)数据来自网站 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>;1961—2015 年太阳黑子(Sunspots, SS)相对活动数年平均值来源于 <http://sidc.oma.be/products/meu/index.php>;厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)指数采用多元 ENSO 指数<sup>[22-26]</sup>(即 MEI),数据来自于 <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/>。以上大气环流指数的时间范围(除 SS 外)和降水数据的时间范围一致。

### 1.2 研究方法

1.2.1 降水集中度(PCI)的计算 本文降水集中度的定义采用是 Oliver<sup>[15]</sup>在 1980 年提出并经 De Luis 等<sup>[16]</sup>改进的计算方法,定义如下:

$$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} p_i\right)^2} \times 100 \quad (1)$$

式中: $p_i$ 某站点第  $i$  月降水量。

通过某一年 12 个月的降水量,即可由公式(1)得出该区域某年的 PCI 值;且由式(1)可知:若年降水量较为均匀的分配在 12 个月内,则 PCI 值达到最小,约为 8.3;若年降水量都集中在某一个月,则该 PCI 值达到最高,为 100。再者,季节范围内(春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 2 月))降水集中指数(SPCI)也可以根据公式(1)来计算<sup>[18]</sup>,定义如下:

$$SPCI = \frac{\sum_{i=1}^3 p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^3 p_i\right)^2} \times 25 \quad (2)$$

在实际应用的过程中,依据 Oliver<sup>[15]</sup> 定义当 PCI(SPCI)值 $<10$ 时,表示某地区年内降水量的月分配较为均匀(即低集中度);当 $10 \leq \text{PCI} < 15$ 时,表示该地区年内降水具有一定集中性(中集中度);当 $15 \leq \text{PCI} < 20$ 时,表示该地区年内降水量的不规则分布(高集中度);而当 $\text{PCI} \geq 20$ 时,则表明该地区年降水在年内的分配具有异常集中性,降水量集中在某几个月内,月降水量分配非常不均匀。另外,为了更加准确的看出月降水的年内变化,也对年降水量的变异系数(CVs)进行了计算。

**1.2.2 趋势分析** 采用 Sen 斜率计算年 PCI 值的变化趋势,并使用 Mann-Kendall(M-K)方法对 PCI 值的变化趋势进行显著性检验;并根据 Sen 计算 PCI 值的变化趋势,利用软件 ArcGIS 10.2 生成甘肃省 PCI 值倾向率空间分布图;并用反距离加权插值法(IDW)用来分析要素的空间分布规律。

**1.2.3 相关性分析** 本文采用交叉小波变换(XWT)和小波相干变换(WTC)来分析年 PCI 值与 AO, PDO, ENSO 和 SS 指数之间的多时间尺度相关关系。交叉小波是将小波变换和交叉谱分析两种方法结合产生的一种新型信号分析技术<sup>[22-24]</sup>,该方法提供了两序列在时频空间中能量共振和协方差分布规律,可以从多时间尺度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系;且该方法可以揭示两序列在不同时段尺度上的相关性和一致性,并能再现时频空间中的相位

关系。本文计算方法和程序详见参考文献<sup>[22-24]</sup>,此处不再赘述。

## 2 结果与分析

### 2.1 年降水集中度的年际变化趋势

图 1 为甘肃省 1961—2017 年 PCI 值的年际变化情况。可以看出:近 57 a 来,甘肃省 PCI 的多年平均值为 20.3,最大值为 26.3(1980 年)、最小值为 16.6(2016 年)。统计分析表明:该地区 PCI 值呈现出减小趋势,其递减率为 $-0.54/10 \text{ a}$ ,这表明降水集中程度有降低趋势,但依旧处于中度集中度到高度集中度的范围内,即就是研究区降水的年内月份分配仍然是不均匀的。甘肃省 PCI 值年代际变化也较为明显,1980s 之前呈现增大趋势,从 1960s 的 19.85 增加到 1970s 的 21.0,高于多年平均值 20.3,也就是年降水不规则分布的趋势有所增加;1980s 的 PCI 值略微降低,但仍然高于多年平均值;之后到 1990s,PCI 值又增加到 20.96,几乎接近 1970s 的水平;但到了 2000s,PCI 值减小到 19.27,远小于平均值,这说明该地区 2000—2010 年内降水的不规则分布有所缓减。整个研究时段内,甘肃省年年代际 PCI 值呈现出增大—减小—增大—减小—再增大的趋势,即年代波动趋势明显。由此可以得出:自 1961—2017 年来甘肃省年内降水分布不均匀,降水主要集中在某几个月内,其他月份降水较少或者无降水事件发生。

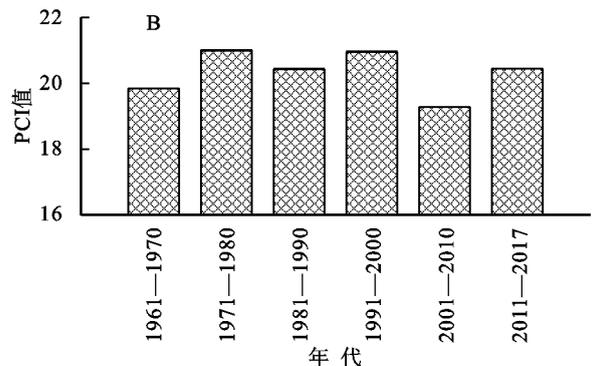
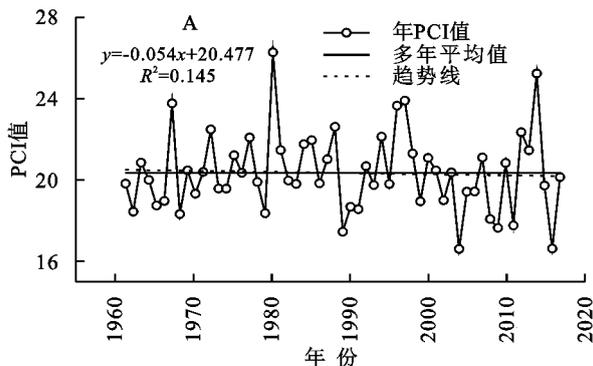


图 1 1961—2017 年甘肃省年 PCI 值(A)和年代际(B)PCI 值的变化趋势

### 2.2 年降水集中度的空间变化

为了探究甘肃省年 PCI 值的空间变化特征,本文采用研究区内各站点 PCI 值的变化趋势及其变异系数作为参数,绘制甘肃省年 PCI 值变化趋势与变异系数空间分布图(图 2)。甘肃省各站点 PCI 值空间变化趋势差异明显,介于 $-1.13 \sim 0.41/10 \text{ a}$ ,瓜州县多年 PCI 值变化趋势减小幅度最大,而鼎新多年 PCI 值增幅最大。可以看出,研究区 PCI 值的变化趋势从东南部到西北部逐渐降低,这说明该地区西北部

年降水分配有逐渐趋于均匀的趋势,而东南部年降水却呈现出逐渐趋于分散的态势。这与王红桃等<sup>[24]</sup>发现甘肃省在 1967—2008 年的降水量呈减少趋势,但西北部有略微的增加,东南部减少的研究结果相吻合。但从 1961—2017 年 PCI 值的变异系数空间分布图却发现,东南部年 PCI 值的 CV 值呈现出弱变异,而西北部 PCI 值的 CV 值却呈现出与东南部相反的趋势,呈现出中度变异。造成甘肃省东南与西北部 PCI 值空间差异的原因有:西北部受西风带环流影

响,且西北部深居内陆,水汽不易到达;而东南部受东南季风影响,带来了丰富的降水,所以东南部降水较西北部多且年内分配较为均匀<sup>[27]</sup>。

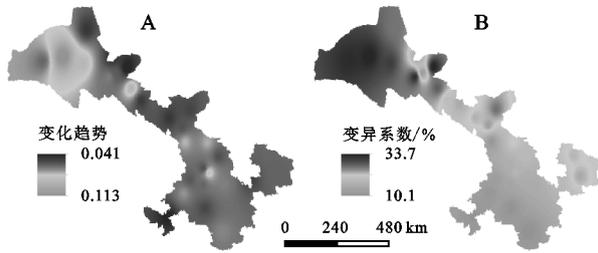


图 2 甘肃省平均降水集中度的变化趋势及其变异系数的空间分布

### 2.3 月降水集中度的空间变化

从季节 SPCI 值的空间分布图(图 3)可以看出,

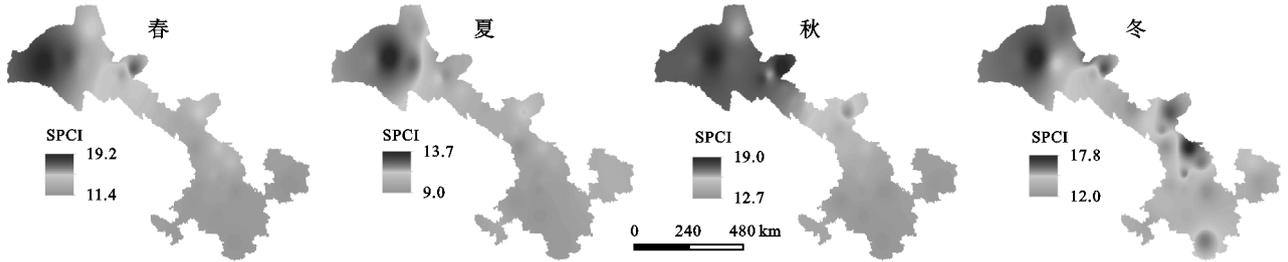


图 3 研究区 1961—2017 年各季节 SPCI 平均值

### 2.4 降水集中度与若干大气环流指数的相互关系

本文利用交叉小波变换(XWT)和小波相干变换(WTC)对甘肃省年 PCI 值与大气环流指数的年际变化的相关性(共振周期、显著时段及相位关系等遥相关特征)进行探讨。交叉小波变换重点突出年 PCI 值变化与大气环流指数两组信号序列在时频域中高能量区的相互关系,如果两组信号序列是物理相关的,则它们的相位相差很小或者一致,其相位关系可以用相位角的圆域平滑值来量化;而相干小波变换则重点揭示年 PCI 值变化与气候因子在时频域中低能量区的相互关系,特别适用于两种过程具有很强的相互作用时的时频分析。交叉小波变换表明甘肃省年降水集中度(PCI)与 PDO, AO, ENSO 和 SS 存在共振周期(图 4A, C, E, G),只是在不同域中的相关性存在明显差异,这表明 PDO, AO, ENSO 和 SS 是影响该区域降水集中度变化的重要因素之一。从图 4A 中可以看出,甘肃省年 PCI 值与 PDO 分别在 1981—1987 年、1990—2002 年存在 2~4 a, 4~6 a 的共振周期(小波交叉功率谱相关性通过了红色噪音标准谱检验(显著性水平  $\alpha = 0.05$ ),下文中通简称为“通过红标检验”)。2~4 a 的周期平均位相角接近垂直向下  $90^\circ$ , 则位相谱 PCI 变化位相比 PDO 落后;而 4~6 a 的周期平均相位角水平向右,则表示两者同位相变化。从图 4C 中看出,PCI 值与 AO 交叉小波功率谱高能量区分别在 1962—1969 年、1980—1988 年、1983—2005 年、2008—

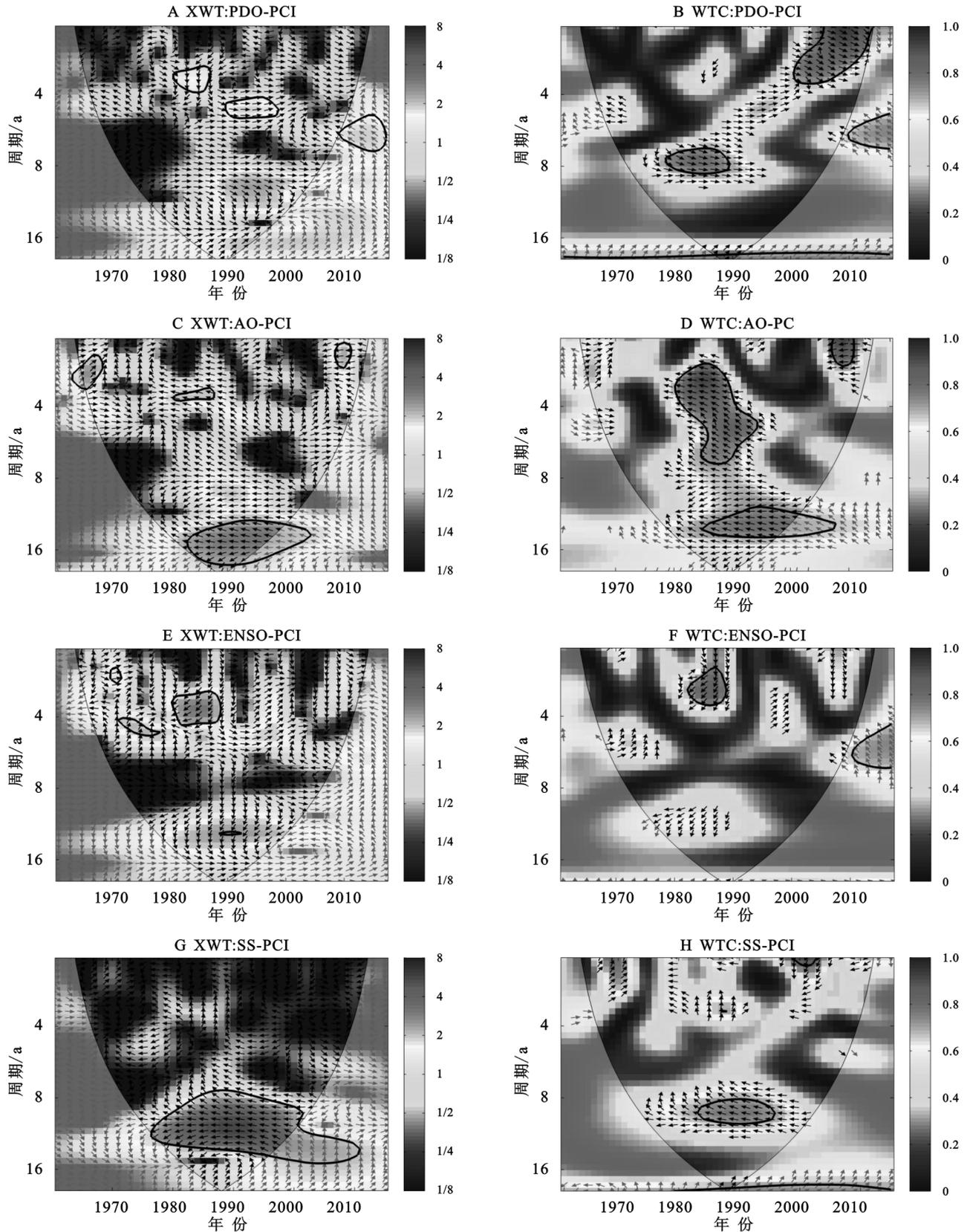
近 57 a 来,甘肃省春、夏、秋季的 SPCI 值空间分布格局基本一致,各季节 SPCI 值呈现出东南部低而西北部相对较高的空间分布特征,但各个季节 SPCI 最大、最小值所在位置略有不同。春、秋季 SPCI 值变化范围比较接近,为 11.4~19.2, 12.7~19.3, 据 Oliver<sup>[15]</sup> 定义,说明这两个季节的降水具有中高度集中性。夏季 SPCI 值在 9.0~13.7, 但 SPCI 值均小于 15, 说明夏季降水具有中度集中性。冬季 SPCI 值虽然处于 12.0~17.8, 但在整个研究区域内空间变化差异最显著,其最小值出现在山丹,最大值出现在瓜州;说明甘肃东南部和中部地区的降水在冬季分布相对均匀,而西北部冬季降水具有高度集中性,也就是降水可能发生在某一个月内。

2012 年存在 1~3 a, 3.5~4 a, 12~16 a 和 0~2 a 的共振周期(其中 3.5~4 a 和 0~2 a 通过红标检验),在时频域中两者显示负位相关关系,位相方向向左,表明两者在此域内有相对滞后性。研究区 PCI 值与 ENSO 指数(图 4E)在 1968—1972 年表现出 1~2 a 的共振周期,在 1972—1978 年表现出 4~5 a 的共振周期,在 1980—1990 年存在 3~5 a 的共振周期(通过红标检验)。PCI 值与太阳黑子数(SS)在 1975—2010 年存在 7~12 a 反相位的共振周期(未通过红标检验)(图 4G),表明两者存在滞后性。

总之,本文交叉小波变换揭示的是甘肃省年 PCI 值与大气环流指数在其波动强烈时段上的共振关系,更多反映的是极值年份的遥相关特征;而对于年 PCI 值,在其波动不强烈的时段具有同等重要意义,因此,进一步通过小波相干谱分析甘肃省年 PCI 值与大气环流指数的遥相关特征(图 4B, D, F, H)。年 PCI 值与 PDO 的小波相干功率谱在低能量区(图 4B), 1978—1990 年存在 7~9 a 的同相位共振周期(通过红标检验), 2000—2014 年存在 0~4 a 的共振周期。在图 4D 中看出年 PCI 值与 AO 相干小波功率谱低能量区在 1980—1994 年、1984—2008 年、2008—2012 年分别表现出 2~8 a, 13~15 a 及 0~2 a 呈负位相的共振周期(其中 2~8 a 的共振周期通过红标检验)。而年 PCI 与 ENSO 和 SS 的小波相干功率谱

在低能量区均只有一个共振周期,前者仅在 1984—1990 年存在 2~3 a 的反相位共振周期(图 4F)(通过

红标检验);后者在 1983—1997 年存在 8~11 a 的反相位共振周期(图 4H)(通过红标检验)。



注:图 A,C,E,G 是交叉小波功率谱,B,D,F,H 为相干小波功率谱;粗黑线包围的范围表示通过  $\alpha = 0.05$  显著性水平下的红噪声标准谱的检验;细黑线为影响锥曲线,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。箭头表示相对位相差, $\leftarrow$ 表示两者反位相变化; $\rightarrow$ 表示两者同位相变化; $\downarrow$ 表示年 PCI 变化位相比 PDO,AO,ENSO 和 SS 变化位相落后  $90^\circ$ , $\uparrow$ 表示月降水量变化位相比 PDO,AO,ENSO 和 SS 变化位相提前  $90^\circ$ [28]。

图 4 甘肃省降水集中度 (PCI) 与 PDO,AO,ENSO 和 SS 的交叉小波功率谱、相干小波功率谱。

### 3 讨论与结论

甘肃省年均 PCI 值在 1961—2017 年间呈现出以震荡为主,略有下降的趋势,表明降水年内分配有逐渐趋于均匀的态势。有研究表明<sup>[29]</sup>:西北地区降水量呈现出增加趋势,但空间上西北地区东部降水量却呈现出减少趋势。本文中 PCI 值的空间分布也呈现出和降水基本一致的分布特征,即研究区西北部的年 PCI 值有下降趋势而东南部呈上升趋势。大气环流指数对气温和降水的影响已被学术界公认并已取得许多研究成果,但由于气候系统的复杂性,使得大气环流指数对各地区气候的影响存在一定的差异性。而太阳黑子活动会改变全球水循环现状,导致水资源在时间空间上的重新分配,也决定了区域可利用淡水资源存储量的上限<sup>[30]</sup>。因此,本文对甘肃省年均 PCI 值的特征分析及其和大气环流指数(PDO, AO, ENSO 和 SS)的遥相关分析将有助于进一步理解该区域降水时空变化趋势,进而也可以探究大气环流与水资源体系的相互影响和相互作用机制。

通过讨论和分析近 57 a 来甘肃省年 PCI 与季节 PCI 值,初步可以得出以下结论:

(1) 甘肃省年平均 PCI 值呈现出震荡为主,略微下降的趋势,其递减率为 $-0.54/10$  a,表明降水集中程度有所减弱,但年内降水分布不均匀,降水主要集中在某几个月内,其他月份降水较少或者无降水事件发生。

(2) 甘肃省年平均 PCI 值的变化趋势从东南部到西北部逐渐降低,这说明该地区西北部年降水分配有逐渐趋于均匀的趋势,而东南部年降水原有的集中态势有些微加强。

(3) 甘肃省春、夏、秋季的 SPCI 值空间分布格局基本一致,存在明显差异,SPCI 值呈现出东南部低而西北部相对较高的空间分布特征;冬季 SPCI 值在整个研究区域内空间变化差异最显著;说明甘肃东南部和中部地区的降水在冬季分布相对均匀,而西北部冬季降水具有高度集中性,也就是降水可能发生在某一个月内。

(4) 交叉小波变换和小波相干谱分析表明:甘肃省年平均 PCI 与 PDO, AO, ENSO 和 SS 存在共振周期,在不同时域中的相关性却存在一定差异,这表明大气环流指数是影响该区域年 PCI 值变化的一个重要因素。

#### 参考文献:

[1] 任志艳,延军平,王鹏涛.1960—2012 年内蒙古降水集中度和降水集中期时空变化[J].中国沙漠,2016,36(3):

760-766.

- [2] 王纪军,裴铁璠,顾万龙,等.降水年内分配不均匀性指标[J].生态学杂志,2007,26(9):1364-1368.
- [3] Dore M H I. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? [J]. *Environment International*, 2005,31:1167-1181.
- [4] 王红桃,包光,胡亚飞.甘肃省 1967—2008 年气温和降水时空变化[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(2):34-42.
- [5] 任朝霞,杨达源.西北干旱区近 50 年气候变化特征与趋势[J].地球科学与环境学报,2007,29(1):99-102.
- [6] Frieler K, Meinshausen M, von Deimling T S, et al. Changes in global-mean precipitation in response to warming, greenhouse gas forcing and black carbon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011,38(4):1-5.
- [7] 段亚雯,朱克云,马柱国,等.中国区域 1961—2010 年降水集中指数(PCI)的变化及月分配特征[J].大气科学,2014,38(6):1124-1136.
- [8] Zhang L J, Qian Y F. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003,17(2):146-163.
- [9] 王皖.我国夏季和全年降水集中程度与旱涝的研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [10] 孔锋方,佳毅,刘凡,等.1951—2012 年中国降水集中度和集中期的时空格局[J].北京师范大学学报,2015,51(4):404-411.
- [11] 张录军,钱永甫.长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J].地球物理学报,2004(4):622-630.
- [12] Huang S Z, Huang Q, Chen Y T, et al. Spatial-temporal variation of precipitation concentration and structure in the Wei River basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016,125(1/2):67-77.
- [13] Shi P, Wu M, Qu S M, et al. Spatial distribution and temporal trends in precipitation concentration indices for the southwest China[J]. *Water Resources Management*, 2015,29(11):3941-3955.
- [14] 纳丽.宁夏降水集中程度与旱涝关系的研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [15] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: A comparative index[J]. *Professional Geographer*, 1980,32(3):300-309.
- [16] De Luis M, González-Hidalgo J C, Raventós J, et al. Distribución espacial de la concentración y agresividad de la lluvia en el territorio de la comunidad valenciana [J]. *Cuatrenario Y Geomorfología*, 1997,11(1):33-44.
- [17] Zhang K X, Yao Y L, Qian X Q, et al. Various characteristics of precipitation concentration index and its cause analysis in China between 1960 and 2016 [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(12):

- 4648-4658.
- [18] Zamani R, Mirabbasi R, Nazeri M, et al. Spatio-temporal analysis of daily, seasonal and annual precipitation concentration in Jharkhand state, India[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, 32(4):1085-1097.
- [19] De Luis M, González-Hidalgo J C, Brunetti M, et al. Precipitation concentration changes in Spain 1946—2005[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(5):1259-1265.
- [20] Vyshkvarkova E, Voskresenskaya E, Martin-Vide J, et al. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in southern Russia[J]. *Atmospheric Research*, 2018, 203(1):36-43.
- [21] 张克新,王娟娟,彭娇婷,等.贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J].*贵州师范大学学报:自然科学版*,2020,38(2):10-18.
- [22] Wolter K, Timlin M S. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal [C] // Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, Ok, Noaa/Nmc/Cac, Nssl, Oklahoma Clim. Survey, Cimms and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, 1993.
- [23] 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):187-192.
- [24] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6):561-566.
- [25] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1):61-78.
- [26] Jevrejeva S, Moore J C, Grinsted A. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach[J]. *Journal Geophysical Research*, 2003, 108(21):4677-4686.
- [27] 王红桃,包光,胡亚飞.甘肃省 1967—2008 年气温和降水时空变化[J].*沙漠与绿洲气象*,2017,11(2):34-42.
- [28] 段鹏硕,刘根友,柳林涛,等.地球动力学扁率与南极涛动年际变化的小波相干分析[J].*科学通报*,2014,59(30):2947-2955.
- [29] 靳立亚,符娇兰,陈发虎.近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应[J].*地理科学*,2005,25(5):567-572.
- [30] 董林垚,张平仓,刘纪根,等.太阳黑子和 ENSO 对日本吉野川流域水文要素影响[J].*水科学进展*,2017,28(5):671-680.
- [30] 刘生元,王金艳,王式功,等.春季东亚副热带西风急流的变化特征及其与中国沙尘天气的关系[J].*中国沙漠*,2015,35(2):431-437.
- [31] Yang Y, Wang J, Niu T, et al. The variability of spring sand-dust storm frequency in Northeast Asia from 1980 to 2011 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27(1):119-127.
- [32] 冯鑫媛,王式功,程一帆,等.中国北方中西部沙尘暴气候特征[J].*中国沙漠*,2010,30(2):394-399.
- [33] 赵明瑞,闫大同,李岩瑛,等.甘肃民勤 2001—2010 年沙尘暴变化特征及原因分析[J].*中国沙漠*,2013,33(4):1144-1149.
- [34] 李威.中国北方春季沙尘暴的变化与 ENSO 的关系[J].*气候变化研究进展*,2006,2(6):296-300.

(上接第 260 页)

- [25] 王文彪,王晓宏,胡生荣,等.呼和浩特地区近 48 年沙尘暴发生规律及其影响因子研究[J].*水土保持研究*,2013,20(3):131-134.
- [26] 王文涛,田斌,李静.新疆东部地区气候变化及对生态环境的影响[J].*水土保持研究*,2014,21(5):249-254.
- [27] 赵光平,陈楠,王连喜.宁夏中部干旱带生态恢复对沙尘暴的降频与减灾潜力分析[J].*生态学报*,2005,25(10):2750-2756.
- [28] Li HongJun, Yang XinHua, Zhao Yong, et al. The atmospheric circulation patterns influencing the frequency of spring sand-dust storms in the Tarim Basin[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014, 6(2):168-173.
- [29] 赵勇,李红军,何清.塔里木盆地沙尘天气日数的变化及其与北大西洋涛动的联系[J].*中国沙漠*,2012,32(4):1082-1088.