

1951 – 2018 年河北围场地区降水的多尺度变化特征

龚兰兰^{1,2}, 王长燕^{1,2}, 郁耀闯^{1,2}, 韩景卫^{1,2}, 王雄¹

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013; 2. 陕西省灾害监测与机理模拟实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 利用 1951 – 2018 年河北围场地区气象站年降水量和同期的厄尔尼诺 (ENSO)、太平洋年代际振荡 (PDO) 数据, 采用集合经验模态分解 (EEMD) 和 Morlet 小波分析等方法, 研究了河北围场地区 1951 – 2018 年降水量的多尺度变化特征及其与厄尔尼诺和太平洋年代际振荡的关系。结果表明: 1951 – 2018 年围场地区年降水量总体上表现为增加的变化趋势, 增幅为 0.8 mm/10a; 围场地区年降水量在时间尺度上存在显著的准 4 a 和准 27 a 的年际和年代际周期, 分别与厄尔尼诺的 2 ~ 7 a 和太平洋年代际振荡的 20 ~ 30 a 周期相对应; 交叉小波谱和小波凝聚谱表明, 围场地区的年降水量与 ENSO 和 PDO 之间具有较好的共振周期, 说明 1951 – 2018 年围场地区的年降水量可能受到厄尔尼诺和太平洋年代际振荡的影响。

关键词: 降水; 多尺度变化; 集合经验模态分解 (EEMD); 厄尔尼诺 (ENSO); 太平洋年代际振荡 (PDO); 围场地区
中图分类号: TV125 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2020)05-0087-06

Multi-scale features of precipitation in the Weichang region Hebei Province from 1951 to 2018

GONG Lanlan^{1,2}, WANG Changyan^{1,2}, YU Yaochuang^{1,2}, HAN Jingwei^{1,2}, WANG Xiong¹

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China;
2. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation of Shaanxi Province, Baoji 721013, China)

Abstract: Data on the annual precipitation and its corresponding El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) data at the meteorological station in the Weichang region of Hebei Province from 1951 to 2018 were collected. Multi-scale features of the annual precipitation in the Weichang region from 1951 to 2018 and its relationship with ENSO and the PDO were analyzed using ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and Morlet wavelet analysis. The results showed that the annual precipitation in the Weichang region from 1951 to 2018 showed a general increasing trend with an increase of 0.8 mm/10a. There existed obvious interannual and interdecadal changes of 4 a and 27 a, which had a good correspondence with the 2 – 7 a cycle of ENSO and the 20 – 30a cycle of PDO respectively. The cross wavelet and wavelet cross coagulation spectrum showed that the annual precipitation in the Weichang region had a good resonance period with ENSO and PDO, indicating that the annual precipitation in this region could be affected by ENSO and PDO.

Key words: precipitation; multi-scale variation; ensemble empirical mode decomposition (EEMD); El Niño-Southern Oscillation (ENSO); Pacific Decadal Oscillation (PDO); Weichang region

1 研究背景

降水是气象和水文循环系统的重要组成部分,

也是农业、水资源管理和气候变化等方面的重要参数之一^[1]。在全球变暖背景下, 降水的强度和频率变化过大往往会导致干旱和洪涝等极端气候事件的

收稿日期: 2019-12-28; 修回日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771048); 陕西省教育厅重点实验室项目 (05JS40); 陕西省社会科学基金项目 (2019E007); 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目 (KLACP1904); 陕西省社会科学界联合会项目 (2019Z007、2020Z050); 宝鸡市科技局项目 (2018JH-13); 宝鸡文理学院重点科研项目 (ZK2017013、ZK2017039、ZK2017040)

作者简介: 龚兰兰 (1996-), 女, 陕西安康人, 硕士研究生, 研究方向为灾害地理与气候变化。

通讯作者: 王长燕 (1979-), 女, 山东烟台人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土壤水循环与气候变化响应。

发生^[2-3],从而对区域的生态环境和经济社会发展产生重要的影响^[4-5]。目前,全球多数地区降水量呈增加趋势,并具有明显的区域差异。例如,我国东南沿海、秦岭-淮河以南以及西北地区降水量的增加趋势较为明显^[4,6-7],东北中南部和华北等地区的降水量则呈减少趋势^[6,8]。围场满族蒙古族自治县(简称“围场地区”),位于河北省承德市北部,地处干旱与半干旱区、季风与非季风气候、森林与草原以及农业与畜牧业之间的过渡地带,该地区具有多种多样的气候和地理条件,生态环境比较脆弱,对气候变化较为敏感。受自然环境和地理条件等因素影响,该地区霜冻、干旱和洪涝等极端气候事件频发^[9],是研究降水多尺度变化特征的理想区域。因此,开展河北围场地区年降水的多尺度变化特征及其影响因素分析,对于认识区域气候变化规律及水资源的有效管理具有重要意义。

目前,降水量时间尺度的相关研究主要集中在降水量的季节性^[3,10-11]和极端事件等^[5,12-13]方面,对降水量多时间尺度变化特征的探讨还相对较少^[14-15]。冯建民等^[16]、宗海锋等^[17]、罗那那等^[18]研究表明,我国东部地区、长江流域和北疆地区的降水量存在着明显的年际-年代际尺度变化特征。毕硕本等^[14]、李芬等^[19]、万智巍等^[20]、潘威等^[21]研究表明,我国区域降水量的多尺度变化特征受到厄尔尼诺(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)和北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)等的影响。Liu等^[22]利用树轮记录定量重建了围场地区1777-2003年的降水量,发现夏季风活动强弱变化是影响该区降水量变化的重要因素。但目前对围场地区降水量多尺度变化特征及其影响因素的研究还鲜见报道,这无法准确描述围场地区降水量的年际-年代际尺度变化特征,进而也无法揭示该区的气候变化机制。

本文以气候变化比较敏感、生态环境较为脆弱的河北围场地区为研究案例区,系统研究该区降水量的多尺度变化特征及其与厄尔尼诺(ENSO)和太平洋年代际振荡(PDO)的关系,该结果将为认识围场地区降水的变化规律、预测未来可能的降水变化趋势以及未来华北平原东南部的生态安全和有效管理水资源提供参考依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及区域概况

本文选取由中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)提供的河北围场满族蒙古族自治县气象站点

1951-2018年的逐月降水观测资料,对年尺度降水系列进行统计。厄尔尼诺(ENSO)和太平洋年代际振荡(PDO)数据由荷兰皇家气象局气候资源管理网站(<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>)提供。

围场满族蒙古族自治县,位于河北省承德市北部,地理坐标为116°32'~118°14'E,41°35'~42°40'N,该区地势西北高东南低,平均海拔1500m,东西长138km,南北宽118km,总面积9219km²。围场地区气候类型属于北(寒)温带-中温带、半湿润-半干旱、大陆性季风型和高原-山地气候,夏季温暖多雨而短促,冬季寒冷干燥而漫长,年平均气温3.3℃,年降水量为300~560mm,多年平均降水量为445.6mm,降水时空分异较大,主要集中在夏季,6-8月的降水量占全年降水的68%~72%,春季降水量相对较少,仅占全年降水的12%~15%。该区属于典型温带针叶林和暖温带落叶阔叶林过渡地带,气候变化比较敏感,生态环境较为脆弱。围场地区地理概况如图1所示。

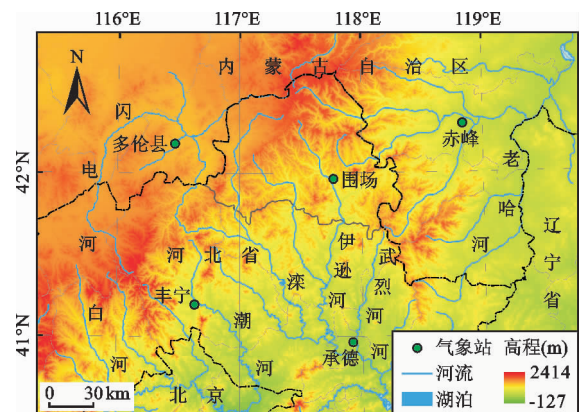


图1 围场地区地理概况图

2.2 集合经验模态分解法

本文采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)和Morlet小波函数法对围场地区降水的时间序列进行多周期尺度分解^[23]。EEMD方法是在经验模态分解(EMD)的基础上改进而来,是一种适应于非线性、非平稳信号的处理方法^[24-25],目前已被广泛应用于水文、气候变化和地球物理等领域的多时间尺度序列信号分析^[20,26-27]。小波分析是一种用于分析时序信号的功率谱局部变化的现代较新的分析方法,它同时兼顾了时域与频域的局域化特性,并考虑了有限数据的边缘效应对其周期的影响^[28-29]。另外,利用交叉小波变换(cross wavelet transform, CWT)来进行交叉

小波谱和小波凝聚谱分析^[30]。

3 结果与分析

3.1 围场地区年降水量变化特征

图 2 为 1951-2018 年围场地区年降水量变化特征。由图 2 可知,1951-2018 年河北围场地区年降水量总体上表现为波动增加的变化趋势,增加幅度为 0.8 mm/10a,年降水量的变化范围为 237.2~684 mm,平均值为 450.9 mm。由图 2 中的 5 a 滑动平均曲线可以看出,该区年降水量具有 7 个明显不同的变化阶段,其中,1951-1957 年、1963-1976 年、1983-1992 年和 2007-2018 年为该区年降水量的增加阶段,增加幅度分别为 39.3%、21.4%、44% 和 28.9%;1958-1962 年、1977-1982 年和 1993-2006 年为该区年降水量的减少阶段,减少幅度分别为 48.4%、24.2% 和 18.5%。

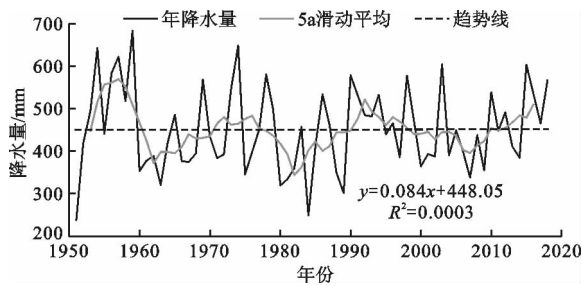


图 2 1951-2018 年围场地区年降水量变化特征

3.2 围场地区年降水量的年际-年代际特征

图 3 为 1951-2018 年围场地区年降水量时间序列的集合经验模态分解结果,该结果得到了 5 个周期不同的固有模态函数 *IMF* (intrinsic mode function) 及一个趋势项分量 *RES* (residuals),每个 *IMF* 分量都有其相对应的稳定准周期,不同时间尺度上的准周期在相同的时间段内表现出了不同强度的非均匀性变化。表 1 为 1951-2018 年围场地区年降水量不同时间尺度波动的平均周期和方差解释量,其中反映年际尺度变化的分量为 *IMF1* 和 *IMF2*;反映年代际尺度变化的分量为 *IMF3*、*IMF4* 和 *IMF5*; *RES* 为趋势项。

IMF1 + 2 (第一、二本征模函数之和) 主要指示 1951-2018 年围场地区在主周期为准 4 a 尺度上的年降水量变化特征,该时间尺度的方差贡献率为 64.3% (图 3(a))。该区降水量年际变化主要可以分为以下几个阶段:1951-1955、1971-1985 和 2003-2005 年 *IMF1* + 2 曲线呈明显上升趋势,说明在这 3 个时段内降水量呈增加趋势;1956-1970 和

1986-2002 年 *IMF1* + 2 曲线呈明显下降趋势,说明在这 2 个时段内降水量呈减少趋势;2006 年以后降水量变化的波动幅度变小,说明该时期内降水量变化趋势趋于平稳。

IMF3 + 4 + 5 (第三、四、五本征模函数之和) 主要指示 1951-2018 年围场地区在主周期为准 27 a 尺度的降水量变化特征,该时间尺度的方差贡献率为 16.2% (图 3(b))。该区降水量的年代际变化特征大致可以分为以下几个阶段:1951-1957、1964-1972、1984-1992 和 2008-2018 年 *IMF3* + 4 + 5 曲线呈明显上升趋势,说明在这 4 个阶段内降水量呈增加趋势;1958-1963、1973-1983 和 1993-2007 年 *IMF3* + 4 + 5 曲线呈下降趋势,说明在这 3 个阶段内降水量明显减少。

RES 为趋势项,主要指示 1951-2018 年围场地区年降水量的波动趋势,从 *RES* 曲线(图 3(c)) 的趋势可以看出,围场地区在近 70 年的降水量变化趋势呈先降低后增加的趋势,降低和增加的时间拐点出现在 1983 年前后。

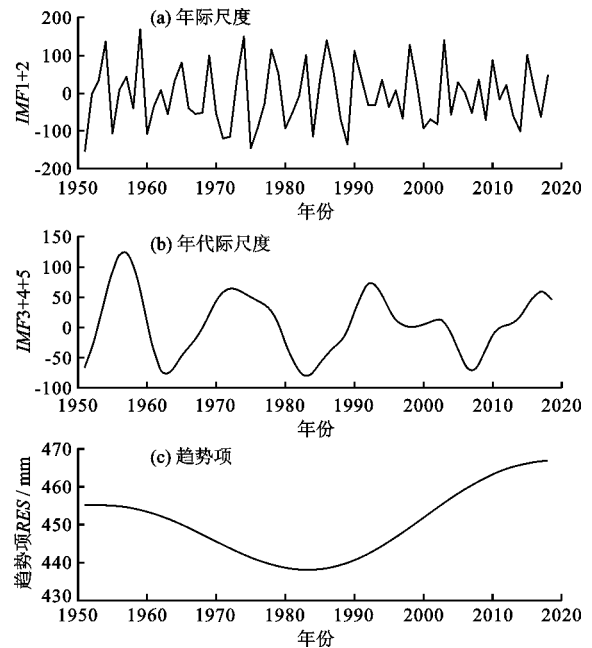


图 3 1951-2018 年围场地区年降水量的集合经验模态分解结果

3.3 围场地区年降水量与厄尔尼诺的关系

厄尔尼诺(ENSO) 是影响我国北方地区气候变化的主要因素^[31],也是导致我国季风区气温和降水量发生变化的重要原因^[32],具有 2~7 a 的变化周期。当 ENSO 处于冷相位时,东赤道太平洋海温会呈现出明显的下降趋势,这可能会引起 Walker 和

Hadley 环流的变化,进而诱发强度较大的西太平洋副热带高压^[14,32]。随着西太平洋副热带高压向我国北方地区的移动,我国季风区的降水量可能会减少到正常水平以下^[33],北方地区的温度可能会升高;相反,当 ENSO 处于暖相位时,相反的温度和降水量变化模式可能会在我国的北方地区发生。例如,一般在 El Niño 发生的当年或第 2 年长江中下游和黄河中下游地区的降水量通常会偏少^[8],在强 El Niño 衰减并向 La Niña 态发展的年份,长江中下游地区的降水量会显著增加^[34]。集合经验模态分解 (EEMD) 结果表明:1951-2018 年围场地区年平均降水量中的准 4 a 周期变化与厄尔尼诺的 2~7 a 周期具有较好的对应关系,说明 ENSO 可能是影响该区 1951-2018 年降水量发生年际尺度变化的重要原因,这与孙艺杰等^[15]、李芬等^[19]以及其他一些相关研究结果^[35-36]较为一致。

图 4 为 1951-2018 年围场地区降水量与厄尔尼诺序列的交叉小波谱和小波凝聚谱,交叉小波能

量谱中颜色越偏黄色表示能量谱密度值越大。交叉小波谱(图 4(a))表明该区的降水量与厄尔尼诺间存在着显著的 3~6 a 共振周期;小波凝聚谱(图 4(b))表明该区的降水量与厄尔尼诺间存在着 3~7 a 的强凝聚性共振周期,并且二者之间呈正相关关系。需要说明的是,交叉小波谱中显示,1967-1978 年围场地区年降水量与厄尔尼诺的相位差箭头竖直向上,说明该区年降水量的变化周期滞后于厄尔尼诺约 3/4 个周期,这一研究结果与郝志新等^[34]的关中原干湿度变化滞后于厄尔尼诺大约 2 a 的研究结果类似。

表 1 降水量序列本征模函数的组合方差解释量

尺度	本征模函数 (IMFs)	平均周期/ a	方差解释量/ %
年际尺度	IMF1 + 2	4	64.3
年代际尺度	IMF3 + 4 + 5	27	16.2
趋势项	RES		0.8

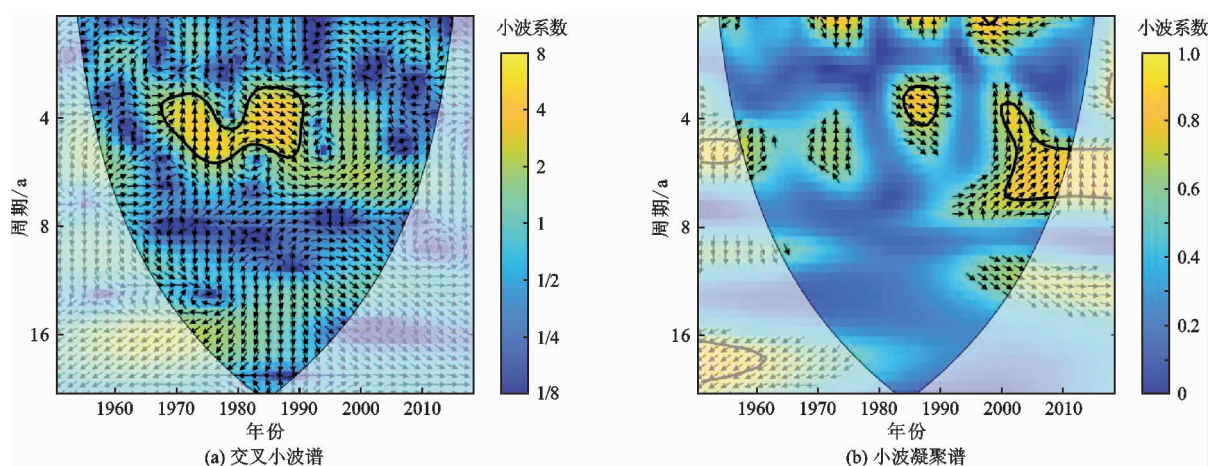


图 4 1951-2018 年围场地区降水量与 ENSO 的交叉小波谱和小波凝聚谱

图 5 为 1951-2018 年围场地区降水量与 ENSO 空间遥相关的空间分布。分析图 5 可知,该区年降水量与厄尔尼诺间存在着显著的正相关关系,ENSO 对区域空间降水量的影响大致可以从我国渤海湾西北海岸延伸至内蒙古地区的中东部(图 5),该结果与 Wang 等^[32]研究的 1820-2012 年围场地区的温度与 ENSO 间存在着空间遥相关的结论类似。

3.4 围场地区年降水量与太平洋年代际振荡的关系

太平洋年代际振荡 (PDO) 是指北太平洋海温年代际循环变化的海洋现象,具有 20~30 a 的变化周期,不仅对北美而且对整个北半球大气环流均具有重要的影响^[37],其还可以通过调控 ENSO 事件来

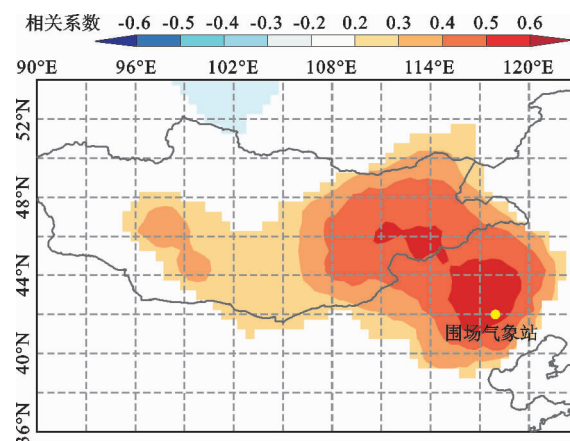


图 5 1951-2018 年围场地区降水量与 ENSO 空间遥相关的空间分布

间接影响气候变化^[38]。当PDO处于冷相位时,太平洋东部和北部的海温较低;相反,当PDO处于暖相位时,西太平洋副热带高压较强,太平洋东部和北部的海温较高^[39]。需要说明的是,西太平洋副热带高压的加强是由于ENSO和PDO的共同作用叠加所致^[40]。

由此可见,PDO与太平洋东部和北部的海温密切相关,它主要是通过海气相互作用影响北半球海平面的气压,使亚洲季风区海平面气压发生变化,与陆地气压的改变共同作用从而影响水汽的输送,进而对降水产生影响。集合经验模态分解(EEMD)结果表明:1951-2018年围场地区年降水量的准27a周期变化与太平洋年代际振荡的20~30a周期具

有较好的一致性,说明太平洋年代际振荡是影响该区1951-2018年降水量发生年代际周期变化的主要原因。

图6为1951-2018年围场地区降水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(图6(a))表明:该区的年降水量与PDO间在 $\alpha=0.01$ 水平上无明显的对应关系,但小波凝聚谱(图6(b))结果显示,该区1951-1988年年降水量与PDO之间存在着18~24a的强凝聚共振周期,并且二者呈负相关关系,说明1951-2018年围场地区的年降水量与太平洋年代际振荡(PDO)间可能存在着某种关联,这与现有的一些相关研究结果^[14-15, 20-21]较为一致。

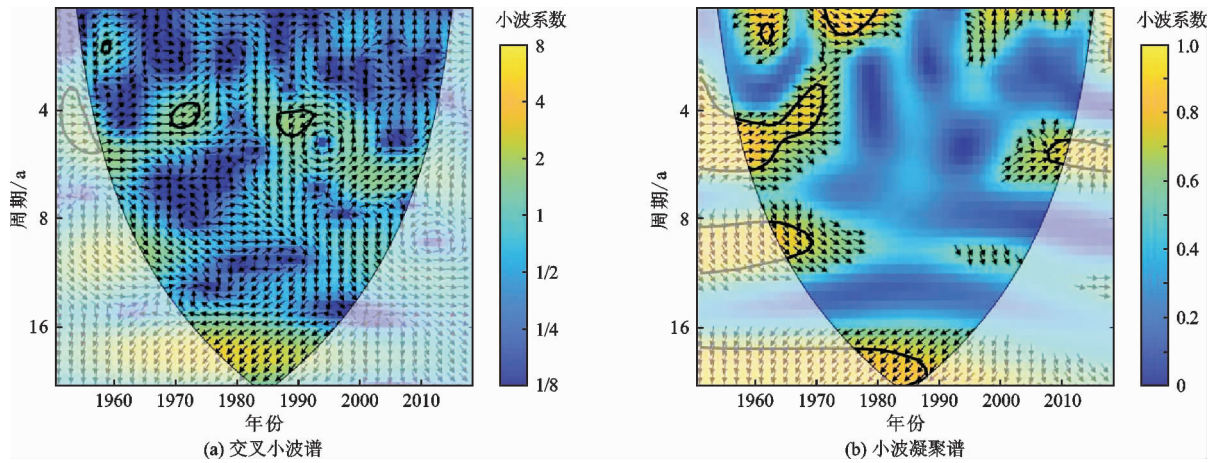


图6 1951-2018年围场地区降水量与PDO的交叉小波谱和小波凝聚谱

4 结论

(1)1951-2018年围场地区的年降水量总体上表现为增加的变化趋势,主要可以分为7个阶段,其中,1951-1957年、1963-1976年、1983-1992年和2007-2018年为年降水量的增加阶段,1958-1962年、1977-1982年和1993-2006年为年降水量的减少阶段。

(2)围场地区年降水量在时间尺度上存在着显著的准4a和准27a的年际和年代际变化周期,分别与厄尔尼诺的2~7a周期和太平洋年代际振荡的20~30a变化周期相对应,说明厄尔尼诺和太平洋年代际振荡是影响围场地区近70年降水量变化的主要因素。

(3)交叉小波谱和小波凝聚谱分析表明,围场地区年降水量与厄尔尼诺间存在着显著的共振周期,与太平洋年代际振荡间可能也存在着某种关联。

(4)围场地区年降水量的准4a和准27a的变化周期分别可以解释年降水量方差变量的64.3%和16.2%,说明厄尔尼诺(ENSO)对围场地区年降水量的贡献可能要大于太平洋年代际振荡(PDO)对该区年降水量的贡献。

参考文献:

- [1] CAO Qing, HAO Zhenchun, ZHOU Junwei, et al. Impacts of various types of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and ENSO Modoki on the rainy season over the Huaihe River Basin [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(5):2811-2824.
- [2] WANG Xiaoming, ZHANG Kefei, WU Suqin, et al. The correlation between GNSS-derived precipitable water vapor and sea surface temperature and its responses to El Niño-Southern Oscillation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216:1-12.
- [3] 闪丽洁,张利平,张艳军,等. 长江中下游流域旱涝急转

- 事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J]. 地理学报, 2018, 73(1):25-40.
- [4] 张蓓蓓,王朋,张辉,等. 近 63a 安康地区降水与太阳黑子活动的相关性分析[J]. 干旱区研究, 2018, 34(6):1336-1343.
- [5] 汪成博,李双双,延军平,等. 1970-2015 年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6):1209-1222.
- [6] 任国玉,任王玉,战云健,等. 中国大陆降水时空变异规律 - II. 现代变化趋势[J]. 水科学进展, 2015, 26(4):451-465.
- [7] 商沙沙,廉丽妹,马婷,等. 近 54a 中国西北地区来气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1):68-76.
- [8] HAO Zhixin, ZHENG Jingyun, GE Quansheng. Precipitation cycles in the middle and lower reaches of the Yellow River (1736-2000) [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(1):17-25.
- [9] 赵雪,赵文智,宝音,等. 河北坝上脆弱生态环境及整治[M]. 北京:中国环境科学出版社,1997.
- [10] HE Yi, YE Jinyin, YANG Xiaoying. Analysis of the spatio-temporal patterns of dry and wet conditions in the Huai River Basin using the standardized precipitation index [J]. Atmospheric Research, 2015, 166:120-128.
- [11] ZHANG Qiang, WANG Yue, SINGH V P, et al. Impacts of ENSO and ENSO Modoki + A regimes on seasonal precipitation variations and possible underlying causes in the Huai River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 533:308-319.
- [12] YANG Mangen, CHEN Xing, CHENG C S. Hydrological impacts of precipitation extremes in the Huaihe River Basin, China [J]. Springer Plus, 2016, 5(1):1731-1744.
- [13] 吕俊梅,祝从文,琚建华,等. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J]. 大气科学, 2014, 38(4):782-794.
- [14] 毕硕本,瞿颖,张永华,等. 1725 年以来北京年降水量年代际变化分析及其与太平洋海表温度关系研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(5):743-751.
- [15] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等. 1960-2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7):1820-1832.
- [16] 冯建民,梁旭,张智,等. “西北”中东部及内蒙古西部降水的多尺度特征[J]. 气象科学, 2005, 25(5):474-483.
- [17] 宗海锋,张庆云,彭京备. 长江流域梅雨的多尺度特征及其与全球海温的关系[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(1):101-114.
- [18] 罗那那,巴特尔·巴克,吴燕锋. 基于集合经验模态分解北疆降水多尺度变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4):362-367.
- [19] 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.
- [20] 万智巍,贾玉连,蒋梅鑫,等. 长江中下游长时间降水序列及其与 PDO 的关系[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1):1-4.
- [21] 潘威,郑景云,满志敏. 1766-2000 年黄河上中游汛期径流量波动特征及其与 PDO 关系[J]. 地理学报, 2018, 73(11):2053-2063.
- [22] LIU Yu, TIAN Hua, SONG Huiming, et al. Tree ring precipitation reconstruction in the Chifeng-Weichang region, China, and East Asian summer monsoon variation since AD 1777 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115:D06103.
- [23] HUANG N E, SHEN Zhen, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 454(1971):903-995.
- [24] HUANG N E, WU Zhaohua. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies [J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2):2007-2030.
- [25] WU Zhaohua, HUANG N E, LONG S R, et al. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(38):14889-14894.
- [26] CHEN Yangkang, MA Jitao. Random noise attenuation by $f-x$ empirical-mode decomposition predictive filtering [J]. Geophysics, 2014, 79(3):81-91.
- [27] BREAKER L C, LOOR H R, CARROLL D. Trends in sea surface temperature off the coast of Ecuador and the major processes that contribute to them [J]. Journal of Marine Systems, 2016, 164:151-164.
- [28] MEYER Y. Wavelets and operators [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [29] WANG Y M, LEAN J, SHEELEY J N. Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713 [J]. The Astrophysical Journal, 2005, 625(1):522-538.
- [30] 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.
- [31] ZHANG Qibin, QIU Hongyan. A millennium-long tree-ring chronology of *Sabina przewalskii* on northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Dendrochronologia, 2007, 24(2-3):91-95.

(下转第 101 页)

- 时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 75-83.
- [16] ZHANG Qiang, LI Jianfeng, SINGH V P, et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 57-76.
- [17] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961-2011年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 640-649.
- [18] ZHAI Panmao, ZHANG Xuebin, Wan Hui, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [19] 孔锋, 方建, 乔枫雪, 等. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征(1961-2013年)[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3051-3067.
- [20] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 1973-2016年雅鲁藏布江流域极端降水事件时空变化特征[J]. 山地学报, 2018, 36(5): 750-764.
- [21] 郭湘宇, 吴正方, 杜海波, 等. 福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1084-1098.
- [22] 张卉, 薛联青, 刘远洪, 等. 洞庭湖流域极端降水变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 6-12.
- [23] 李运刚, 何大明, 胡金明, 等. 红河流域1960-2007年极端降水事件的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1908-1917.
- [24] 时光训, 刘健, 马力, 等. 1970-2014年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 77-85.
- [25] 章家恩, 徐琪. 三峡库区生物多样性的变化态势及其保护对策[J]. 热带地理, 1997, 17(4): 412-418.
- [26] 刘晓冉, 程炳岩, 杨茜, 等. 近50a三峡库区汛期极端降水事件的时空变化[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 244-251.
- [27] 张天宇, 李永华, 程炳岩, 等. 三峡库区汛期极端降水非均匀性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 298-304.
- [28] TORIDE K, CAWTHORNE D L, ISHIDA K, et al. Long-term trend analysis on total and extreme precipitation over Shasta Dam Watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 244-254.
- [29] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515-520.
- [30] 吴梦初, 延军平. 太阳活动与ENSO事件对云南省旱涝灾害的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 280-284.

(上接第92页)

- [32] WANG Yanchao, LIU Yu, ZHANG Huifang, et al. Temperature variability inferred from tree-ring records in Weichang region, China, and its teleconnection with large-scale climate forcing [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(3-4): 1533-1545.
- [33] ZHOU Tianjun, YU Rucong, ZHANG Jie, et al. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(8): 2199-2215.
- [34] 郝志新, 耿秀, 刘可邦, 等. 关中平原过去1000年干湿变化特征[J]. 科学通报, 2017, 62(21): 2399-2406.
- [35] 郭飞燕, 毕玮, 郭飞龙, 等. 山东气候年际变化特征及其与ENSO的关系[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 465-474.
- [36] 张人禾, 闵庆焯, 苏京志. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(5): 544-553.
- [37] GUTZLER D S, KANN D M, THORNBRUGH C. Modulation of ENSO-based long-lead outlooks of southwestern US winter precipitation by the Pacific decadal oscillation [J]. *Weather and Forecasting*, 2002, 17(6): 1163-1172.
- [38] 唐民, 吕俊梅. 东亚夏季风降水年代际变异模态及其与太平洋年代际振荡的关系[J]. 气象, 2007, 33(10): 88-95.
- [39] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Yuan, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [40] CHAN J C L, ZHOU Wen. PDO, ENSO and the early summer monsoon rainfall over South China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8): L08810.