

海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析

邹磊¹, 夏军^{1,2}, 张印², 乔云峰³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要:选取海河流域35个气象站点1961—2018年逐日降水数据,采用创新趋势分析法、Mann-Kendall非参数检验法和Pettitt突变检验法综合分析了海河流域不同量级降水量的时空演变特征,并采用交叉小波探究了太阳黑子和大气环流异常因子对年降水量的影响。结果表明:1961—2018年海河流域降水整体上呈现出减少趋势,其中轻度降水的下降趋势并不显著,强降水变化呈现出超过10%的下降趋势,春秋降水存在增加趋势,夏冬降水呈下降趋势;海河流域降水整体上呈现南多北少的格局,夏季和全年降水在空间上的分布形态相似,受地形因素的影响,以太行山和燕山为界,山前多雨,春秋两季南部降水多,中部降水少;太阳黑子和大气环流异常因子对流域年降水的变化有较强的影响,其中太阳黑子影响最为显著,AO和ENSO的影响次之,PDO的影响最弱。

关键词:降水量;时空演变特征;海河流域;创新趋势分析;Mann-Kendall非参数检验;Pettitt突变检验

中图分类号:P426 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2021)01-0053-08

Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin // ZOU Lei¹, XIA Jun^{1,2}, ZHANG Yin², QIAO Yunfeng³ (1. Key Lab of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Key Lab of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of the 35 meteorology stations in the Haihe River Basin from 1961 to 2018, this study analyzed the spatial-temporal characteristics of the precipitation in different magnitudes in the Haihe River Basin by the methods of innovative trend analysis, the Mann-Kendall nonparametric test and the Pettitt test. The influences of sunspots and anomalous atmospheric circulation factors on the precipitation were explored using the cross wavelet analysis method. The results showed that, from 1961 to 2018, the precipitation in the Haihe River Basin shows a decreasing trend. The decreasing trend of light precipitation is not significant and the change of heavy precipitation shows a decreasing trend of more than 10%. Precipitation in spring and autumn has an increasing trend, while that in summer and winter shows a decreasing trend. The precipitation declines from the south to the north. The spatial-temporal change characteristics of summer and annual precipitation in the Haihe River Basin are similar. Due to topographic factors, it is rainy in front of the mountain, which is bounded by Taihang Mountains and Yanshan Mountains. In spring and autumn, more precipitation is in the south and less precipitation in the middle of the Haihe River Basin. Sunspots and anomalous atmospheric circulation factors have exerted strong influences on the precipitation changes. Sunspot has the most significant effect on the precipitation, followed by AO and ENSO, and PDO has the weakest effect.

Key words: precipitation; spatial-temporal change characteristics; Haihe River Basin; innovative trend analysis; Mann-Kendall nonparametric test; Pettitt test

基金项目:国家重点研发计划(2017YFA0603702);国家自然科学基金重点项目(41890822)

作者简介:邹磊(1990—),男,助理研究员,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zoulei@igsnrr.ac.cn

通信作者:夏军(1954—),男,中国科学院院士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

降水是全球水循环的基本组成部分,是影响人类经济和地球生态环境最重要的气候因素之一^[1-2]。受全球气候变暖以及高强度人类活动的影响,降水格局发生了显著变化^[3],中纬度地区降水增加,亚洲季风降水变率加大^[4],导致水汽循环发生改变,洪涝、干旱等极端水文气象事件频发,对社会经济发展和人类生产生活产生重要影响^[5],因此,有必要对变化环境下流域不同量级降水量的演变趋势及其变异驱动力进行深入研究。

近年来,由于气候变化剧烈,降水时空分布特征变化显著,国内外众多学者针对降水的时空变化分析研究较多,如姚俊强等^[6]针对中国西北干旱区降水时空变化特征进行分析研究,得出研究时段西北干旱区的降水量增加趋势明显。Afzal 等^[7]研究发现苏格兰区域的降水自 20 世纪 70 年代以来呈现显著的增加趋势。束美珍等^[8]基于海河流域 25 个气象站点 1960—2010 年逐月降水量资料,采用线性回归法、累计距平法分析海河流域年际降水特征,发现海河流域 1960—2010 年降水量呈现微弱下降趋势。陈磊等^[9]利用黄河流域 106 个气象站点 1960—2010 年逐日降水量数据,采用多种趋势分析方法结合对季节降水的变化趋势和变异情况进行了研究,结果表明黄河流域 20 世纪 90 年代后流域降水变化趋势明显改变。陈洁等^[10]基于 1961—2010 年地面气象观测资料,分析了我国降水与地表干湿状况时空格局,结果表明 1961—2010 年我国降水量呈轻微增加趋势。上述研究主要关注于降水总量的时空演变分析,但是针对不同量级降水量在年际和季节尺度上的趋势分析较少,且降水量变化背后可能的影响因素还在不断探索之中。有研究表明,太阳黑子和大气环流异常因子(如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北极涛动(AO)和太平洋 10 年涛动(PDO))对降水有较强的影响^[11-12]。研究引起流域降水量变化的影响因素,将有助于构建降水量的数值模拟模型,对不同量级降水量进行模拟预估。

本文以海河流域为研究区,基于流域内 35 个气象站点 1961—2018 年逐日降水观测数据,采用创新趋势分析法、Mann-Kendall 非参数检验法和 Pettitt 突变检验法综合分析海河流域不同量级降水量在年际和季节尺度上的时空演变特征,并进一步探究年降水量与太阳黑子和大气环流异常因子之间的相关性,以期较全面地揭示变化环境下降水量的演变特征,并为海河流域水资源管理、气象灾害的防治和农业生产提供参考。

1 研究区概况

海河流域($35^{\circ}\text{N} \sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)东临渤

海,西接太行山脉,南界黄河,北倚内蒙古高原,流域总面积约 31.8 万 km^2 (图 1)。海河流域包括七大河系,分别为滦河河系、北三河系、永定河系、大清河系、子牙河系、漳卫河系和徒骇马颊河系。全流域地势西北高东南低,属温带季风气候区,降水年内分配不均,多集中于夏季,冬春较少。流域内人口密集,在我国政治经济中占有重要地位。受全球气候不断变化和高强度人类活动的影响,流域内降水的时空分布发生了显著改变,该区域面临严重的水资源短缺危机。因此,加强海河流域不同量级降水量趋势分析及其驱动力的研究,对于认识区域尺度上气候变化对流域水资源的影响和制定切实的流域水资源管理目标有重要意义。

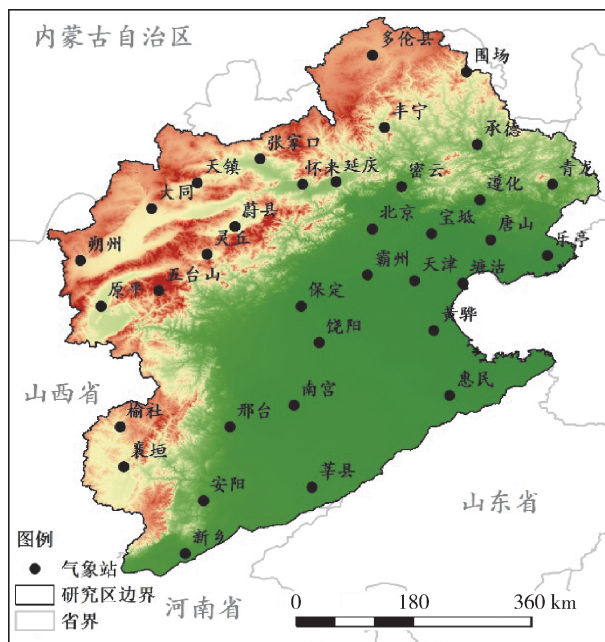


图 1 海河流域及气象站点分布示意图

Fig.1 Haihe River Basin and spatial distribution of meteorological station

2 资料与方法

2.1 数据资料及预处理

采用国家气象信息中心资料室(中国气象科学数据共享服务网)提供的气象资料,选取海河流域 35 个气象站(图 1)1961—2018 年的逐日降水数据进行分析。考虑到数据序列的完整性和连续性,对降水数据进行初步质量控制和缺失数据插补。文中关于四季的时间规定如下: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。

为了进一步探究大气环流异常因子和太阳黑子对海河流域年降水量变化的影响,利用 1961—2018 年的太阳黑子数、ENSO 指数(本文以 Nino3.4 指数描述)、PDO 和 AO 指数作为影响因素分析年降水量

发生变化的驱动力。其中,太阳黑子数据来自国际科学协会理事会(ICSU)世界数据系统(WDS)的太阳黑子指数(<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>),PDO和ENSO指数来源于美国国家海洋与大气的管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)地球系统研究实验室(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>),AO指数来源于NOAA国家气候数据中心(<http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao.php>)。

2.2 Mann-Kendall 非参数检验

Mann-Kendall (M-K) 非参数检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法^[13-14],近年来被众多学者用于分析降水、径流和气温等要素时间序列的变化趋势^[15-18]。该方法不需要样本序列遵从一定的分布,对于时间序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,检验的统计量 S 的计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

式中: n 为观测值的数量; x_i 和 x_j 分别为 i, j 时刻的观测值。

S 为正态分布,均值为0,方差 $\text{var}(S)$ 计算公式为

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z 为时间序列的标准化统计量, $Z > 0$ 和 $Z < 0$ 分别表示增加和减少趋势。 $|Z|$ 值越大,意味着趋势越显著。在本研究中,考虑0.05的显著性水平,也就是说, $Z > 1.96$ 和 $Z < -1.96$ 分别表示显著的增加和减少趋势。

2.3 创新趋势分析

创新趋势分析(innovative trend analysis, ITA)法最初由Sen^[19]提出,可轻松获取低、中、高等不同等级数据的趋势。该方法不需要任何假设,已被应用于环境、水文气象变量的趋势分析中^[20-21]。该方法将研究变量的序列划分成两个时间长度相同的子序列,按照升序进行排列后绘制散点图,如果散点分布位于1:1线附近的,则认为该序列没有趋势;如果

散点落在1:1线的上三角区域,表明该序列具有上升趋势;相反,则表明该序列具有下降趋势,可用于分析不同等级降水的变化趋势,具体计算过程可参考文献^[19,22]。参考Wu等^[20]的研究,本文基于百分位数对不同量级的降水强度进行分类:轻度降水(小于10%);低等降水(10%~40%);中等降水(40%~60%);高等降水(60%~90%);强降水(大于90%)。

2.4 Pettitt 突变分析

Pettitt 突变分析方法是一种基于秩的非参数变点检测方法^[23],其计算简便,受异常值影响较小,广泛应用于水文气象等领域,可以对水文气象要素时间序列进行突变分析,获取突变点,可用于海河流域降水量突变点分析,具体计算过程可参考文献^[24]。

2.5 交叉小波变换分析

交叉小波变换(cross-wavelet transform, XWT)是将小波变换和交叉谱分析两种方法相结合而产生的一种信号分析手段^[25]。该方法可用于分析两个时间序列在时域和频域中的相关关系^[26],从而充分揭示它们具体的相关性和演化特征。交叉小波变换的详细计算过程可以参考文献^[27]。

3 结果与分析

3.1 流域降水的时间序列变化特征

基于海河流域35个气象站点1961—2018年逐日实测降水资料,采用泰森多边形法获取海河流域面平均降水量,对其进行多尺度时间序列(年尺度和季节尺度)演变特征分析(图2)。由图2可以看出,海河流域1961—2018年全年降水量呈明显的下降趋势,年降水量最大值出现在1964年(图2(e))。根据Pettitt突变结果分析可得,海河流域降水量在1979年发生突变(图3);冬季降水量有微弱的下降趋势(图2(a)),递减速率约为 -0.0374 mm/a ;春季降水量在1963年以前呈下降趋势,在1963年以后整体呈现出增加趋势(图2(b));夏季降水量呈显著下降趋势,递减速率达 -1.2023 mm/a (图2(c));秋季降水量整体上呈现出增加趋势,增速约 0.1405 mm/a (图2(d))。

为了进一步明晰不同量级降水量的趋势变化,采用创新趋势分析法进一步针对年尺度和季节尺度下不同量级降水量进行趋势变化分析。图4为年尺度和季节尺度下应用创新趋势法分析所得结果。如图4(e)所示,海河流域年降水序列多数点位于 45° 线的下三角区,表明年降水序列整体呈现出下降趋势,这个结论和逐年降水变化趋势分析结论相同。

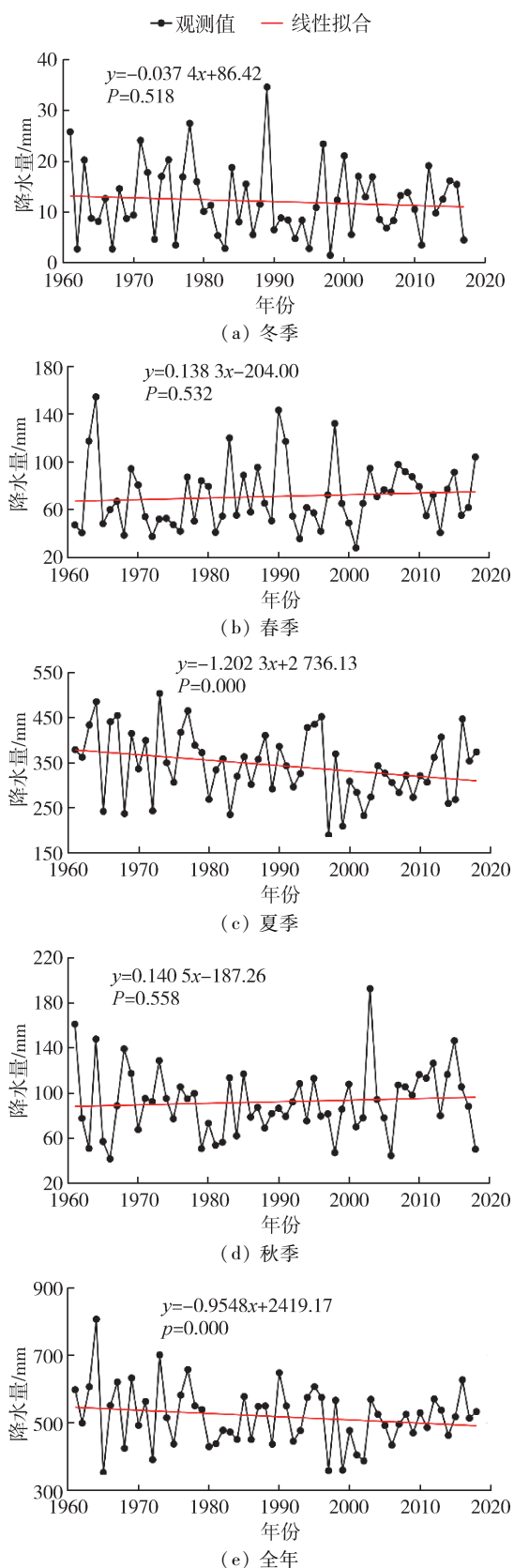


图2 海河流域年尺度和季节尺度降水量变化趋势
Fig. 2 Temporal trend of annual and seasonal precipitation in the Haihe River Basin

其中,轻度降水的下降趋势并不显著,强降水变化趋势显著,呈现出超过 10% 的下降趋势;冬季降水序列大多数点位于 1:1 线的下部,表征海河流域冬季

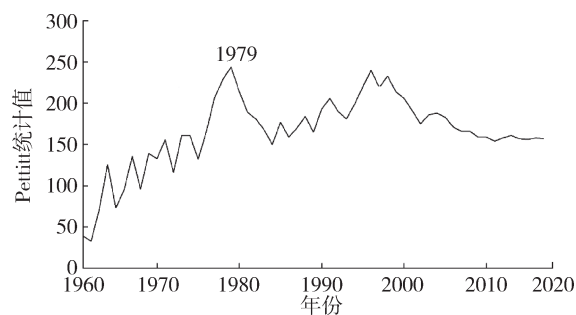


图3 海河流域年降水量突变分析

Fig. 3 Analysis of abrupt change of annual precipitation in the Haihe River Basin

降水整体呈下降趋势(图4(a))。从图4(a)中可以看出,随着降水量的不断增加,点位与 1:1 线的偏离距离增大,表明冬季降水量的下降趋势随着降水强度的增加而逐渐加强,强降水呈现出超过 10% 的显著下降趋势;春季降水序列大多数点位于 1:1 线的上三角区域内,表征春季降水量呈现出总体增长趋势(图4(b)),但轻度降水和强降水变化趋势不显著;海河流域夏季降水序列主要分布在 1:1 线的下部,表明夏季降水量整体呈现出下降趋势(图4(c)),同时大多数点位于 -5% 带的下方,夏季强降水呈现出 10% 的显著下降趋势;秋季降水序列多数位于 45° 线的上方,表明秋季降水量整体呈上升趋势,其中多数点据位于 45° 线和 5% 带之间,上升趋势不显著(图4(d))。综上所述,海河流域年降水量总体呈现出下降趋势,春季和秋季降水量呈现出上升趋势,夏季和冬季降水量呈现下降趋势,且夏季和冬季强降水的下降趋势显著,降水量的减少可能会进一步加剧海河流域水资源短缺。

3.2 流域降水量的空间变化特征

基于海河流域 35 个气象站点 1961—2018 年逐日降水资料,采用反距离加权平均方法对气象站点数据进行空间插值,获取海河流域降水量空间分布,并对每个气象站点降水量做 M-K 趋势分析,结果如图 5 所示。从图 5(e)可以看出,海河流域年降水量整体呈现南多北少,数值范围在 377.5 ~ 750.6 mm 之间,在五台山以及东北部遵化、青龙等站点附近出现降水量高值区,最小值出现在西北部。流域内多数站点(18 个)呈现出下降趋势,其中五台山站点降水下降趋势显著。海河流域冬季降水从北向南逐渐增加,变化范围为 5.3 ~ 30.7 mm,86% 的站点(30 个)出现下降趋势,五台山地区海拔较高,是冬季降水的一个高值区域,且呈现出轻微的上升趋势(图 5(a));春季流域降水大部分站点呈现上升趋势,南部降水多,中部降水偏少(图 5(b));夏季降水东部偏多,多数站点出现下降趋势,这可能主要和地形相

关,以太行山和燕山为界限,山前部分降水多,山后降水少,流域降水量变化范围在 228.7 ~ 521.3 mm 之间(图 5(c));秋季降水的空间分布形态和春季降水较为相似,整体变化在 67.5 ~ 146.8 mm 之间,五台山以及南部地区降水呈下降趋势,东北部降水偏少,但东北部降水整体呈上升趋势(图 5(d))。综上所述,海河流域 1961—2018 年降水格局整体呈现南多北少,且有五台山周边和东北部等两个高值降水区。春秋两季降水呈上升趋势,冬夏两季呈下降趋势,特别是夏季,和全年的分布形势相似,降水减少趋势显著,且地形要素对降水有明显影响,以太行山和燕山为界,山前多雨,分别向西北和东南两侧减少。

3.3 年降水量的驱动力分析

采用交叉小波变换探究具有代表性的大气环流异常因子和太阳黑子与海河流域年降水量之间的相关关系。在交叉小波图中,颜色越接近红色表征两者之间的相关性越强,越接近蓝色表征两者之间的相关性越弱;黑粗线为 95% 置信区间的边界,箭头表示相对相位差,→表示两者之间相位一致,←表示两者变化相位相反;细黑线为小波影响锥线的边界,其所包围的部分为有效谱值区。

如图 6(a)所示,海河流域年降水量与 ENSO 在 1965—1974 年存在 1 ~ 4 a 周期显著的负相关关系,

在 1989—1995 年和 1998—1999 年分别存在 6 ~ 7 a 和 5 a 周期的负相关关系;PDO 与海河流域年降水量存在两个明显的信号,前者为 1990—1997 年的 4 ~ 6 a 周期的负相关关系,后者为 1991—2003 年的 8 ~ 11 a 周期较为显著的正相关关系(图 6(b));AO 与海河流域年降水量存在 4 个共振周期,在 1967—1970 年存在 1 ~ 4 a 周期显著的正相关关系,在 1982—1993 年和 2004—2007 年分别存在 16 ~ 20 a 和 5 a 周期的正相关关系,在 1978—1995 年存在 8 ~ 9 a 周期较为显著的负相关关系(图 6(c));太阳黑子与海河流域年降水量在 1968—2008 年存在一个 8 ~ 12 a 周期的显著的负相关关系(图 6(d))。已有研究发现,太阳黑子平均变化周期大约为 11 a,与图 6(d)中存在的共振周期基本一致。太阳黑子增多,表明太阳活动加强,改变大气环流的平均状态,影响区域降水发生变化。综上所述,海河流域年降水量与太阳黑子,ENSO、AO 和 PDO 均存在一定的共振周期,只是在不同时域中存在明显差异。具体来说,太阳黑子、AO 和 ENSO 对年降水量的影响较显著,PDO 对年降水量的影响相对较弱。

4 结 论

a. 1961—2018 年海河流域降水整体上呈现减少趋势,其中轻度降水的下降趋势并不显著,强降水变

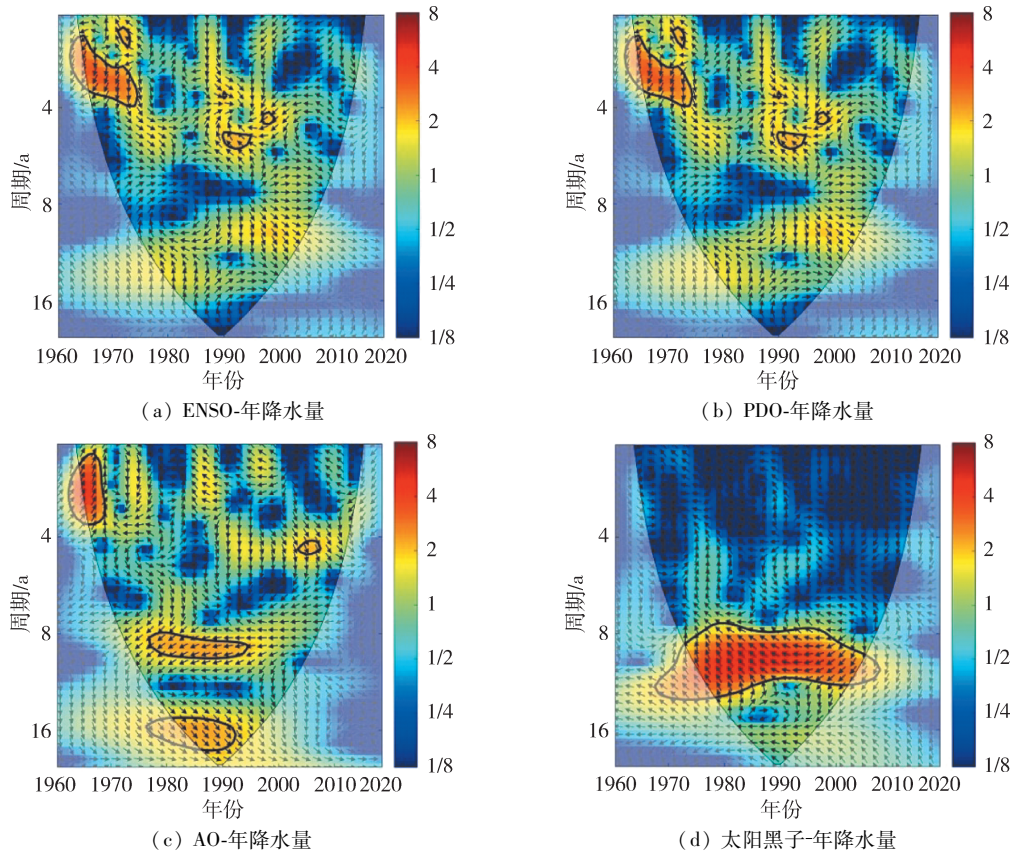


图 6 海河流域年降水量与 ENSO、PDO、AO 以及太阳黑子的交叉小波功率谱

Fig. 6 Cross wavelet power spectrum of annual precipitation in the Hai River Basin and ENSO, PDO, AO and sunspots

化趋势显著,呈现出超过 10% 的下降趋势,流域年降水量序列在 1979 年发生突变。春季和秋季降水存在增加趋势,夏季和冬季降水呈减少趋势,且夏季和冬季的强降水减少趋势显著,随着时间的推移,降水量的减少将会进一步加剧海河流域水资源的短缺。

b. 1961—2018 年海河流域降水整体上呈现出南多北少的格局,且有五台山周边和东北部等两个高值降水区。各个季节的变化趋势有所差异,夏季和全年在空间上的分布形态相似,整体上呈现南多北少的格局,从沿海到内陆也逐渐减少,受地形因素影响,以太行山和燕山为界,山前多雨,分别向西北和东南两侧减少;春秋两季的分布特征类似,南部降水多,中部降水偏少。

c. 通过交叉小波分析,海河流域年降水量与太阳黑子,ENSO、AO 和 PDO 均存在一定的共振周期。具体来说,太阳黑子、AO 和 ENSO 对于年降水量的影响较显著,PDO 对于年降水量的影响相对较弱。结果表明太阳活动和大气环流异常因子影响了降水量的变化。

参考文献:

- [1] MICHAELIDES S, LEVIZZANI V, ANAGNOSTOU E, et al. Precipitation: measurement, remote sensing, climatology and modeling [J]. Atmospheric Research, 2009, 94(4) : 512-533.
- [2] XU J H, CHEN Y N, LI W H, et al. Understanding temporal and spatial complexity of precipitation distribution in Xinjiang, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1/2) : 321-333.
- [3] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(2) : 161-173. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2) : 161-173. (in Chinese))
- [4] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1) : 1-6. (QIN Dahe, THOMAS S. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Climate Change Research, 2014, 10(1) : 1-6. (in Chinese))
- [5] 冶运涛,梁犁丽,龚家国,等. 长江上游流域降水结构时空演变特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(2) : 164-171. (YE Yuntao, LIANG Lili, GONG Jianguo, et al. Spatial-temporal variability characteristics of precipitation structure across the upper Yangtze River basin, China [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2) : 164-171. (in Chinese))
- [6] 姚俊强,杨青,刘志辉,等. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17) : 5846-5855. (YAO Junqiang, YANG Qing, LIU Zhihui, et al. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17) : 5846-5855. (in Chinese))
- [7] AFZAL M, GAGNON A S, MANSELL M G. Changes in the variability and periodicity of precipitation in Scotland [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(1/2) : 135-159.
- [8] 束美珍,刘丽红. 海河流域近 51 年降水量时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6) : 1065-1068. (SHU Meizhen, LIU Lihong. Spatial and temporal variations of precipitation in Haihe River Basin in recent 51 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6) : 1065-1068. (in Chinese))
- [9] 陈磊,王义民,畅建霞,等. 黄河流域季节降水变化特征分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(9) : 8-12. (CHEN Lei, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Characteristics and Variation Trends of Seasonal Precipitation in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2016, 38(9) : 8-12. (in Chinese))
- [10] 陈洁,刘玉洁,潘韬,等. 1961—2010 年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11) : 2440-2453. (CHEN Jie, LIU Yujie, PAN Tao, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in China and its impact on surface dry-wet conditions during 1961—2010 [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11) : 2440-2453. (in Chinese))
- [11] 曹永强,刘佳佳,高璐. 近 54 年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J]. 地理科学, 2015, 35(8) : 1027-1032. (CAO Yongqiang, LIU Jiajia, GAO Lu. Relationship between sunspots and precipitation in Northwestern Liaoning in recent 54 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8) : 1027-1032. (in Chinese))
- [12] 荣艳淑,石丹丹,吕星玥,等. 拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(3) : 14-24. (RONG Yanshu, SHI Dandan, LYU Xingyue, et al. Influence of La Niña events on drought and flood in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3) : 14-24. (in Chinese))
- [13] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3) : 245-259.
- [14] KENDALL M. Multivariate analysis [M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [15] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(4) : 35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4) : 35-41. (in Chinese))
- [16] 张姝琪,张洪波,辛琛,等. 水文序列趋势及形态变化的表征方法[J]. 水资源保护, 2019, 35(6) : 58-67.

- (ZHANG Shuqi, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [17] 陈伏龙, 李绍飞, 冯平, 等. 考虑融雪洪水跳跃变异的水库极限防洪风险复核[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 9-16. (CHEN Fulong, LI Shaofei, FENG Ping, et al. Recheck analysis of reservoir extreme flood control risk considering snowmelt flood sequences with jump up components[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 9-16. (in Chinese))
- [18] 赵贵章, 徐远志, 王莉莉, 等. 黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 195-201. (ZHAO Guizhang, XU Yuanzhi, WANG Lili, et al. Effect of Qingtongxia hydraulic project in upstream of Yellow River on river baseflow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 195-201. (in Chinese))
- [19] SEN Z. Innovative trend analysis methodology[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(9): 1042-1046.
- [20] WU H, QIAN H. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950 s[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(5): 2582-2592.
- [21] KISI O, AY M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 362-375.
- [22] SEN Z. Trend identification simulation and application [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(3): 635-642.
- [23] PETTITT A N. A non-parametric approach to the changepoint problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [24] VILLARINI G, SERINALDI F, SMITH J A, et al. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century [J]. Water Resources Research, 2009, 45: W08417.
- [25] 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: 561-566.
- [26] 张洪波, 俞奇骏, 陈克宇, 等. 基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 59-66. (ZHANG Hongbo, YU Qijun, CHEN Keyun, et al. Analysis on the responding relationship between runoff period and ENSO events based on cross-wavelet transform [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 59-66. (in Chinese))
- [27] 张克新, 潘少明, 曹立国, 等. 横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1869-1877. (ZHANG Kexin, PAN Shaoming, CAO Ligu, et al. Variation of water deficit and its association with climate indices in Summer Monsoon in Hengduan Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11): 1869-1877. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-29 编辑: 彭桃英)

(上接第 35 页)

- [16] 霍文博, 朱跃龙, 李致家, 等. 新安江模型和支持向量机模型实时洪水预报应用比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 283-289. (HUO Wenbo, ZHU Yuelong, LI Zhijia, et al. Comparison of Xin'anjiang model and support vector machine model in the application of real-time flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(4): 283-289. (in Chinese))
- [17] 徐源浩, 邬强, 李常青, 等. 基于长短时记忆(LSTM)神经网络的黄河中游洪水过程模拟及预报[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 387-393. (XU Yuanhao, WU Qiang, LI Changqing, et al. Simulation of the flood process in the middle reaches of the Yellow River by a long-short term memory(LSTM) neuro network[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(3): 387-393. (in Chinese))
- [18] YASEEN Z M, SULAIMAN S O, DEO R C, et al. An enhanced extreme learning machine model for river flow forecasting: state-of-the-art, practical applications in water resource engineering area and future research direction [J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 387-408.
- [19] TIKHAMARINE Y, SOUAG-GAMANE D, AHMED A N, et al. Improving artificial intelligence models accuracy for monthly streamflow forecasting using grey wolf optimization (GWO) algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124435.
- [20] ZHOU Y, GUO S, CHANG F-J. Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 343-355.
- [21] 吴佳, 陈森朋, 陈修云, 等. 基于强化学习的模型选择和超参数优化[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(2): 255-261. (WU Jia, CHEN Senpeng, CHEN Xiuyun, et al. Reinforcement learning for model selection and hyperparameter optimization [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(2): 255-261. (in Chinese))
- [22] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.

(收稿日期: 2020-09-12 编辑: 彭桃英)