

基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征

任建成^{1,2}, 王峰¹, 卢晓宁³

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031; 2.滨州市气象局, 山东 滨州 256612; 3.成都信息工程大学, 成都 610225)

摘要:为了探究山东省年降水量的时空变化特征,根据山东省 29 个国家基本、基准地面气象观测站 1980—2019 年逐月降水资料,通过经验正交分解(EOF)、小波分析等方法对山东省年降水量变化特征进行了分析探讨。结果表明:山东省年降水量介于 507.0~1 047.4 mm,大体上由东南向西北递减;山东省年降水场主要具有 2 种模态,4 种表现类型,分别为全省多雨型,全省少雨型,东南部降水偏多、西北部降水偏少型以及东南部降水偏少、西北部降水偏多型,山东省 40 a 来降水场表现出 4 种类型的年份数分别为 12,12,2,4 a,4 种降水类型分布年份实况验证的准确率达到 96.7%;山东省年降水量存在 3~9 a 的年际变化周期,以及 15~32 a 的年代际变化周期,其中主周期为 28,18,4,7 a,分别经历了大约 2,3,15,8.5 个丰—枯转换期。综上,山东省年降水量由东南逐渐向西北递减。年降水场具有 2 种模态,4 种表现类型,且具备多时间尺度周期特征。

关键词:气候特征; 年降水; 经验正交函数(EOF); 小波分析; 山东省

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0179-05

Characteristics of Spatiotemporal Variation of Annual Precipitation in Shandong Province Based on EOF and Wavelet Analysis

REN Jiancheng^{1,2}, WANG Feng², LU Xiaoning³

(1.Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Jinan 250031, China; 2.Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou, Shandong 256612, China; 3.Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To explore the temporal and spatial variation characteristics of annual precipitation in Shandong Province, based on the monthly precipitation data of 29 national basic and benchmark surface meteorological stations in Shandong Province from 1980 to 2019, the variation characteristics of annual precipitation in Shandong Province were analyzed and discussed by means of empirical orthogonal decomposition (EOF) and wavelet analysis. The results showed that: the annual precipitation in Shandong Province ranged from 507.0 mm to 1 047.4 mm, and decreased from southeast to northwest in general; the annual precipitation field in Shandong Province mainly had 2 modes, there were 4 types of precipitation in Shandong Province, which were rainy in the whole province, less rainy in the whole province, more precipitation in the southeast, less precipitation in the northwest, and less precipitation in the southeast and more precipitation in the northwest; the number of years of 4 types of precipitation fields in Shandong Province in the past 40 years was 12 years, 12 years, 2 years and 4 years, respectively; the accuracy of the actual verification of the 4 types of precipitation distribution years was 96.7%; there were 3~9 years of annual variation period of annual precipitation in Shandong Province, and the interval of 15~32 years; the main periods were 28 years, 18 years, 4 years and 7 years, which had experienced about 2, 3, 15 and 8.5 wet-dry transition periods, respectively. The annual precipitation in Shandong Province gradually decreased from southeast to northwest. The annual precipitation field had 2 modes and 4 performance types, and had the characteristics of multi time scale cycle.

Keywords: climate characteristics; annual precipitation; empirical orthogonal function; wavelet analysis; Shandong Province

收稿日期:2021-02-23

修回日期:2021-03-22

资助项目:国家自然科学基金(41401103);山东省气象局科学研究项目(2018sdqxm21,2019sdqxm23)

第一作者:任建成(1984—),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要从事中短期预报、人工影响天气研究。E-mail:19129512@qq.com

通信作者:王峰(1968—),女,山东聊城人,高级工程师,主要从事农业气象、应用气象研究。E-mail:1877619047@qq.com

气候变化是当今科学研究的热点问题^[1-4],而对于气候变化的研究,降水是最主要的指标之一。IPCC 第 5 次评估报告^[5]认为:全球气候变暖导致热浪、强降水等极端事件发生频率增加,全球降水呈现出“干者愈干、湿者愈湿”趋势。而降水的年际和年代际变化早已成为气候变化信号检测和气候可预报性研究的核心内容之一^[6]。国内很多学者对各地降水变化特征作了大量研究。如李智才等^[7]的研究表明 1960—2005 年期间,山西大部分地区主汛期降水量均呈下降趋势,且山西主汛期降水及主汛期暴雨的出现与季风强度有显著的正相关;李勇等^[8]的研究表明:贵州地区降水存在着显著的 28 a 周期变化;黄颖等^[9]的研究表明:祁连山及其周边年降水量均与地形高度有较好的对应关系,海拔越高降水量越大。

山东省的气候属暖温带季风气候类型,雨热同季,春秋短暂,冬夏较长。夏季受低纬太平洋海面暖湿气流影响,气候湿热^[10]。冬季则受高纬蒙古—西伯利亚高压控制^[11],气候干冷。春、秋季节的气候差异亦是较大。基于此,学者们以往对于山东省降水的研究,侧重于季节性降水^[10-14],而对于年降水的研究相对较少。但年降水是工农业生产、社会统计中最重要的指标之一,因此,

对山东省年降水进行系统性研究,对于指导工农业生产,应急减灾具有重要的现实意义。

1 研究区概况

山东省地处中国东部、黄河下游,大致介于北纬 34°22.9′—38°24.01′,东经 114°47.5′—122°42.3′,是我国 10 个沿海省市之一。山东省的气候属暖温带季风气候类型,雨热同季,春秋短暂,冬夏较长。全省年平均气温大致遵循由西南向东北递减的规律,但地区差别不大。山东省降水量分布南多北少,降水季节分布很不均衡,夏季降水量可以占到全年降水量的 60%~70%,易形成涝灾,冬、春及晚秋则降水偏少,容易发生旱灾,对农业生产的影响最大。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

降水数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括山东省 29 个国家基准、基本地面气象观测站 1980—2019 年的逐月降水数据,并对其中异常数据进行了处理,将一年中每月降水量值累加得到年降水量数据。山东省年平均降水量描述统计特征见表 1。

表 1 山东省年平均降水量描述统计特征

观测数/ 个	平均/ mm	标准 误差	中位数/ mm	标准差	方差	峰度	偏度	置信度 (95.0%)
29	657.176	20.870	648.7	112.388	12631.150	3.996	1.566	42.750

2.2 研究方法

2.2.1 经验正交函数(EOF) 经验正交函数(Empirical Orthogonal Function,简称 EOF)^[15]分析,是一种多元统计方法,其原理是利用数据的方差,把数据中有用的信息集中到少数几个空间分布和时间序列上,从而反映要素场的时空变化。目前已在气象和气候研究领域得到非常广泛的应用^[16-18]。特征向量对应的是空间样本,也称空间特征向量或者空间模态,在一定程度上反映了要素场的空间分布特点。EOF 分解法计算过程较为复杂,在此不做详细讨论,具体计算过程可参见文献^[15]。

2.2.2 小波分析 时间序列(Time Series)是地球科学研究中经常遇到的问题。在时间序列研究中,时域和频域是常用的两种基本形式。为了解决非平稳时间序列的时域和频域问题,Morlet 在 20 世纪 80 年代初提出了一种具有时—频多分辨功能的小波分析(Wavelet Analysis)^[19]方法。该方法可以清晰地揭示时间序列中的多周期特征,充分反映时间序列不同时间尺度的发展趋势,并可以评估系统的未来发展趋势。目前,小波分析理论已在众多非线性科学领域内得到广泛

应用^[20-22]。目前,常用的对时间序列进行小波分析的方法要使用较为复杂的 Matlab, Furfur 等工具,在此也不做详细讨论,详细计算过程请参考文献^[19]。

2.2.3 空间插值方法 运用 ArcGIS 软件,对统计量进行克里金(Kriging)插值分析,揭示山东省年降水的空间分布特征。插值所用山东省地图底图来源于天地图·山东网(<http://www.sdmap.gov.cn/>)。已有的研究^[23]表明:克里金插值法的效果优于距离加权反比插值法。

3 结果与分析

3.1 山东省年降水量空间分布特征

从图 1 及表 2 可以看出山东省年降水量的空间分布特征,即山东省年降水量大体上由东南向西北逐渐递减。东南部地区面向北太平洋,并处在泰沂山脉的迎风坡,年降水量最多,最大值出现在泰山站(1 047.7 mm)。而西北部地区背靠泰沂山地,处于背风坡,年降水量最少,最小值出现在莘县站(507.0 mm)。

3.2 山东省年降水量 EOF 分解时空特征

3.2.1 空间分布特征 应用 EOF 分解法对山东省

1980—2019 年降水场进行时空分解,并进行 North 显著性检验^[14]。根据 North 准则,只有特征根误差范围没有重叠的特征向量可以通过显著性检验。从表 3 可知,经 EOF 分解后的前 5 个特征向量特征值的累积方差贡献率达 76.1%,但只有前 2 个特征向量的特征根误差范围没有重叠,可以通过 North 检验,其累积方差贡献率达到 59.6%,可以较好地解释山东省降水场的分布类型。

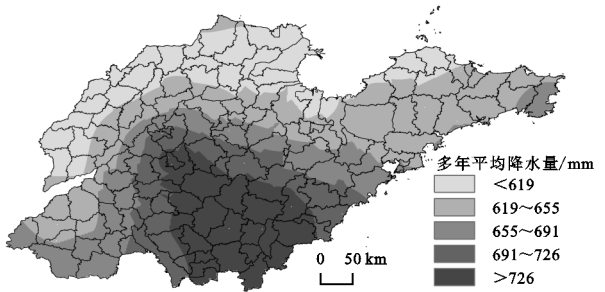


图 1 山东省多年平均降水量分布

表 2 山东省各气象站点年平均降水量统计 mm

序号	站名	平均值±标准差	序号	站名	平均值±标准差	序号	站名	平均值±标准差
1	德州	529.1±147.6	11	莘县	507.0±124.7	21	海阳	674.1±178.8
2	陵城	535.6±155.2	12	济南	697.6±168.9	22	石岛	740.1±189.8
3	惠民	552.0±149.5	13	淄川	685.2±169.9	23	菏泽	621.0±147.9
4	东营	556.4±152.0	14	泰山	1047.4±275.9	24	定陶	648.7±171.3
5	垦利	559.3±171.5	15	泰安	677.6±203.9	25	兖州	673.7±181.0
6	长岛	544.9±157.5	16	淄博	607.3±153.7	26	费县	800.8±175.4
7	龙口	582.3±147.2	17	沂源	703.5±177.6	27	莒县	739.4±192.9
8	福山	619.0±170.6	18	潍坊	574.5±147.2	28	临沂	835.8±167.8
9	烟台	629.7±170.5	19	莱阳	641.1±158.4	29	日照	774.1±194.1
10	成山头	651.2±178.4	20	青岛	649.7±190.6			

表 3 山东省年降水量 EOF 分解前 5 个特征向量方差贡献率

模态	特征值	方差	累计方差	特征根误差范围	
		贡献率/%	贡献率/%	下限	上限
1	439250.83950	50.4	50.4	323897.91770	554603.76120
2	80267.44965	9.2	59.6	59188.18467	101346.71460
3	51509.34379	5.9	65.5	37982.32741	65036.36018
4	50574.66085	5.8	71.3	37293.10423	63856.21747
5	41563.70974	4.8	76.1	30648.54482	52478.87467

模态 1 特征向量的方差贡献率远高于其他模态的方差贡献率,达到 50.4%,是山东省降水场最主要的空间分布类型。从图 2A 可以看出,模态 1 中所有站点的特征值均为正值,表明此模态下山东省各站点降水变化趋势一致性非常强,即全省全年都多雨,或者全省全年都少雨。从第一特征向量空间分布特征

来看,其与山东省年降水量分布具有高度一致性,即特征向量值由东南逐渐向西北递减,高值中心位于东南部地区,反映该区域年降水变化量大,低值中心位于鲁西北和半岛北部的边缘地区。

模态 2 特征向量的方差贡献率为 9.2%,也是山东省比较典型的降水场表现形式。从图 2B 可以看出,这种分布格局大体以鲁中山区为界,向东向南为正值区,向西向北为负值区,正值中心出现在半岛沿海地区,负值中心出现在鲁西北部地区,呈现东南西北反向分布模式,即要么东南部降水量偏多,西北部降水量偏少;要么东南部降水量偏少,西北部降水量偏多。特征向量值从东南向西北依次减小,反映了山东省降水量变化也是由东南向西北递减。

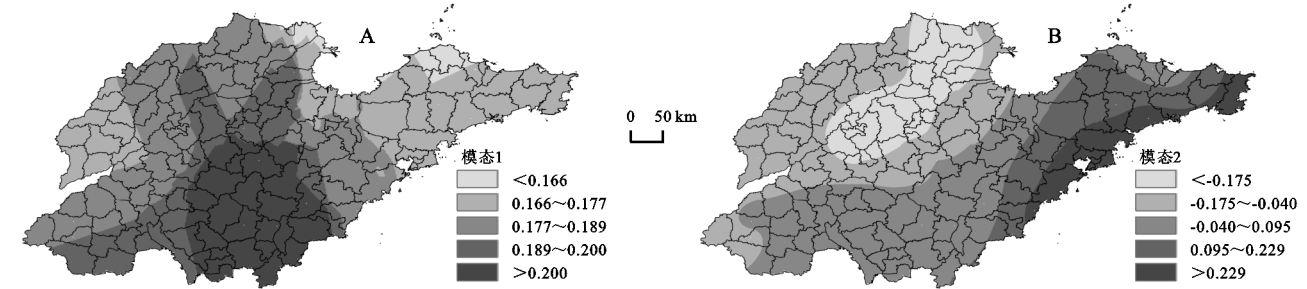


图 2 山东省年降水场第 1 及第 2 模态特征向量分布

3.2.2 时间分布特征 时间系数可以表现对应特征向量空间分布模态的时间变化特征,时间系数为正值表示与空间模态变化方向相同,负值则相反,且时间系数绝对值大小与模态的典型程度呈正比^[14]。

对山东省年降水场空间分布特征进行分析,我们得到了 3.2.1 部分山东省年降水场的 4 种表现类型。对 4 种降水空间模态分布类型做统计分析(图 3)得到: 40 a 间,山东省全年全省多雨,全年全省少雨,东南部

多雨、西北部少雨及东南部少雨、西北部多雨的年份分别有 12,12,2,4 a,具体年份见表 4。进一步对山东省 4 种降水场表现类型进行实况验证得到:全年全省多雨的年份,各年份降水量较多年平均降水量均偏多,平均偏多 128.8 mm;全年全省少雨的年份,各年份降水量较多年平均降水量均偏少,平均偏少 142.5 mm;东南部多雨、西北部少雨的年份,东南部降水量较多年平均降水量均偏多,平均偏多 191.4 mm,而西北部在 1985 年降水量较多年平均降水量偏多 25.7 mm,2008 年降水量较多年平均降水量平均偏少 7.7 mm;东南部少雨、西北部多雨的年份,东南部降水量较多年平均降水量均偏少,平均偏

少 59.1 mm,而西北部降水量较多年平均降水量均偏多,平均偏多 52.6 mm。

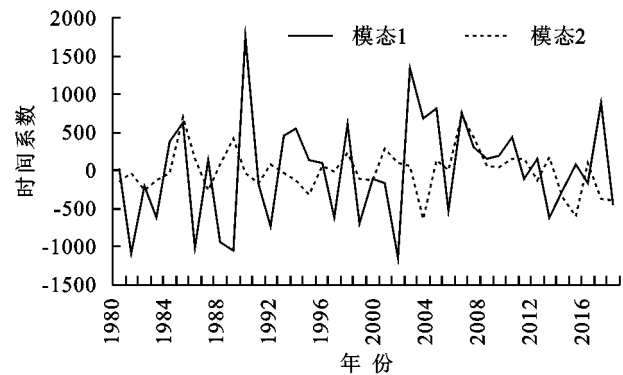


图 3 EOF 分析法中前两个特征向量的时间系数

表 4 EOF 分析 4 种降水场表现类型年份分布

模态	表现类型	年份
1	全省多雨	1984 年、1990 年、1993 年、1994 年、1998 年、2003 年、2004 年、2005 年、2007 年、2010 年、2011 年、2018 年
	全省少雨	1981 年、1983 年、1986 年、1988 年、1989 年、1992 年、1997 年、1999 年、2002 年、2006 年、2014 年、2019 年
2	东南部多雨、西北部少雨	1985 年、2008 年
	东南部少雨、西北部多雨	1987 年、1995 年、2015 年、2016 年

可以看出:时间系数所反映的降水场分布形式与特征向量反映的典型降水场形式基本一致,模态 1 降水场分布模式有 24 a,占总年数的 60%,是山东省降水场最主要的分布形式。从模态 1 时间系数线性趋势来看,其倾斜率大于 0,说明山东省 40 a 来年降水量有一定的增长趋势;模态 2 分布模式出现了 6 a,占总年数的 15%,也是山东省比较典型的降水场分布形式,从模态 2 时间系数线性趋势来看,势斜率小于 0,说明 40 a 来山东省东南部降水量有一定的减少趋势,而西北部降水量有一定的增加趋势。经 EOF 分析得到的降水场分布年份,实况验证准确率达到 96.7%,仅 1985 年没有通过验证,这可能跟该降水类型所表现出的年份数量很少有关系。

3.3 山东省年降水量周期性变化特征

对山东省年降水进行小波分析,用以揭示山东省年降水变化的周期性规律,结果见图 4。小波系数实部等值线图能反映统计序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,进而能判断在不同时间尺度上,时间序列的变化趋势。信号强弱用小波系数实部值的大小来表示,小波系数实部等值线中心为正表示该年份降水偏多,为负则表示该年份降水偏少。小波方差图能反映年降水时间序列的波动能量随时间尺度的分布情况,可用来确定序列演化过程中存在的主周期。

由图 4A 可知,山东省年降水量存在 3~9 a 的年

际变化周期,以及 15~32 a 的年代际变化周期,各周期在整个研究时间段内表现比较稳定,正负相位比较明显,具有全域性。

由图 4B 可知,山东省年降水变化周期存在 4 个比较明显的峰值,分别对应着 28,18,4,7 a 的时间尺度,表明这 4 个周期为山东省近 40 a 降水波动能量最强烈的周期。其中,28 a 时间尺度为第一峰值,该尺度周期波动能量最强,对山东省年降水的周期变化影响最强烈,大约经历了 2 个丰—枯转换期;第二、第三、第四峰值分为 18,4,7 a 时间尺度,分别对应着第二、第三、第四主周期,分别经历了大约 3,15,8.5 个丰—枯转换期。山东省整个时间段内年降水周期变化主要为上述 4 个周期的波动所控制。

EOF 展开时,因所取范围不同或取样大小不同,会引起特征向量空间分布过多地集中于第一模态问题,而 REOF 在 EOF 分解的基础上可以重点表现空间相关性分布结构,可以对大面积的研究区域进行分区研究;Morlet 小波的结果一般存在着多重时间尺度上的复杂嵌套结构,且在不同的尺度周期中,表现出不同的振荡规律,本文使用的降水数据序列时间尺度较短,故周期性变化的时间尺度也相对较小。因此,未来有必要使用最新的气象数据,对山东省降水进行气候分区,并分别对不同区域的降水特征进行更加细致的研究。

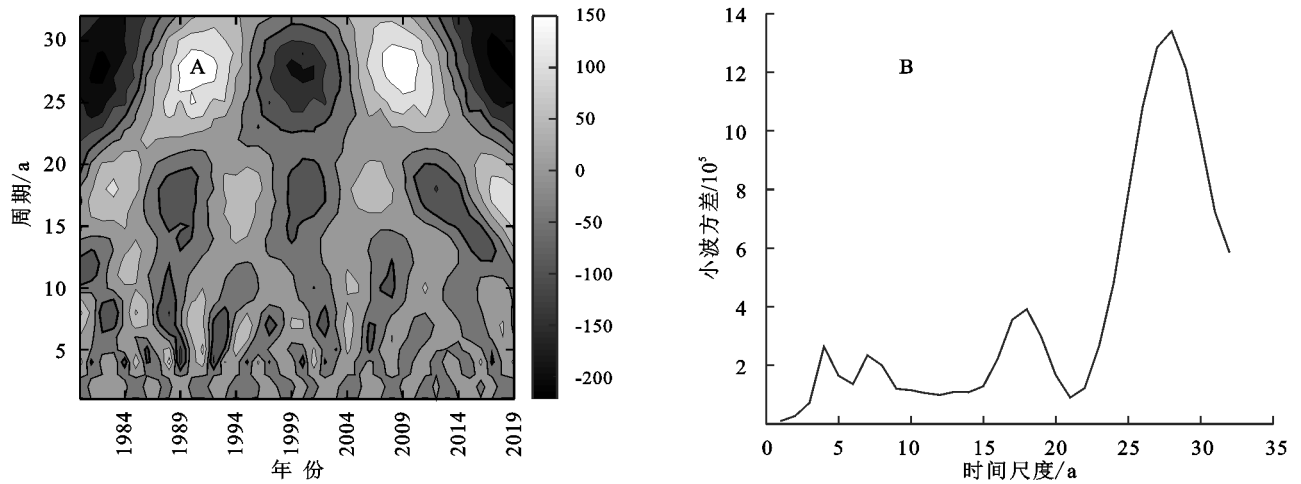


图 4 山东省年降水小波系数实部等值线及小波系数方差

4 结论

(1) 山东省年降水量大体上由东南向西北逐渐递减。东南部地区年降水量最多,最大值出现在泰山站(1 047.7 mm);西北部地区年降水量最少,最小值出现在莘县站(507.0 mm)。

(2) 山东省年降水场具有 2 种模态,4 种表现类型,分别为全省多雨型,全省少雨型,东南部降水偏多、西北部降水偏少型以及东南部降水偏少、西北部降水偏多型。山东省 1980—2019 年年降水场表现出 4 种类型的年份数分别为 12,12,2,4 a,4 种降水类型分布年份实况验证的准确率达到 96.7%,仅 1985 年没有通过验证。山东省 40 a 来年降水量整体上有了一定的增长趋势,而东南部降水量整体上有了一定的减少趋势。

(3) 山东省年降水量存在 3~9 a 的年际变化周期,以及 15~32 a 的年代际变化周期,其中主周期为 28,18,4,7 a,分别经历了大约 2,3,15,8.5 个丰—枯转换期。

参考文献:

[1] 刘引鸽,郑润禾,龙颜,等.渭河中游气候变化及其对水文要素的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):108-117.

[2] 毕鹏,施小明,刘起勇.过去十年中国气候变化与人群健康研究进展及未来展望[J].气候变化研究进展,2020,16(6):763-769.

[3] 黄其威,刘诗奇,王平,等.1936—2018 年环北极典型流域气温与降水时空变化[J].资源科学,2020,42(11):2119-2131.

[4] 胡祖恒,李永华,胡跃文,等.西南地区持续性气候事件的未来变化预估[J].气象科学,2020,40(6):829-837.

[5] 姜彤,李修仓,巢清尘,等.《气候变化 2014:影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J].气候变化研究进展,2014,10(3):157-166.

[6] 王艳姣,闫峰.1960—2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征[J].地理科学进展,2014,33(10):1354-1363.

[7] 李智才,刘秀红,郭慕萍,等.山西省主汛期降水的特征研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(11):43-49.

[8] 李勇,刘秀明,王世杰,等.1961—2017 年贵州降水时空

变化特征[J].水土保持研究,2019,26(6):145-150.

[9] 黄颖,毛文茜,王潇雅,等.近 39 a 祁连山及其周边地区降水量时空分布特征[J].干旱气象,2020,8(4):527-534.

[10] 王庆,马倩倩,夏艳玲,等.最近 50 年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究[J].地理科学,2014,34(2):220-228.

[11] 高留喜,刘秦玉.山东春季降水的时空变化特征分析[J].高原气象,2005,24(5):811-815.

[12] 胡刚,石星军,宋慧.基于 REOF 和 ESMD 的降水场时空耦合分析:以山东省冬季降水为例[J].中国水土保持科学,2020,18(6):132-139.

[13] 褚颖佳,郭飞燕,尹承美,等.东部型和中部型厄尔尼诺事件对山东夏季降水的不同影响[J].海洋气象学报,2020,40(4):97-104.

[14] 刘煦,凌艺,张凯静.山东半岛地区夏半年降水日变化特征[J].干旱气象,2020,38(2):234-241.

[15] 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.

[16] 邱海军,曹明明,刘闻.基于 EOF 的陕西省降水变化时空分异研究[J].水土保持通报,2011,31(3):57-59,93.

[17] 赵嘉阳,王文辉,靳全锋,等.基于 EOF 的福建省降水量时空变化特征分析[J].重庆理工大学学报:自然科学,2017,31(2):73-79.

[18] 李烁阳,刘小燕,杨贵羽,等.湖北省降水及早涝时空分布特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2):202-207.

[19] 王文圣,丁晶,李耀清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

[20] 王晓宁,岳大鹏,赵景波,等.黑龙江省 1958—2017 年极端降水时空变化与灾害效应[J].水土保持研究,2020,27(5):139-145.

[21] 李万荣,张弢.1960—2017 年河西走廊东部寒潮时空变化特征[J].干旱气象,2019,37(5):747-753.

[22] 张钦,唐海萍,崔凤琪,等.基于 SPEI 的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J].生态学报,2019,39(19):1-14.

[23] 靳国栋,刘衍聪,牛文杰.距离权重反比插值法和克里金插值法的比较[J].长春工业大学学报:自然科学版,2003,24(3):53-57.