

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.018.

任建成, 谷山青, 卢晓宁. 基于 REOF 分析的山东省年降水区域特征及趋势分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 224-231.

Ren Jiancheng, Gu Shanqing, Lu Xiaoning. Regional Characteristics and Trend Analysis of Annual Precipitation in Shandong Province Based on REOF [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 224-231.

# 基于 REOF 分析的山东省年降水区域特征及趋势分析

任建成<sup>1,2</sup>, 谷山青<sup>1,2</sup>, 卢晓宁<sup>3</sup>

(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:** [目的]探究山东省不同气候分区年降水量的时空特征, 为该地区气候分析、防灾减灾提供更加区域性的参考依据。[方法]根据山东省 95 个国家地面气象观测站 1991—2020 年降水年值数据, 首先对山东省年降水场进行气候分区, 然后通过相关统计方法分析各分区降水的时空变化特征。[结果](1) 山东省各降水模态降水偏少的年份更多, 降水偏多的年份降水强度更大, 年代际变化均较为明显, 但各模态降水偏多偏少的年份分布及强度变化有所不同。(2) 山东省年降水量大致由东南向西北递减, 年降水场划分为东南沿海区(Ⅰ区)、西北平原区(Ⅱ区)和中部山地区(Ⅲ区)3 个区域, 各降水分区年降水均呈不显著增加趋势, 趋势率各不相同, 突变均不明显。(3) 山东省各降水分区年降水量均具有较为明显的周期性特征, 东南沿海区年降水场存在 2 个较为明显的能量中心, 中心尺度均为 2~3 a, 未来变化具有强持续性; 西北平原区年降水场存在 3 个较为明显的能量中心, 中心尺度分别为 5~7 a, 3 a 和 2~3 a, 未来变化具有持续性; 中部山地区年降水场存在 2 个较为明显的能量中心, 中心尺度分别为 2~3 a, 6 a, 未来变化具有强持续性。[结论]山东省降水偏少的年份更多, 降水偏多的年份降水强度更大, 年降水场大致可分为 3 个分区, 各分区年降水量均呈不显著增加趋势, 均具有较为明显的周期性特征, 且未来变化均具有持续性。

**关键词:** 年降水; 区域特征; 旋转经验正交函数; 重标极差分析法; 山东省

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0224-08

## Regional Characteristics and Trend Analysis of Annual Precipitation in Shandong Province Based on REOF

Ren Jiancheng<sup>1,2</sup>, Gu Shanqing<sup>1,2</sup>, Lu Xiaoning<sup>3</sup>

(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:** [Objective] Exploring the spatiotemporal characteristics of annual precipitation in different climate zones in Shandong Province is expected to provide a more regional reference basis for climate analysis, disaster prevention and reduction in the region. [Methods] According to the annual precipitation data of ground meteorological observatories in 95 countries of Shandong Province in the period from 1991 to 2020, the annual precipitation data in Shandong Province were divided into climate regions, and then the spatiotemporal variation characteristics of precipitation in each region were analyzed by using relevant statistical methods. [Results] (1) In Shandong Province, there were more years with less precipitation modalities, and more precipitation intensity in years with more precipitation, and the interdecadal variation was obvious, but the distribution and intensity changes of years with more and less precipitation in each mode were different. (2) The annual precipitation in Shandong Province decreases from southeast to northwest. The annual

收稿日期: 2022-10-24

修回日期: 2022-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401103); 山东省气象局科学研究项目(SDYBY2020-11)

第一作者: 任建成(1984—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为农业气象、应用气象等。E-mail: 19129512@qq.com

通信作者: 谷山青(1983—), 女, 青海海东人, 学士, 工程师, 主要研究方向为大气科学、大气探测等。E-mail: guoguo\_shanqing@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

precipitation data were divided into three regions: southeast coastal area (Zone I), northwest plain area (Zone II) and central hilly area (Zone III). The annual precipitation in each precipitation region showed no significant increase trend, with different trend rates and no obvious mutation. (3) The annual precipitation of each precipitation subarea in Shandong Province had obvious periodic characteristics. There were two obvious energy centers in the annual precipitation data of the southeast coastal area, with the central scale of 2~3 years, and the future change has strong sustainability. There were three obvious energy centers in the annual precipitation data in the northwest plain, with the central scales of 5~7 years, 3 a and 2~3 years, respectively. There were two obvious energy centers in the annual precipitation data in the central hilly region, with the central scales of 2~3 years and 6 years, respectively. The future changes are of strong sustainability. [Conclusion] Shandong Province has more years with less precipitation and more precipitation intensity, and the annual precipitation field can be roughly divided into three zones, and the annual precipitation in each region has obvious cyclical characteristics, and future changes are continuous.

**Keywords:** precipitation; regional characteristics; rotating empirical orthogonal function; rescaled range analysis; Shandong Province

气候变化已成为科学界的共识。IPCC 第五次评估报告<sup>[1]</sup>指出,近百年来温室气体浓度的增加导致了全球大气和海洋变暖是毋庸置疑的。IPCC 第六次评估报告<sup>[2]</sup>进一步指出,气候变化加快了水循环,并对降水特征产生明显影响。《中国气候变化蓝皮书(2022)》<sup>[3]</sup>指出:全球变暖趋势仍在持续,2012 年以来中国年降水量持续偏多,中国平均年降水量总体呈较明显增加趋势,且不同区域间降水特征差异明显,全球范围内的极端降水事件频发。全球变暖背景下各地降水变化的研究也早已成为了国内外的研究热点<sup>[4-6]</sup>。

目前,全球范围内对于降水研究主要集中于降水变化特征及地域性差异、季风区和非季风区降水特征对比、极端降水变化等方面。如 Donat 等<sup>[7]</sup>的分析认为全球干旱区降水明显增加,且受温度升高的影响比较明显,但湿润区降水量变化并不显著。Wang 等<sup>[8]</sup>的研究表明季风降水不仅与太阳辐射能量有关,跟地球内部的反馈机制也密切相关,南方涛动增强了全球季风降水,热带和亚热带地区极端降水强度增加速度大大高于全球,但是在其他地区模拟的物理机制尚存在不确定性。

国内对于降水变化特征及影响机制、极端降水也进行了大量的研究。过去几十年,国内降水量整体变化不显著<sup>[9]</sup>,但东南沿海、长江下游、青藏高原和西北地区年降水量呈增加趋势,东北、华北和西南地区降水量呈减少趋势,特别是东北地区和华北地区年降水量呈显著减少趋势,尤其是夏季降水<sup>[10-12]</sup>。近年来及未来一段时间,我国极端降水普遍呈增多趋强趋势,其中极端降水事件增幅最大的地区为华北和东北<sup>[13]</sup>。

山东省是中国华东地区的一个沿海省份,气候属暖温带季风气候类型,境内存在山地、丘陵、平原、盆

地等多种地貌。对于山东省降水特征的研究,有徐泽华等<sup>[14]</sup>研究认为,1981—2010 年期间,山东省年降水量呈现上升趋势,降水的振荡周期与南方涛动和东亚夏季风存在一定的响应关系。卢仲翰等<sup>[15]</sup>的研究则表明 1961—2017 年期间,山东省降水量年降水量呈不显著减少趋势,降水的空间高值中心出现在泰山山脉的周边。刘玄<sup>[16]</sup>的研究表明:山东省多个极端降水指数呈显著上升趋势,且地域差别较大。上述研究均从整体上分析了山东省的降水特征。地形、海陆位置等因素会对地区气候产生比较明显的影响<sup>[17-18]</sup>,鉴于山东省海陆并存、地貌复杂的地理特点,仅从整体上对山东省降水进行研究,不能很好地体现山东省降水的区域特征。因此,本文首先对山东省年降水场进行气候分区,并对各区域的年降水时空分布特征进行更加深入的研究,为山东省气候分析、防灾减灾提供更加区域性的参考依据。

## 1 研究资料和方法

### 1.1 研究资料

根据世界气象组织的建议,到 2021 年应使用 1991—2020 年的新气候基准线,而高质量气候值是应对气候变化亟需的重要科学数据之一。得益于中国地面自动观测系统的发展及观测数据完整性和质量的提升,本文研究资料采用中国气象局研制的 1991—2020 年中国地面气候数据集,该数据集基于国家气象信息中心归档的中国地面观测数据,对 1991 年以来的地面台站观测数据集元数据进行了系统的质量检查和核实订正。在基于站址迁移信息对所有要素进行了分段处理基础上,采用傅里叶级数理论对气温、降水等累年日值序列进行了谐波处理,在

体现气象变量季节性转换的同时,避免了日与日之间的异常突变特征,具有更好的气候代表性。最终建立的 1991—2020 年中国地面气候值数据集提供了中国 2 438 个站点的气候背景信息,为天气气候业务提供了数据支撑。本文选用山东省 95 个气象站点 1991—2020 年降水年值数据进行分析研究,选用的站点全部为山东省气象局当前业务观测站点,降水数据可以较好地体现山东省年降水变化特征,站点空间分布详见图 1,各气象站点年平均降水量(mm)描述统计特征见表 1。

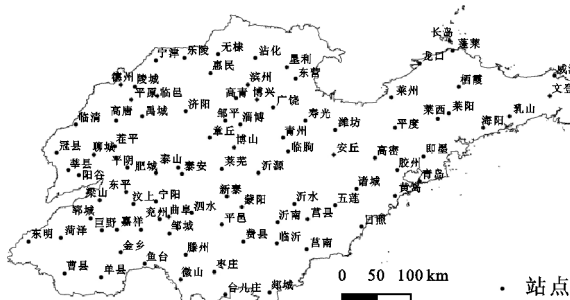


图 1 山东省气象站点分布

Fig. 1 Distribution map of meteorological stations in Shandong province

表 1 山东省各气象站点年平均降水量描述统计特征

Table 1 The statistical characteristics of the annual average precipitation of each meteorological station in Shandong province are described

观测数/ 个	平均/ mm	标准 误差	中位数/ mm	标准差	方差	峰度	偏度	区域	最小值/ mm	最大值/ mm	置信度 (95.0%)
95	673.33	9.94	659.90	96.89	9388.62	1.23	0.90	532.40	518.10	1050.50	19.74

1.2 研究方法

1.2.1 EOF 及 REOF 方法 经验正交函数(Empirical Orthogonal Function,简称 EOF)通过 North 显著性检验,把时间序列中集中到少数几个显著的时空模态上,已在气候等领域应用较多<sup>[19-21]</sup>。主要计算过程分为 3 步:

- 首先标准化处理原始数据矩阵,求得标准化矩阵  $\mathbf{X}$ 。
- 然后通过矩阵  $\mathbf{X}$  及其转置矩阵  $\mathbf{X}^T$ ,得到相关系数矩阵  $\mathbf{A}$ 。
- 最后求矩阵  $\mathbf{A}$  的特征值 $\lambda$ 、特征向量  $\mathbf{V}$  和时间系数  $\mathbf{Z}$ ,并计算可以通过 North 显著性检验的前  $P$  个特征向量的方差贡献率。

North 显著性检验具体过程如下:

$$\begin{cases} \lambda_i - \lambda_{i-1} \geq \lambda_i \sqrt{2/n}, \text{模态显著} \\ \lambda_i - \lambda_{i-1} < \lambda_i \sqrt{2/n}, \text{模态不显著} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\lambda$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的特征值; $\lambda_i - \lambda_{i-1}$  表示相邻两特征值的差值; $\lambda_i \sqrt{2/n}$  表示允许误差。

旋转经验正交函数(Rotating Empirical Orthogonal Function,简称 REOF)方法是在 EOF 分解的基础上通过特征向量  $\mathbf{V}$  进行最大方差旋转,当满足精度要求时则停止旋转,得到(2) 式。

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{G} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}$  为旋转后的标准化矩阵; $\mathbf{B}$  为旋转后的特征向量; $\mathbf{G}$  为旋转后的时间系数。

旋转后的特征向量可以更加清晰地体现研究要素空间分布结构<sup>[22-23]</sup>。因此,本文采用 REOF 对山东省年降水场进行气候分区,并进一步分析研究各分区降水的时空特征。

1.2.2 赫斯特指数和重标极差分析法 赫斯特指数(下称 Hurst 指数)用于定量描述时间序列信息对未

来对过去的长期依赖性,由英国水文专家 H.E.Hurst 提出。Hurst 指数的计算方法称为重标极差分析法(下称  $R/S$  分析法)<sup>[24]</sup>,主要计算过程如下:

- (1) 将时间序列  $x_i$ (长度为  $N$ )均分为  $A$  个相邻的子区间(长度为  $n$ ),表示为  $e_a, a = 1, 2, \dots, A, e_a$  为长度为  $N/A$  的子区间。
- (2) 求出  $e_a$  对于其均值的累积截距:  $x_{k,a} \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - E_a)k = 1, 2, \dots, n, x_{k,a}$  为  $e_a$  对于其均值的累积截距,  $N_{i,a}$  为子区间  $e_a$  的均值。
- (3) 定义极差:  $R_a = \max(x_{i,a}) - \min(x_{k,a}), R_a$  为极差,即第(2) 步中累积截距最大值和最小值的差值。

$$(4) \text{ 计算标准差: } S_a = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (N_{k,a} - E_a)^2}{n}} S_A \text{ 为子区间 } e_a \text{ 的标准差。}$$

(5) 极差的标准化处理,得到重标极差,  $(R/S)_n = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \frac{R_a}{S_a} (R/S)_n$  为序列在长度为 的时间跨度上的重标极差。

(6)  $n$  从 3 开始,并重复 1—5 步,直到  $n = 4$ ,得到序列  $[R/S]_n, n = 3, \dots, N$ 。

Hurst 指数 用以描述  $(R/S)_n$  和  $n^H$  的正比关系,即

$$(R/S)_n = C \times n^H \quad (3)$$

式中: $C$  为常数。以  $\lg(n)$  为解释变量,  $\lg(R/S)$  为被解释变量进行线性回归:

$$\lg(R/S) = \lg C + H \cdot \ln n + \epsilon \quad (4)$$

式中: $\epsilon$  为常数;  $H$  为 Hurst 指数的估值,即(4) 式的斜率,其具体形式见表 2<sup>[25]</sup>。

研究的时间序列是否为周期性循环及其平均循

环长度可通过统计量  $V$  进行判断,统计量  $V$  的计算公式为:

$$V_n=(R/S)_n/\sqrt{n}$$
 (5)

在  $V_n\sim\ln n$  的曲线上,若  $H=0.5$ ,  $V$  统计量应该为一条水平线,若  $H<0.5$ ,曲线向下倾斜,若  $H>0.5$ ,曲线向上倾斜。曲线第一次出现的明显转折点对应的时间长度  $n$  就是未来对过去的依赖长度。

表 2 Hurst 指数具体表现形式

Hurst 指数范围	表示的意义
$0.65<H\leq 1$	强持续性序列,未来与过去的变化趋势一致
$0.5<H\leq 0.65$	弱持续性序列,未来与过去的变化趋势一致
$H=0.5$	随机序列,未来与过去的变化趋势无关
$0.35<H<0.5$	弱反持续性序列,未来与过去的变化趋势相反
$0<H\leq 0.35$	强反持续性序列,未来与过去的变化趋势相反

表 3 山东省年降水场 EOF, REOF 特征值及特征向量统计

Table 3 Annual precipitation field EOF, REOF eigenvalues and eigenvector statistics in Shandong province							
特征向量 序号	特征值	旋转前方差 贡献率/%	前后两特征值 差值	允许误差 范围	显著性	旋转后 特征值	旋转后方差 贡献率/%
1	44.34	46.67	34.97	6.43	显著	27.70	29.15
2	9.37	9.86	2.76	1.36	显著	26.01	27.38
3	6.61	6.96	0.92	0.96	不显著		

2.2 山东省年降水场 REOF 空间分布特征

对 1991—2020 年山东省年降水场 REOF 分解后,得到 2 个模态:第 1 模态空间分布表现为高值区主要集中在鲁东南沿海和泰沂山脉的迎风坡,该地区受海洋气候和西南暖湿气流影响比较明显,年降水量为 729 mm,降水比较丰沛;第 2 模态的高值主要集中在鲁西北地区,该区主要位于泰沂山脉的背风坡,

1.2.3 其他方法 运用 ArcGIS 软件,对统计量进行克里金插值分析,用以分析统计量空间分布特征;应用线性回归分析法分析降水的趋势性特征;应用 Mann-Kendall(下称 M-K)突变检验法分析降水的突变特征;应用 Morlet 小波分析降水的周期性特征;趋势分析、突变分析均采用  $\alpha=0.05$  置信水平。

2 结果与分析

2.1 山东省年降水场 EOF 特征

对山东省年降水场进行 EOF 时空分解,并经 North 显著性检验,只有前 2 个降水模态显著,对应的特征值  $\lambda$  累计方差贡献率达到 56.53%,能较好地代表山东省年降水的空间特征。对前 2 个降水模态进行 REOF 旋转后的方差贡献率和特征值均较旋转前更加均匀,详见表 3。

地形以平原为主,受大陆性气候的影响比较明显,年降水量 616 mm,降水相对较少,其他地区主要为中部及南部部分山地丘陵地区,年降水量为 717 mm,根据各模态荷载值大于 0.6 地区分布范围,经整理后可将山东划分为 3 个气候区(图 2),按照模态顺序分别命名为东南沿海区(I 区)、西北平原区(II 区)、中部山地区(III 区)。

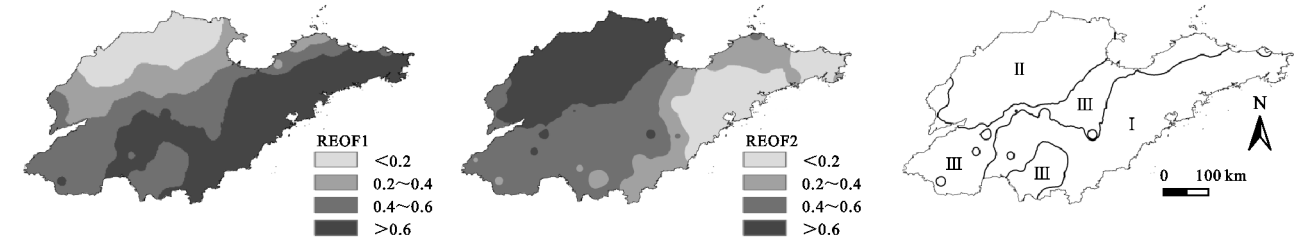


图 2 山东省年降水 REOF 分解后得到的 2 个特征向量场空间分布(荷载值 $\geq 0.6$ )及降水分区

Fig. 2 Spatial distribution (load value $\geq 0.6$ ) and precipitation zones of two eigenvector fields obtained after the decomposition of annual precipitation REOF in Shandong province

2.3 各降水模态的时间系数特征

从模态 1 和模态 2 的时间系数(图 3)看出,其共同特征为:(1)正值年份数少于负值,说明各模态降水偏少的年份更多。(2)正值振幅相对较大,说明各模态降水偏多的年份降水强度更大。(3)降水的年代际变化均较为明显,其中 1990 年代以降水偏少为主,2000 年代以降水偏多为主,且偏多的强度较大,2010 年代以降水偏少为主,且偏少的强度较大。

但 2 个模态降水偏多偏少的年份分布及强度变化有所不同。

2.4 各分区降水的线性趋势及突变特征

图 4A 表明,东南沿海区(I 区)年降水呈不显著增加趋势( $p>0.05$ ),趋势率为 11.5 mm/10 a,UF 和 UB 曲线存在多个交点,主要发生在 2000 年代,各交点以后 UF 曲线变化均未通过  $\alpha=0.05$  显著性水平,说明该区年降水突变不明显。



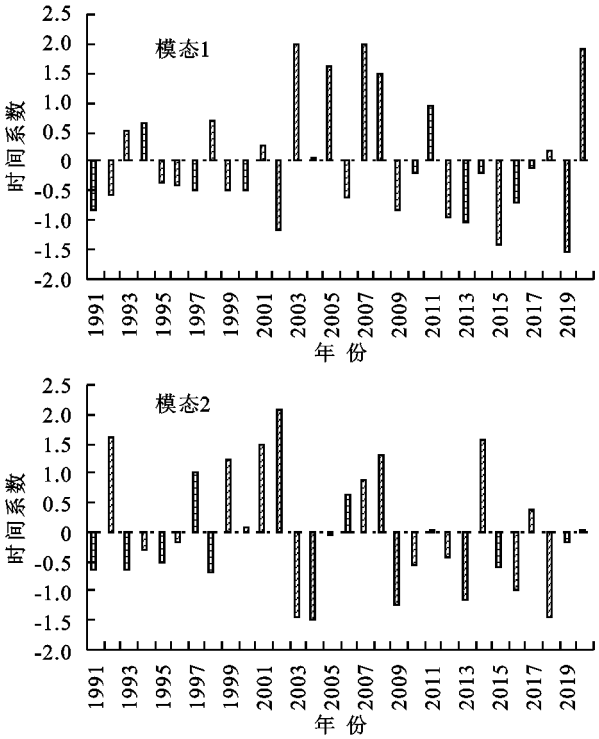


图 3 山东省年降水场各模态特征向量时间系数

Fig. 3 Time coefficient of characteristic vectors of each zone of annual precipitation field in Shandong province

图 4B 表明,西北平原区(Ⅱ区)年降水量呈不显著增加趋势( $p>0.05$ ),趋势率为  $22.7\text{ mm}/10\text{ a}$ ,UF 和 UB 统计量存在多个交点,这些交点在各个年达均有发生,各交点以后 UF 曲线变化均未通过  $\alpha=0.05$  显著性水平,说明该区年降水突变不明显。

图 4C 表明,中部山地区(Ⅲ区)年降水呈不显著增加趋势( $p>0.05$ ),趋势率为  $10.7\text{ mm}/10\text{ a}$ ,UF 和 UB 统计量存在多个交点,主要发生在 1990 年代前期、2003 年及 2010 年代,各交点以后 UF 曲线变化均未通过显著性水平,说明该区年降水突变不明显。

综上,山东省年降水量大致由东南向西北递减,各降水分区年降水均呈不显著增加趋势,且突变均不明显。山东省各分区年降水量主要为量的区别,变化趋势差别不大。

2.5 各分区降水的周期性特征

从图 5 可以看出:东南沿海区(Ⅰ区)年降水场存在 2 个较为明显的能量中心,中心尺度均为  $2\sim 3\text{ a}$ ,分别在 2000 年代中前期和 2010 年代后期表现最明显;西北平原区(Ⅱ区)年降水场存在 3 个较为明显的能量中心,中心能量从大到小依次为:中心尺度  $5\sim 7\text{ a}$ ,在 1990 年代后期和整个 2000 年代表现最强烈,中心尺度  $3\text{ a}$ ,在 1990 年代后期到 2000 年代前期表现最强烈,中心尺度  $2\sim 3\text{ a}$ ,在 2010 年代后期表现最

强烈;中部山地区(Ⅲ区)年降水场存在 2 个较为明显的能量中心,中心能量从大到小依次为:中心尺度  $2\sim 3\text{ a}$ ,在 1990 年代后期到 2000 年代中前期表现最强烈,中心尺度  $6\text{ a}$ ,在 2000 年代中前期表现最强烈。

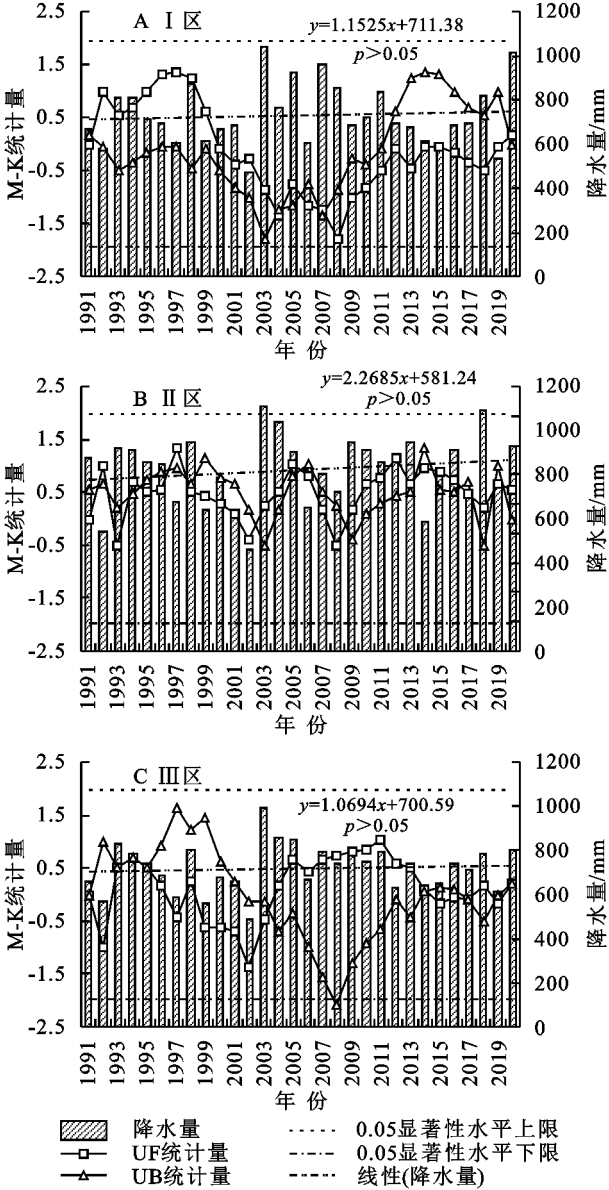


图 4 山东省年降水各分区降水量线性趋势及 M-K 检验曲线

Fig. 4 Linear trend of precipitation in each sub-district of annual precipitation in Shandong province and M-K test curve

2.6 各分区降水的未来趋势预测

对山东省各降水分区年降水未来趋势运用 R/S 分析法进行预测,东南沿海区(Ⅰ区)降水时间序列的 Hurst 指数  $0.72>0.65$ ,表明Ⅰ区降水时间序列前后具有强持续性,即未来Ⅰ区年降水将继续呈现比较明显的不显著上升趋势;西北平原区(Ⅱ区)降水时间序列的 Hurst 指数  $0.5<0.59<0.65$ ,表明Ⅱ区年降水量时间序列前后具有持续性,即未来Ⅱ区年降水量将

继续呈现不显著上升趋势;中部山地区(Ⅲ区)降水时间序列的 Hurst 指数  $0.76>0.65$ ,表明Ⅲ区降水时间序列前后具有强持续性,即未来Ⅲ区年降水将继续呈现比较明显的不显著上升趋势。

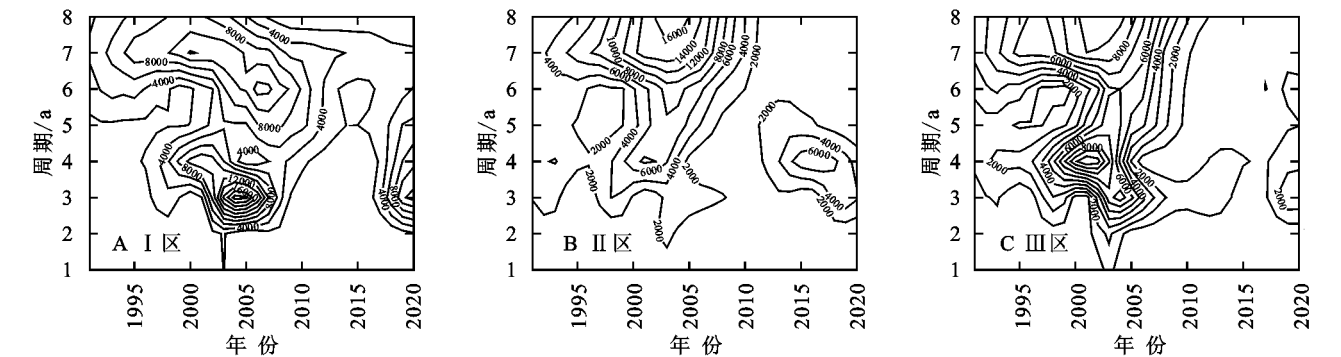


图 5 山东省年降水场各分区小波系数模部平方等值线

Fig. 5 Wavelet coefficient module square contour plot of each division of annual precipitation field in Shandong province

从图 6 可以看出:东南沿海区(Ⅰ区)降水  $V$  统计量第一个拐点的  $\ln n \approx 1.79$ ,对应的时间长度  $n \approx 6$ ,说明Ⅰ区降水时间序列过去状态对未来状态的影响时间约为 6 a,6 a 后持续性将慢慢减弱直至消失;西北平原区(Ⅱ区)降水  $V$  统计量第一个拐点的  $\ln N \approx 2.08$ ,对应的时间长度  $n \approx 8$ ,说明Ⅱ区年降水量时

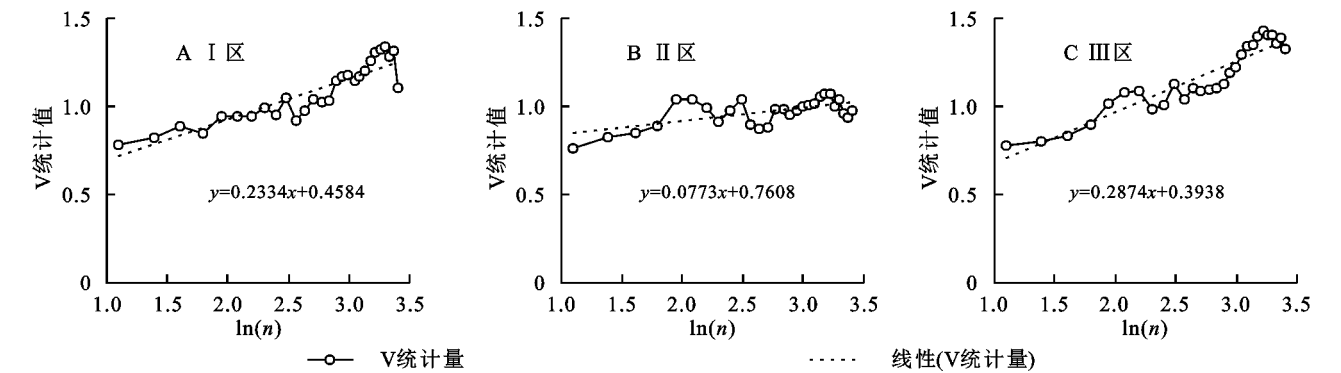


图 6 山东省各降水分区年降水变化曲线

Fig. 6 Annual precipitation  $V-\ln(n)$  variation curve of each precipitation subdivision in Shandong province

### 3 讨论

山东省各个降水分区降水均呈不显著增加趋势,这与《中国气候变化蓝皮书(2022)》<sup>[3]</sup>以及徐泽华等<sup>[14]</sup>的研究结论比较一致,但与卢仲翰<sup>[15]</sup>、程增辉等<sup>[26]</sup>的研究不一致,这与降水资料序列的时间范围差别较大、降水数据来源、站点密度等有较大关系。由于本文的降水序列时间尺度较短,降水的变化周期也相对较小,但 10 a 以下的降水周期与徐泽华<sup>[14]</sup>、程增辉等<sup>[26]</sup>的研究较为一致。本文选用的站点密度较大,资料序列较新,可以对山东省年降水场进行较为准确的分区,相关的分区结论可作为对前人研究成果继承和补充。

IPCC<sup>[1-2]</sup>和《中国气候变化蓝皮书(2022)》<sup>[3]</sup>都指出,中国高温、强降水等极端天气气候事件趋多、趋

强的趋势更加明显。对于降水的研究也在逐渐从降水量转移到极端降水方面,未来应结合全球气候模型(GCM)及区域气候模式(RCM),利用观测数据对 GCM/RCM 基线期降水进行偏差矫正,开展对山东省极端降水事件的统计研究。

### 4 结论

(1) 山东省各降水模态降水偏少的年份更多,降水偏多的年份降水强度更大,年代际变化均较为明显,其中 1990 年代以降水偏少为主,2000 年代以降水偏多为主,且偏多的强度较大,2010 年代以降水偏少为主,且偏少的强度较大,但各模态降水偏多偏少的年份分布及强度变化有所不同。

(2) 山东省年降水场划分为东南沿海区(Ⅰ区)、西北平原区(Ⅱ区)和中部山地区(Ⅲ区)3 个区域。

山东省年降水量大致由东南向西北递减,各降水分区年降水均呈不显著增加趋势,但趋势率各不相同,且突变均不明显。

(3) 山东省各降水分区年降水量均具有较为明显的周期性特征,其中东南沿海区年降水场存在2个较为明显的能量中心,中心尺度均为2~3 a,分别在2000年代中前期和2010年代后期表现最明显;西北平原区年降水场存在3个较为明显的能量中心,中心尺度分别为5~7 a,3 a和2~3 a,分别在1990年代后期和整个2000年代、1990年代后期到2000年代前期、2010年代后期表现最强烈;中部山地区年降水场存在2个较为明显的能量中心,中心尺度分别为2~3 a,6 a,分别在1990年代后期到2000年代中前期、2000年代中前期表现最强烈。

(4) 山东省各降水分区年降水量未来变化均具有持续性,其中东南沿海区(Ⅰ区)年降水量未来变化具有强持续性,过去状态对未来状态的影响时间约为6 a;西北平原区(Ⅱ区)年降水量未来变化具有持续性,过去状态对未来状态的影响时间约为8 a;中部山地区(Ⅲ区)年降水量未来变化具有强持续性,过去状态对未来状态的影响时间约为10 a。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
Jiang T, Li X C, Chao Q C, et al. Highlights and understanding of climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability[J]. Climate Change Research, 2014,10(3):157-166.
- [2] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等.气候变化科学方面的几个最新认知[J].气候变化研究进展,2021,17(6):629-635.  
Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al. Several new understandings in the climate change science[J]. Climate Change Research, 2021,17(6):629-635.
- [3] 吴鹏,谷星月,王朋岭.中国气候变化蓝皮书(2022)发布[N].中国气象报,2022-08-04(1).  
Wu P, Gu X Y, Wang P L. Blue book on climate change in China(2022)released [N]. China Meteorological News, 2022-08-04(1).
- [4] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. Science, 2008,321(5895):1481-1484.
- [5] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2006,314(5804):1442-1445.
- [6] Rahmstorf S, Coumou D. Increase of extreme events in a warming world[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011,108(44):17905-17909.
- [7] Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(5):2098-2118.
- [8] Wang B, Liu J, Kim H J, et al. Recent change of the global monsoon precipitation(1979—2008)[J]. Climate Dynamics, 2012,39:1123-1135.
- [9] 任国玉,任玉玉,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.  
Ren G Y, Ren Y Y, Zhan Y J, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: Ⅱ: Recent trends[J]. Advances in Water Science, 2015,26(4):451-465.
- [10] 唐蕴,王浩,严登华,等.近50年来东北地区降水的时空分异研究[J].地理科学,2005,25(2):172-176.  
Tang Y, Wang H, Yan D H, et al. Research on the spatial-temporal differentiation of precipitation in northeast China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005,25(2):172-176.
- [11] 杨修群,谢倩,朱益民,等.华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型[J].地球物理学报,2005,48(4):789-797.  
Yang X Q, Xie Q, Zhu Y M, et al. Decadal-to-inter-decadal variability of precipitation in north China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. Chinese Journal of Geophysics(in Chinese), 2005, 48(4):789-797.
- [12] 郝立生,丁一汇.华北降水变化研究进展[J].地理科学进展,2012,31(5):593-601.  
Hao L S, Ding Y H. Progress of precipitation research in north China[J]. Progress in Geography, 2012,31(5):593-601.
- [13] 舒章康,李文鑫,张建云,等.中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J].中国工程科学,2022,24(5):116-125.  
Shu Z K, Li W X, Zhang J Y, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. Engineering Science, 2022, 24(5):116-125.
- [14] 徐泽华,韩美,张广彩,等.山东降水时空分布变化及其影响因素[J].水土保持研究,2018,25(3):272-278.  
Xu Z H, Han M, Zhang G C, et al. Spatiotemporal distribution of the precipitation and its impact factors in Shandong province[J]. Research of Soil and Water

- Conservation, 2018, 25(3): 272-278.
- [15] 卢仲翰, 王俊杰, 曾俞. 近 57 年山东省降水量及雨日变化特征[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(4): 30-35, 42.
- Lu Z H, Wang J J, Zeng Y. Characteristics of climate change in precipitation and rainy days in Shandong province in recent 57 years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 30-35.
- [16] 刘玄. 山东省极端气候变化特性和水文响应分析[D]. 济南: 山东农业大学, 2022.
- Liu X. Analysis of extreme climate change characteristics and hydrological response in Shandong province [D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2022.
- [17] 王翌. 地形和季风因素对华北极端气候事件时空变化特征的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- Wang Y. The impact of terrain and monsoon factors on the spatiotemporal changes of extreme climate events in north China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [18] 何永利, 丁磊, 李冬冬, 等. 全球变暖过程中海陆增温差异特征研究进展[J]. 干旱气象, 2019, 37(5): 703-712.
- He Y L, Ding L, Li D D, et al. Research review on the contrast of land and ocean warming features under the global warming[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(5): 703-712.
- [19] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 179-183.
- Ren J C, Wang F, Lu X N. Characteristics of spatio-temporal variation of annual precipitation in Shandong province based on EOF and wavelet analysis [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 179-183.
- [20] 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: 自然科学版, 2017, 31(2): 73-79.
- Zhao J Y, Wang W H, Jin Q F, et al. Analyzing spatial and temporal distributions of precipitation in Fujian province using empirical orthogonal function[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017(2): 73-79.
- [21] 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.
- Li S Y, Liu X Y, Yang G Y, et al. Analysis of spatial and temporal distribution of precipitation and drought in Hubei province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 202-207.
- [22] 唐亚平, 张凯, 李忠娴, 等. 基于 REOF 方法的辽宁气候舒适度区域特征分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2): 120-124.
- Tang Y P, Zhang K, Li Z X, et al. Analysis of climate comfort regional characteristics in Liaoning based on REOF [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(2): 120-124.
- [23] 林颖仪, 王武功, 马盼, 等. 基于 REOF 方法的海南岛人体舒适度特征分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(5): 838-846.
- Lin Y Y, Wang S G, Ma P, et al. Characteristics of human body comfortable degree in Hainan island based on REOF method[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(5): 838-846.
- [24] 张钦, 唐海萍, 崔凤琪, 等. 基于标准化降水蒸散指数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): 7110-7123.
- Zhang Q, Tang H P, Cui F Q, et al. SPEI-based analysis of drought characteristics and trends in Hulun buir grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7110-7123.
- [25] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 398-409.
- Xu H J, Yang T B. Spatial-temporal variations of vegetation activities and its responses to climatic factors in the Qaidam basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 398-409.
- [26] 程增辉, 陆宝宏, 王慧凤, 等. 山东地区气候要素变化特征分析及预测[J]. 水电能源科学, 2017(5): 10-14.
- Cheng Z H, Lu B H, Wang H F, et al. Analysis and prediction of change characteristics of climate factors in Shandong[J]. Water Resources and Power, 2017(5): 10-14.