DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.03

# 1961-2020年沂蒙山区极端降水时空变化特征

时延锋[1], 李福孟[2], 王志峰[1], 李炳旭[1], 张志斌[1], 李福林[3]
(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 济南城建集团有限公司,
山东 济南 250000; 3. 山东省水利科学研究院,山东 济南 250014)

**摘 要**: 基于1961-2020年20个国家级气象站日降水数据,通过选取9个极端降水指数,利用5 a滑动平均法、Mann-Kendall法和累积距平法、Morlet小波变换法、泰森多边形法及克里金空间插值等方法,分析了研究区极端降水的时空变化特征。结果表明:研究区1 d最大降水量、5 d最大降水量和降水强度呈上升趋势,大雨日数、年降水量、强降水量、极强降水量、连续干旱日数及连续湿润日数呈不显著下降趋势;年降水量与大雨日数的突变情况类似,1980年后下降趋势明显,降水强度在1998年发生突变,突变之后变为增强趋势;各极端降水指数基本存在20 a左右的第一主周期;空间分布上,除连续干旱日数与降水强度外,其他7个指数空间分布相似,基本呈现从东南向西北减少的分布格局,连续干旱日数整体呈现从东到西递减的趋势,降水强度整体呈现南高北低的趋势;1980-2000年为降水异常年份多发时段,1964、2003和2020年为降水量典型异常偏高年份。研究结果可为沂蒙山区水资源规划、防灾减灾等提供理论和数据支撑。

**关键词**: 极端降水; 极端降水指数; 时空变化特征; 沂蒙山区
**中图分类号**:P426.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2022)05-0017-010

# Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation in Yimeng Mountain Area from 1961-2020

**SHI Yanfeng**[1], **LI Fumeng**[2], **WANG Zhifeng**[1], **LI Bingxu**[1], **ZHANG Zhibin**[1], **LI Fulin**[3]
(1. *School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan* 250101, *China*;
2. *Jinan Urban Construction Group Co., Ltd., Jinan* 250000, *China*; 3. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan* 250014, *China*)

**Abstract**: Based on the daily precipitation data from 20 national meteorological stations in Yimeng Mountain Area (from 1961 to 2020), nine extreme precipitation indices were selected to analyze the spatiotemporal variations of extreme precipitation with the methods of 5-year sliding average, Mann-Kendall test, cumulative anomaly, Morlet wavelet transform, Tyson polygon and Kriging interpolation. The results showed that the Rx1day, Rx5day and SDⅡ showed a increasing trend, whereas the Rr25, PRCRTOT, R95P, R99P, CDD and CWD showed a non-significant downward trend. The abrupt changes of PRCRTOT and Rr25 were similar, and their downward trend was obvious after 1980. The SDⅡ had undergone a significant abrupt change in 1998, which presented an upward trend after the abrupt change. All the extreme precipitation indices basically had the first main cycle of 20 a. In spatial distributions, except for the CDD and SDⅡ, the spatial distribution of the other 7 indices was similar, which showed a decreasing pattern from southeast to northwest. The CDD decreased from east to west, and the SDⅡ showed a trend of higher in south and lower in north. The anomalous years often occurred during 1980 to 2000, and the precipitation was typically abnormally high in 1964, 2003 and 2020. The research results can provide a theoretical and statistical support for water resources planning, disaster prevention and reduction in Yimeng Mountain Area.

**收稿日期**:2021-01-24; **修回日期**:2022-06-23
**基金项目**:国家自然科学基金项目(42007176); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QD25)
**作者简介**:时延锋(1990-),男,山东日照人,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为土壤-地下水污染与控制、水文与水资源。
**通讯作者**:李福林(1967-),男,山东郯城人,博士,研究员,硕士生导师,研究方向为水资源与水环境。

**Key words**: extreme precipitation; extreme precipitation index; spatiotemporal variation characteristics; Yimeng Mountain Area

## 1 研究背景

在全球变暖的大背景之下,极端气候事件发生的频率越来越高,高温、洪水、干旱等极端气候不仅破坏了生态环境,而且阻碍了经济社会的发展,同时也对人民群众的生命及财产安全造成了严重的威胁[1-4]。其中极端降水为极端气候的重要表现,已得到国内外的广泛关注[5-7]。

近年来,国内外许多学者对极端降水事件开展了研究。Griffiths 等[8]通过对美国东北部极端降水的研究发现,其 20 世纪极端降水指数总体表现为持续上升态势。Abbasnia 等[9]研究发现土耳其马尔马拉地区的气温呈现明显的升高趋势,大部分地区的强降水有所增加,且降水时间短,降水强度大。李双双等[10]研究发现,秦岭 - 淮河南北的降水强度增加,突发性强降水增多,极端降水事件与 ENSO(El Niño - Southern Oscillation)有着密切的关系。甘露等[11]研究指出 1964 - 2016 年四川省极端降水事件发生频率降低,但强度却在增加,空间上由东南向西北逐渐减少,其中地形因子是影响计算降水事件频率分布的重要因素。张菁等[12]发现陕甘宁三河源区的极端降水明显增多,空间差异显著,南部地区多于北部地区。董旭光等[13]、李胜利等[14]、苏敏等[15]均对近 50 年来山东省的极端降水从不同角度进行了分析,发现山东省年降水日数和强度存在着明显的年代际振荡,且呈带状分布,由东南向西北逐渐减少,进入 21 世纪以来大雨和暴雨降水量和降水日数比率增大;不同时段(长时段 1961 - 2013 年,短时段 1991 - 2013 年)各极端降水指数变化趋势不同,短时段变幅更大且变化显著的站点更多;极端强降水量、持续干期和降水强度呈不显著增加的趋势,且各极端降水指数空间差异明显。

由于地形、环境等因素的影响,不同区域的极端气候尤其是极端降水会有明显不同,因此面向区域尺度的极端降水研究是非常必要的。沂蒙山区地处鲁中南山地丘陵区,地貌复杂,以山地、丘陵为主。同时该地区气候变化多样,极端气候增多,尤其是极端降水,加重了该区域的水土流失,甚至容易引发山洪、泥石流等灾害,对人类的生存产生严重影响。然而却鲜有学者针对沂蒙山区的极端降水事件开展研究,故本研究基于沂蒙山区 1961 - 2020 年 20 个国家级气象站的日降水数据,选取了 9 个极端降水指数,利用 5 a 滑动平均法、Mann - Kendall 法和累积距平法、Morlet 小波变换法、泰森多边形及克里金空间插值法对沂蒙山区极端降水的时空变化特征进行了分析,研究结果有助于在全球变暖的大背景下更好地了解沂蒙山区的极端降水,以期为该区域应对未来气候变化、解决水资源短缺问题、防灾减灾等提供理论和数据支撑。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

沂蒙山区位于山东省的中南部(116°34′ ~ 119°39′E, 34°26′ ~ 36°23′N),属于北方土石山区,总面积约 $3.26 \times 10^4$ km$^2$,涉及 27 个县(市、区)。研究区为半湿润暖温带季风气候,降水比较丰富,年均降水量为 700 ~ 900 mm,多集中在汛期 6 - 9 月份,年平均气温为 12 ~ 14 ℃。土壤类型有棕壤、褐土、潮土等,地貌复杂,以山地、丘陵为主。自然植被以暖温带落叶阔叶林为主,主要有侧柏、油松、刺槐等。沂蒙山区地形高程及本研究选取的气象站分布见图 1。

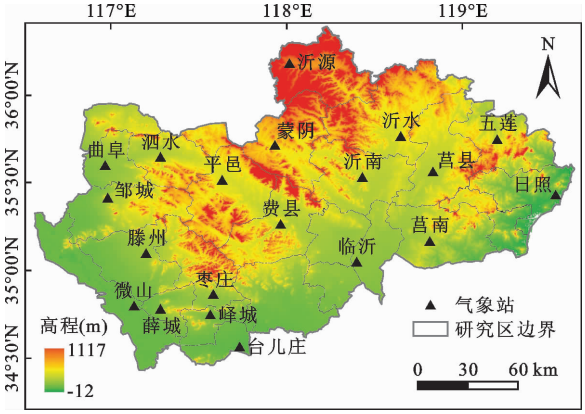



图 1 沂蒙山区地形高程及气象站分布

### 2.2 数据来源

本研究所选取的 20 个国家气象站 1961 - 2020 年逐日降水数据均来源于国家气象数据共享平台(http://data.cma.cn),站点分布均匀,数据质量较好。各气象站的基本信息见表 1。

### 2.3 研究方法

(1)极端降水指数的选取。我国通常将日降水量介于 25 ~ 50 mm 和大于 50 mm 的降水事件定义为大雨和暴雨。但由于不同区域的年降水量差异较大,不能完全按照统一标准进行简单定义。因此,本研究对于极端降水的定义是在参考了世界气象组织

提出的极端降水指数的基础上,利用百分位法进行定义的。同时基于研究区现状,参考国内外相关文献[16-20],选取了 9 个极端降水指数来进行分析,各极端降水指数及其定义见表 2。

**表 1　选取的 20 个国家气象站基本信息**

| 气象站名称 | 地理位置 | | 降雨量特征值/mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 经度/(°) | 纬度/(°) | 均值 | 最大值 | 最小值 | 标准差 |
| 临沂 | 118.40 | 35.05 | 865.58 | 1363.60 | 529.50 | 181.29 |
| 泗水 | 117.28 | 35.65 | 727.68 | 1106.80 | 410.20 | 162.32 |
| 沂源 | 118.17 | 36.18 | 716.36 | 1616.70 | 394.50 | 202.64 |
| 蒙阴 | 117.93 | 35.72 | 789.32 | 1282.00 | 410.20 | 214.42 |
| 平邑 | 117.63 | 35.52 | 759.68 | 1236.40 | 392.40 | 189.20 |
| 费县 | 117.97 | 35.27 | 831.11 | 1246.90 | 407.00 | 185.93 |
| 沂水 | 118.65 | 35.77 | 756.22 | 1141.90 | 377.70 | 192.48 |
| 沂南 | 118.43 | 35.53 | 796.31 | 1460.20 | 452.80 | 223.79 |
| 莒南 | 118.82 | 35.17 | 844.64 | 1353.40 | 481.00 | 197.87 |
| 微山 | 117.13 | 34.80 | 774.38 | 1392.90 | 464.50 | 180.55 |
| 薛城 | 117.28 | 34.78 | 782.89 | 1392.50 | 470.60 | 189.28 |
| 峄城 | 117.57 | 34.75 | 834.46 | 1292.20 | 471.80 | 173.56 |
| 枣庄 | 117.58 | 34.87 | 847.32 | 1326.00 | 508.20 | 185.64 |
| 台儿庄 | 117.73 | 34.57 | 808.91 | 1377.30 | 417.50 | 208.58 |
| 滕州 | 117.20 | 35.10 | 731.37 | 1245.80 | 367.00 | 195.52 |
| 曲阜 | 116.97 | 35.60 | 708.70 | 1310.05 | 415.60 | 181.44 |
| 邹城 | 116.98 | 35.42 | 722.00 | 1263.80 | 268.50 | 197.05 |
| 莒县 | 118.08 | 35.57 | 791.41 | 1354.30 | 446.60 | 213.76 |
| 五莲 | 119.20 | 35.75 | 786.26 | 1257.30 | 466.30 | 196.81 |
| 日照 | 119.53 | 35.43 | 829.48 | 1426.20 | 504.50 | 233.74 |

**表 2　极端降水指数名称及定义**

| 指数类型 | 指数名称 | 缩写 | 定义 | 单位 |
|---|---|---|---|---|
| 绝对指数 | 大雨日数 | Rr25 | 日降水量≥25 mm 的日数 | d |
| | 年降水量 | PRCRTOT | 年内日降水量≥0.1 mm 的降水量之和 | mm |
| 阈值指数 | 1 d 最大降水量 | Rx1day | 年内单日最大降水量 | mm |
| | 5 d 最大降水量 | Rx5day | 年内连续 5 日最大降水量 | mm |
| | 强降水量 | R95P | 年内日降水量高于 95% 阈值降水量之和 | mm |
| | 极强降水量 | R99P | 年内日降水量高于 99% 阈值降水量之和 | mm |
| 持续指数 | 连续干旱日数 | CDD | 年内日降水量持续 <1 mm 日数的最大值 | d |
| | 连续湿润日数 | CWD | 年内日降水量持续≥1 mm 日数的最大值 | d |
| 强度指数 | 降水强度 | SDⅡ | 年内降水量与日降水量≥1 mm 的日数之比 | mm/d |

(2)时空变化特征分析。在时间序列变化上,本研究采用 5 a 滑动平均法来分析各极端降水指数的年际变化;利用 Mann – Kendall 法[21-23]和累积距平法[24-25]两种方法来进行突变检验,以探明各极端降水指数发生突变的情况;基于 Morlet 小波变换法分析各极端降水指数的周期变化,通过 MATLAB 和 Excel 分别计算小波系数和小波系数的实部,最后利用 Surfer9 软件绘制出小波等值线图进行分析,并通过小波方差图中丰、枯的交替来判断各极端降水指数周期的变化规律[26-28]。

空间变化上,主要利用泰森多边形法[29]和空间插值法[30-31]来进行分析。泰森多边形法主要是用来计算研究区范围内的平均降雨量。空间插值法包括反距离加权平均插值法(inverse distance weight, IDW)、趋势面法、样条函数法、克里金法(Kriging)等方法,本文主要利用克里金插值法来进行空间变化特征的分析。

(3)年降水量异常年份判定。将年降水量距平除以标准差,若该比值≥1 或≤ -1,即为异常偏高或偏低;若该比值≥2 或≤ -2,即为典型异常偏高或偏低。结合极端降水指数综合表现,确定研究区的极端降水异常年份[32]。

## 3 结果与分析

### 3.1 极端降水指数时间变化特征

研究区各极端降水指数随时间的变化趋势如图 2 和表 3 所示。由图 2 和表 3 可知,除了降水强度( $P$ <0.05)、5 d 最大降水量( $P$ <0.05)和 1 d 最大降水量( $P$ >0.05)呈上升趋势外,大雨日数、年降水量、强降水量、极强降水量、连续干旱日数及连续湿润日数均呈下降趋势,但下降趋势不明显。其中,年降水量、强降水量和极强降水量通过 0.05 水平的显著性检验;大雨日数、连续干旱日数和连续湿润日数未通过 0.05 水平的显著性检验。从 5 a 滑动平均来看,大雨日数、年降水量、强降水量变化趋势相似,均在 20 世纪 70 年代和 21 世纪初出现偏高的情况,即在时间序列上出现双峰型变化,表明年降水量主要受大雨日数和强降水量影响;1 d 最大降水量、5 d 最大降水量和极强降水量在 20 世纪 70 年代出现峰值,90 年代后变化平稳,近两年又出现上升趋势;极强降水量经历了 20 世纪 60 - 70 年代初先下降后上升的变化,80 年代后波动变化平缓。连续干旱日数和连续湿润日数在研究时段内变化平稳,连续干旱日数基本保持在 44 ~ 46 d/a,连续湿润日数基本保持在 4 ~ 5 d/a;降水强度呈波动上升趋势,但基本保持在 9 ~ 10 mm/d。

综上分析,研究区年降水量和极端降水事件呈不显著减少趋势,但 2010 年之后,大雨日数、强降水量和极强降水量有增大的趋势,随着降水强度的增大,极端降水的发生概率也相应增大。随着全球气候变暖和水循环加剧,局部地区强对流天气的增多可能导致了沂蒙山区极端降水的增多、增强。

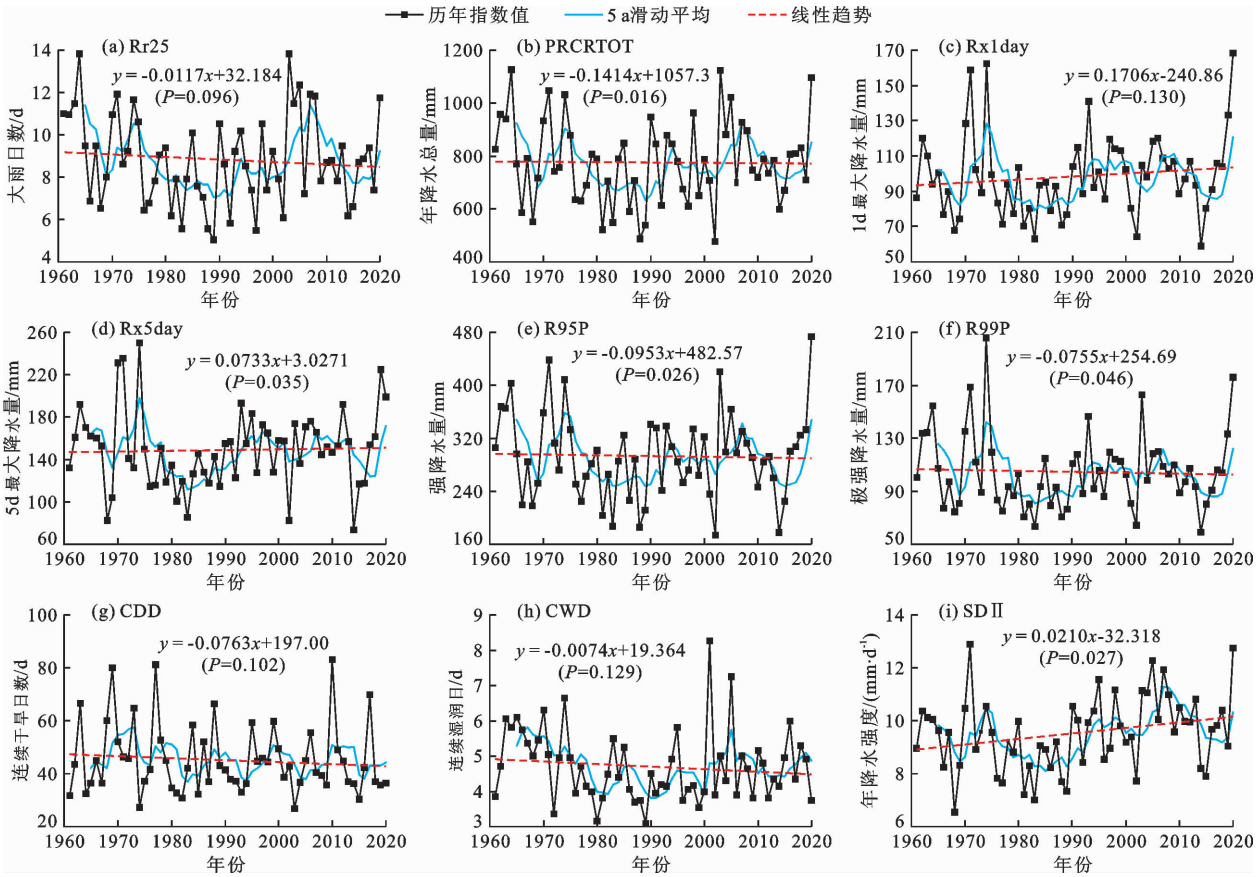



图 2 1961 - 2020 年沂蒙山区各极端降水指数年际变化趋势

表 3　极端降水各指数变化趋势及速率

| 指数 | 变化趋势 | 变化速率 |
|---|---|---|
| Rr25/(d·(10a)$^{-1}$) | 减少 | 0.117 |
| PRCRTOT/(mm·(10a)$^{-1}$) | 减少 | 1.414 |
| Rx1day/(d·(10a)$^{-1}$) | 增大 | 1.706 |
| Rx5day/(d·(10a)$^{-1}$) | 增大 | 0.733 |
| R95P/(mm·(10a)$^{-1}$) | 减小 | 0.953 |
| R99P/(mm·(10a)$^{-1}$) | 减小 | 0.755 |
| CDD/(d·(10a)$^{-1}$) | 减少 | 0.763 |
| CWD/(d·(10a)$^{-1}$) | 减少 | 0.074 |
| SDⅡ/(mm·(10a)$^{-1}$) | 增大 | 0.210 |

### 3.2　极端降水指数突变分析

借助 MATLAB2018b 绘制 M – K 曲线图,并结合累积距平法进行研究区极端降水指数的突变分析,结果如图 3、4 所示。

综合分析图 3、4 可知,大雨日数 *UB* 和 *UF* 曲线在 1962、1963 和 1965 年出现 3 个突变点,且突变点位于置信区间内,*UF* 曲线整体位于 0 值以下,表明大雨日数处于缓慢减少的阶段,且 *UF* 曲线在 1980 年后超过 0.05 信度线,表明 1980 年后大雨日数下降趋势明显,结合累积距平曲线可以看出,1975 年之后大雨日数整体呈下降趋势,这与 M – K 突变检验结果一致。年降水量突变情况与大雨日数类似。同理,1 d 最大降水量在 1990 年之后发生过突变,但突变之后 *UF* 曲线没有超过 0.05 信度线,表明突变不明显,*UF* 曲线在 1997 年之前基本位于 0 值以下,1997 年之后位于 0 值以上,表明 1 日最大降水量在 1997 年之前基本呈下降趋势,1997 年之后呈上升趋势。5 d 最大降水量突变情况与 1 日最大降水量突变情况类似。连续干旱日数在 2010 年后出现 3 个突变点,且突变点位于置信区间内,*UF* 曲线未超过 0.05 信度线,表明连续干旱日数突变不明显。降水强度在 1998 年发生突变,突变之后变为上升趋势,根据累积距平曲线也可看出,降水强度经历了先减少后增加的过程。

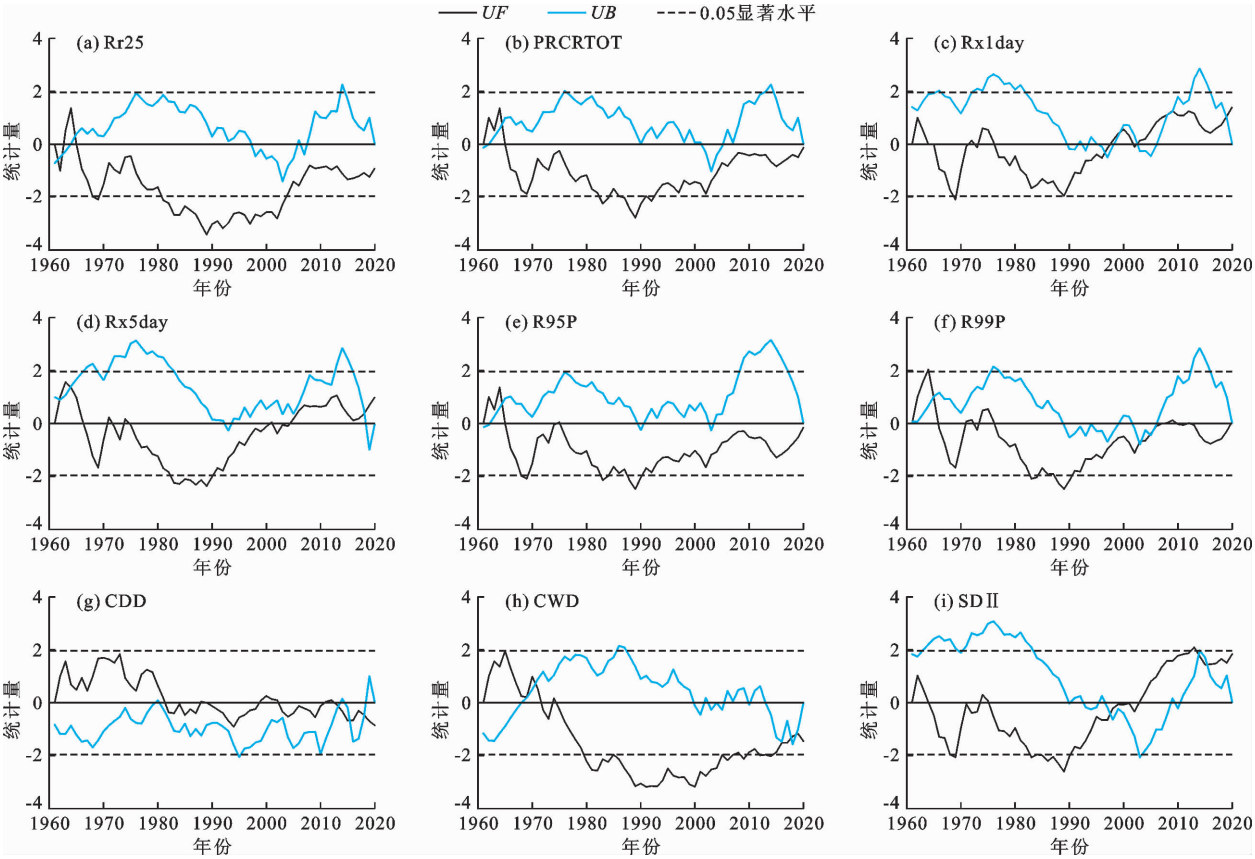



图 3　1961 – 2020 年沂蒙山区各极端降水指数 M – K 曲线

### 3.3　极端降水指数周期分析

研究区极端降水指数小波周期变换及小波方差结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,除了大雨日数、1 d 最大降水量、连续干旱日数和连续湿润日数 4 个指标存在 3 个主周期外,其余指标均存在 2 个主周期。年降水量、强降水量、极强降水量和降水强度周

期变化一致,20 a 的振荡周期最显著,为第一主周期,具有全域性且在整个研究期内呈现 4 个“丰 – 枯”转换期,其次为 15 a 的振荡周期明显,为第二主周期,周期变化在 2000 年以前表现较为强烈。1 d 最大降水量和 5 d 最大降水量均是在 18 a 的振荡周期最显著,且具有全域性;其次为 10 a 的振荡周期,1 d 最大降水量在 6 a 为不显著的第三周期。连续干旱日数在 15 a 尺度的周期变化为第一主周期,具有全域性且在整个研究期内呈现 7 个“丰 – 枯”转换期,8 a 为第二主周期,3 a 为不显著的第三周期,周期变化在 1985 年以后表现较为强烈。28 a 尺度的周期变化为连续湿润日数第一主周期,其次为 18 a 的振荡周期明显,为第二主周期,周期变化在 1970 – 1995 年较为强烈,8 a 的周期变化短暂且具有局域性,为第三主周期。大雨日数的第一主周期是 22 a,第二和第三主周期分别是 30 和 7 a。

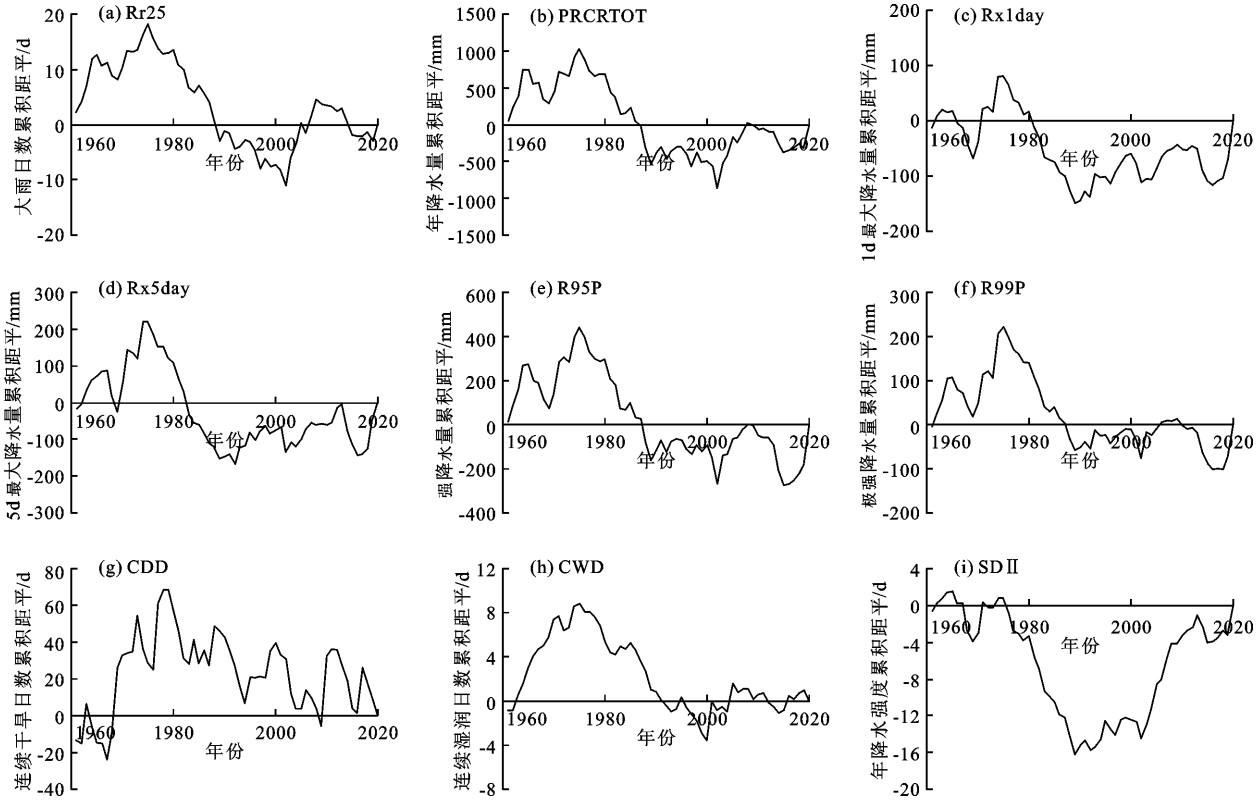



图 4 1961 – 2020 年沂蒙山区各极端降水指数累积距平曲线

### 3.4 极端降水指数空间分布规律

研究区 1961 – 2020 年极端降水指数的空间分布规律如图 6 所示。由图 6 可以看出,除了连续干旱日数与降水强度外,其他 7 个指数均是由东南向西北逐渐减少。区域内大雨日数高值区在临沂附近(9.8 d),低值区在沂源附近(7.9 d),80% 站点的大雨日数多年平均值为 8.0 ~ 9.5 d,其中,有 8 个站点大雨日数多年平均值大于 9 d。年降水量高值区在临沂附近(855.55 mm),低值区在曲阜附近(699.95 mm)。1 d 最大降水量高值区在临沂附近(108.86 mm),低值区在沂源附近(86.45 mm),且 75% 的站点 1 d 最大降水量多年平均值在 90 ~ 105 mm 之间。5 d 最大降水量高值区在临沂附近(165.76 mm),低值区在沂源附近(136.81 mm),且 90% 的站点 5 d 最大降水量多年平均值在 138 ~ 160 mm 之间。强降水量高值区在临沂附近(336.04 mm),低值区在曲阜附近(255.96 mm),且 75% 的站点强降水量多年平均值在 275 ~ 320 mm 之间。极强降水量高值区在临沂附近(129.68 mm),低值区在沂源附近(85.96 mm),且 80% 的站点强降水量多年平均值在 90 ~ 105 mm 之间。连续湿润日数高值区在临沂附近(5.3 d),低值区在平邑附近(4.4 d)。

连续干旱日数整体呈现从东到西递减的趋势,高值区在沂源附近(47.2 d),低值区在五莲附近(42.67 d)。降水强度整体呈现南高北低的趋势,各站点降水强度多年平均值基本在 9 ~ 10 mm/d 之间,高值区在峄城附近(10.19 mm/d),低值区在沂源附近(8.66 mm/d)。

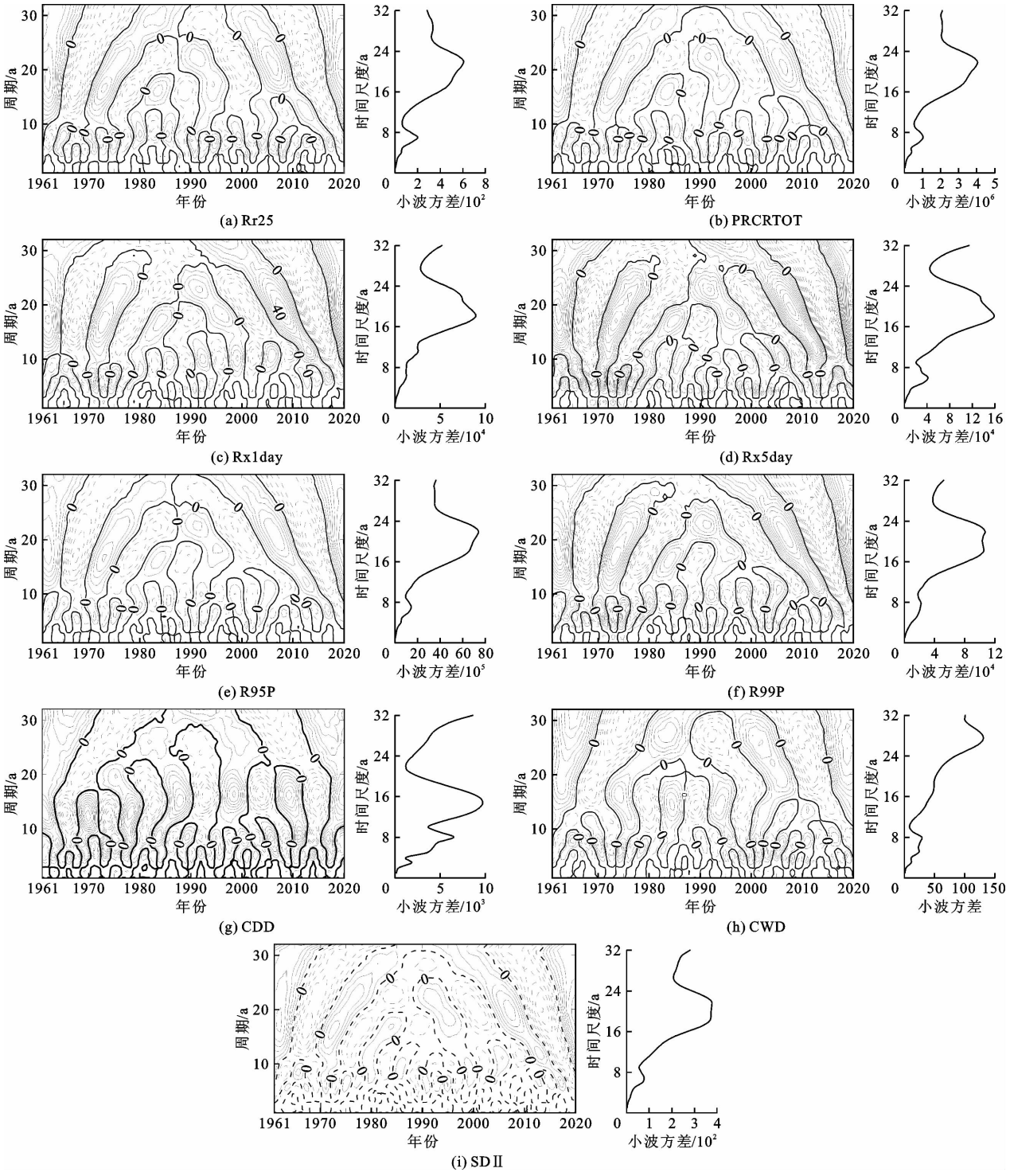



**图 5　1961 – 2020 年沂蒙山区各极端降水指数小波变换及方差**

### 3.5　降水异常年份检测

根据年降水量异常年份判定方法,结合极端降水各指数的年际变化情况,确定研究区 1961 – 2020 年极端降水异常年份,结果如图 7 及表 4 所示。1980 – 2000 年间为异常年份多发时段,近一半年份为异常偏低。除年降水量外,其他几个极端降水指数也在不同方面揭示了降水异常年份。大雨日数、1 d最大降水量以及强降水量和年降水量的典型异常偏高年份均出现在 1964、2003、2020 年。除了连续干旱日数在 2003 年达到最低值以外,其他 7 个指数的最低值均在年降水总量异常偏低年份范围内。

一般来说,降水异常年份容易发生极端降水或极端干旱,但是,降水正常年份也可能发生极端气候事件。例如,2018 年 6 月 25 日起的强降水导致山

东淄博、潍坊、泰安、日照、临沂、滨州等地遭受不同程度的洪涝灾害。据山东省水文局统计,6 月 25 日至 26 日下午 2 点,山东全省平均降水量为 77 mm,最大降水量出现在临沂市沂水县辉泉雨量站,达到 333 mm。但通过检测发现 2018 年为正常年份,这表明在研究极端降水事件时要综合考虑多种因素,某次极端降水事件的发生可能受极端天气影响,预测难度大,可预报性低。

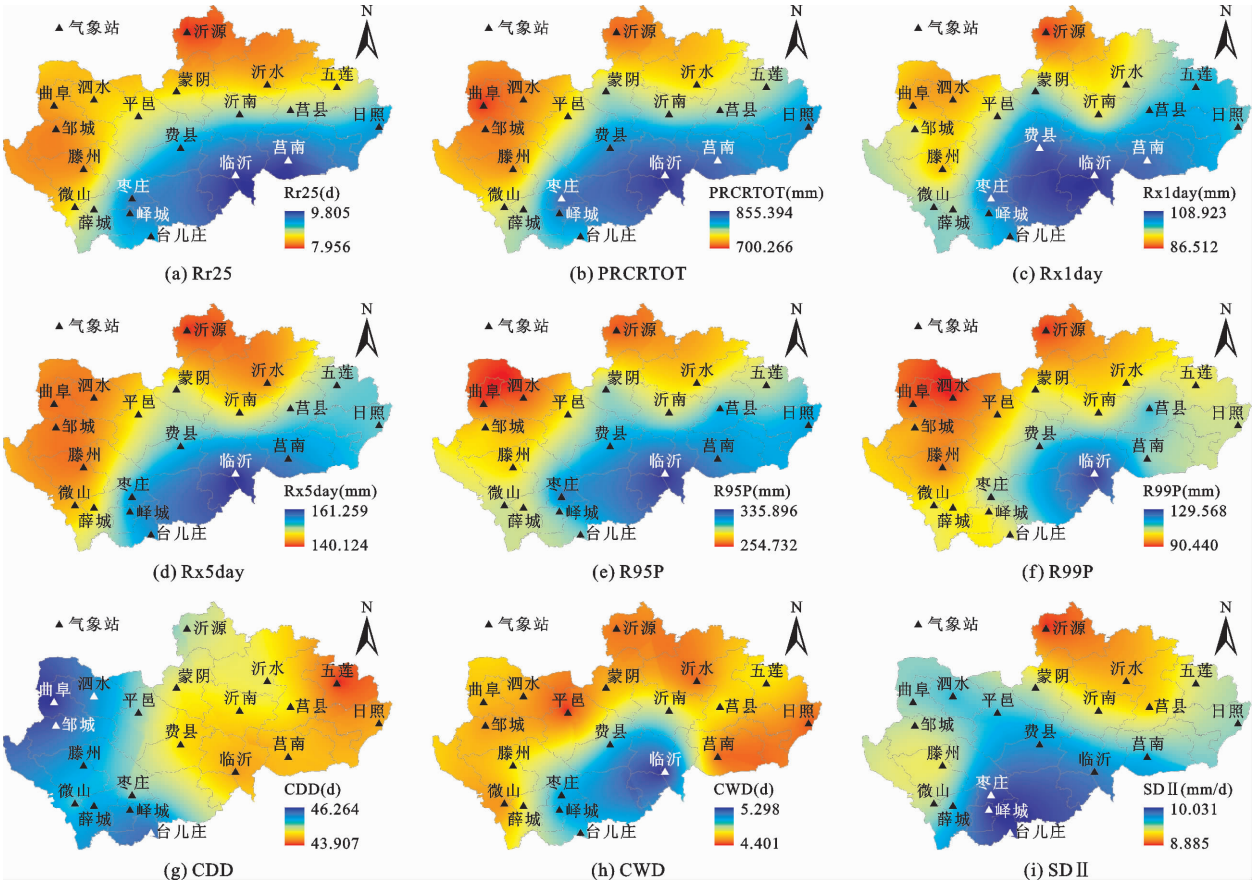



图 6 1961 – 2020 年沂蒙山区各极端降水指数平均值空间分布特征图

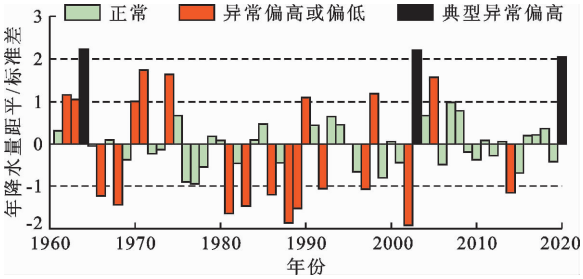



图 7 1961 – 2020 年沂蒙山区降水异常年份检测

表 4 1961 – 2020 年研究区年降水量异常值出现年份统计表

| 年降水量特征 | 年份 |
|---|---|
| 异常偏低(–2 < 距平/标准差≤ –1) | 1966,1968,1981,1983,1986,1988,1989,1992,1996,2002,2014 |
| 异常偏高(1≤距平/标准差 <2) | 1962,1963,1970,1971,1974,1990,1998,2005 |
| 典型异常偏高(距平/标准差≥2) | 1964,2003,2020 |

## 4 讨 论

由于近年来极端气候事件频发,国内外专家学者越来越重视对极端气候事件时空分布等方面的研究,并取得了大量的研究成果。本文通过对沂蒙山区 9 个极端降水指数的时间变化趋势、突变、周期及空间分布特征的研究,得出沂蒙山区 1961 – 2020 年的极端降水变化不显著,具体表现为 1 d 最大降水量、5 d 最大降水量和降水强度呈现增加的变化趋势,年降水量、大雨日数、强降水量、持续湿润日数呈现下降的变化趋势,这与李胜利等[14]、苏敏等[15]对山东省极端降水指数变化的研究结论基本一致,表明沂蒙山区极端降水变化基本符合山东省极端降水的整体变化特征。降水强度的增加会加剧沂蒙山区的水土流失情况,因此沂蒙山区仍需重视水土保持的相关工作。

极端降水事件由于降水强度大、时段集中,会引起山洪、滑坡、泥石流、城市严重内涝等灾害,给人民的生命安全及财产带来严重威胁。因此急需研究区域尺度的极端降水时空变化特征,该研究对区域合理安排生产、提高防灾减灾能力具有重要的意义。

## 5 结　论

本研究基于 20 个国家气象站 1961 – 2020 年日降水数据,利用 9 个极端降水指数,运用 5 年滑动平均法、Mann – Kendall 法和累积距平法、Morlet 小波变换法、泰森多边形法及克里金空间插值等方法,从时间和空间两个角度,分析了沂蒙山区极端降水的变化特征,得出以下主要结论:

(1)研究区 1 d 最大降水量、5 d 最大降水量和降水强度呈上升趋势,大雨日数、年降水量、强降水量、极强降水量、连续干旱日数及连续湿润日数呈下降趋势,但下降趋势均不明显。整体来说,研究区年降水量及极端降水事件呈不显著减少趋势,但 2010 年之后,大雨日数、强降水量和极强降水量有增加趋势。

(2)Mann – Kendall 突变法与累积距平法的检验结果一致,年降水量与大雨日数均是在 1980 年后下降趋势明显,降水强度在 1998 年发生突变,突变之后变为上升趋势。极端降水主要存在 3 个主周期,即 18 ~ 20、10 ~ 15 和 5 ~ 8 a,震荡强度由强到弱。

(3)空间分布上,除连续干旱日数与降水强度外,其他 7 个指数空间分布相似,基本呈现从东南向西北减少的分布格局;连续干旱日数整体呈现从东到西递减的趋势,降水强度整体呈现南高北低的趋势。

(4)1980 – 2000 年间为异常年份多发时段,近一半年份为异常偏低。大雨日数、1 d 最大降水量以及强降水量与年降水量一样,典型异常偏高年份均出现在 1964、2003、2020 年。

**参考文献:**


[1] 王国强,姜基春,焦 峰. 延安市安塞区极端降水变化特征[J]. 应用生态学报,2021,32(4):1417 – 1423.

[2] LIAN Lishu, XU Shujing, LI Zhifu, et al. Spatial-temporal variation of extreme precipitation events in Northewst China during 1961 – 2010 [J]. Meteorological and Environment Research, 2014, 5(1):12 – 19 + 23.

[3] 邓 鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报( 自然科学版),2020,48(1):39 – 45.

[4] 孙 鹏,肖名忠,张 强,等. 水文气象极值事件研究进展[J]. 武汉大学学报(理学版),2018,64(1):28 – 36.

[5] 邹 磊,夏 军,张 印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(5):1264 – 1274.

[6] 陈 冰,陆卫华,宋祖钦,等. 茂名地区极端降水时空分布特征分析[J]. 气象研究与应用,2018,39(1):6 – 10.

[7] EGGERT B, BERG P, HAERTER J O, et al. Temporal and spatial scaling impacts on extreme precipitation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(2):2157 – 2196.

[8] GRIFFITHS M L, BRADLEY R S. Variations of twentieth-century temperature and precipitation extreme indicators in the northeast United States[J]. Journal of Climate,2007,20(21):5401 – 5417.

[9] ABBASNIA M, TOROS H. Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: A case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey [J]. Pure and Applied Geophysics,2018,175:3861 – 3873.

[10] 李双双,杨赛霓,刘宪锋,等. 1960 – 2013 年秦岭 – 淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展,2015,34 (3):354 – 363.

[11] 甘 露,刘 睿,冀 琴,等. 四川省极端降水事件时空演变特征[J]. 山地学报,2021,39(1):10 – 24.

[12] 张 菁,张 珂,王 晟,等. 陕甘宁三河源区 1971 – 2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):288 – 294.

[13] 董旭光,顾伟宗,孟祥新,等. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报,2014,69(5):661 – 671.

[14] 李胜利,巩在武,石振彬. 近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. 水土保持研究,2016,23(4):120 – 127.

[15] 苏 敏,岳大鹏,赵景波,等. 山东省近 55 年来极端降水的时空变化与灾害效应研究[J]. 江西农业学报,2020,32(7):90 – 98.

[16] 董钊煜,彭 涛,董晓华,等. 1960 – 2016 年三峡库区极端降水事件时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):93 – 101.

[17] TONG Siqin, LI Xiangqian, ZHANG Jiquan, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960 – 2017[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 75 – 89.

[18] CHENG Qingping, GAN Lu, ZUO Xiaoan, et al. Statistical analyses of spatial and temporal variabilities in total, daytime, and nighttime precipitation indices and of extreme dry/wet association with large-scale circulations of Southwest China, 1961 – 2016 [J]. Atmospheric Research, 2019, 219: 166 – 182.

[19] 刘裕辉,刘惠英,卢怡诗. 赣江上游章水流域极端降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2): 65 – 73 + 80.

[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): 138 – 146.

[21] 曾学梅,丁文荣. 云南高原岩溶区极端降水变化规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):28 - 35.
[22] HALLEY J M, KUGIUMTZIS D. Nonparametric testing of variability and trend in some climatic records[J]. Climatic Change, 2011, 109(3 - 4): 549 - 568.
[23] 徐 晶,徐征和,李 伟,等. 济南市 1970 - 2016 年降雨侵蚀力时空变化[J]. 山地学报,2018,36(3):391 - 400.
[24] 吕乐婷,韩月驰,高晓琴. 汤河流域降水径流变化趋势分析[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版),2020,43(3):372 - 380.
[25] 谢贤胜,王 升,闫 妍,等. 广西西江流域近 50 年气温和降水变化趋势及突变分析[J]. 水力发电,2020,46(12):19 - 25 + 83.
[26] TAN Xuezhi, GAN T Y, SHAO Dongguo. Wavelet analysis of precipitation extremes over Canadian ecoregions and teleconnections to large-scale climate anomalies[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2016, 121(24): 469 - 486.
[27] 邹 磊,余江游,王飞宇,等. 渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J]. 干旱区研究,2021,38(3):764 - 774.
[28] 吴舒祺,赵文吉,杨 阳,等. 基于小波变换的长江中下游地区极端降水与大气环流响应关系研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(4):67 - 76.
[29] 龙胤慧,廖梓龙. 基于泰森多边形法的庆阳市面雨量计算[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2012,29(3):64 - 67.
[30] 张孟丹,余钟波,谷黄河,等. 无定河流域降水量空间插值方法比较研究[J]. 人民黄河,2021,43(4):30 - 37 + 99.
[31] 莫跃爽,索惠英,焦树林,等. 喀斯特地区降水量空间插值方法对比 - 以贵州省为例[J]. 水土保持研究,2021,28(1):164 - 170.
[32] 徐晓明,张雪芹. 1961 - 2019 年深圳市极端降水变化[J]. 自然灾害学报,2021,30(3):43 - 51.

(上接第 16 页)

[11] 李景保,吴文嘉,徐 志,等. 长江中游荆南三口河系径流演变特征及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(9):1456 - 1465.
[12] 张欧阳,熊 文,丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江,2010,41(1):1 - 5 + 78.
[13] 何 征,万荣荣,戴 雪,等. 近 30 年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应[J]. 湖泊科学,2015,27(6):991 - 996.
[14] 张洪波,曹 巍,张双虎,等. 人类活动对洞庭湖区荆南三河径流变化的定量影响[J]. 地球科学与环境学报,2018,40(1):91 - 100.
[15] 许继军,陈 进,常福宣. 控制性水利工程对长江中下游水资源影响与对策[J]. 人民长江,2014,45(7):11 - 17 + 76.
[16] YAN Peng, HE Guojin, WANG Guizhou, et al. Surface water changes in Dongting Lake from 1975 to 2019 based on multisource remote-sensing images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1827.
[17] 代 稳,张美竹,王金凤,等. 水系连通功能变异下荆南三口流域径流特征[J]. 水土保持研究,2021,28(1):380 - 386.
[18] 张 瑞. 水系连通变异下长江荆南三口地区旱涝演变特征及驱动因素分析[D]. 长沙:湖南师范大学,2019.
[19] 姜 瑶,徐宗学,王 静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报,2020,51(7):845 - 857.
[20] ZHANG Jinghong, WEI Fangqiang, LIU Shuzhen, et al. Possible effect of ENSO on annual sediment discharge of debris flows in the Jiangjia Ravine based on Morlet wavelet transforms[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(3): 267 - 274.
[21] 张冬冬,戴明龙,李妍清,等. 1956 - 2020 年荆江三口径流变化特征及水库补水效果[J]. 湖泊科学,2022,34(3):945 - 957.
[22] 朱玲玲,许全喜,戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响[J]. 水科学进展,2016,27(6):822 - 831.
[23] 李凯轩,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区三口水系生态基流研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(8):19 - 24.