

# 1970—2019 年济南市极端降水事件时空变化特征

赵芹蕊<sup>1</sup>, 徐立荣<sup>1</sup>, 时延锋<sup>2</sup>, 徐征和<sup>1</sup>, 徐 晶<sup>1</sup>, 许功伟<sup>1</sup>

(1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 252000; 2. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 济南 250101)

**摘 要:** 为了研究济南市极端降水事件时空变化特征, 采用线性趋势、Mann-Kendall 突变分析、小波分析等方法, 基于济南市 1970—2019 年 49 个雨量站 50 a 的逐日降水资料, 选用 12 个极端降水指数进行研究。结果表明: 年降水量 (PRCRTOT) 呈显著增加趋势 ( $p < 0.05$ ), 增加速率为 31.04 mm/10 a; 连续干旱日数 (CDD) 呈大幅下降趋势 ( $p < 0.05$ ), 下降速率为 16.51 d/10 a, 雨日数 (RD)、极端降水日数 (R95)、极端降水总量 (R95P) 呈明显上升趋势 ( $p < 0.05$ ), 年降水强度呈下降趋势 ( $p < 0.05$ ), 其余指数呈不显著增加趋势; 研究区雨日数、极端降水日数、极端降水总量、连续干旱日数及年降水量发生明显突变, 其他指数突变不明显; 在周期变化上, 多数指数存在 22~27 a, 17~17 a, 7~10 a, 4~5 a 的主振荡周期; 从空间分布看, 极端降水指数的空间差异明显, 大雨日数、1 日最大降雨量、5 日最大降雨量及年降水量高值区基本集中在原济南市中心城区、东南部山区和莱芜附近, 低值区集中在北部郊区。总体而言, 济南市极端降水事件频发, 应重视城市排水, 减少内涝风险。

**关键词:** 极端降水; 降水指数; 时空变化; 济南市

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0140-10

## Spatiotemporal Characteristics of Extreme Precipitation in Jinan During 1970—2019

ZHAO Qinrui<sup>1</sup>, XU Lirong<sup>1</sup>, SHI Yanfeng<sup>2</sup>, XU Zhenghe<sup>1</sup>, XU Jing<sup>1</sup>, XU Gongwei<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 252000, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The spatiotemporal variations of extreme precipitation were analyzed for Jinan (from 1970 to 2019) on the basis of 12 extreme precipitation indices derived from daily precipitation data at 49 meteorological stations with the help of linear regression, Mann-Kendall test, continuous wavelet transform and other methods. The main conclusions are as the followings. The annual precipitation (PRCRTOT) showed a significant increasing trend ( $p < 0.05$ ) at a rate of 31.04 mm/decade, while the continuous dry days (CDD) showed a significant decreasing trend ( $p < 0.05$ ) at a rate of 16.51 d/decade. The RD, R95 and R95P showed upward trends ( $p < 0.05$ ), and the SDII exhibited a downward trend ( $p < 0.05$ ), while non-significant increasing trends had been found for the other indices. Significant mutations were detected in the RD, R95, R95P, CDD and PRCRTOT in the study area, while there was no significant mutation in the other extreme precipitation indexes. Most extreme precipitation indexes had four main oscillation periods of 22~27-year, 14~17-year, 7~10-year and 4~5-year. There was great difference for most extreme precipitation indices in their spatial distributions. For example, the Rr25, Rx1day, Rx5day and PRCRTOT were high in the old downtown, the southeast mountainous area of Jinan City and Laiwu City, low in the northern suburbs of the study area. In general, extreme precipitation events occurred frequently in Jinan, so urban drainage should be emphasized to reduce the risk of waterlogging.

**Keywords:** extreme precipitation; precipitation index; temporal and spatial variation; Jinan City

收稿日期: 2021-05-27

修回日期: 2021-07-01

资助项目: 国家自然科学基金 (42007153); 山东省自然科学基金 (ZR2020QE285)

第一作者: 赵芹蕊 (1998—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向为水利工程。E-mail: zhaqinrui0101@163.com

通信作者: 徐晶 (1990—), 女, 山东烟台人, 博士, 讲师, 主要从事水生态与水环境研究。E-mail: stu\_xuj@ujn.edu.cn

近年来,极端降水事件的频率和强度不断增加,已成为全球气候变化及其影响领域的热点问题<sup>[1-2]</sup>。IPCC 调查报告显示,全球气候变暖日趋严重,人类活动与全球气候变暖及极端气候变化存在关联<sup>[3]</sup>。极端气候事件对气候变化的敏感性和重要性均高于气候平均值,对自然系统的威胁也高于气候平均值<sup>[4]</sup>。随着全球气候变暖,年降水量增加的地区极端降水事件普遍也呈增加趋势,有些年降水量减小的地区,极端降水总量及发生频率也在增加<sup>[5]</sup>。目前,极端降水事件已经引起全球范围的关注。国内外学者利用全球各地不同地区降水资料对极端降水事件进行了不同方向的研究。国外学者在美国<sup>[6]</sup>、加拿大<sup>[7]</sup>、泰国<sup>[8]</sup>、日本<sup>[9]</sup>、欧洲<sup>[10]</sup>等不同区域尺度的研究表明不同地区极端降水变化趋势不尽相同。国内有许多学者在省域尺度<sup>[11]</sup>、流域尺度<sup>[12]</sup>、区域尺度<sup>[13]</sup>和全国尺度<sup>[14]</sup>等不同尺度研究极端降水的变化规律,对国内气候变化研究及人类生产生活方面有重要影响。

虽然目前国内对极端降水事件的研究很多,但针对济南市的极端降水研究相对较少,李鹏等<sup>[15]</sup>利用 1972—2016 年 24 个降水站点、6 个极端降水指标以及 1985 年、2000 年、2015 年 3 期 Landsat 遥感影像资料进行分析,站点及极端降水指标相对较少且主要分析研究了济南市雨岛效应及城市化发展对降水量的影响。刘铮瑶等<sup>[16]</sup>利用 1951—2012 年济南市的逐日降水资料分析得出极端降水事件多发生在持续降水中且极端性增强,进入 21 世纪后极端降水事件有明显突变增加趋势。由于济南市汛期(7—8 月)降水集中,在短时间内暴雨易成灾,且南绕丘陵,北环孤山,中心城区地势低洼,南高北低的地势导致汛期雨洪涨猛落缓,高水位持续时间长,若不能及时排出,暴雨在城区周围汇集会短时间内形成强大的雨水径流,在市区北部的低洼地区形成积水,造成城市内涝现象。

城市建设也是引起城市内涝的原因之一<sup>[17]</sup>。城市建设使得中心城区不断扩大,导致城市下垫面发生巨大变化,地面严重硬化,严重影响到济南市地面的渗透性和滞水性,且城市排水系统仍需完善,这些都导致济南市易发生洪涝灾害。且进入 21 世纪以来,济南市洪涝灾害频发,尤其 2007 年“7·18”超强特大暴雨造成惨重的人员及财产损失<sup>[18]</sup>。本文在前人研究基础上,利用 49 个雨量站站点的降水资料对济南市 1970—2019 年 50 a 间的极端降水事件的时空变化进行分析,以期揭示济南市极端降水变化趋势及周期规律,为城市防洪工作提供参考。

## 1 研究区概况

济南(35°59'—37°35'N, 116°02'—117°55'E)地处中国华东地区、山东省中西部、华北平原东南部边缘, 全市总面积 10 244 km<sup>2</sup>。济南市南依泰山, 北跨黄河, 地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上, 地势南高北低。济南市地形特征及 49 个雨量站站点位置分布见图 1。济南市地形可划分 3 带: 北部临黄带, 中部山前平原带, 南部丘陵山区带。济南位于中纬度地带, 由于受太阳辐射、大气环流和地理环境的影响, 属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 一年之中, 在不同季节, 全市处在不同大气环流控制之下, 构成了春暖、夏热、秋爽、冬寒四季变化分明的气候。夏季不仅炎热, 且多降水, 雨热同季。

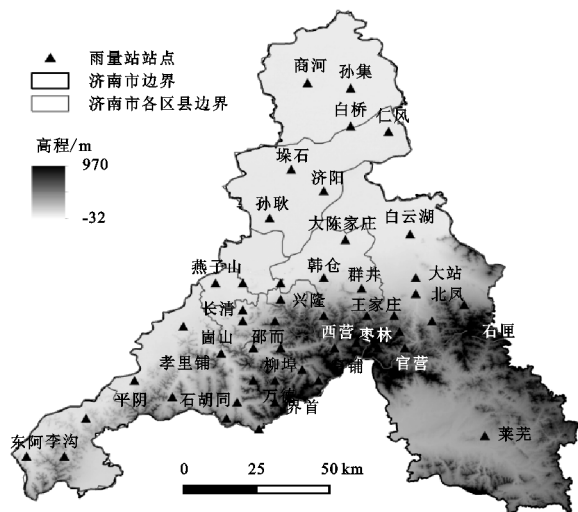


图 1 济南市 DEM 及雨量站站点分布

## 2 数据与方法

## 2.1 数据来源

本文所采用的 1970—2019 年 49 个雨量站站点的逐日降水资料来源于济南市水文局,并经过较为严格的质量控制。由于 2019 年莱芜市并入济南,所以本文选取原济南市 48 个雨量站站点和莱芜雨量站站点进行研究分析。对于部分站点的少数空缺值,采用插值平均方法进行插补。

## 2.2 研究方法

根据《降水量等级(GB/T28592—2012)》,国内将降水划分成4个等级,小雨(0~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨( $\geq 50.0$  mm)。我国将50 mm的日降水量作为极端降水事件的阈值,但由于全国不同地区不能完全按照统一标准进行简单定义,所以本文参考近年来研究极端降水指数的国内外文献<sup>[19-20]</sup>,定义12个极端降水指数(表1),

其中极端降水采用国际上通用的百分位法来计算阈值。具体方法是把 1970—2019 年逐年日降水量按升序排列,将第 95 个百分位的 50 a 平均值作为极端降水事件的阈值<sup>[13]</sup>。各站点 50 a 间日降水数据的描述性统计特征见表 2。运用线性趋势法和 5 a 滑动平

均法<sup>[21-22]</sup>分析极端降水指数时间序列上的变化趋势,Mann-Kendall 突变分析法<sup>[5]</sup>分析突变情况,Morlet 小波分析法<sup>[15]</sup>分析指数的周期规律。最后用 Arc-GIS 10.7 克里金插值法进行空间插值,分析极端降水指数在空间尺度上的分布规律。

表 1 极端降水指数名称及定义

指数名称	缩写	定义	单位
雨日日数	RD	年内日降水量 $\geq 0.1$ mm 的日数	d
大雨日数	Rr25	日降水量 $\geq 25$ mm 的日数	d
1 日最大降雨量	Rx1day	年内单日最大降雨量	mm
5 日最大降雨量	Rx5day	年内连续 5 日最大降雨量	mm
极端降水日数	R95	年内日降水量高于 95% 阈值日数之和	d
极端降水总量	R95P	年内日降水量高于 95% 阈值降水量之和	mm
极端降水强度	RI95	年内日降水量高于 95% 阈值雨日平均水量	mm/d
极端降水比率	R95C	极端降水总量占年降水量的百分比	%
连续干旱日数	CDD	年内日降水量持续 $< 1$ mm 日数最大值	d
连续湿润日数	CWD	年内日降水量持续 $\geq 1$ mm 日数最大值	d
年降水量	PRCRTOT	年内日降水量 $\geq 0.1$ mm 降水量之和	mm
年降水强度	SDII	年内降水量与日降水量 $\geq 1$ mm 日数之比	mm/d

表 2 站点降水量描述性统计特征

						mm
站点	8 位码	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差
商河	31123150	189.4	918.4	499.20	528.39	174.92
孙集	31123250	248.5	667.5	408.00	411.06	110.69
孙耿	31126550	234.8	1049.9	530.95	541.95	188.08
垛石	31126600	209.7	655.7	397.20	421.27	126.53
济阳	31126650	214.3	889.7	529.90	529.76	183.80
白桥	31126700	179.8	690.0	342.40	377.43	132.61
仁风	31126750	250.8	806.1	491.00	513.24	148.64
东阿	41428300	234.6	894.6	514.14	529.96	182.00
李沟	41428350	210.3	1112.1	583.00	568.45	202.57
平阴	41428300	195.5	1094.8	509.45	527.53	181.62
孝里铺	41428450	187.5	723.0	411.05	416.74	151.76
段家店	41428500	217.9	984.4	541.30	562.97	192.11
界首	41428550	268.2	1095.1	541.75	542.25	179.24
石胡同	41428800	255.0	810.7	458.34	484.01	162.12
管马场	41428850	201.8	928.0	488.50	529.83	178.68
万德	41428900	204.5	1030.5	565.22	582.84	208.60
姬家峪	41428950	239.0	854.5	481.50	520.35	177.27
崮山	41429050	295.4	1108.7	625.00	651.26	201.68
长清	41429100	264.2	1006.9	556.45	582.34	194.10
窝铺	41429250	252.6	1185.1	672.69	659.74	229.57
柳埠	41429250	239.3	902.0	489.60	513.82	163.03
南高而	41429300	289.5	1147.2	622.26	644.81	219.06
枣林	41429350	276.5	1108.5	665.20	684.01	211.61
西营	41429400	257.0	813.9	539.00	531.12	141.41
邱家庄	41429500	253.6	913.7	492.85	519.00	152.29
卧虎山水库	41429550	272.0	1066.0	588.01	623.57	200.09

续表 2

站点	8 位码	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差
莱芜	41500101	449.1	1180.8	754.45	763.02	172.99
石匣	41520700	128.0	1232.3	549.75	588.91	197.64
刘家庄	41820900	208.4	914.8	494.00	477.46	176.15
吴家铺	41820950	154.5	857.5	486.50	485.93	155.44
邵而	41821000	272.0	1181.0	612.48	604.01	202.69
东红庙	41821050	224.5	846.2	472.50	517.28	154.43
兴隆	41821100	308.6	1060.0	514.20	552.13	170.47
燕子山	41821150	176.0	921.0	533.00	543.58	180.21
黄台桥	41821200	223.7	1073.1	595.98	603.78	195.74
东梧	41821250	178.9	859.0	516.95	510.04	145.81
韩仓	41821300	120.0	915.1	457.25	451.50	153.36
王家庄	41821350	218.8	1114.3	556.55	576.38	190.75
群井	41821400	237.1	1073.9	565.15	543.36	183.07
大陈家庄	41821450	143.0	869.5	492.88	475.76	160.09
官营	41821550	171.2	882.5	562.02	534.47	170.61
垛庄	41821600	307.1	963.9	612.40	618.91	180.62
三德范	41821650	282.5	874.94	559.85	579.81	169.30
横河	41821750	142.3	966.0	512.00	510.00	165.93
南曹范	41821800	184.5	871.0	462.95	469.73	132.82
北凤	41821850	215.2	805.2	526.40	530.25	161.20
大站	41821900	209.8	803.1	470.90	474.12	161.75
白云湖	41821950	163.7	719.1	446.45	449.62	162.17
闫家峪	41822150	257.4	983.7	547.75	584.61	176.33

3 结果与分析

3.1 极端降水指数时间变化特征

1970—2019 年济南市极端降水指数随时间变化趋势见图 2,各指数变化情况见表 3。由图 2、表 3 可知,除连续干旱日数( $p<0.05$ )和年降水强度( $p<0.05$ )呈下降趋势外,其余 10 个极端降水指数均呈上升趋势。其中,大雨日数( $p>0.05$ )、1 日最大降雨量( $p>0.05$ )、5 日最大降雨量( $p>0.05$ )、极端降水强度( $p>0.05$ )、极端降水比率( $p<0.05$ )、连续湿润日数( $p>0.05$ )6 个指数呈小幅上升趋势;雨日日数( $p<0.05$ )、极端降水日数( $p<0.001$ )、极端降水总量( $p<0.05$ )、年降水量( $p<0.05$ )4 个指数呈明显上升趋势;年降水强度( $p<0.05$ )呈小幅下降趋势;连续干旱日数( $p<0.05$ )呈明显下降趋势。

从 5 a 滑动平均来看,大雨日数和年降水强度在 20 世纪 90 年代后期和 21 世纪初均出现偏高的情况,即在上升过程中出现双峰形的变化;1 日最大降雨量、5 日最大降雨量和极端降水强度变化情况相似,在 20 世纪 90 年代后期均出现峰值,这与刘焕彬等<sup>[23]</sup>的研究结果相似;极端降水比率变化平稳,基本保持在 0.2%~0.4%;连续湿润日数在 1978 年达到峰值后于 2010 年达到第二峰值。雨日日数与极端降水日数在 2010 年后呈明显上

升趋势;极端降水总量和年降水量在 20 世纪 90 年代有明显高值;连续干旱日数在 20 世纪 80 年代末 90 年代初呈明显下降趋势。

总的来说,年降水量以及极端降水事件呈增多趋势,尤其进入 21 世纪,雨日日数与极端降水日数明显上升,且从图 2 中可以看出,年降水量经历了 20 世纪 70—90 年代的枯水段,转变为 20 世纪 90 年代—21 世纪初的丰水段,之后经历一个小的枯水段之后又处于丰水段。这与李鹏等<sup>[15]</sup>利用滑动平均法得到的济南市年降水量的“枯”“丰”年份大体一致。说明济南市的年降水量及极端降水总量呈上升趋势,且近年来由于全球气候变暖以及夏季台风影响,更应该注重与完善城市排水工作,减少城市内涝风险。

3.2 Mann-Kendall 突变分析结果

降水的趋势性分析整个的变化趋势,而对降水的突变性进行分析能够反映出极端降水指数的内部变化特征<sup>[24]</sup>。借助 Matlab2018b 对济南市极端降水指数进行 M-K 突变分析,绘制 M-K 曲线见图 3。由图 3 可知,雨日日数 UB 和 UF 曲线相交于 2008 年,且相交点位于置信区间内,UF 曲线在 2010 年超过信度线,达到 0.05 显著水平,说明雨日日数存在明显突变,突变年份为 2008 年,由一个相对较少期转变为一个相对较多期。同理可知,极端降水日数、连续干旱



日数以及年降水量也发生明显突变,突变年份分别为 2011 年、2008 年、1994 年;极端降水总量的 UB 和 UF 曲线交点太多,且 UF 曲线在 2019 年超过信度线,表明极端降水总量日趋增加为突变现象,在研究期内极端降水总量发生了 4 次突变,突变年份大致为:1997 年、2003 年、2010 年、2015 年;大雨日数、1 日最大降雨量、5 日最大降雨量、极端降水强度、极端

降水比率以及年降水强度的 UB 和 UF 曲线交汇点较多,说明在研究期内发生多次突变,但 UF 曲线没有超过 0.05 信度线,说明这 6 个指数发生了突变,但突变不明显未达到显著水平,连续湿润日数 UB 和 UF 曲线相交于 2010 年,突变后 UF 曲线一直处于上升状态,说明连续湿润日数处于缓慢增加状态,但未达到显著水平,说明突变不明显。

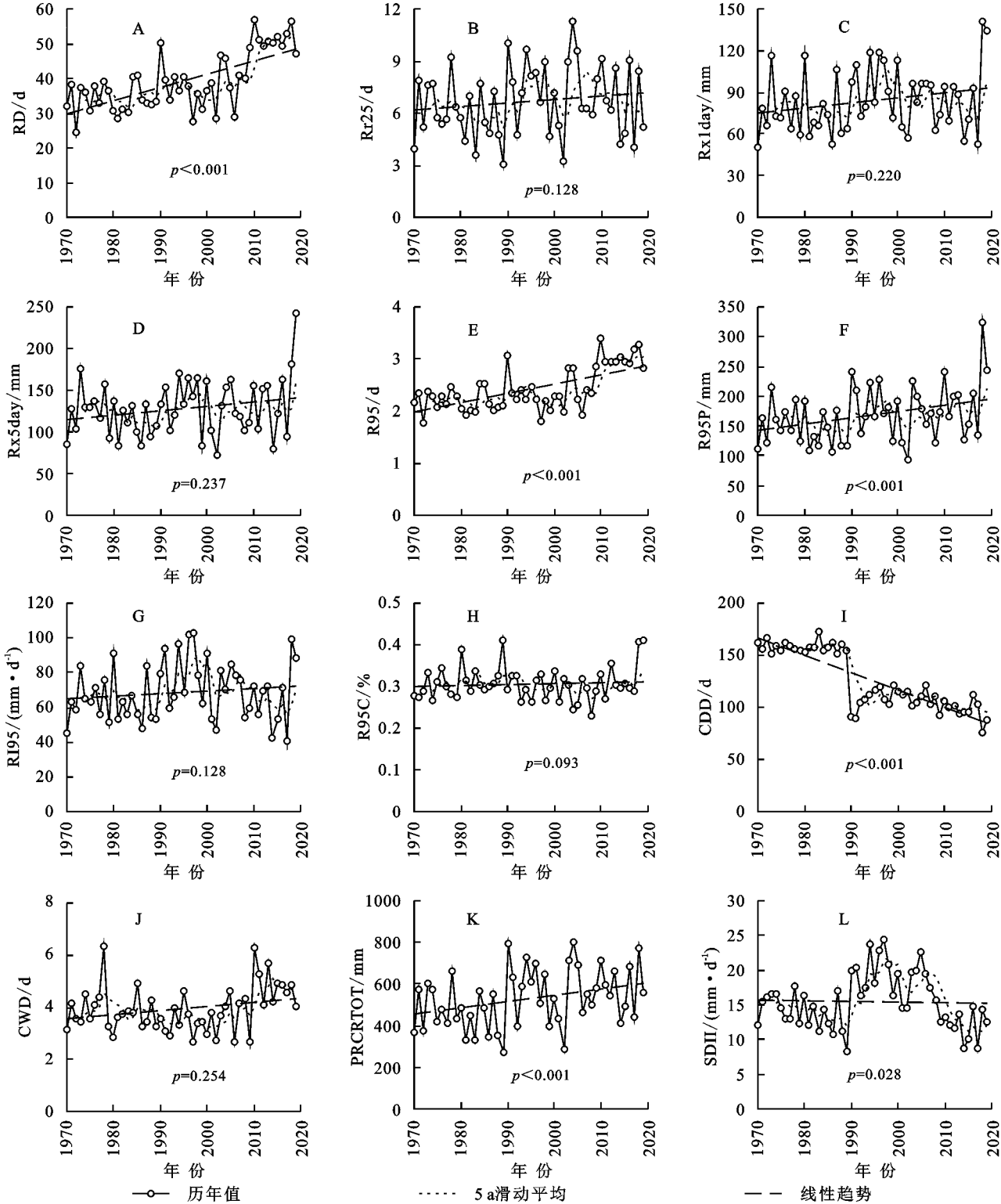


图 2 1970—2019 年济南市极端降水指数时间变化趋势

表 3 1970—2019 年济南市极端降水指数变化情况

指数	变化趋势	变化速率	指数	变化趋势	变化速率
雨日天数	上升	3.83 d/10 a	极端降水强度	上升	1.32 mm/(d · 10 a)
大雨日数	上升	0.19 d/10 a	极端降水比率	上升	0.09%/10 a
1 日最大降雨量	上升	3.53 mm/10 a	连续干旱日数	下降	16.51 d/10 a
5 日最大降雨量	上升	5.33 mm/10 a	连续湿润日数	上升	0.15 d/10 a
极端降水日数	上升	0.18 d/10 a	年降水量	上升	31.04 mm/10 a
极端降水总量	上升	10.74 mm/10 a	年降水强度	下降	0.02 mm/(d · 10 a)

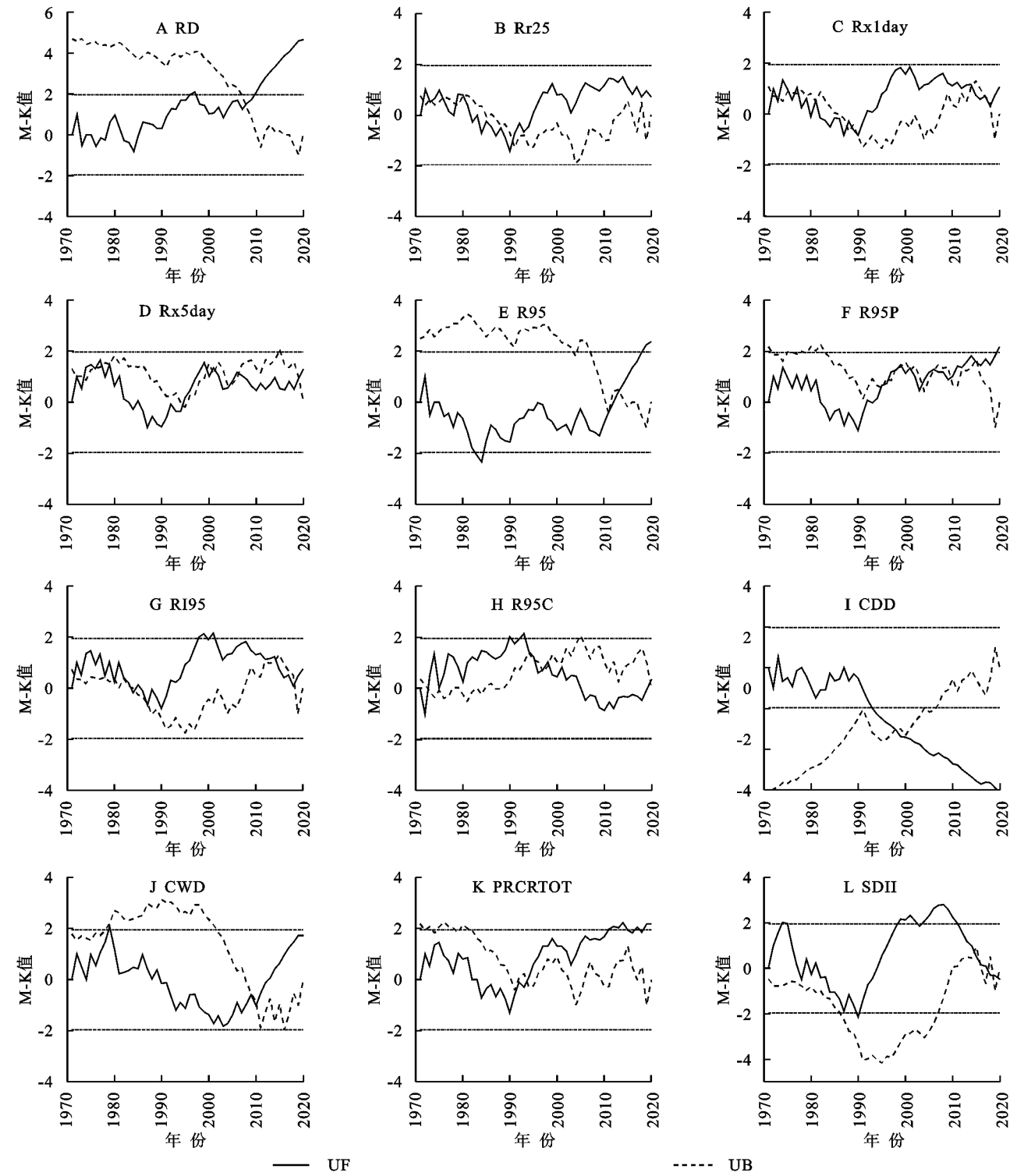


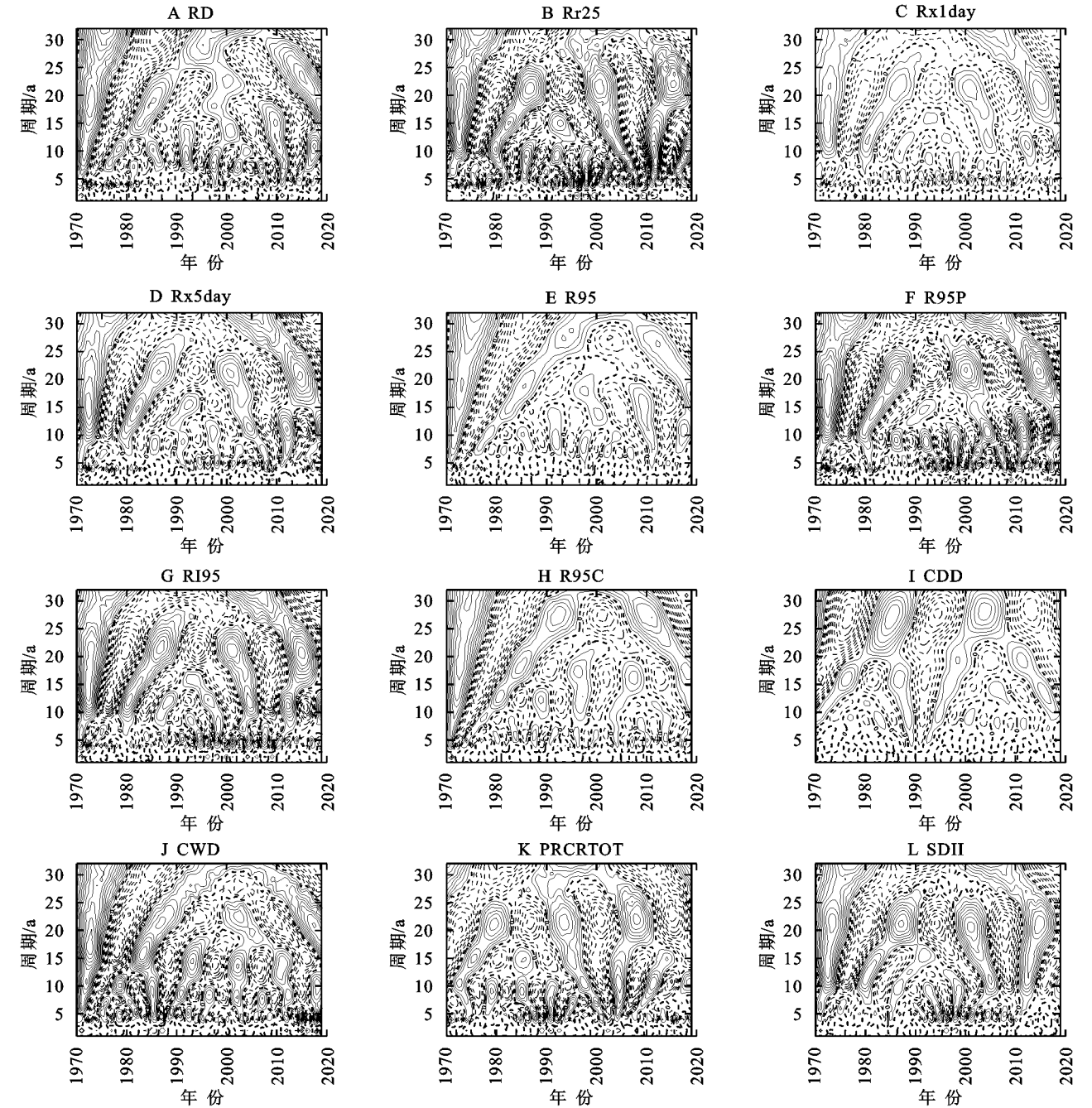
图 3 1970—2019 年济南市极端降水指标 M-K 突变趋势

3.3 极端降水指数周期分析

本文利用小波分析理论,借助 MATLAB2018b 计算小波系数,然后借助 Furfer15 绘制等值线图,研究极端降水指数的 Morlet 连续复小波变换周期的变化规律。济南市 1970—2019 年极端降水指数小波分析图见图 4,实线表示小波系数正值区,代表极端降水指数较大,虚线表示小波系数负值区,代表极端降水指数较小。

从图 4 和表 4 中可以看出,雨日天数、大雨日数、极端降水比率、连续湿润日数、5 日最大降水量和年降水量 6 个指数有 4 个主周期,其余 6 个指数有 3 个主周期。极端降水指数普遍存在 22~27 a,14~17 a,

7~10 a,4~5 a 的主周期。1 日最大降雨量、极端降水总量、极端降水强度、年降水强度的周期变化一致,22 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 7 个丰枯交替的周期性变化,其次为 12 a 的振荡周期明显,为第二主周期,5 a 的周期变化短暂具有局域性,为第三主周期。大雨日数、连续湿润日数、年降水量的周期变化相似,22 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 7 个丰枯交替的周期性变化,其次为 14~15 a 的振荡周期明显,为第二主周期,4~5 a 的周期变化短暂具有局域性,为第三主周期。



注:实线为小波系数正值,虚线为小波系数负值。

图 4 小波系数实部等值线

表 4 1970—2019 年济南市极端降水指数周期变化特征

指数	第一主周期	第二主周期	第三主周期	第四主周期
RD	18	13	7	4
Rr25	22	14	8	4
Rx1day	22	12	5	—
Rx5day	22	14	10	5
R95	27	17	8	—
R95P	22	10	5	—
RI95	22	12	5	—
R95C	27	17	12	5
CDD	27	16	8	—
CWD	22	14	9	4
PRCRTOT	22	15	10	5
SDII	22	12	5	—

3.4 极端降水指数空间变化趋势

统计济南市 1970—2019 年 50 a 间每个站点的极端降水指数的平均值,然后利用 ArcGIS 10.7 克里金插值法进行空间插值,结果见图 5。

济南市雨日日数除了莱芜站数值较大外(110.86 d),整体呈从西北向东南递减趋势,低值地区位于横河、韩仓、官营等地区,雨日日数小于 27 d;大雨日数整体从东南向西北有递减趋势,大雨日数基本都在 5~8 d,有 18 个站点的大雨日数大于 7 d,有 21 个站点的大雨日数在 6~7 d,整体变化不大。1 日最大降雨量和 5 日最大降雨量整体呈从东南向西北递减趋势,1 日最大降雨量基本都在 70~95 mm,低值区在白桥附近(68.85 mm),高值区在石匣附近(105.05 mm)。5 日最大降雨量基本在 110~148 mm,低值区在白桥附近(107.23 mm),高值区在石匣附近(157.74 mm)。

极端降水日数、极端降水总量、极端降水比率变化趋势相似,整体呈从东南向西北递减趋势,极端降水日数基本在 2~3 d,高值区在莱芜(14.9 d)。极端降水总量基本在 124~223 mm,低值区在白桥附近(113.74 mm),高值区在莱芜附近(439.57 mm)。极端降水比率基本在 0.25%~0.33%,高值区在莱芜附近(0.58%)。极端降水强度整体呈从西北向东南递减趋势,极端降水强度基本在 59~80 mm/d,低值区在莱芜附近(32.52 mm/d),高值区在官营(82.30 mm/d)、横河(82.40 mm/d)附近。

连续干旱日数整体呈从西北到东南递减趋势,连续干旱日数基本在 78~161 d,低值区在莱芜附近(48.8 d),高值区在横河(161.18 d)、官营(161.5 d)附近。连续湿润日数整体呈从东南到西北递减趋势,连续湿润日数基本在 3.5~4.5 d,低值区在韩仓附近

(3.32 d),高值区在莱芜附近(4.42 d)。年降水量整体呈从东南到西北递减趋势,年降水量基本在 447~680 mm,低值区在白桥附近(375.81 mm),高值区在莱芜附近(748.48 mm)。年降水强度整体呈从西向东经历先增加后减小的趋势,年降水强度基本在 10~23 mm/d,莱芜站年降水强度为 3.67 mm/d,与其他站点相差较大。

4 讨论

在以往极端降水事件的研究中,大多数学者都是基于极端降水阈值、百分位法设置极端降水指数<sup>[13]</sup>。本文对济南市近 50 a 来极端降水进行分析,对比之前学者对济南市降水的研究,本文利用更多的雨量站站点数据和选取了更多的极端降水指数。但由于莱芜刚并入济南市,莱芜区站点较少,仅有一个,且相对原济南其他区县雨量站站点数量少、密度小,导致结果准确性可能会受一定影响,若后期有莱芜区其他站点数据进行补充,会提高研究的准确性。此外,有学者认为研究气候变化时应注意城市化效应的影响,但是如何剔除人类活动的影响目前没有公认的合理有效的方法<sup>[25]</sup>。

南部山区年降水量相对较大,雨日日数及大雨日数也相对平原地区较多,且多分布暴雨及特大暴雨。这可能是由于南部多山,夏季暖湿气流从东南来,在南部山区受到阻挡,暖湿气流抬升,水汽易凝结形成降水。且南部山区植被覆盖率较低,地形起伏较大,导致水土流失严重,当有暴雨突袭时,不仅容易发生城市内涝,更有可能导致山体滑坡和泥石流。不仅如此,随着城区南扩,城市化进程推进,南部山区面积一再缩小,植被覆盖率降低,地面大面积硬化,不利于水土保持。所以更应该注重南部山区的防洪工作。研究济南市尤其是南部山区的降水特性,对合理利用雨水资源,解决水资源持续性利用问题有指导意义。

5 结论

(1) 近 50 a 来,研究区雨日日数、极端降水日数、极端降水总量、年降水量 4 个指数呈上升趋势,上升速率分别为 3.83 d/10 a,0.18 d/10 a,10.74 mm/10 a,31.04 mm/10 a。大雨日数、1 日最大降雨量、5 日最大降雨量、极端降水强度、极端降水比率、连续湿润日数 6 个指数呈不明显上升趋势,上升速率分别为:0.19 d/10 a,3.53 d/10 a,5.33 d/10 a,0.02 mm/(d·10 a),0.09%/10 a,0.15 d/10 a。年降水强度呈不明显下降



趋势,下降速率为  $0.1\text{ mm}/(\text{d} \cdot 10\text{ a})$ 。连续干旱日数呈明显下降趋势,下降速率为  $16.5\text{ d}/10\text{ a}$ 。且进入 21 世纪后,受全球气候变暖加快以及夏季台风的

影响,世界大范围地区降水量增多,济南也不例外。年降水量的增多主要是由于雨日日数和极端降水总量增多所造成的。

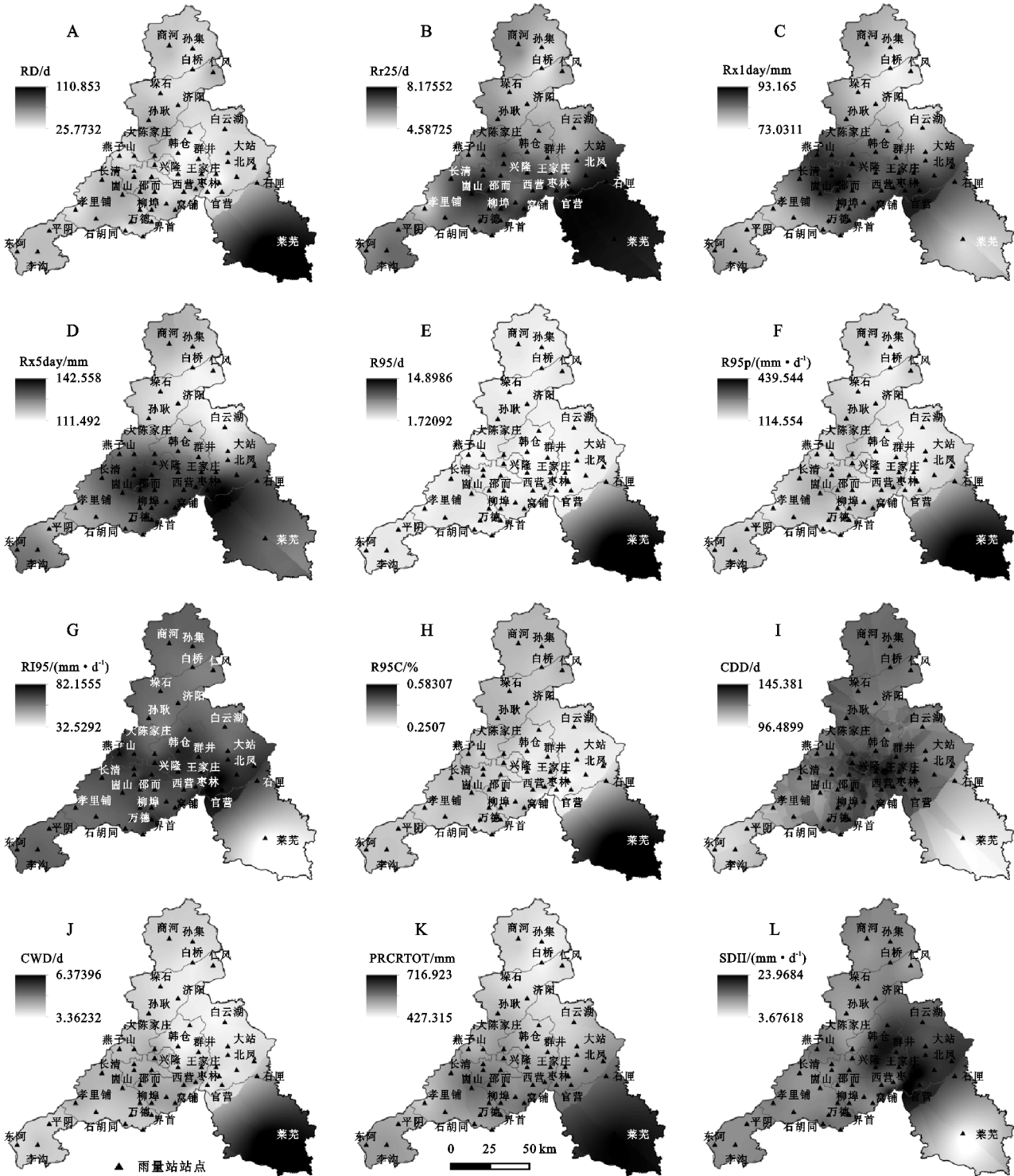


图 5 1970—2019 年济南极端降水指标空间分布特征

(2) 研究区雨日日数、极端降水日数、极端降水总量、连续干旱日数及年降水量 4 个指标发生明显突变。其中,雨日日数和连续干旱日数在 2008 年发生突变,极端降水日数在 2011 年发生突变,极端降水总量存在多个突变年,分别为 1997 年、2003 年、2010 年

和 2015 年,年降水量在 1994 年发生突变。其他极端降水指数或不发生突变或突变不明显不具有统计学意义。通过 M-K 突变分析可以得出未来雨日日数和年降水量将会增多,极端降水事件的发生也会增加。进入 21 世纪后极端降水事件的突发性增强,济南市

的极端降水总量增多,可见城市内涝的风险增加,因此完善城市排水工作,降低城市内涝风险极为重要。

(3) 通过小波分析发现极端降水指数普遍存在22~27 a,14~17 a,7~10 a,4~5 a的振荡周期。雨日日数、大雨日数、极端降水比率、连续湿润日数和年降水量5个指数有4个主周期,其余7个指数有3个主周期。

(4) 在空间上,济南市大雨日数、1日最大降雨量、5日最大降雨量以及年降水量高值区基本集中在原济南市中心城区、南部山区和莱芜附近,低值区集中在东北部平原地区。

#### 参考文献:

- [1] Ribes A, Thao S, Vautard R, et al. Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean[J]. *Climate dynamics*, 2019,52(1):1095-1114.
- [2] Min S K, Zhang X, Zwiers F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes [J]. *Nature*, 2011,470(7334):378-381.
- [3] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. *Climate Change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [4] 秦玉琳,孙照渤,倪东鸿.中国东北夏季极端高温变化特征及其与环流异常的联系[J].*气象与减灾研究*,2012,35(2):7-16.
- [5] 孟清,高翔,白红英,等.1960—2015年秦岭地区极端降水的时空变化特征[J].*水土保持研究*,2019,26(6):171-178,183.
- [6] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998,79(2):231-242.
- [7] Cardell M F, Amengual A, Romero R, et al. Future extremes of temperature and precipitation in Europe derived from a combination of dynamical and statistical approaches[J]. *International Journal of Climatology*, 2020,40(11):4800-4827.
- [8] Choi G, Collins D, Ren G, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955—2007[J]. *International Journal of Climatology*, 2010,29(13):1906-1925.
- [9] Miyajima J, Fujibe F. Climatology of extreme precipitation in Japan for different time scales[J]. *Sola*, 2011,7: 157-160.
- [10] Zolina O, Kapala A, Simmer C, et al. Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: A comparative assessment [J]. *Global and Planetary Change*, 2004,44(1/4):129-161.
- [11] 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.
- [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] 马伟东,刘峰贵,周强,等.1961—2017年青藏高原极端降水特征分析[J].*自然资源学报*,2020,35(12):3039-3050.
- [14] 陈星任,杨岳,何佳男,等.近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(9):2068-2081.
- [15] 李鹏,徐宗学,叶陈雷,等.济南市1972—2016年降水特性[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2021,19(2): 237-245.
- [16] 刘铮瑶,董治宝,殷淑燕,等.济南市极端降水变化特征及趋势分析[J].*地球环境学报*,2013,4(6):1506-1512.
- [17] 姜芊孜,王志芳,李明翰.不透水地表对城市水环境的负面影响及缓解措施[J].*城市问题*,2014,33(11):50-55.
- [18] 刘秋锋,赵建,康慕谊.济南市城市扩展与城市暴雨洪灾[J].*灾害学*,2005,20(4):39-42.
- [19] 刘梦洋,王小军,柯杭,等.甘肃省陇东地区夏季极端降水及典型年环流特征分析[J].*干旱区研究*,2021,38(3):775-784.
- [20] Costa A C, Soares A. Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal[J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009,29(13):1956-1975.
- [21] 封国林,龚志强,支蓉.气候变化检测与诊断技术的若干新进展[J].*气象学报*,2008,66(6):892-905.
- [22] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等.我国横断山区1960—2008年气温和降水时空变化特征[J].*地理学报*,2010,65(5):563-579.
- [23] 刘焕彬,邱粲,王荣.气候变化背景下济南短历时暴雨强度及雨型特征[J].*山东科学*,2021,34(1):121-129.
- [24] 邢贞相,闫丹丹,刘美鑫,等.三江平原近60年降水量时空变异特征分析[J].*农业机械学报*,2015,46(11): 337-344.
- [25] 吴金华,盛芝露,杜加强,等.1956—2017年东北地区气温和降水的时空变化特征[J].*水土保持研究*,2021,28(3):340-347,415.