

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.034.

曾颖婷, 李成, 黄新洲, 等. 近60年福建省极端降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 203-210.

ZENG Yingting, LI Cheng, HUANG Xinzhou, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Extreme Precipitation in Fujian Province in the Last 60 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 203-210.

## 近60年福建省极端降水的时空变化特征

曾颖婷<sup>1</sup>, 李成<sup>2</sup>, 黄新洲<sup>3</sup>, 林辉阳<sup>1</sup>

(1.福建省气象服务中心, 福州 350007; 2.扬州大学 园艺与植物保护学院,  
江苏 扬州 225009; 3.闽侯县预警信息发布中心, 福建 闽侯 350100)

**摘要:** [目的]探究我国东南沿海地区极端降水变化的新特征, 对该地区防灾减灾具有重要意义。[方法]以福建省为例, 基于1960—2019年67个气象站点逐日降水数据, 利用气候倾向率、Mann-Kendall突变检验等方法, 分析了极端降水量(R95P)、极端降水频次(R95D)、极端降水强度(R95I)和极端降水贡献率(R95C)4个极端降水指标的时空变化特征, 并阐明了极端降水指数与大气环流指数的相关性。[结果](1)近60年来福建省R95P、R95D、R95I和R95C呈现出增加趋势, 变化率分别为24.90 mm/10 a、0.34 d/10 a、0.25 (mm/d)/10 a和0.84%/10 a。(2)R95P、R95I和R95C均在1994年以后转为偏多(强)期, 而R95D的突变点出现在1993年, 由降水日数偏少期转变为偏多期。(3)西太平洋副高强度指数、南海副高强度指数和北半球极涡强度指数与极端降水指数之间有显著的相关性( $p < 0.05$ ), 特别是南海副高强度指数对转折后时段的R95D有显著影响。[结论]研究结果对该地区开展极端降水的生态风险评估提供重要参考。

**关键词:** 极端降水; 时空变化; 大气环流指数; 福建省

**中图分类号:** P46

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)03-0203-08

## Spatial and Temporal Characteristics of Extreme Precipitation in Fujian Province in the Last 60 Years.

ZENG Yingting<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, HUANG Xinzhou<sup>3</sup>, LIN Huiyang<sup>1</sup>

(1. Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou 350007, China;  
2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009,  
China; 3. Minhou County Early Warning Information Issue Center, Minhou 350100, China)

**Abstract:** [Objective] It is important for disaster prevention and mitigation to explore the new characteristics of extreme precipitation changes in the southeast coastal region of China. [Methods] Daily precipitation datasets of 67 meteorological stations from 1960 to 2019 were selected, and methods of climate tendency rate and Mann-Kendall test were used to analyze the spatial and temporal variation characteristics of four extreme precipitation indices, including the extreme precipitation (R95P), extreme precipitation frequency (R95D), extreme precipitation intensity (R95I), and extreme precipitation contribution (R95C). Meanwhile, the correlation between extreme precipitation indices and atmospheric circulation indices was also analyzed. [Results] (1) R95P, R95D, R95I and R95C had the increasing trend during the last 60 years, and their change rates were 24.90 mm/decade, 0.34 d/decade, 0.25 (mm/d)/decade and 0.84%/decade, respectively. (2) R95P, R95I, and R95C had abrupt changes around the year 1994, which changed from a relatively low (weak) to a high (strong) period. The mutation of R95D occurred in 1993, changing from a low to high period. (3) There

收稿日期: 2022-02-15

修回日期: 2022-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41801013); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180939); 福建省气象局青年科技专项(2021Q04)

第一作者: 曾颖婷(1990—), 女, 福建漳州人, 工程师, 硕士, 主要从事气候变化影响评估研究。E-mail: 113236039@qq.com

通信作者: 李成(1988—), 男, 江苏南京人, 讲师, 博士, 主要从事地气交换与气候变化研究。E-mail: licheng\_nj@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

was the significant correlation between the South China Sea Subtropical High Intensity Index, West Pacific Subtropical High intensity index, Northern Hemisphere Polar Vortex Intensity Index and extreme precipitation indices ( $p < 0.05$ ). Particularly, the West Pacific Subtropical High has the significant influence on the R95D after the year of 1994. [Conclusion] The results provide a scientific basis for ecological risk assessments of extreme precipitation in Fujian Province under the background of climate change.

**Keywords:** extreme precipitation; spatiotemporal change; atmospheric circulation indices; Fujian Province

IPCC 第六次评估报告显示:与工业革命前的气温记录相比,目前全球平均升温约为  $1.1^{\circ}\text{C}$ ,全球变暖不仅使地表温度不断升高,还使水循环过程不断加快<sup>[1-3]</sup>,极端降水事件也愈发频繁<sup>[4-6]</sup>。由于极端降水事件具有突发性强、不可预见性等特征,它的频繁发生会对水土保持、植被恢复及经济社会可持续发展等产生不利影响<sup>[7]</sup>。因此,研究气候变化背景下极端降水的时空演变规律显得尤为重要。

全球尺度极端降水的研究结果表明,不同区域、不同时空尺度的极端降水变化存在明显差异<sup>[8-10]</sup>。除小部分地区的强降水事件在减少外,其他大部分地区的极端降水事件表现出增多趋势<sup>[11-13]</sup>。就我国而言,它地处东亚地区,地形复杂且横跨多个气候区,使我国极端降水事件的区域性差异更为显著<sup>[14-17]</sup>。其中,长江中下游地区、新疆、青海及青藏高原的极端降水发生强度和发生频次在不断增加<sup>[18-19]</sup>;华南大部分地区的极端降水频次在 1989 年以后表现为增多趋势<sup>[20-21]</sup>;但华北和东北地区的极端降水事件呈减少趋势<sup>[22]</sup>。大气环流是影响降水变化的重要因素之一,西太平洋副热带高压、北极涛动、南极涛动、北大西洋涛动等对我国极端降水变化具有重要影响,但不同地区的影响因素存在差异<sup>[23-24]</sup>。

福建省邻近北回归线,属亚热带海洋性季风气候,受季风环流影响较大,由极端降水引起的灾害性损失日益凸显。如 2016 年 5 月福建三明特大暴雨造成 9.9 万人受灾,直接经济损失达 6.3 亿元。已有一些学者对福建省的降水变化进行了初步研究<sup>[25-26]</sup>,然而以往研究选用的站点数量普遍较少,时间序列较短,使研究结果存在一定的局限性,难以满足气象灾害精细化评估的需求;同时,前人对于该地区极端降水变化影响因素的分析也较少。考虑到极端降水本身具有局地性及非平稳性,基于更多站点、更长时序的降水数据对理解气候变化背景下,极端降水变化的新特征具有重要意义。

为此,本研究选取 1960—2019 年福建省 67 个国家气象站逐日降水数据,采用极端降水量(R95P)、极端降水频次(R95D)、极端降水强度(R95I)和极端降水贡献率(R95C)4 个极端降水指数,分析福建省近

60 年来极端降水的时空变化特征,并探究极端降水指数与大气环流指数的相关关系。研究结果可为区域极端降水的生态风险评估提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据资料

本研究使用的降水资料为 1960—2019 年福建省 67 个国家气象站逐日均一化降水资料,该资料来源于福建省气候中心。站点分布见图 1A。当日降水量  $\geq 0.1 \text{ mm}$  时,记为一个降水日频次。

为理解极端降水指数与大气环流异常因子的相关性<sup>[27-28]</sup>,本研究选取了北极涛动指数(AO)、北大西洋涛动指数(NAO)、北太平洋遥相关型指数(NP)、西太平洋副高强度指数(WPI)、南海副高强度指数(SI)和北半球极涡强度指数(PVI)进行分析,数据由国家气候中心提供。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 极端降水指数的定义** 由于降水极值具有很强的地域差异<sup>[29]</sup>,为了消除地域差异的影响,通过百分位法定义不同站点的极端降水阈值,将各站点的逐日降水数据剔除空值后由小到大排列,取第 95 个百分位值作为该站点的极端降水阈值<sup>[30]</sup>。从频率和强度两个方面,选取了 4 个极端降水指数(R95P, R95D, R95I, R95C),具体信息见表 1。

**1.2.2 回归分析及趋势检验** 采用一元线性回归方法,分析极端降水的变化趋势,公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n(\sum_{i=1}^n i x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:slope 表示降水变化的斜率; $n$  是研究的时间数(年); $x_i$  表示第  $i$  年极端降水值。slope  $> 0$  表示研究区域内极端降水呈上升趋势,反之,呈下降趋势。斜率的大小反映了上升或下降的程度,降水倾向率采用斜率的 10 倍来表示<sup>[31]</sup>。选用 Mann-Kendall(M-K)非参数检验法判定变化趋势的显著性,它不受异常值的干扰,也不需要样本服从特定分布,被广泛应用于气候变化研究中。检验的统计量  $S$  计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

式中: $x_j$  和  $x_i$  为降水序列第  $j$  和第  $i$  个时次的值; $n$  为时间序列长度; $S$  为正态分布,进一步构造  $Z$  指数:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当  $Z$  指数的绝对值大于 1.96 时,表示变化趋势

达到 0.05 显著性水平。

1.2.3 突变检验 采用 M-K 检验法对 4 个极端降水指数时间序列进行突变检验。在 M-K 突变检验中,如果原序列(UF)、反向序列(UB)两条曲线出现交点,且交点在临界直线 $\pm 1.96(\alpha=0.05)$ 之间,则认为序列产生了突变,且这一交点就是突变开始点;反之,则认为没有产生突变。若 UF 值大于 0,表明序列呈上升趋势;UF 值小于 0,则表明呈下降趋势。当 UF 或 UB 超过临界直线时,表明增加或减少趋势显著<sup>[32]</sup>。

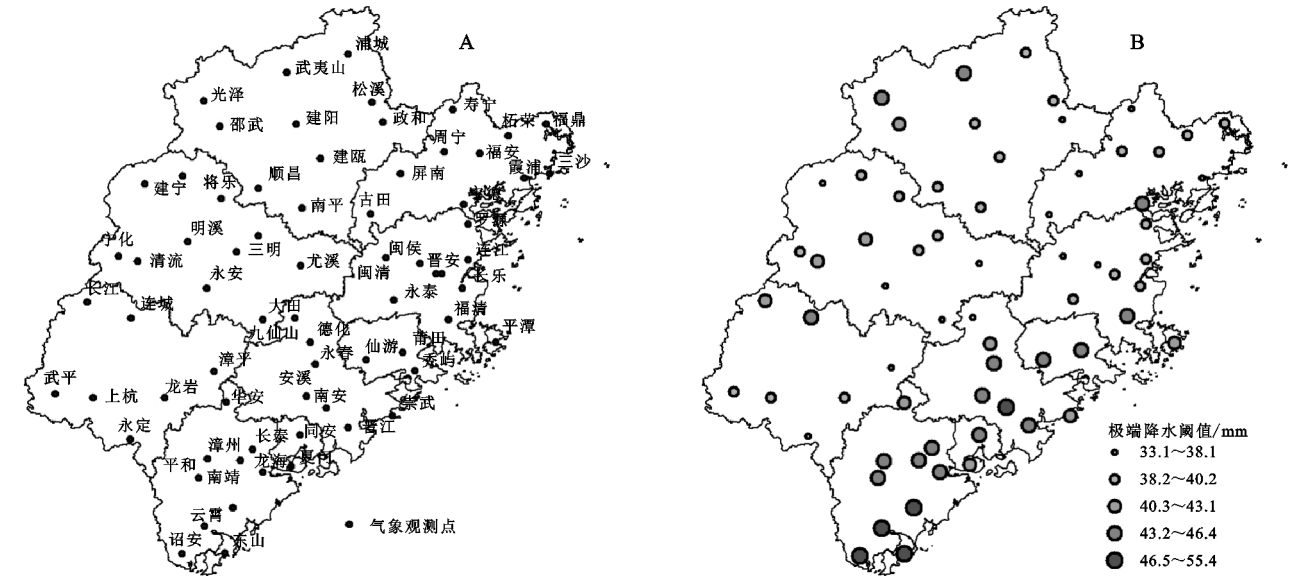


图 1 福建站点分布和阈值分布

表 1 极端降水指数定义

指数名称	英文缩写	定义	单位
极端降水量	R95P	全年日降水量大于第 95 个百分位值的降水总和	mm
极端降水频次	R95D	全年日降水量大于第 95 个百分位值的频次总和	d
极端降水强度	R95I	站点 R95P 与 R95D 的比值	mm/d
极端降水贡献率	R95C	R95P 占全年降水总量的百分比	%

1.2.4 相关分析 利用相关分析探究大气环流对极端降水的影响,计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: $n$  为时间序列长度; $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为变量  $x$  和  $y$  的均值; $r > 0$  表示两变量呈正相关, $r < 0$  表示两变量呈负相关。

2 结果与分析

2.1 极端降水阈值分布

采用百分位法对 1960—2019 年福建省各站点的逐日非零降水日值数据进行计算,得出 67 个站点的极端降水阈值,结果见图 1B。各站点极端降水阈值

为 33.1~55.4 mm,且空间分布上存在较大差异。高值区主要集中于莆田至漳州的沿海地区,极端降水阈值达 46 mm 以上。三明东部、宁德西部及福州西部地区的极端降水阈值较小,大多数站点的极端降水阈值在 38 mm 以下。

2.2 指数均值分布

福建省 R95P 多年均值的空间分布见图 2A。全省 67 个站点年均 R95P 介于 399.8~789.6 mm,它们的空间分布差异较大。其中,高值区主要出现在宁德北部、漳州南部及三明西部,尤以宁德北部山区出现 R95P 高值的站点最为密集,部分站点 R95P 达 600 mm 以上。但在福州西部、三明东部及龙岩东部地区的 R95P 较低(499 mm 以下)。

由图 2B 可知,年均 R95D 介于 5.4~10.9 d 之间。

在空间分布上,它呈现出由西北向东南地区逐渐减少的分布特征,福州中南部到漳州一带的 R95D 相对较小,普遍低于 7 d。而福建西北部地区的 R95D 则较大,其中高值中心主要位于宁德和三明地区,达到 9~10 d。

各站点 R95I 的年均值也存在明显差异,它们的变化范围在 53.93~89.98 mm/d 之间(图 2C)。从空间分布上看,它大致呈现出由沿海向内陆递减的分布特征,这与极端降水阈值的空间分布相似,高值区位于福州到漳州一带的沿海地区,但内陆地区(三明、南平地区)的平均强度相对较弱。由于漳州南部地区的

R95P 较高,但 R95D 较低,导致它的 R95I 相对较大(80 mm/d 以上)。反之,中部地区(南平南部、三明东部、福州西部)R95P 较低,但 R95D 较高,故该地区是 R95I 的低值区。

由图 2D 可知,各站点 R95C 的多年平均值在 28.9%~39.7% 之间。R95C 的高值区主要位于福州东部、漳州南部和龙岩西部地区,达 35% 以上。低值区主要位于南平、三明地区,大多在 30% 以下。虽然 R95P 和 R95D 在中部沿海地区(福州到泉州一带沿海)没有表现出高值水平,但该地区的 R95C 仍相对较高。

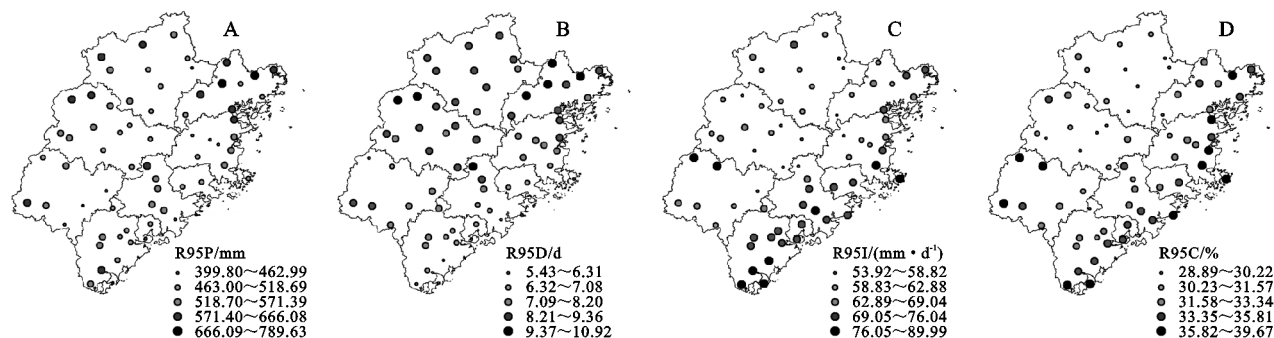


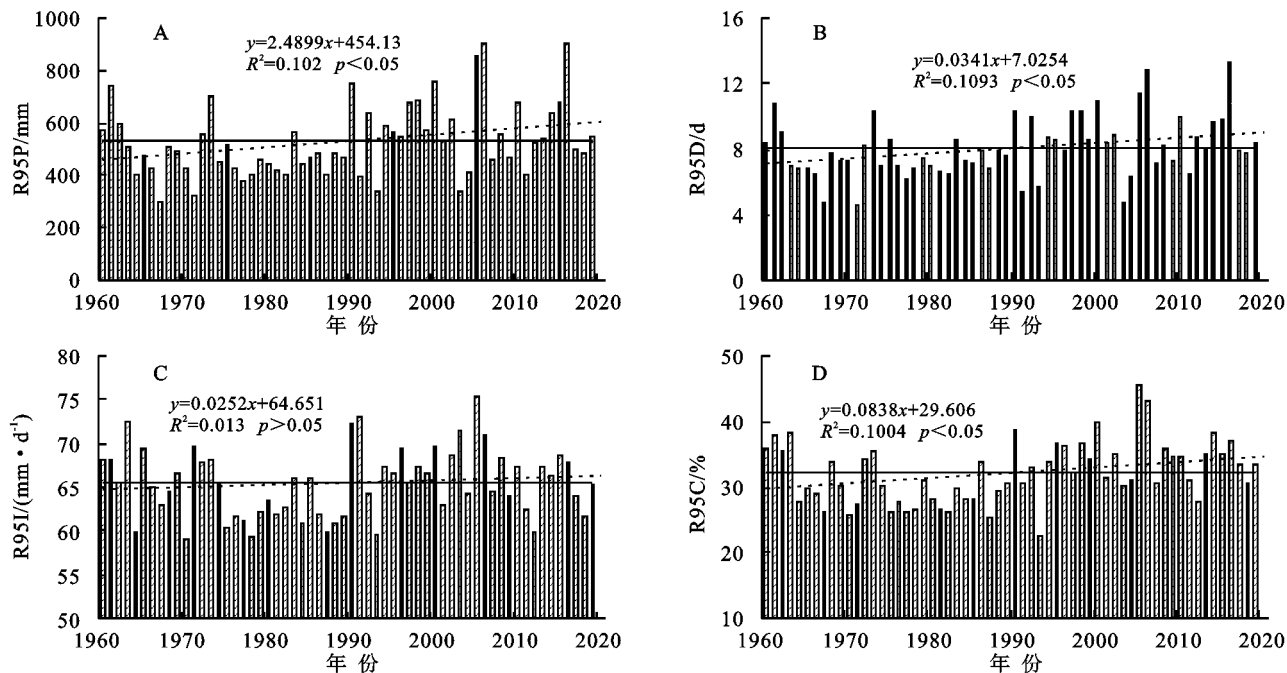
图 2 4 个极端降水指数的空间分布

## 2.3 极端降水的时空变化特征

2.3.1 时间变化特征 基于福建省 67 个气象站点逐日降水量数据,分析了各站点 R95P, R95D, R95I 及 R95C 的年际变化特征,结果见图 3。

由图 3 可知,福建省 R95P 的多年平均值为 530.07 mm。其中最低值出现在 1967 年,仅为 300.59 mm;2006

年的 R95P 值最大,为 906.26 mm。从变化趋势上看,近 60 a 的 R95P 呈显著的上升趋势( $p < 0.05$ ),倾向率为 24.90 mm/10 a。R95D 的多年平均值为 8.07 d,2016 年和 1971 年分别是 R95D 的高值和低值年份,二者相差近 10 d。近 60 a 的 R95D 呈显著增加趋势( $p < 0.05$ ),增加速率为 0.34 d/10 a。



注:实线为多年平均值,虚线为线性趋势线。

图 3 4 个极端降水指数的年际变化

过去 60 年的 R95I 的变化范围在 59.04~75.22 mm/d,各站点年平均 R95I 为 65.42 mm/d。从变化

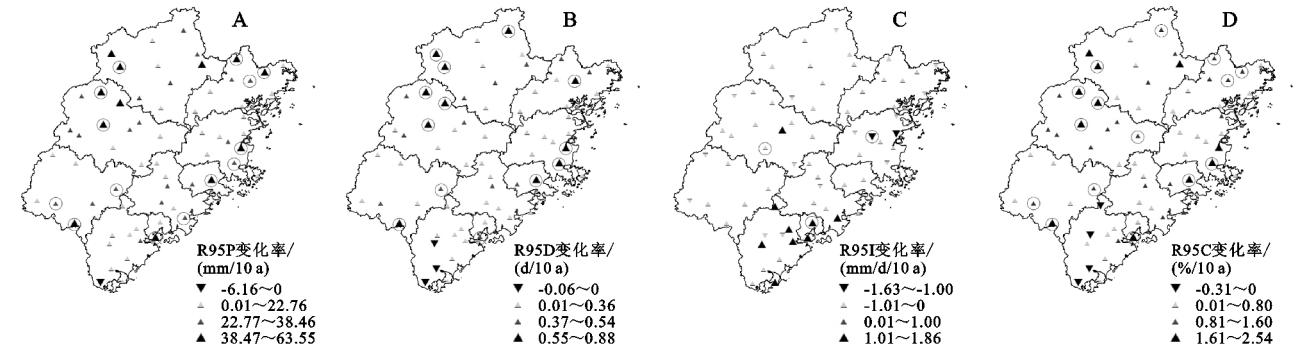
趋势来看,R95I 呈现出微弱的上升趋势( $p > 0.05$ ),倾向率为 0.25(mm/d)/10 a。年平均 R95C 为 32.16%,它在



2005 年出现最大值(45.46%),但在 1993 年最小,为 22.69%。近 60 年 R95C 呈显著增加趋势( $p<0.05$ ),上升速率为 0.84%/10 a。

总体上看,近 60 年福建省 R95P,R95D 及 R95C 均表现出增加趋势,并通过了显著性检验;R95I 也随时间增强,但变化趋势不明显。

2.3.2 空间分布特征 各站点极端降水指数变化趋



注:○表示趋势通过  $\alpha=0.05$  水平显著性检验的站点。

图 4 4 个极端降水指数的趋势变化空间分布特征

表 2 极端降水变化趋势统计

指数	显著增加趋势		显著减小趋势	
	站点个数	占比/%	站点个数	占比/%
R95P	14	20.90	0	0
R95D	13	19.40	0	0
R95I	2	3.00	1	1.49
R95C	15	22.39	0	0

从 R95I 变化趋势的空间分布上看(图 4C),有 51 个站点呈现上升趋势,尤以南部地区的上升趋势最为明显,它的增长率达到 1(mm/d)/10 a 以上;有 16 个站点 R95I 呈现下降趋势,主要分布在福州地区。对于 R95C 而言,全省大部分站点都呈上升趋势,其中 15 个站点通过显著性检验( $p<0.05$ ),高值区主要位于三明、南平及福州沿海地区,达到 0.6%/10 a,但有 4 个站点呈减小趋势,均位于漳州地区(图 4D)。

2.4 极端降水指数的突变检验

采用 M-K 方法分别对 R95P,R95D,R95I,R95C4 个极端降水指数的年际变化序列进行突变检验,结果见图 5。1960—2019 年 4 个极端降水指数均发生了突变,R95P 在 1994 年发生突变(图 5A),即它在 1994 年前为减少趋势,而在 1994 年之后呈现增加趋势,年平均 R95P 也由 484.505 mm 增加至 593.86 mm。R95D 的突变点出现在 1993 年左右(图 5B),由频次偏少期转为偏多期。1960—1993 年平均 R95D 为 7.45 d,但它在 1993 年后的频次增加到 8.75 d。

R95I,R95C 的突变点和 R95P 相似,均发生在 1994 年(图 5C—D)。其中,R95I 在 1994 年之前略小于多年

势的空间分布见图 4。全省超过 95%的站点 R95P 和 R95D 都呈现上升趋势,二者变化趋势的空间分布基本相似。其中,R95P 和 R95D 显著增加的站点个数分别为 14,13 个(表 2),约占总数的 20%左右,主要分布在三明、福州东部和宁德北部地区,分别在 38 mm/10 a 和 0.6 d/10 a 以上。但在漳州地区(如诏安站、平和站、云霄站)R95P 和 R95D 呈下降趋势。

平均值,偏少约 0.86 mm/d,但在 1994 年以后转变为高于平均值 1.23 mm/d。1960—1994 年期间 R95C 的均值为 30.29%,但它在 1994 年之后增加到 34.75%(图 5D)。

2.5 极端降水指数与大气环流指数的相关性分析

通过计算福建省 4 个极端降水指数(R95P,R95D,R95I,R95C)与大气环流指数的相关关系(表 3),发现 AO,WPI,SSI 与 4 个极端降水指数均表现出正相关关系,而 NAO,NP,PVI 与各极端降水指数呈负相关关系。其中,WPI 与 R95P,R95D,R95C 呈现出显著正相关关系( $p<0.05$ );SSI 与 R95P,R95D 也存在显著正相关关系( $p<0.01$ );PVI 与 R95P,R95D,R95C 呈显著负相关关系( $p<0.05$ );其余 3 个大气环流指数与极端降水指数的相关性较弱。综合而言,福建省极端降水受到多种环流因素的共同影响,特别是副高强度指数(SSI 和 WPI)对极端降水的影响最为显著,二者的增强会引起极端降水量增加,降水频次增多。

对比转折点前后时段各极端降水指数与大气环流指数的相关性可知(表 4),在转折点前的时段中,各环流指数与极端降水指数的相关性较弱,均未通过显著性检验。但在转折点后的时段中,AO,NAO,PVI 与 R95P,R95D,R95C 的相关关系由正相关转变为负相关。其中,副高强度指数与极端降水指数的相关性明显增大,尤其是 SSI 与 R95D 呈现出显著正相关关系( $p<0.05$ ),说明 90 年代后极端降水主要受副高强度增强的影响。

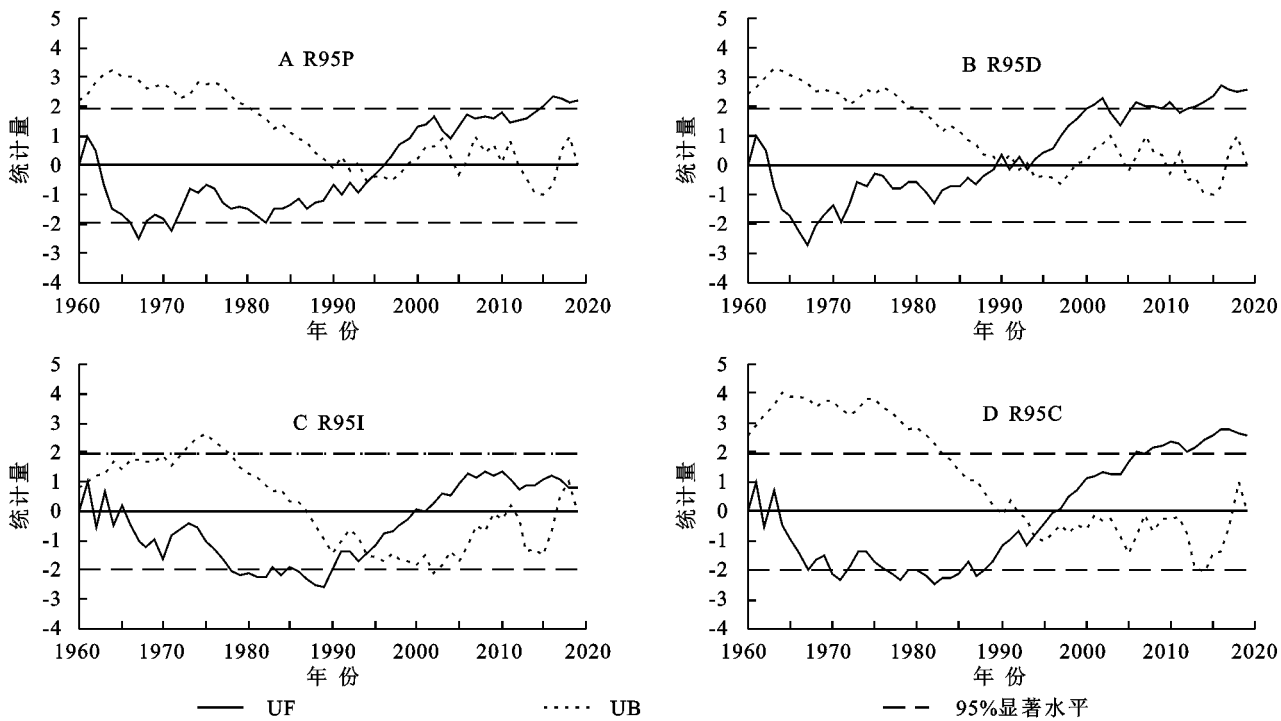


图 5 4 个极端降水指数的 M-K 突变检验

表 3 极端降水指数与大气环流指数的相关关系

环流指数	R95P	R95D	R95I	R95C
AO	0.04	0.05	−0.02	0.02
NAO	−0.21	−0.20	−0.12	−0.19
NP	−0.21	−0.23	−0.02	−0.11
WPI	0.40**	0.41**	0.15	0.29*
SSI	0.41**	0.42**	0.17	0.25
PVI	−0.39**	−0.37**	−0.24	−0.42*

注：\* 表示相关系数通过 0.05 水平的显著检验，\*\* 表示通过 0.01 水平的显著检验。

3 讨论

本研究表明 1960—2019 年福建省 R95P 和 R95D 的变化趋势分别为 24.90 mm/10 a ( $p<0.05$ ) 和 0.34 d/10 a ( $p<0.05$ ), 与前人的研究结果<sup>[25]</sup> 相比, 变化趋势基本一致, 但变化幅度有所增加。将 1961—2016 年这两个指标分别 与全国<sup>[33]</sup> (6.2 mm/10 a 和 0.1 d/10 a) 和 华南地区<sup>[34]</sup> (17.46 mm/10, 0.19 d/10 a) 的变化趋

势进行比较, 福建省极端降水的变化率约为全国的 3~4 倍、华南地区的 1~1.5 倍, 说明了不同地域的不同气候条件会造成极端降水的区域差异显著。同时, 近 60 年来福建省 R95P 和 R95D 均在 1994 年以后表现出明显的增加趋势, 与苏志重等<sup>[25]</sup> 得出的福建省降水量在 90 年代初期发生突变的结果略有差异, 主要与降水数据的时间序列延长有关。

本文中 R95P 和 R95D 在三明、福州东部和宁德北部地区表现出增加, 其中约 20% 的站点显著增加, 这与郭湘宇等<sup>[35]</sup> 得出的全省仅 4.5% 的站点显著增加的结论不一致。这主要是由于极端降水的局地性特征, 在研究区内部存在明显的空间分布差异, 考虑到以往研究受站点数量的限制, 难以全面描述其空间分布特征。本研究基于全省国家气象站, 分析了极端降水的时空演变格局, 有效弥补了以往研究中精细化不足的问题。目前, 全球变暖趋势仍在加剧, 引起水循环过程不断加快, 也预示着未来福建省极端降水可能继续增加。

表 4 转折前与转折后时段极端降水指数与大气环流指数的相关关系

环流指数	转折前时段				转折后时段			
	R95P	R95D	R95I	R95C	R95P	R95D	R95I	R95C
AO	0.22	0.21	0.07	0.13	−0.20	−0.20	−0.23	−0.21
NAO	0.16	0.17	0.04	0.14	−0.28	−0.30	−0.06	−0.18
NP	−0.25	−0.26	−0.03	−0.05	0.02	−0.02	0.21	0.15
WPI	0.02	0.05	−0.11	−0.16	0.33	0.36	0.06	0.12
SSI	0.03	0.06	−0.10	−0.14	0.38	0.40*	0.14	0.12
PVI	0.10	0.11	−0.03	0.07	−0.27	−0.27	−0.07	−0.23

注：\* 表示相关系数通过 0.05 水平的显著性检验。

由表3可知,WPI,SSI与福建省极端降水指数的相关性最好,说明WPI和SSI对该地区极端降水产生重要的影响。当副高强度增加时,极端降水也相应增多。一般而言,极端降水在夏季较为多发,作为西太副高的一部分,南海副高的强度增加会引起西南风增强,有利于热带太平洋向东南沿海输送水汽,极大地促进了极端降水的发生。相关研究表明,西太副高的面积和强度在1990s初有一次明显的突变,1990s以后显著增强<sup>[36]</sup>。由此可以看出,福建省极端降水显著增强的时间与副高增强的转折点有很好的一致性。此外,副高强度的增强使得环流场出现调整,东南夏季风减弱,我国东部丰水区出现南移,空间分布由“北涝南旱”转为“北旱南涝”<sup>[37]</sup>,也从一个侧面印证了90年代以后福建极端降水的增强可能是由于西太副高增强所引起的,因而WPI的加强会引起极端降水偏多。PVI与极端降水指数都表现为负相关关系。其中,PVI与R95P,R95D和R95C表现出显著负相关关系( $p<0.05$ ),表明极端降水受极涡强度的影响也较为明显。黄嘉佑等<sup>[38]</sup>发现夏季降水受前期冬季极涡影响较为强烈,当PVI较大时,长江中下游地区以及我国东部沿海地区会出现干旱,反之亦然。

## 4 结论

(1) 自1960年以来福建省R95P,R95D,R95I和R95C的变化倾向率分别为24.90 mm/10 a,0.34 d/10 a,0.25(mm/d)/10 a和0.84%/10 a。其中,R95P,R95I和R95C均在1994年发生突变,而R95D的突变点出现在1993年左右。

(2) 福建省R95P和R95D的空间变化趋势相似,约有超过95%的站点呈现增加趋势,20%左右的站点显著增加。R95I和R95C显著增加的站点分别占总数的3%和22.39%,R95I在南部地区增加趋势最为明显,而R95C增加速率较高的地区位于三明、南平及福州沿海地区。

(3) WPI,SSI和PVI对福建省极端降水指数有显著影响,特别是副高强度的增加会引起转折后时段极端降水增强。

### 参考文献:

- [1] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8): <https://doi.org/10.1029/2009GL037810>.
- [2] Fyfe J C, Gillett N P, Zwiers F W. Overestimated global warming over the past 20 years[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 767-769.
- [3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. UK: Cambridge university press, 2014.
- [4] 慎璐璐,杨艳芬,吴晶,等.黄河流域极端气候事件时空变化规律[J].*水土保持研究*, 2022, 29(2): 231-242.
- [5] Zarekarizi M, Rana A, Moradkhani H. Precipitation extremes and their relation to climatic indices in the Pacific Northwest USA [J]. *( ) Climate Dynamics*, 2018, 50(11): 4519-4537.
- [6] Muller C, Takayabu Y. Response of precipitation extremes to warming: what have we learned from theory and idealized cloud-resolving simulations, and what remains to be learned? [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 035001.
- [7] 江雯,汪军红,孙鹏,等.大别山区不同降雨和植被条件下梯地产流产沙特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(1): 28-35.
- [8] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111: 1-22.
- [9] Donat M G, Peterson T C, Brunet M, et al. Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 581-592.
- [10] Lenderink G, Mok H Y, Lee T C, et al. Scaling and trends of hourly precipitation extremes in two different climate zones-Hong Kong and the Netherlands[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(9): 3033-3041.
- [11] Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 522-555.
- [12] 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.
- [13] Wu H T J, Lau W K M. Detecting climate signals in precipitation extremes from TRMM (1998—2013)—Increasing contrast between wet and dry extremes during the “global warming hiatus” [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(3): 1340-1348.
- [14] Gao X, Guo M, Yang Z, et al. Temperature dependence of extreme precipitation over mainland China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124595.
- [15] 严中伟,杨赤.近几十年中国极端气候变化格局[J].*气候与环境研究*, 2000, 5(3): 267-272.
- [16] 张勇,许吟隆,董文杰,等.中国未来极端降水事件的变化: 基于气候变化预估结果的分析[J].*自然灾害学报*, 2006, 15(6): 228-234.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 杨金虎,江志红,杨启国,等.中国西北汛期极端降水事

- 件分析[J].中国沙漠,2007,27(2):320-325.
- [20] 齐庆华,蔡榕硕,张启龙.华南夏季极端降水时空变异及其与西北部太平洋海气异常关联性初探[J].高原气象,2013,32(1):110-121.
- [21] 龙妍妍,范广洲,段炼,等.中国近54年来夏季极端降水事件特征研究[J].气候与环境研究,2016,21(4):429-438.
- [22] Wang B, Zhang M, Wei J, et al. Changes in extreme precipitation over Northeast China, 1960—2011 [J]. Quaternary International, 2013,298:177-186.
- [23] Li B, Chen Y, Chen Z, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010? [J]. Atmospheric Research, 2016,167:275-284.
- [24] Zhao G, Mu X, Hörmann G, et al. Spatial patterns and temporal variability of dryness/wetness in the Yangtze River Basin, China [J]. Quaternary International, 2012,282:5-13.
- [25] 苏志重,石顺吉,张伟,等.1960—2010年福建省极端降水事件变化趋势分析[J].暴雨灾害,2016,35(2):166-172.
- [26] 陈丽娟,王壬,陈友飞.1960—2014年福建省极端气候事件时空特征及变化趋势[J].中国水土保持科学,2016,14(6):107-113.
- [27] Guo X, Wu Z, He H, et al. Variations in the start, end, and length of extreme precipitation period across China [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(5):2423-2434.
- [28] 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.
- [29] 曾颖婷,陆尔.1961—2010年我国夏季总降水和极端降水的变化[J].气候变化研究进展,2015,11(2):79-85.
- [30] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(9):1-10.
- [31] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [32] Sun W, Mu X, Song X, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming [J]. Atmospheric Research, 2016,168:33-48.
- [33] 卢珊,胡泽勇,王百朋,等.近56年中国极端降水事件的时空变化格局[J].高原气象,2020,39(4):683-693.
- [34] 戴声佩,罗红霞,李茂芬,等.1959—2016年华南地区极端降水事件变化特征[J].中国农业资源与区划,2022, 43(3):128-142.
- [35] 郭湘宇,吴正方,杜海波,等.福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].资源科学,2017,39(6):1084-1098.
- [36] 张超.夏季西太平洋副热带高压近60a特征变化及对中国夏季降水影响[C]//创新驱动发展提高气象灾害防御能力:S8副热带气象发展及生态环境影响,2013.
- [37] 钱代丽,管兆勇,王黎娟.近57a夏季西太平洋副高面积的年代际振荡及其与中国降水的联系[J].大气科学学报,2009,32(5):677-685.
- [38] 黄嘉佑,刘舸,赵昕奕,副高,极涡因子对我国夏季降水的影响[J].大气科学,2004,28(4):517-526.

(上接第202页)

- [12] 徐燕云,吴晓梅,沈秋仙,等.铅胁迫对大灰藓几种生理指标的影响[J].武汉植物学研究,2010,28(5):606-611.
- [13] 李春蕊.大气颗粒物对细叶小羽藓(*Haplcladium microphyllum*)和大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)生理及叶表面微生物群落结构的影响[D].山东青岛:青岛理工大学,2018.
- [14] 毛可红,朱姝蕊.不同基质容器栽培对大灰藓生长的影响[J].中国农业信息,2016,2(3):129-130.
- [15] 张永昌,何林,郭水良.植物功能多样性及其在苔藓植物中应用的研究[J].上海师范大学学报:自然科学版,2020,49(1):9-17.
- [16] 陈勤,孙冲,方发明.苔藓植物的生态环境指示作用[J].世界林业研究,2013,26(2):19-23.
- [17] 杨贵森,黄磊,杨利贞,等.植物根系水力再分配量及影响因素分析[J].干旱区研究,2021,38(5):1411-1419.
- [18] 覃森.黄土区典型草被生长过程中根系对土壤抗冲性影响的试验研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [19] 刘瑞丰,李新平,李素俭,等.商洛地区土壤蔗糖酶及过氧化氢酶与土壤养分的关系研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):182-185.
- [20] 孟杰,卜崇峰,赵玉娇,等.陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响[J].自然资源学报,2010,25(11):1864-1874.
- [21] Newton A E, Cox C J, Duckett J G, et al. Evolution of the Major Moss Lineages: Phylogenetic analyses based on multiple gene sequences and morphology [J]. Bryologist, 2000,103(2):187-211.
- [22] Šinžar-sekulić J, Jasmina B, Sabovljević M S, Stevanović B M. Comparison of desiccation tolerance among mosses from different habitats [J]. Archives of Biological Sciences, 2005,57(3):189-192.
- [23] 单飞彪.自然和人工藓类结皮层对土壤及植物营养元素含量的影响初探[D].呼和浩特:内蒙古大学,2009.