

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.003

# 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域 极端降水变化解析

张姣<sup>1,2,3</sup>, 胡庆芳<sup>2</sup>, 黄璟胜<sup>3</sup>, 陈炼钢<sup>2</sup>, 杨川<sup>1,2</sup>, 云兆得<sup>2</sup>, 朱伟<sup>2</sup>

- 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098;
- 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029;
- 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 为了分析全球气候变化背景下漓江流域极端降水的变化特征, 基于流域内气象站点 1963—2019 年逐日降水资料, 采用修改后的 ETCCDI 指数, 通过 ITA (innovative trend analysis) 法和 Mann-Kendall 法 2 种非参数检验方法从站点和流域尺度研究了漓江流域极端降水的变化趋势, 并分析了流域年降水量、汛期降水量和极端降水事件发生时间的变化情况。结果表明: 1963—2019 年漓江流域年降水量及汛期降水量均呈增长趋势; 空间上, 各极端降水指数呈现出由流域西北向东南递减的分布格局; 时间上, 各站点极端降水指数均呈上升趋势; 极端降水事件在年内最早发生时间总体表现为流域北部站点时间推迟, 南部站点时间提前; ITA 法和 Mann-Kendall 法对漓江流域极端降水指数的趋势显著性检验结果存在明显差异, ITA 法的敏感性更强。

**关键词:** 极端降水; 变化趋势; ITA 法; Mann-Kendall 法; 漓江流域

中图分类号: TV125; P426.614 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2024)06-0015-08

## Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods

ZHANG Jiao<sup>1,2,3</sup>, HU Qingfang<sup>2</sup>, HUANG Jingsheng<sup>3</sup>, CHEN Liangang<sup>2</sup>, YANG Chuan<sup>1,2</sup>, YUN Zhaode<sup>2</sup>, ZHU Wei<sup>2</sup>

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To analyze the characteristics of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin under the background of global climate change, based on the daily precipitation data of various meteorological gauges from 1963 to 2019, the modified ETCCDI indices are used to analyze the trend of extreme precipitation in Lijiang River Basin at gauge scale and the whole basin scale using two non-parametric testing methods, innovative trend analysis (ITA) method and Mann-Kendall method. In addition, the annual precipitation, flood season precipitation and the occurrence time of extreme precipitation events are also included in the analysis. Results show that the annual precipitation and flood season precipitation are increasing from 1963 to 2019. The extreme precipitation indices show spatial distribution pattern of decreasing from northwest to southeast in the basin and the indices at all gauges show an upward trend in general. Besides, the occurrence time of the earliest extreme precipitation event within a year is generally delayed in the north of the basin and advanced in the southern part. At the same time, there is an obvious difference in the trend significance test results of extreme precipitation indices between ITA and Mann-Kendall methods, and the sensitivity of ITA is stronger.

**Key words:** extreme precipitation; change trend; ITA method; Mann-Kendall method; Lijiang River Basin

极端降水事件的历史变化特征、成因机理、未来变化趋势等问题已成为国际气候变化和自然灾害研究领域的焦点之一<sup>[1-4]</sup>。目前, 国内外在极端降水事件研究方面已取得大量成果。在极端降水事件的变化特征方

**基金项目:** 广西科技计划项目(桂科 AB22080093); 国家自然科学基金面上项目(52279019); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y521021)

**作者简介:** 张姣(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhangjiao\_0518@163.com

**通信作者:** 胡庆芳(1981—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文遥感、防洪与水资源规划研究。E-mail: hqf\_work@163.com

**引用本文:** 张姣, 胡庆芳, 黄璟胜, 等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22.

ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 15-22.

面, Sun 等<sup>[5]</sup>指出,近年全球约有 2/3 的气象站点观测到了极端降水事件增加,远超各国预期。卢珊等<sup>[6]</sup>通过分析我国近年的极端降水事件时空变化,发现我国极端降水事件显著增多,且增多区域主要集中在东南沿海和西部地区,喀斯特地区的强降水量和极端降水量总体也呈增长趋势<sup>[7]</sup>。而关于极端降水的机理成因,目前尚存在争议,但也取得了重要研究成果。尹家波等<sup>[8]</sup>从热力学角度出发,指出极端降水事件往往伴随着剧烈的水-热交换,与生态系统生产力及碳收支过程存在非线性响应关系。Huang 等<sup>[9]</sup>发现,人为温室气体和气溶胶排放增加的热力学效应将协同促进全球极端降水强度增加。Wang 等<sup>[10]</sup>指出,温室气体排放对短期降水事件的影响较大,而人为气溶胶排放对月平均降水的影响较大,降水事件越极端,人为因素的影响就越明显。在极端降水事件的未来变化趋势方面,吉戴婧琪等<sup>[11]</sup>发现,极端降水量指数和极端降水强度指数均呈现增长趋势。李慧慧等<sup>[12]</sup>预测了不同温室气体排放情景下我国极端降水事件的变化特征,发现极端降水日数、降水量指数在不同经济路径下的变化趋势存在差异,华中、东北、西北和西南青藏高原及其周边地区,温室气体排放升高则极端降水事件发生频率与降水强度增大。除此之外,国内外学者对极端降水与平均气温的响应关系<sup>[13]</sup>、量化极端降水事件规模及频率<sup>[14]</sup>、探究极端降水与极端对流的空间差异及联系<sup>[15]</sup>等方面也开展了相关研究,为气候变化背景下的极端降水事件分析奠定了基础。在趋势检验方面,Sen 斜率估计法、Mann-Kendall (M-K) 法<sup>[16-17]</sup>等非参数趋势检验法在水文气象领域应用十分广泛<sup>[18-20]</sup>。Sen<sup>[21]</sup>于 2012 年提出了 ITA (innovative trend analysis) 法,虽时间不长,但在国际国内均已有了若干研究验证了其可行性<sup>[22-26]</sup>。

漓江是我国珠江流域西江水系一级支流桂江上游河段的通称<sup>[27]</sup>,地处广西壮族自治区桂林市境内,是我国西南地区脆弱岩溶环境的重要生态安全屏障<sup>[28]</sup>。漓江流域是世界岩溶峰林景观发育最完整的地区之一,由于雨水储蓄能力差、汛期暴雨多发,易导致重大洪涝灾害,是西江水系的重要防洪薄弱环节之一,目前桂林市城区尚未达到《珠江流域防洪规划》规定的 100 年一遇防洪标准。近年来该流域多次遭遇极端降水事件袭击,并发生重大洪涝灾害事件,因此开展漓江流域极端降水研究十分必要。孙桂凯等<sup>[29-30]</sup>指出广西极端降水贡献率较高且呈缓慢增加趋势,强降水量和极端降水量总体呈增长趋势,同时强降水阈值、强降水比例和日降水强度增加趋势显著。段文军等<sup>[31]</sup>发现,1960—2010 年漓江流域降水量年际变化总体呈波动增加态势,且降水年内变化幅度明显超过年际变化。目前专门针对漓江流域极端降水的研究还很少,本文基于长系列观测资料,系统解析漓江流域极端降水变化特征。

## 1 研究区概况与研究数据

漓江起点为桂林市兴安县溶江镇灵渠口,终点为平乐县三江口,干流自北向南流经兴安、灵川、桂林城区、阳朔和平乐,河道全长 268 km,集水面积 12 159 km<sup>2</sup>,两岸多为岩溶地貌。流域内陆洞河、川江、小溶江、甘棠江及义江流域的宛田一带为桂北暴雨中心。漓江流域属中亚热带季风气候,温暖湿润,雨水充沛,多年平均降水量为 1 673.3 mm。降水年内分配不均,汛期(3—8 月)雨量约占全年的 75%。流域多年平均气温为 18.8℃,极端最高气温为 39.4℃,极端最低气温为 -4.9℃,多年平均水面蒸发量为 1 443 mm。漓江流域内分布着 7 个气象站点,漓江流域水系及气象站分布如图 1 所示。

本文以漓江流域内的兴安、灵川、桂林、阳朔、恭城、平乐和荔浦 7 个气象站 1963—2019 年的逐日降水观测记录作为分析当地极端降水变化的基础资料。7 个气象站中,桂林站为国家基本气象站,其他均为一般气象站。根据各气象站降水资料,采用距离反比方法方法进行空间插值,得到漓江流域面平均雨量。

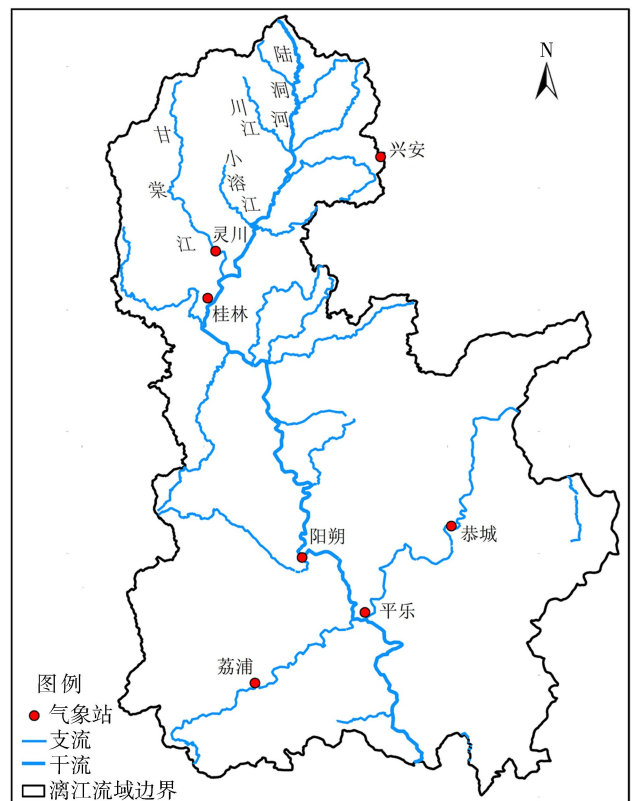


图 1 漓江流域水系及气象站点分布

Fig. 1 River system and meteorological gauges in Lijiang River Basin

## 2 研究方法

### 2.1 极端降水指数

本文从 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 推荐的 27 个极端降水指数中,选取了表征降水频率和强度在内的 7 个指数进行分析。为更好地匹配 GB/T 28592—2012《降水量等级》,将 ETCCDI 推荐指数中的大雨以上日数 (R20) 定义阈值由 20 mm/d 提升至与 GB/T 28592—2012《降水量等级》一致的 25 mm/d 进行分析 (符号相应改为 R25)。此外,本文还根据漓江流域实际情况,选取了极端降水强度 (EPII) 和极端降水贡献率 (EPCR) 两个指数加以分析。本文采用的极端降水指数见表 1。

表 1 极端降水指数

Table 1 Extreme precipitation indices

| 指数分类     | 指数名称(符号)           | 定义                         | 单位   |
|----------|--------------------|----------------------------|------|
| 频率指数(符号) | 中雨以上日数(R10)        | 日降水量大于或等于 10 mm 的总日数       | d    |
|          | 大雨以上日数(R25)        | 日降水量大于或等于 25 mm 的总日数       | d    |
| 强度指数     | 日降水强度(SDII)        | 年日降水量大于或等于 1 mm 的降水总量与日数之比 | mm/d |
|          | 最大 1 d 降水量(RX1day) | 年最大 1 d 降水量                | mm   |
|          | 最大 5 d 降水量(RX5day) | 年最大连续 5 d 降水量              | mm   |
|          | 极端降水强度(EPII)       | 极端降水量与极端降水日数之比             | mm/d |
|          | 极端降水贡献率(EPCR)      | 极端降水量占全年降水总量的百分比           | %    |
| 总量指数     | 强降水量(R95p)         | 年日降水量大于第 95 百分位值的降水量之和     | mm   |
|          | 极端降水量(R99p)        | 年日降水量大于第 99 百分位值的降水量之和     | mm   |

### 2.2 趋势检验方法

本文同时采用 M-K 法和 ITA 法检验漓江流域极端降水指数序列的变化趋势,并对两者的检验结果进行对比分析。M-K 法是一种经典性的非参数统计方法,其原理参见文献[16-17]。ITA 法的适用场景较广,对于时间序列的正态性、样本长度及序列相关性均无特殊要求<sup>[32]</sup>。ITA 法首先将时间序列均分为前后两个子序列,将它们分别按升序排列,然后在笛卡尔坐标系中绘制散点图。前半序列点绘于坐标系水平轴上,后半序列点绘于垂直坐标轴上,并以 45° 直线将坐标轴范围划分为上下相等的两个三角形,根据散点图可直观判断序列变化趋势:若数据点聚集在 45° 直线上,则表明该时间序列无明显趋势,若散点位于上三角区域,则表示序列呈上升趋势,位于下三角区域,则呈下降趋势。若有非单调的增加或减少趋势,可将数据分为低、中、高值组分别进行精确解释。为了更好地理解时间序列数据中的趋势特征,Sen<sup>[33]</sup>于 2017 年进一步提出了根据趋势线斜率( $s$ )判断序列趋势的方法,若  $s$  为正,则序列呈上升趋势,反之,则呈下降趋势。

## 3 结果与分析

### 3.1 年降水量与汛期降水量

由图 2 和表 2 可知,1963—2019 年漓江流域多年平均降水量为 1673.3 mm,其中 2015 年降水量最多(2378.6 mm),超出多年平均 42.2%;2011 年降水量最少(1062.3 mm),低于多年平均 36.5%。漓江流域年降水量序列整体呈波动上升态势,其平均增速为 2.78 mm/a,但 M-K 法检验结果显示年降水量上升趋势不显著,而 ITA 法结果显示上升趋势显著。漓江流域多年平均汛期降水量为 1247.0 mm,约占全年降水量的 75%。1963—2019 年流域汛期降水量以 2.62 mm/a 的平均速率波动上升,M-K 法检验结果显示汛期降水量上升趋势不显著,ITA 法检验结果显示趋势显著。总体来说,漓江流域的年降水量及汛期降水量均在时间

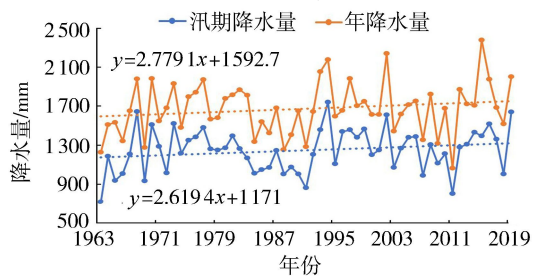


图 2 漓江流域年降水量和汛期降水量的年际变化  
Fig.2 Inter annual variation of annual precipitation and flood season precipitation in Lijiang River Basin

表 2 年降水量和汛期降水量趋势检验结果

Table 2 Trend test results of annual precipitation and flood season precipitation

| 降水要素  | M-K 法 |    | ITA 法 |     |
|-------|-------|----|-------|-----|
|       | Z     | 趋势 | s     | 趋势  |
| 年降水量  | 1.43  | ↑  | 4.07  | ↑ * |
| 汛期降水量 | 1.45  | ↑  | 4.23  | ↑ * |

注:Z 为 M-K 法的检验值,“↑”表示该序列呈上升趋势,“↓”表示该序列呈下降趋势,“\*”表示上升或下降趋势的显著性通过 95% 置信水平检验,趋势明显。下同。

尺度上呈现增长态势,且汛期降水量是年降水量的主要构成部分。

### 3.2 极端降水指标分析

#### 3.2.1 站点尺度

表3和表4给出了各气象站极端降水指数的气候倾向率及变化趋势检验结果,各站点R25、SDII、RX1day、RX5day及R95p指数的气候倾向率均为正;R10在灵川、桂林、阳朔的气候倾向率为负,其余气象站均为正;R99p的气候倾向率除平乐为负外,其余气象站均为正;EPII的气候倾向率除荔浦站为负外,其余气象站均为正;平乐站和荔浦站EPCR的气候倾向率为负,其余气象站为正。M-K法检验结果表明:各气象站R25、SDII、RX1day、RX5day及R99p指数均呈上升趋势,其中SDII除灵川外,其他气象站均呈显著的上升趋势;R10在兴安、恭城、平乐和荔浦呈上升趋势,在灵川、桂林和阳朔则呈下降趋势;R95p及EPII除荔浦呈下降趋势外,其余各气象站均呈显著上升趋势;EPCR除平乐、荔浦呈不显著下降趋势外,其余各气象站均呈上升趋势。ITA法结果表明:各气象站R25、SDII、RX5day、R95p及EPII均呈显著上升趋势;R10在桂林、阳朔呈显著下降趋势,而其余气象站呈显著上升趋势;RX1day除兴安呈不显著上升趋势外,其余气象站均呈显著上升趋势;R99p指标平乐呈不显著下降趋势,荔浦呈不显著上升趋势,其余各气象站均显著上升;EPCR在兴安呈不显著下降趋势,荔浦呈显著下降趋势,灵川呈显著上升趋势,阳朔、恭城呈不显著上升趋势,桂林和平乐无明显变化趋势。

表3 各气象站极端降水指数气候倾向率

Table 3 Climate tendency rate of extreme precipitation indices at each gauge

| 气象站 | R10/d | R25/d | SDII/(mm/d) | RX1day/mm | RX5day/mm | R95p/mm | R99p/mm | EPII/(mm/d) | EPCR/% |
|-----|-------|-------|-------------|-----------|-----------|---------|---------|-------------|--------|
| 兴安  | 0.1   | 0.62  | 0.38        | 6.17      | 6.73      | 14.93   | 8.77    | 5.21        | 0.29   |
| 灵川  | -0.12 | 0.02  | 0.29        | 8.84      | 14.31     | 23.91   | 12.65   | 7.1         | 0.47   |
| 桂林  | -0.57 | 0.77  | 0.45        | 5.95      | 9.97      | 16.89   | 9.06    | 5.94        | 0.28   |
| 阳朔  | -0.44 | 0.18  | 0.29        | 4.91      | 2.86      | 9.97    | 4.35    | 3.85        | 0.1    |
| 恭城  | 1.04  | 0.63  | 0.37        | 2.85      | 1.92      | 8.75    | 4.22    | 2.44        | 0.06   |
| 平乐  | 1.1   | 0.85  | 0.38        | 0.9       | 6.63      | 2.15    | -0.9    | 1.44        | -0.26  |
| 荔浦  | 0.34  | 0.7   | 0.3         | 1.21      | 0.77      | 0.05    | 0.67    | -0.16       | -0.17  |

注:表中数据为10a平均值。

表4 各气象站极端降水指数变化趋势检验结果

Table 4 Trend test results of extreme precipitation indices at each gauge

| 指数     | M-K法 |    |    |    |    |    |    | ITA法 |    |    |    |    |    |    |
|--------|------|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|
|        | 兴安   | 灵川 | 桂林 | 阳朔 | 恭城 | 平乐 | 荔浦 | 兴安   | 灵川 | 桂林 | 阳朔 | 恭城 | 平乐 | 荔浦 |
| R10    | ↑    | ↓  | ↓  | ↓  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑*   | ↑* | ↓* | ↓* | ↑* | ↑* | ↑* |
| R25    | ↑    | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑* | ↑  | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* |
| SDII   | ↑*   | ↑  | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* |
| RX1day | ↑*   | ↑* | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑    | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* |
| RX5day | ↑    | ↑* | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* |
| R95p   | ↑    | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↓  | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* |
| R99p   | ↑*   | ↑* | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑  | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↓  | ↑  |
| EPII   | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑  | ↑  | ↑  | ↓  | ↑*   | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* | ↑* |
| EPCR   | ↑    | ↑* | ↑  | ↑  | ↑  | ↓  | ↓  | ↓    | ↑* | —  | ↑  | ↑  | —  | ↓* |

注:“—”表示该序列无明显上升或下降趋势。

由于M-K法和ITA法的原理不同,因此其检验结果也不完全相同;尽管在两种检验方法下,各站点极端降水指标变化趋势有所差别,但总体上均呈增长趋势。这意味着未来漓江流域极端降水的总量、频率及强度将继续增加,流域洪涝情势会进一步向不利方向发展。

在极端降水总量、频率、强度指标分析的基础上,进一步探究极端降水事件年内发生时间的变化情况。统计了各气象站1963—2019年日降水量超过极端降水阈值的极端降水事件在年内首次发生时间(图3,图中纵坐标表示该年首次极端降水发生的日期顺序数,以1月1日为第1天,如“100”表示“第100天”),同时给出了各气象站极端降水事件发生时间的变化趋势(表5)。由图3可知,对于首次发生时间均值而言,各气象站主要集中在年内的第132~146天(5月12—26日)。计算气候倾向率可知:兴安极端降水发生时间的年际变化较为平稳;灵川及桂林极端降水发生时间的气候倾向率分别为0.21、0.38d/a,首次发生时间均呈

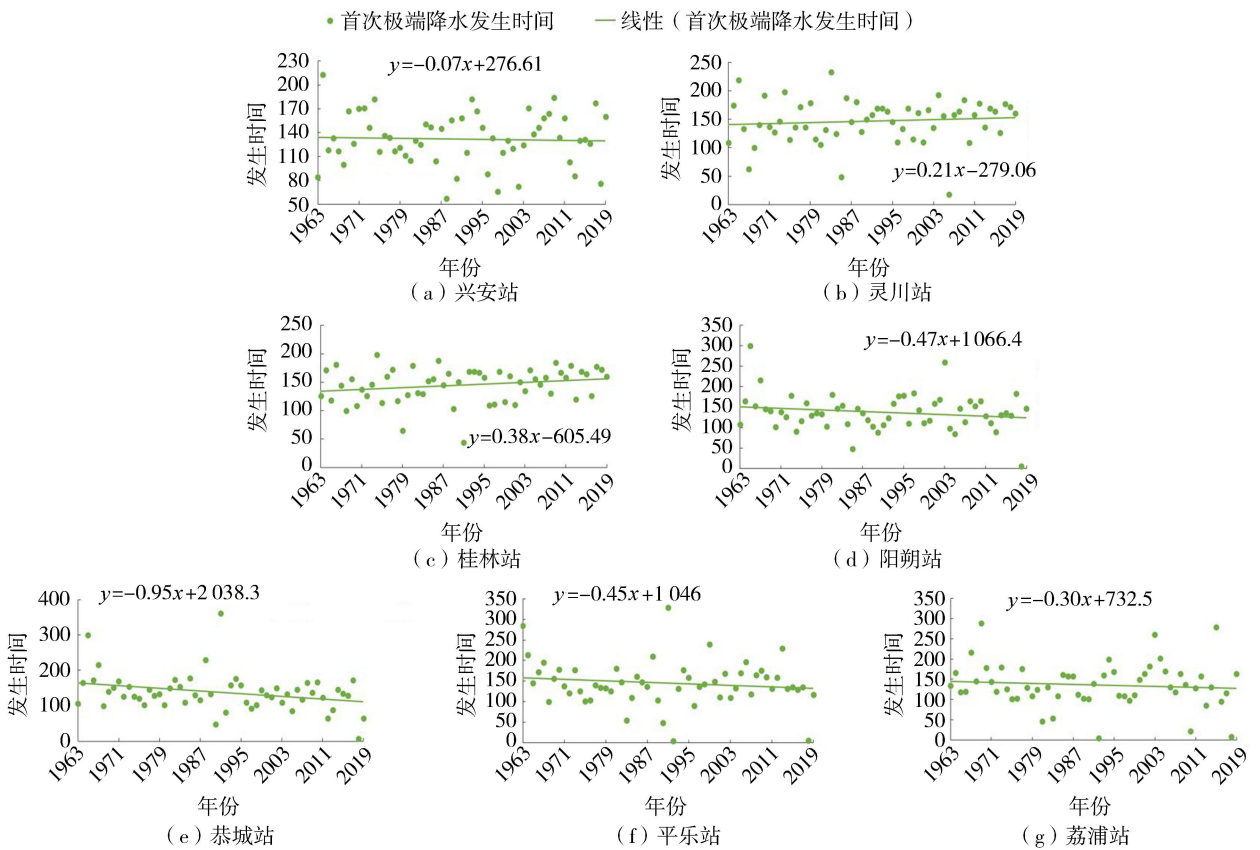


图 3 各气象站首次极端降水发生时间

Fig. 3 First extreme precipitation occurrence time at each gauge

推迟趋势;阳朔、恭城、平乐和荔浦气候倾向率分别为  $-0.47$ 、 $-0.95$ 、 $-0.45$ 、 $-0.30$  d/a,首次发生时间呈现提前趋势。M-K 法检验结果表明:流域北部 3 个气象站首次极端降水事件发生时间呈不显著的推迟趋势,南部 4 个气象站呈不显著提前趋势(表 5)。ITA 法检验结果表明:兴安、阳朔和荔浦呈不显著推迟趋势,灵川和桂林呈显著推迟趋势,恭城呈显著提前趋势,平乐呈不显著提前趋势(表 5)。总体来说,各气象站首次极端降水事件在年内的发生时间存在差异,漓江流域北部站点极端降水发生时间呈提前趋势,而流域南部站点呈推迟趋势。

表 5 各气象站极端降水发生时间的均值及变化趋势

Table 5 Mean and trend of extreme precipitation occurrence time at each gauge

| 气象站 | 首次发生时间  | M-K 法 |    | ITA 法 |    |
|-----|---------|-------|----|-------|----|
|     |         | Z     | 趋势 | s     | 趋势 |
| 兴安  | 第 132 天 | 0.19  | ↑  | 0.04  | ↑  |
| 灵川  | 第 146 天 | 1.06  | ↑  | 0.19  | ↑* |
| 桂林  | 第 145 天 | 1.84  | ↑  | 0.38  | ↑* |
| 阳朔  | 第 138 天 | -0.66 | ↓  | 0.01  | ↑  |
| 恭城  | 第 138 天 | -1.85 | ↓  | -0.84 | ↓* |
| 平乐  | 第 145 天 | -0.89 | ↓  | -0.16 | ↓  |
| 荔浦  | 第 136 天 | -0.54 | ↓  | 0.02  | ↑  |

为探究极端降水指数的空间分布特征,将流域内各气象站 9 个极端降水指数的多年平均值运用距离反比平方方法在漓江流域内进行空间插值,结果如图 4 所示。由图 4 可知,各极端降水指数的空间分布基本遵循由流域西北部向东南部递减的规律。其中,R10、R25 的最大值出现在流域北部灵川、桂林、兴安附近,最小值出现在荔浦、平乐附近;SDII、RXday5、R95p 及 EPII 的最大值出现在流域西北部,兴安附近为较大值,最小值出现在荔浦、平乐附近;RXday1、R99p 及 EPCR 的最大值虽也出现在流域西北部,但最小值出现在平乐附近。

### 3.2.2 流域尺度

目前有关极端降水指数的分析主要集中在站点尺度上,在流域或区域尺度上,由于降水强烈的空间变异性,相关极端降水指数将可能受到空间均化的影响。漓江流域面积较小,在流域尺度上开展极端降水变化分析仍具有一定意义,表 6 为各极端降水指数的气候倾向率及趋势变化情况。在变化趋势方面,全流域尺度上各极端降水指数序列均呈现出上升态势。但 M-K 法和 ITA 法的显著性检验结果方面存在一定差异:M-K 法仅有 SDII 通过了 95% 的显著性检验,而 ITA 法除 R10 未通过 95% 显著性检验外,其余指标均通过置信水平检验,上升趋势显著。

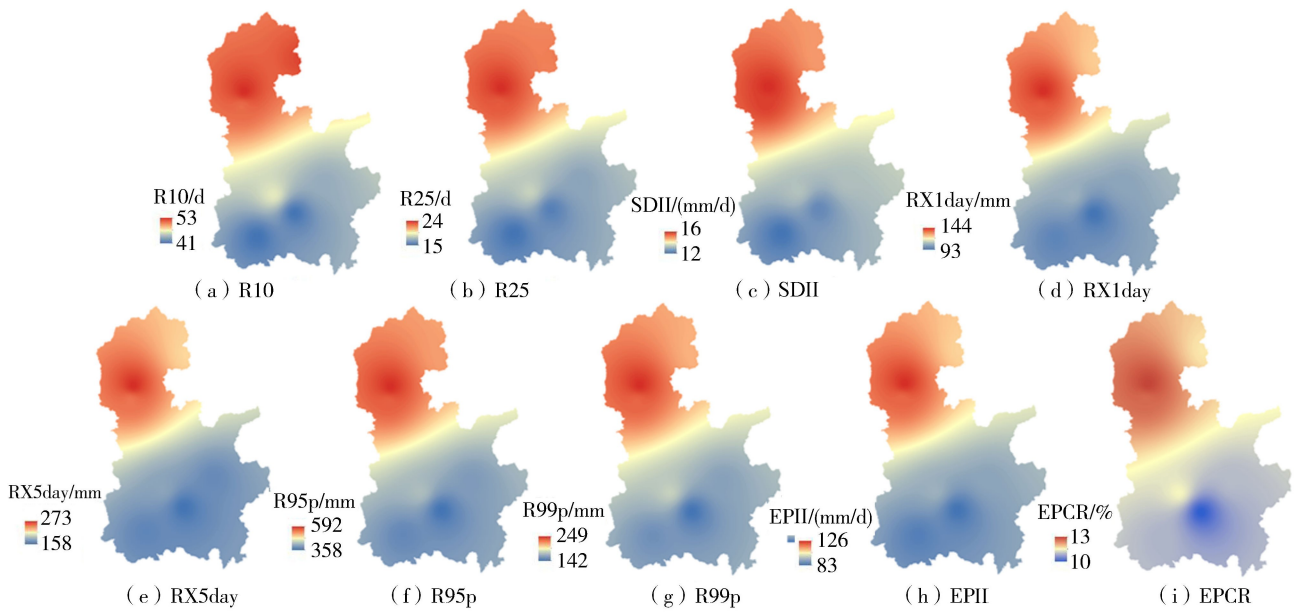


图4 漓江流域极端降水指数空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of extreme precipitation indices in Lijiang River Basin

### 3.3 M-K 法与 ITA 法检验结果比较

M-K 法与 ITA 法在原理和检验步骤上均存在较大差异, M-K 法通过秩次检验得出结果, 而 ITA 法则通过斜率检验得出结果, 这导致两者检验结果也相应存在一定的差异。在流域年降水量及汛期降水量序列的分析中, 两种方法结果均显示序列呈上升趋势, 降水量增加, 但 M-K 法检验结果显示上升趋势不显著, 而 ITA 法结果显示趋势显著; 在站点尺度的极端降水指数分析中, M-K 法及 ITA 法的序列趋势判断结果一致性较高, 但在显著性判断结果上存在较大差异。由表 7 可知, 两种方法趋势判断结果一致性超过 85%, 但 ITA 法结果显示具有显著变化的站点远多于 M-K 法; 在首次极端降水年内发生时间的变化趋势分析中, 两者趋势判断结果一致率为 71%, M-K 法检验结果显示各气象站均未发生显著变化, 而 ITA 法结果则显示灵川、桂林、恭城发生了显著变化; 在流域尺度的极端降水指数分析中, M-K 法与 ITA 法的趋势判断结果完全一致, 均显示漓江流域尺度范围内, 所有极端降水指标均呈现上升趋势, 但 M-K 法检验结果显示仅有 SDII 指标上升趋势显著, 而 ITA 法结果则显示除 R10 指标上升趋势不显著外, 其余均呈现出显著上升趋势。

总体而言, 两种方法对于序列趋势上升、下降或无明显趋势的判断结果一致性较高, 但在趋势

显著性判断方面, ITA 法的敏感性明显更高, 其判定序列趋势显著的比例明显高于 M-K 法。ITA 法对数据序列的独立性和正态分布并未做限制性假设, 适用性强, 且由于其建立在斜率估计的基础上, 因此其趋势检验结果的可视化程度较高。除此之外, ITA 法能够更敏感地识别出 M-K 法无法检测到的序列显著趋势。目

表 6 流域极端降水指数的气候倾向率及趋势检验结果

Table 6 Climate tendency rate and trend test results of extreme precipitation indices in the basin

| 极端降水指数  | 倾向率       | M-K 法 |    | ITA 法 |    |
|---------|-----------|-------|----|-------|----|
|         |           | Z     | 趋势 | s     | 趋势 |
| R10     | -0.08 d   | 0.06  | ↑  | 0.06  | ↑  |
| R25     | 0.72 d    | 1.93  | ↑  | 0.09  | ↑* |
| SDII    | 0.28 mm/d | 2.87  | ↑* | 0.04  | ↑* |
| RX1 day | 1.39 mm   | 0.94  | ↑  | 0.28  | ↑* |
| RX5day  | 4.53 mm   | 1.41  | ↑  | 0.78  | ↑* |
| R95p    | 10.88 mm  | 1.33  | ↑  | 1.38  | ↑* |
| R99p    | 3.67 mm   | 1.54  | ↑  | 0.56  | ↑* |
| EPII    | 1.83 mm/d | 1.54  | ↑  | 0.28  | ↑* |
| EPCR    | 0.09 %    | 1.11  | ↑  | 0.02  | ↑* |

注: 表中倾向率数据为 10 年平均值。

表 7 极端降水指数趋势检验结果对比

Table 7 Comparison of trend test results for extreme precipitation indices

| 极端降水指数  | 趋势判断一致的站点数 | 具有显著性趋势变化的站点数 |       |
|---------|------------|---------------|-------|
|         |            | M-K 法         | ITA 法 |
| R10     | 6          | 0             | 7     |
| R25     | 7          | 1             | 7     |
| SDII    | 7          | 6             | 7     |
| RX1 day | 7          | 2             | 6     |
| RX5day  | 7          | 1             | 7     |
| R95p    | 6          | 0             | 7     |
| R99p    | 6          | 2             | 5     |
| EPII    | 6          | 3             | 7     |
| EPCR    | 4          | 1             | 2     |

前, M-K 法已广泛运用于水文气象领域时间序列的趋势判断, 而 ITA 法由于其提出时间不长, 国内学者对其的研究还较少。在后续研究中, 可在 ITA 法的应用区域拓展、不同显著性水平结果的对比分析及与更多趋势检验方法的对比总结等方向上做进一步探究。总体来说, 漓江流域极端降水增多趋强, 将对流域防洪治涝产生不利影响, 同时不利于流域水平衡健康状态构建, 应引起高度重视。

## 4 结 论

a. 1963—2019 年漓江流域年降水量整体呈现上升态势, 以 2.88 mm/a 的变化率增加; 流域多年平均汛期降水量约占全年降水量的 75%, 汛期降水量以 2.62 mm/a 的速率波动上升, 是年降水量上升的主要构成部分。M-K 法检验结果显示流域年降水量与汛期降水量的上升趋势不显著, 未通过 95% 的置信水平检验, 而 ITA 法检验结果则显示两者上升趋势显著。

b. 在流域尺度上, 各极端降水指数总体均呈增长趋势。在空间上, 漓江流域极端降水指数遵循由流域西北部向东南部递减的基本格局; 在时间上, 各气象站极端降水指数总体呈增长趋势。首次极端降水事件主要发生在 5 月 12—26 日之间, 流域北部站点首次极端降水事件发生时间呈推迟趋势、南部站点呈提前趋势。

c. M-K 法和 ITA 法虽对于漓江流域极端降水序列趋势性质的判断结果一致性较高, 但在趋势显著性判断方面, ITA 法的敏感性明显更强, 其判定趋势显著的序列比例明显高于 M-K 法。

### 参考文献:

- [1] 郑景云, 郝志新, 方修琦, 等. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 3-12. (ZHENG Jingyun, HAO Zhixin, FANG Xiuqi, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 3-12. (in Chinese))
- [2] 张长征, 沈婷, 徐慎晖, 等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41(1): 55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))
- [3] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [4] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))
- [5] SUN Qiaohong, ZHANG Xuebin, ZWIERS F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation[J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 243-258.
- [6] 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. (LU Shan, HU Zeyong, WANG Baipeng, et al. Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 years[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 683-693. (in Chinese))
- [7] 陈燕丽, 谢映, 张会, 等. 1961—2019 年广西喀斯特地区极端气候事件时空变化规律[J]. 广西林业科学, 2022, 51(6): 859-865. (CHEN Yanli, XIE Ying, ZHANG Hui, et al. Temporal and spatial variations of extreme climate events in Karst areas of Guangxi from 1961 to 2019[J]. Guangxi Forestry Science, 2022, 51(6): 859-865. (in Chinese))
- [8] 尹家波, 郭生练, 王俊, 等. 全球极端降水的热力学驱动机理及生态水文效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(1): 96-114. (YIN Jiabo, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Thermodynamic driving mechanisms for the formation of global precipitation extremes and ecohydrological effects[J]. Scientia Sinica Terrae, 2023, 53(1): 96-114. (in Chinese))
- [9] HUANG Zeqin, TAN Xuezhi, GAN T Y, et al. Thermodynamically enhanced precipitation extremes due to counterbalancing influences of anthropogenic greenhouse gases and aerosols[J]. Nature Water, 2023, 1(7): 614-625.
- [10] WANG Ziyue, SUN Ying, ZHANG Xuebin, et al. Human influence on historical heaviest precipitation events in the Yangtze River valley[J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(2): 024044.
- [11] 吉戴婧琪, 元媛, 韩剑桥. 中国极端降水事件的时空变化及趋势预测[J]. 中国农村水利水电, 2022(10): 74-80. (JI-DAI Jingqi, YUAN Yuan, HAN Jianqiao. Spatial-temporal changes and trend predictions of extreme precipitation events in China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10): 74-80. (in Chinese))
- [12] 李慧慧, 栾承梅, 夏栩, 等. 基于 CMIP6 气候模式的中国大陆未来极端降水情景预估[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(8): 16-29. (LI Huihui, LUAN Chengmei, XIA Xu, et al. Prediction of future extreme precipitation scenarios in China based on CMIP6 climate model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(8): 16-29. (in Chinese))

- [13] 蒋艳,贺新光,章新平. 长江流域极端降水与当地平均气温的响应关系分析[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(1):40-49. (JIANG Yan,HE Xinguang,ZHANG Xinping. Response of extreme precipitation to local average temperature in the Yangtze River basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(1):40-49. (in Chinese))
- [14] GRÜNDEMANN G J,ZORZETTO E,BECK H E,et al. Extreme precipitation return levels for multiple durations on a global scale [J]. Journal of Hydrology,2023,621:129558.
- [15] WANG T,TANG G Q. Spatial variability and linkage between extreme convections and extreme precipitation revealed by 22-year space-borne precipitation radar data[J]. Geophysical Research Letters,2020,47(12):e2020GL088437.
- [16] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica,1945,13(3):245-259.
- [17] KENDALL M. Rank correlation methods[M]. London;C. Griffin,1955.
- [18] 王雨潇,孙莹莹,张天宇,等. 1998-2020年三峡库区最大1h降水的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):10-18. (WANG Yuxiao,SUN Yingying,ZHANG Tianyu,et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):10-18. (in Chinese))
- [19] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(4):79-85. (XU Lili,SHU Longcang,LI Wei,et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):79-85. (in Chinese))
- [20] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):195-204. (SHANG Shouwei,WANG Leizhi,WANG Yintang,et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):195-204. (in Chinese))
- [21] SEN Z. Innovative trend analysis methodology[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(9):1042-1046.
- [22] PHUONG D N D,TRAM V N Q,NHAT T T,et al. Hydro-meteorological trend analysis using the Mann-Kendall and innovative-Sen methodologies;a case study[J]. International Journal of Global Warming,2020,20(2):145-164.
- [23] GUL S,REN Jingli. Application of non-parametric innovative trend analysis of different time scale precipitation during (1951-2016) in Khyber Pakhtunkhwa,Pakistan[J]. Acta Geophysica,2022,70(1):485-503.
- [24] KISI Ö,SANTOS C A G,DA SLIVA R M,et al. Trend analysis of monthly streamflows using Şen's innovative trend method[J]. Geofizika,2018,35(1):53-68.
- [25] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):128-136. (XIE Zhigao,JIA Wenhao,WANG Xiayu,et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):128-136. (in Chinese))
- [26] 吴国栋,刘廷玺,薛河儒. 一种基于ITA改进的水文气象序列趋势分析法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):1-6. (WU Guodong,LIU Tingxi,XUE Heru. An improved trend analysis method for hydro-meteorological time series based on ITA [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):1-6. (in Chinese))
- [27] 阳扬,翟禄新,贾艳红,等. 概念水文模型在漓江流域的适用性研究[J]. 灌溉排水学报,2022,41(12):131-138. (YANG Yang,ZHAI Luxin,JIA Yanhong,et al. Comparison of conceptual hydrological models for Lijiang river basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(12):131-138. (in Chinese))
- [28] 张军民,荣城,董国松. 2000—2020年漓江流域景观生态脆弱性时空分异[J]. 水土保持研究,2022,29(5):283-292. (ZHANG Junmin,RONG Cheng,DONG Guosong. Spatiotemporal differentiation of landscape ecological vulnerability in Lijiang River Basin from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(5):283-292. (in Chinese))
- [29] 孙桂凯,杜媿,杨爱萍,等. 广西极端降水时空变化规律研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2021,46(2):327-335. (SUN Guikai,DU Ti,YANG Aiping,et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation in Guangxi[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition),2021,46(2):327-335. (in Chinese))
- [30] 周绍毅,苏志,李强. 广西5个主要极端降水指数变化趋势分析[J]. 气象研究与应用,2012,33(3):8-13. (ZHOU Shaoyi,SU Zhi,LI Qiang. Variation tendency of five main extreme precipitation indices in Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application,2012,33(3):8-13. (in Chinese))
- [31] 段文军,王金叶,张立杰,等. 1960—2010年漓江流域降水变化特征研究[J]. 水文,2014,34(5):88-93. (DUAN Wenjun,WANG Jinye,ZHANG Lijie,et al. Characteristics of precipitation in Lijiang River Basin during 1960-2010[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(5):88-93. (in Chinese))
- [32] MALIK A,KUMAR A,GUHATHAKURTA P,et al. Spatial-temporal trend analysis of seasonal and annual rainfall (1966-2015) using innovative trend analysis method with significance test[J]. Arabian Journal of Geosciences,2019,12(10):328.
- [33] SEN Z. Innovative trend significance test and applications[J]. Theoretical and Applied Climatology,2017,127:939-947.