

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.034.

夏志明, 廖凯涛, 郭利平, 等. 基于 EOF 和 MK 趋势分析的赣江流域降水时空分布格局[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 223-233, 249.

XIA Zhiming, LIAO Kaitao, GUO Liping, et al. Spatiotemporal Distribution Pattern of Precipitation in Ganjiang River Basin Based on EOF and MK Trend Analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 223-233, 249.

## 基于 EOF 和 MK 趋势分析的赣江流域 降水时空分布格局

夏志明<sup>1,2</sup>, 廖凯涛<sup>3,4</sup>, 郭利平<sup>1,2</sup>, 陈秀龙<sup>5</sup>, 刘翠平<sup>1,2</sup>, 焦玉章<sup>1,2</sup>, 曹建祖<sup>5</sup>

(1.江西农业大学 林学院 江西省森林培育重点实验室,南昌 330045;

2.江西农业大学 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室,南昌 330045;

3.江西省水利科学院,南昌 330029; 4.江西师范大学 地理与环境学院,南昌 330022;

5.江西农业大学 国土与资源环境学院 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,南昌 330045)

**摘 要:** [目的]研究赣江流域降水的时空分布特征,明确流域上中下游地区不同等级降雨的年际、年内和空间变化规律,并揭示易引发洪涝灾害的大雨和暴雨的高发时段和集中分布区域。[方法]使用经验正交函数分析(EOF)和 Mann-Kendall(MK)非参数检验等方法对全流域和上中下游降水量以及不同等级降水进行了分类与统计研究。[结果](1)对赣江流域降水空间分布格局的分析发现,降雨的高值中心位于流域东南部的宁都和石城地区,以此为起点向南北两个方向逐渐递减;大雨和暴雨的高值中心也主要位于流域东部及其偏南地区,由此向南北递减;中雨和小雨的高值中心则与之相反,主要位于流域西部及其偏南地区。(2)赣江流域降水的年际趋势变化显示,流域整体降水量呈现不显著增加趋势,仅 3 个站点和下游区域的降雨量有显著增加趋势;不同等级降雨中,小雨表现为显著下降趋势,中雨整体表现为不显著下降趋势(下游除外),大雨和暴雨在全流域及其不同分区都表现为显著增加趋势。(3)不同等级降雨的年内变化显示,全年降雨量主要集中发生于汛期,中雨和大雨为主要降水类型;6 月降水最多,尤其是暴雨量显著大于其他月份,12 月降雨量最少。[结论]赣江流域降水呈现出小雨中雨减少,大雨暴雨显著增加的两极分化现象,且呈现明显的时空分布不均现象;以石城和瑞金为起点的流域东南部地区在主汛期(尤其是 6 月)发生区域性暴雨洪涝灾害的概率较大。

**关键词:** 不同等级降雨; 时空分布; EOF 分析; MK 非参数检验; 赣江流域

中图分类号: P426.614

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0223-11

## Spatiotemporal Distribution Pattern of Precipitation in Ganjiang River Basin Based on EOF and MK Trend Analysis

XIA Zhiming<sup>1,2</sup>, LIAO Kaitao<sup>3,4</sup>, GUO Liping<sup>1,2</sup>, CHEN Xiulong<sup>5</sup>,

LIU Cuiping<sup>1,2</sup>, JIAO Yuzhang<sup>1,2</sup>, CAO Jianzu<sup>5</sup>

(1.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture, College of Forestry, Jiangxi

Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Key Laboratory of National Forestry

and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed,

Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3.Jiangxi Academy of Water Science and

Engineering, Nanchang 330029, China; 4.College of Geography and Environment, Jiangxi Normal University,

Nanchang 330022, China; 5.Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi

Province, College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this article is to study the spatiotemporal distribution characteristic of pre-

收稿日期: 2022-08-12

修回日期: 2022-08-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41905104); 江西省水利科技项目(202124ZDKT25); 江西农业大学大学生创新创业训练项目(LXYDC-2022-12, LXYDC-2022-04, 202210410151)

第一作者: 夏志明(2003—), 男, 江西南昌人, 研究方向: 生态气象与流域水文。E-mail: 749047443@qq.com

通信作者: 郭利平(1984—), 女, 四川南充人, 博士, 讲师, 研究方向: 生态气象与流域水文。E-mail: guoliping@jxau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

precipitation in the Ganjiang River basin, clarify the inter-annual, intra annual and spatial variation laws of different levels of rainfall in the upper, middle and lower reaches of the basin, and then reveal the high incidence period and concentrated distribution area of both heavy rainfall and rainstorm that are prone to flood disasters. [Methods] The precipitation of the whole basin and the upper, middle and lower reaches and different grades of precipitation were classified and statistically studied by EOF analysis and Mann-Kendall (MK) non-parametric tests. [Results] (1) The analysis of the spatial distribution characteristics of precipitation in the Ganjiang River Basin found that the center of the high value of rainfall was located in the Ningdu and Shicheng areas in the southeast of the river basin, and gradually decreased in the north and south directions from this starting point. The high-value centers of heavy rain and rainstorm were also mainly located in the eastern part and its further south region, and decreased to the south and north from this point, while the high value centers of moderate rain and light rain were opposite, which were mainly located in the western part of the river basin and its further southern regions. (2) The change of the interannual trend of precipitation in the whole basin showed that the total precipitation showed no significant increase trend, and only 3 stations and downstream areas had a significant increase trend. Among the different grades rainfall, light rainfall showed a significant downward trend, moderate rain as a whole showed a non-significant downward trend (except the downstream area), heavy rainfall and rainstorm showed a significant increase trend in the whole basin and its subarea. (3) The annual changes of different grades of rainfall showed that the annual rainfall mainly occurred in the flood season, with moderate and heavy rainfall as the main precipitation types. The rainfall in June was the most, especially the rainstorm in June was significantly greater than that in other months, and the rainfall in December was the least. [Conclusion] The precipitation in the Ganjiang River Basin showed a polarization phenomenon of light and moderate rainfall decreased, heavy rainfall and rainstorm increased significantly, and there is an obvious uneven spatial and temporal distribution. The southeastern part of the basin, starting from Shicheng and Ruijin, is more likely to experience regional rainstorm and floods disasters during the main flood season, especially in June.

**Keywords:** different grades rainfall; spatiotemporal distribution; EOF analysis; MK non-parametric test; Ganjiang River Basin

气候变化与人们生活密切相关,受全球气候变暖影响,各区域的气候变化特征日益成为气候领域的热点研究问题之一<sup>[1-3]</sup>。IPCC第5次评估报告<sup>[4]</sup>认为:全球气候增暖导致热浪、强降水等极端事件频发,不断增加的气象灾害已经严重影响各国的粮食生产<sup>[5-7]</sup>。赣江是鄱阳湖流域最大水系,其所在的流域也是江西省水土流失最严重的区域;其气候变化特别是降水变化对区域生态环境影响巨大<sup>[8-9]</sup>,且对流域不同区域水文情势的变化有一定影响<sup>[10]</sup>。近年来,受气候变暖影响,流域部分地区强降水发生的频率和强度不断增加,降水极端性更强;年内降水存在严重的季节分配不均现象,比如降水主要集中发生在春夏季,秋冬季较少;并且,在季节交替时易发生旱涝急转事件,对区域农业生产和经济社会发展产生了较大影响。因此,对其开展有针对性的旱涝治理具有重要的现实意义<sup>[11]</sup>,不仅关系到流域本身的水文特征演变,更关系到鄱阳湖的气象水文态势<sup>[12-13]</sup>,与长江地区的旱涝预防也有着一定关系<sup>[14-15]</sup>。

不同等级降雨事件存在明显的时空分布差异,对其进行深度剖析能更清楚地掌握区域降水格局;通过探明赣江流域及其不同分区不同等级降雨的时空变化特征,明确对赣江流域洪涝灾害影响较大的降雨等级和洪涝高风险区域,对流域的防洪工作具有重要的指导意义。李林<sup>[16]</sup>研究表明,不同流域不同等级降雨对年降水量贡献存在不同;董满宇等<sup>[17]</sup>研究发现太湖流域中雨日数、大雨日数显著增加,对流域降水格局起了主导作用,小雨日数、年总降水日数显著减少,导致流域小雨强度、年总降水强度显著增强;张珊等<sup>[18]</sup>对兰州市降雨时空格局的研究发现,不同等级降雨及其时空分布特征影响和制约了降雨型黄土滑坡的发生和发展。不同等级降雨的变化会导致不同地区旱涝灾害的发生,比如微量降雨事件的减少会促进地区干旱化,而大雨事件的增加会加剧涝灾及水土流失等气象和环境灾害<sup>[19]</sup>。中雨以上等级的面雨量降雨是影响汛情的重要因素,中雨、大雨、暴雨等降雨级与防汛直接相关<sup>[14]</sup>,而中雨和大雨是赣江流域的

主要降水类型,其变化对区域洪涝灾害的发生概率具有重要影响。

目前,有关赣江流域降水时空分布格局的研究已有部分开展<sup>[20-24]</sup>,但仅限于对流域总降水量的研究,对流域上中下游的降水时空差异尚未做深入解析,尤其是关于赣江流域的不同等级降水空间分布与年际、年内变化特征还尚不清楚。有鉴于此,本文将从以下几个方面开展研究工作:(1)采用经验正交函数(EOF)来揭示流域年降水和不同等级降雨的空间分布特征,明确极端降水的高发区域;(2)采用 MK 非参数检验法分析赣江流域上中下游年降水和不同等级降雨的年际变化特征,确定不同分区和不同等级降雨的年际变化趋势;(3)采用多重比较法对不同等级降雨各月度降雨量的变化情况进行统计分析,明确洪涝灾害的高风险时间段。通过明确流域的降水时空格局尤其是洪涝灾害发生的高风险区域,以为赣江流域的防洪工作提供一定的科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赣江流域(113.3°—116.4°E,24.29°—29.11°N)位于长江中下游南岸,总面积达 83 500 km<sup>2</sup>,占鄱阳湖流域面积的 51.5%,是鄱阳湖流域最大的子流域。按河谷地形和河道特征可将赣江流域划分为上、中、下游三段,赣州市以上为上游,河流自东向西流,赣州市至新干县为中游,新干县以下为下游,中下游总体流向自南向北,再基于东西南北 4 个方向进行南北分区,向南为南部地区,向北为北部地区<sup>[25]</sup>(图 1)。流域内水系支流众多,水量充足;主要地貌类型为山地和丘陵,还有部分平原和低丘地区,南部山地更多,北部低丘更多;土壤以山地黄壤和黄棕壤为主。所属气候类型为亚热带湿润季风气候,流域年均温 17.8℃,全年气候温和,霜冻期较短;南北地跨 4 个纬度,南北气候略有差异,平均气温相差约 3℃。流域雨量充足,年均降水量在 1 600 mm 以上,但存在明显的季节分布不均特点,全年降水主要集中在汛期(4—9 月),即春夏季降水较多,秋冬季降水较少;同时,也存在明显的空间分布不均现象,东部降水较多,中部降水较少。

1.2 数据来源

本文根据赣江流域的水系分布情况,较为均匀地选择气象站点,共计 34 个气象站点,所有站点的降水时间跨度均为 1959—2020 年,足以表示出该流域的近几十年来的降水分布情况;其中,上中下游分别有 15,12,7 个站点,站点的分布位置见图 1。逐日降雨

数据来自我国气象局国家气象信息中心地面气候数据的日值数据集(<http://data.cma.cn/>)。本文通过 MATLAB2011 年编程实现对数据的筛选和统计分析,并使用 ArcGIS 10.2 做降水指标的空间分布图。

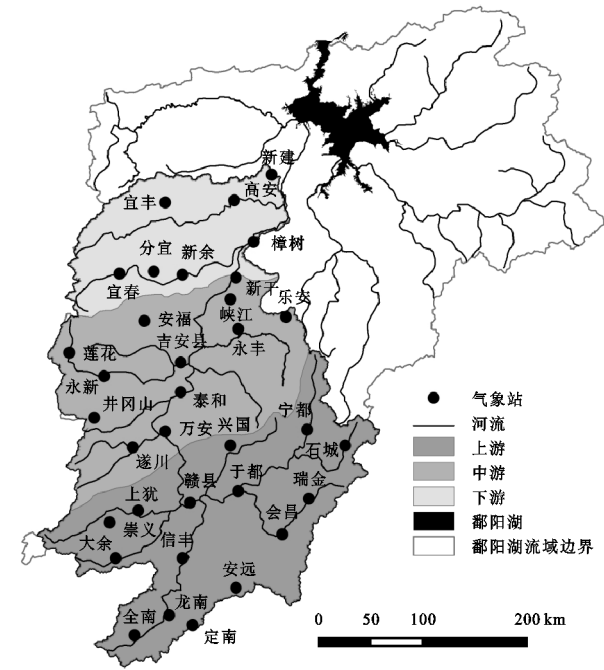


图 1 赣江流域及其气象站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 不同等级降雨的划分与分布情况 依据我国降雨等级划分标准<sup>[26]</sup>,把赣江流域的日降雨量分为 4 个等级,分别为小雨、中雨、大雨和暴雨,即日降雨量在 0.1~10 mm 为小雨,在 10.1~25 mm 为中雨,在 25.1~50 mm 为大雨,大于 50 mm 为暴雨。不同等级降雨在全流域的分布情况显示,中雨的累积降雨量最大,为 486.5 mm,占比达到 30.1%;其次为大雨,其累积降雨量为 471.8 mm,占比为 29.2%;暴雨和小雨的占比较低,分别为 21.5%和 19.1%。上中下游 4 种等级降雨的累积降雨量和占比情况与全流域的分布情况较为一致,即年降雨量主要由中雨和大雨构成,占比约为 60%;而小雨和暴雨的占比约为 40%(表 1)。

1.3.2 经验正交函数(EOF) 本文采用经验正交函数(EOF)对各气象站点的降水数据进行分析处理,通过提取主要数据特征量,将信息集中到少数几个空间分布和时间序列上,以此反映降水的时空变化。其中,特征向量对应空间样本,主成分对应时间系数。该方法在气候和气象学相关研究领域已经得到了广泛运用<sup>[27-29]</sup>。

EOF 分析方法的详细计算过程为:选定预分析的数据,处理成距平形式,得到矩阵  $X_{m \times n}$ ,  $m$  为站点的数量,  $n$  为年数。计算协方差矩阵  $C_{m \times m}$ :

$$C_{m \times m} = \frac{1}{n} (X_{m \times n} \times X_{m \times n}^T)$$

(1)

表 1 不同等级降雨划分标准及其累积降雨量分布情况

降雨等级	小雨 0.1~10 mm		中雨 10.1~25 mm		大雨 25.1~50 mm		暴雨 >50 mm	
划分标准分区	累积降雨量/mm	占比/%	累积降雨量/mm	占比/%	累积降雨量/mm	占比/%	累积降雨量/mm	占比/%
全流域	309	19.1	486.5	30.1	471.8	29.2	346.3	21.5
上游	301.7	18.7	482.6	29.9	482.1	29.8	349.4	21.6
中游	319.1	20.1	491.6	31	457.5	28.8	318.2	20.1
下游	306.3	18.7	485.5	29.6	475.8	29	371.2	22.7

矩阵  $C_{m \times m}$  的特征值  $(\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_m)$  和特征向量  $V_{m \times m}$  满足:

$$C_{m \times m} \times V_{m \times m} = V_{m \times m} \times E_{m \times m} \quad (2)$$

$$E_{m \times m} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix}$$

得到时间系数矩阵  $T_{m \times n}$ :

$$T_{m \times n} = V_{m \times m}^T \times X_{m \times n} \quad (3)$$

第  $k$  个模态的方差贡献率为:

$$\text{贡献率} = \lambda_k / \sum_{i=1}^m \lambda_i \times 100\% \quad (4)$$

本文选用 North 法对特征值的误差范围进行显著性检验,在 95% 置信度水平下的特征根的误差为:

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\frac{2}{N}} \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  是特征根;  $N$  是样本总数。将  $\lambda$  按顺序依次检查,标上误差范围,如果相邻两个特征根之间的误差范围没有重叠,即  $\lambda_{i+1}$  的误差上限小于  $\lambda_i$  的误差下限,则表示通过显著性检验。

1.3.3 MK 分析 Mann-Kendall (MK) 检验具有不需要遵循特定分布的样本,不受少数异常值影响的特点<sup>[30]</sup>,相较于其他方法,更易于计算。能够很好地体现时间序列趋势的上升和下降,并表现出趋势变化的程度,从而适用于水文气象学数据的计算,目前已广泛运用于气候变化特征信息的提取。其详细计算过程为:

对时间序列变量  $x_1, x_2, \cdots, x_n$ , 其检验统计量  $S$  为:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (6)$$

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $S$  呈现为正态分布,其均值等于 0。

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (8)$$

当  $n > 10$  时,标准正态统计变量  $Z$  为:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

当  $Z$  值大于 0 时,时间序列为增加的趋势,当  $Z$  值小于 0 时,为减少的趋势。当  $Z$  值的绝对值  $\geq 1.28, 1.64, 2.32$  时,分别表示时间序列的变化趋势通过了置信度为 90%, 95% 和 99% 的显著性检验<sup>[31]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 赣江流域降水空间分布格局

2.1.1 年降水量的 EOF 分析 采用 EOF 分解法对赣江流域 1959—2020 年的年降水量进行时空分解,并对其进行 North 显著性检验。根据 North 准则,只有模态的特征根误差范围没有重叠的才可以通过显著性检验<sup>[32]</sup>;全流域前 5 个特征向量的累计方差贡献率达到了 88%,但只有前 4 个特征向量的特征根误差范围没有重叠,通过了 North 检验。前 4 个特征向量的累计方差贡献率达到了 86%,但第三和第四模态的方差贡献率仅为 4% 和 2%,取前两个模态能较好解释赣江流域近 60 年降水量的降水分布类型。模态 1 的方差贡献率达到了 67%,远高于其他模态,是赣江流域最主要的空间分布类型(表 2)。

表 2 年降水量前 5 个特征向量贡献率

模态	特征值	方差 贡献率/%	累计方差 贡献率/%	特征根 误差下限	特征根 误差上限
1	2215800.10	67	67	1678389.64	2753210.57
2	416059.96	13	79	315150.60	516969.32
3	141401.45	4	83	107106.56	175696.34
4	80683.73	2	86	61115.05	100252.40
5	77920.96	2	88	59022.35	96819.57

模态 1 中所有站点的特征向量值都为正值,说明赣江流域 1959—2020 年的降水变化趋势具有高度一致性,呈现出全流域都多雨,或全流域都少雨的降水分布特征(图 2)。特征向量值以流域东部为起点,向南北两个方向逐渐递减,高值中心位于流域东部的宁都和石城地区,说明该区域的年降水量最大,为雨



量变化的敏感中心,低值中心位于下游北部地区和上游南部定南和安远等小部分区域。模态 2 的方差贡献率为 13%,也是赣江流域较典型的降水主要空间分布形式。流域上游的特征向量全为正值,中游大都为负值,下游全为负值,从南到北向量值逐渐递减,说

明流域降水量的变化是从南到北逐渐递减的。高值中心在上游南部地区,低值中心在下游北部地区,呈现出南北反向分布模式,即如果流域南部降水量偏多,则北部降水量偏少;如果南部降水量偏少,则北部降水量偏多。

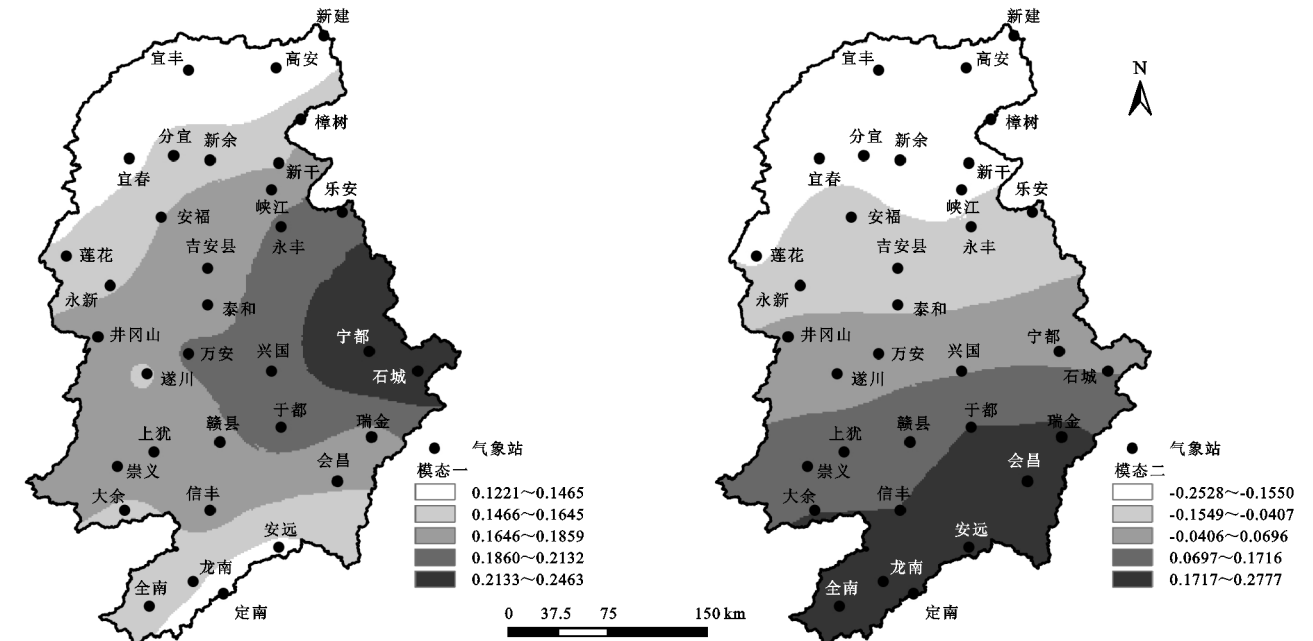
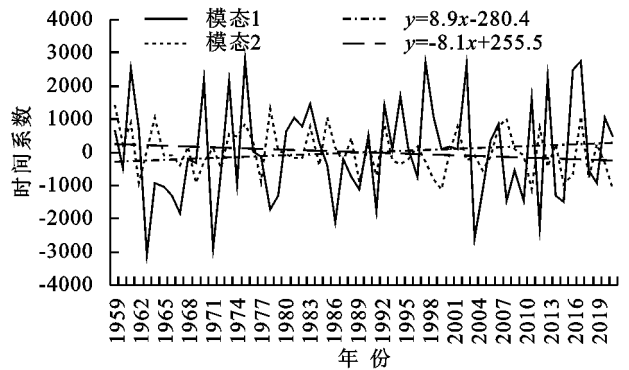


图 2 降雨量第一、二特征值空间分布



注:实线为模态 1 的时间系数趋势线,虚线为模态 2 的时间系数趋势线。

图 3 降雨量第一、二模态时间系数

时间系数可以体现与特征向量空间分布模态相对应的时间变化特征,时间系数为正值,表示与空间模态变化方向相同,负值则相反;且时间系数绝对值

越大,模态的典型程度也越大<sup>[30]</sup>。将每年绝对值最大的时间系数所对应的特征向量作为当年典型的空  
间分布类型,若原本为正值,则该年为该模态的正向分布,若原本为负值,则该年为该模态的反向分布<sup>[33]</sup>。对赣江流域年降水空间分布特征进行分类,有全流域多雨、全流域少雨、南部多雨北部少雨、南部少雨北部多雨 4 种主要表现类型(表 3)。由图 3 可知,模态 1 时间系数趋势斜率大于零,一定程度上说明流域近 60 年来年降水量有增加趋势,即模态 1 有全流域多雨趋势。然而,当模态 2 时间系数为正值时,降水分布表示南部多雨北部少雨,当时间系数为负值时,表现为南部少雨北部多雨。赣江流域年降雨量模态二的时间系数趋势斜率小于零,说明南部少雨北部多雨为流域的主要分布类型。

表 3 第一、二模态 4 种表现型的年份分布

模态	降水表现型	年份
1	全域多雨	1961,1970,1973,1975,1980,1981,1982,1983,1990,1992,1994,1997,1998,2002,2006,2010,2012,2015,2016,2019
	全域少雨	1960,1963,1965,1966,1967,1971,1972,1974,1978,1979,1986,1988,1989,1991,1996,2003,2004,2007,2008,2009,2011,2013,2014,2018
2	南部多雨北部少雨	1959,1964,1985,2001
	南部少雨北部多雨	1962,1969,1977,1984,1999,2017,2020

对赣江流域近 60 年的降水格局进行统计发现,全流域多雨、全流域少雨、南部多雨北部少雨和南部

少雨北部多雨 4 种分布格局分别有 20 a,24 a,4 a 和 7 a,模态 1 的降水分布格局有 44 a,占全部年份的

71%。模态2的降水分布格局有11 a,占18%,说明近60年,赣江流域的降水空间分布格局以模态1为主,模态2为较典型的空间分布格局。

2.1.2 不同等级降雨的空间分布格局 不同等级降雨模态1显示,所有站点的特征向量值均为正值,表示全流域小雨、中雨、大雨和暴雨量的变化具有高度一致性,呈现出赣江全流域小雨、中雨、大雨和暴雨量都多,或全流域都少的降水分布特征(图4)。小雨第1模态高值中心位于上游西部的上犹、崇义和大余地区,低值中心位于下游北部的新建、宜丰和高安地区,向量值从西

南向东北递减。中雨第1模态高值中心位于中游西部地区,低值中心位于上游南部的新建、高安、宜丰地区和下游北部,向量值从中游西部向东北和东南两个方向递减。大雨第1模态高值中心在上游东南的石城、瑞金和会昌地区,低值中心在下游北部地区,向量值从东南向西北递减。暴雨第1模态高值中心在上中游交接的宁都地区,低值中心主要在上游南部,部分在下游北部,全流域东部地区向量值普遍大于西部地区,向量值从东部向南北递减。由此说明,全流域年降水模态1的降水分布格局主要是受到了大雨和暴雨模态1的影响。

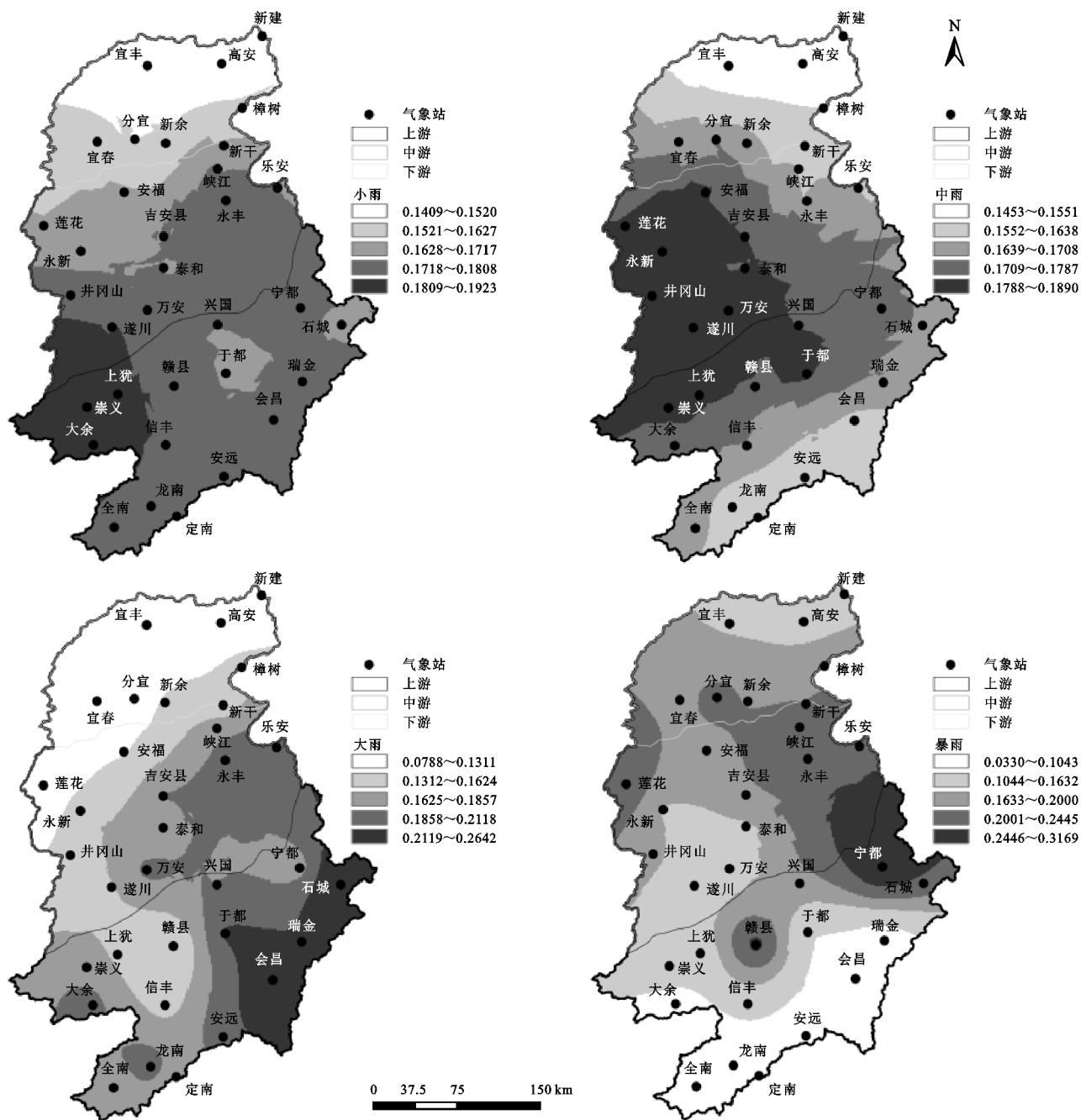


图4 不同等级降雨第一特征值空间分布

不同等级降雨模态2具有良好的-致性,向量值从南向北逐渐递减,呈现出南北反向分布模式,即如果流

域南部的小雨、中雨、大雨和暴雨量多,则北部少;如果南部的小雨、中雨、大雨和暴雨量少,则北部多(图5)。

小雨第 2 模态中下游地区向量值全为负值,上游大部分为正值,仅赣县和石城为负值,高值中心在流域南部,低值中心在下游北部。

中雨、大雨和暴雨第 2 模态下游向量值全为负值,中游大部分为负值,上游除赣县外全为正值;中雨

高值中心在上中游交接处西部的崇义和井冈山地区与上游南部地区,低值中心在下游东北部;大雨高值中心在上游南部,低值中心在下游北部;暴雨高值中心在上游南部,低值中心在下游北部的新建、高安和宜丰地区。

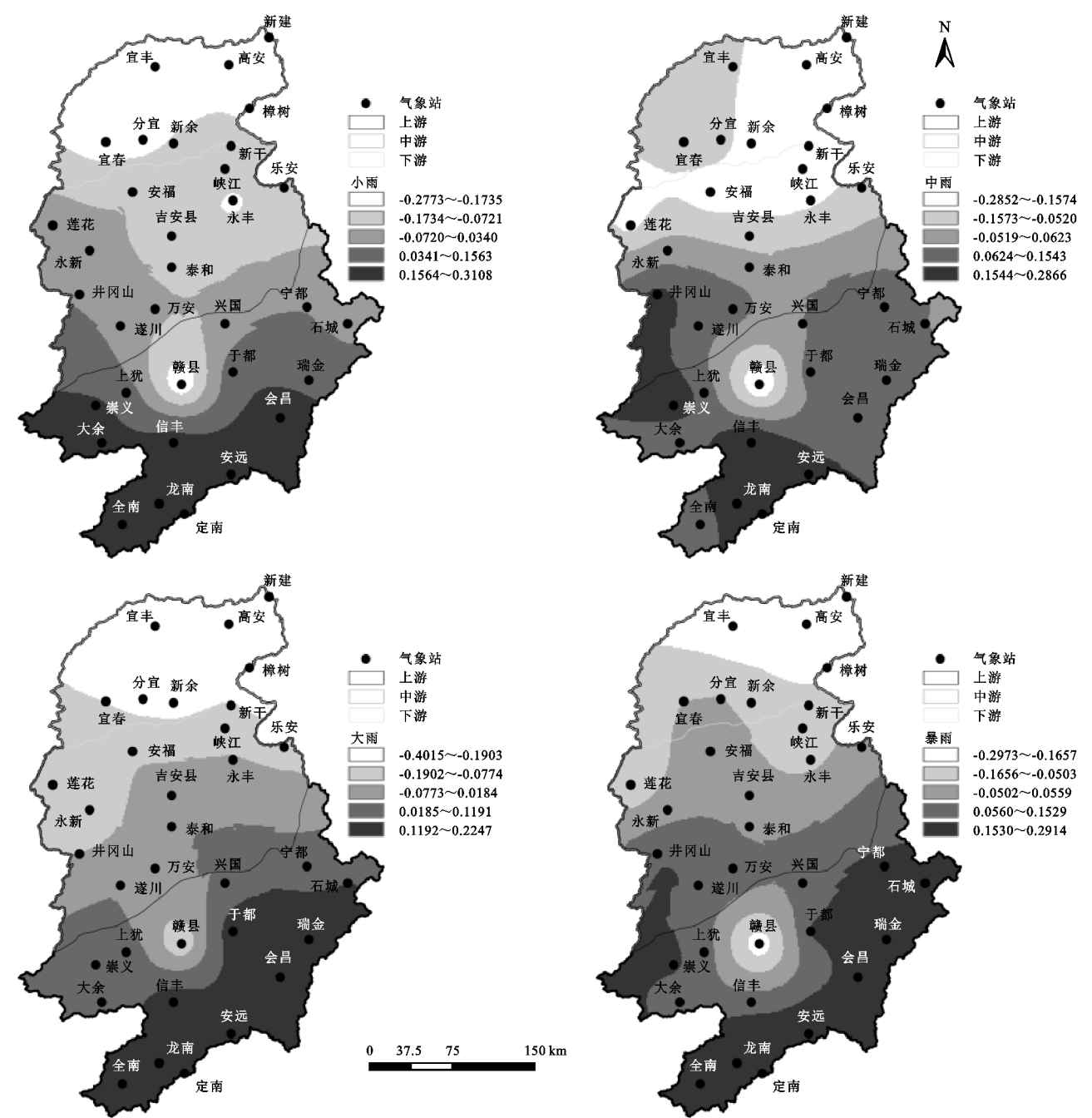


图 5 不同等级降雨第二特征值空间分布

2.2 赣江流域降水的时间变化特征

2.2.1 赣江流域不同等级降水的年际变化 对赣江流域全流域和上中下游各分区年降水量的 MK 分析发现,流域年降水量的 Z 值小于 1.28,表现为不显著增加趋势。其中,上游年降水量增幅最小,中游其次,上中游地区均未达到显著变化;下游的 Z 值为 1.38,表现为显著增加趋势。对全流域及其分区不同等级

降雨年际变化的分析发现,赣江流域小雨的 Z 值为 -2.71,通过了 99%的置信度检验,上中下游均通过了 90%的置信度检验,说明小雨在不同分区都表现为显著减少趋势;其中,上中游 Z 值绝对值都大于下游,说明上游和中游减少趋势比下游更加明显。全流域中雨的年际变化表现为不显著减少趋势,上中游降雨也为不显著下降趋势,仅下游为不显著增加趋势。

全流域和中下游地区大雨的年际变化均通过 90% 的置信度检验, 表现为显著增加趋势, 仅上游为不显著增加趋势。

全流域暴雨的  $Z$  值为 2.02, 说明其年际变化有显著增加趋势, 上中下游均通过 90% 的置信度检验, 且中游增加趋势相对更加显著(表 4)。

表 4 不同等级降雨 MK 分析结果

分区	站点	年降水量	小雨	中雨	大雨	暴雨
上游站点	安远	-0.56	-2.28**	-1.05	-0.12	0.53
上游站点	崇义	0.23	-1.48*	0.02	-0.69	0.97
上游站点	定南	0.06	-1.71**	-1.28*	0.63	0.29
上游站点	大余	0.72	-2.97***	0.47	0.47	0.46
上游站点	赣县	-0.56	-1.28*	-1.24	2.10**	2.19**
上游站点	会昌	0.23	-2.36***	-0.70	0.36	0.78
上游站点	龙南	0.48	-1.48*	-0.20	1.09	-0.03
上游站点	宁都	0.61	-2.42***	-0.30	0.36	1.34*
上游站点	全南	-0.17	-1.48*	-0.03	-0.61	0.61
上游站点	瑞金	-0.72	-2.51***	-0.19	-0.47	-0.73
上游站点	石城	0.61	-1.40*	-0.14	-0.17	1.63*
上游站点	上犹	0.03	-1.88**	-1.09	0.01	1.46*
上游站点	信丰	-0.32	-2.16**	-0.19	-1.07	1.06
上游站点	兴国	0.32	-3.81***	-0.56	0.38	1.48*
上游站点	于都	0.11	-2.13**	-0.63	0.79	0.09
上游	合计	0.13	-3.18***	-0.49	0.70	1.43*
中游站点	安福	0.46	-3.47***	0.15	1.00	0.78
中游站点	吉安县	0.06	-1.15	0.02	2.38***	2.34***
中游站点	井冈山	0.72	-3.09***	-0.22	2.22**	1.24
中游站点	乐安	0.68	-3.74***	-0.15	1.54*	0.60
中游站点	莲花	1.12	-0.86	-0.06	0.24	1.14
中游站点	遂川	1.17	-1.35*	-0.50	2.30**	1.62
中游站点	泰和	0.83	-2.42***	-1.37*	1.72**	1.90**
中游站点	万安	1.08	-2.02**	1.33*	0.95	1.59*
中游站点	新干	0.94	-2.30**	-0.18	0.72	1.52*
中游站点	峡江	1.03	-1.25	-1.02	0.55	1.59*
中游站点	永丰	1.53*	-2.08**	-0.01	2.13**	1.28*
中游站点	永新	1.07	-0.69	-0.13	1.83**	0.45
中游	合计	1.06	-2.75***	-0.21	1.86**	2.02**
下游站点	分宜	0.68	-0.80	0.40	0.90	0.48
下游站点	高安	0.46	-2.16**	0.63	2.30**	1.11
下游站点	新建	1.47*	-1.68**	1.30*	1.37*	1.13
下游站点	新余	0.52	-0.64	-0.45	0.87	1.05
下游站点	宜春	1.17	-2.24**	1.13	0.34	2.00**
下游站点	宜丰	0.90	-1.07	-1.57*	1.52*	0.86
下游站点	樟树	2.15**	-0.86	-1.17	1.93**	2.19**
下游	合计	1.38*	-1.48*	0.34	1.69**	1.85**
全流域	合计	0.81	-2.71***	-0.05	1.46*	2.02**

备注: \*, \*\*, \*\*\* 分别表示通过 90%, 95% 和 99% 的置信度检验。

对流域各气象站点降雨量的 MK 分析发现, 年降水量中下游站点  $Z$  值都为正值, 上游仅安远、赣县、全南、瑞金和信丰为负值, 即全流域有 29 个站点为正值, 其中仅永丰、新建和樟树的降雨量为显著增加趋势; 其他 5 个站点的降雨量表现为不显著下降趋势。全流域小雨  $Z$  值均为负值, 通过 90% 的置信度检验的站点数达到 26 个, 共有 9 个站点通过 99% 的置信度检验。中雨  $Z$  值为正的站点有 9 个, 仅万安和新建通过 90% 的置信度检

验, 有 25 个站点  $Z$  值为负值, 仅泰和和宜丰通过 90% 的置信度检验。中下游大雨  $Z$  值均为正值, 上游有 6 个站点  $Z$  值为负值, 且均未通过 90% 的置信度检验; 全流域共有 12 个站点的大雨  $Z$  值通过 90% 的置信度检验, 16 个站点为不显著增加趋势。中下游暴雨  $Z$  值都为正值, 上游有龙南和瑞金  $Z$  值为负值, 且都未通过 90% 的置信度检验, 显著增加趋势的站点有 13 个, 不显著增加趋势的站点有 19 个。



2.2.2 赣江流域降水的年内变化 由表 5 可知,赣江流域上中下游汛期(4—9 月)总降水量分别为 1 112.6 mm,1 058.6 mm 和 1 091.9 mm,各占全年总降水的 68.9%,66.7%和 66.6%;其中,主汛期(4—6 月)总降水量均为全年 12 个月总降水的前 3 位,各自占全年总降水的 44.4%,42.9%和 44.8%,接近于

全年降水量的一半。上中下游 6 月降水总量均为全年最大值,分别为 268.8 mm,252.7 mm 和 278.7 mm,各自占总降水的 16.6%,15.9%和 17.0%。12 月降水总量为全年最小值,主要降水类型为小雨和中雨,上中下游降水分别为 46.8 mm,50.4 mm 和 53.8 mm,仅占全年的 2.9%,3.2%和 3.3%。

表 5 部分月份降水占比

分区	降雨级	总降水/mm	6 月/mm	占比/%	12 月/mm	占比/%	4—6 月/mm	占比/%	4—9 月/mm	占比/%
上游	小雨	301.7	31.6	10.5	16.6	5.5	95.9	31.8	167.8	55.6
上游	中雨	482.6	59.5	12.3	16.4	3.4	189.6	39.3	305.8	63.4
上游	大雨	482.1	77.2	16.0	8.5	1.8	233.7	48.5	347.7	72.1
上游	暴雨	349.4	100.5	28.8	5.3	1.5	198.9	56.9	291.3	83.4
上游	年降水	1615.8	268.8	16.6	46.8	2.9	718.2	44.4	1112.6	68.9
中游	小雨	319.1	28.5	8.9	20.5	6.4	97.2	30.4	161.2	50.5
中游	中雨	491.6	55.6	11.3	18.8	3.8	191.5	39.0	292.1	59.4
中游	大雨	457.5	71.3	15.6	8.2	1.8	210.5	46.0	322.5	70.5
中游	暴雨	318.2	97.3	30.6	2.9	0.9	182.1	57.2	282.9	88.9
中游	年降水	1586.3	252.7	15.9	50.4	3.2	681.3	42.9	1058.6	66.7
下游	小雨	306.3	26.8	8.7	21.7	7.1	91.7	30.0	148.2	48.4
下游	中雨	485.5	50.7	10.5	21.5	4.4	181.5	37.4	269.8	55.2
下游	大雨	475.8	76.3	16.0	8.5	1.8	229.2	48.2	334.9	70.4
下游	暴雨	371.2	124.9	33.6	2.2	0.6	232.1	62.5	338.9	91.3
下游	年降水	1638.8	278.7	17.0	53.8	3.3	734.6	44.8	1091.9	66.6

暴雨的月度变化为单峰型,而小雨、中雨和大雨各分区月度变化均有先升后降,再升再降的变化趋势(图 6)。赣江流域小雨集中发生在 1—6 月,3 月为小雨累积降雨量最大的月份,且显著大于其他月份;上游 4—6 月,中游 4—5 月和下游 4 月的小雨降雨量也较多,但显著低于 3 月的累积值。上游和中游的 10 月、下游的 9 月为小雨累积降雨量最小的月份。上游中雨的最大值发生于 4 月,中游和下游中雨的最大值则发生于 3 月,中下游 3 月与 4 月的中雨量均未有显著差别,上游 4 月与 5 月未有显著差别,说明中雨量最大的两个月份之间无显著差别;中雨的最小值一般发生于每年的 12 月。就大雨而言,其最大值主要发生于每年的 5 月,且 4—6 月的大雨量之间无显著差别(上游除外);最小值发生于 12 月。流域上中下游暴雨量的月度变化均为单峰型,最大暴雨值都发生于 6 月,其值显著大于其他月份;上中下游 6 月暴雨量分别占全年的 28.8%,30.6%和 33.6%,从上游到下游占比上升,中下游地区 7 月暴雨量显著大于 4 月,而上游 4 月暴雨量略大于 7 月,二者无显著差别;冬季的暴雨发生概率较低。

3 讨论与结论

3.1 基于 EOF 分析的降雨量空间分布特征

年降水、大雨和暴雨模态 1 的高值中心在流域

东部的宁都和石城地区,低值中心在流域南北部,小雨和中雨高值中心位于西部的崇义、上犹和遂川地区,各降雨级在北部新建、高安和宜丰地区均存在低值中心。

年降水、大雨和暴雨向量值从东部向南北递减,小雨从西南向东北递减,中雨从西部向南北两方向递减。由此说明,以宁都、石城和瑞金站为起点的东南部地区是发生洪涝灾害的高风险地区,而流域北部的新建、高安和宜丰是更容易遭受干旱风险的地区。

刘卫林等<sup>[20]</sup>利用反距离权重插值法发现赣江流域降水空间分布基本呈南低北高趋势,东北部总降水多,西南部少,小雨量呈现西高东低的分布特征,大雨和暴雨的降水量由东北向西南递减,小雨与本文模态 1 结果相似,但本文大雨和暴雨从流域中部向北部递减,方向与之相反;该研究还指出宁都附近为降雨高值区,赣州附近为小雨和中雨的低值区,大雨低值主要分布于西南部,而本文模态 1 大雨低值主要分布于西北部,小雨、中雨和大雨在流域北部的宜丰、高安和新建地区出现较明显低值,而高值分布大致相同,该差异可能是由于研究方法和站点选取的不同所致。

年降水和不同级降雨模态 2 向量值均从南向北递减,高值中心大部分位于南部全南、龙南和安远地区,低值中心大部分位于北部新建、高安和宜丰地区。近 60 年全域多雨或全域少雨为赣江流域主要的降雨

空间分布模型,流域南部的降水相对较少,北部相对较多。刘卫林等<sup>[20]</sup>对不同降雨级分布的研究结果与本文第二模态的南少北多分布特征相似,韩会明

等<sup>[21]</sup>发现流域年降水分布为空间一致型和南北相反型,鲁向晖等<sup>[22]</sup>研究发现赣江流域全年降水量呈南少北多的分布格局,与本文得到的结果一致。

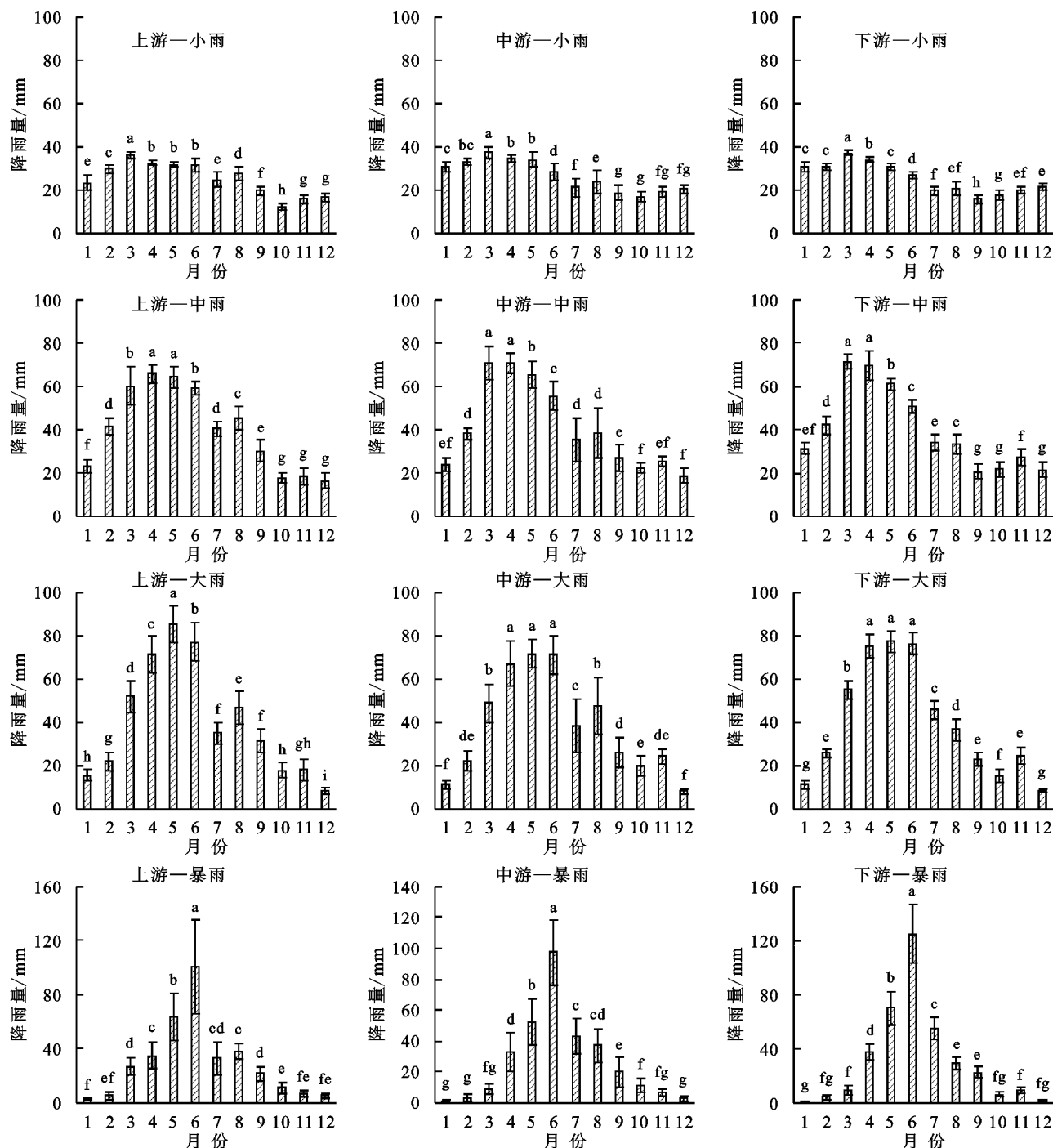


图6 不同等级降雨不同分区的月度分布情况

### 3.2 基于MK趋势分析的降雨量时间变化特征

赣江流域总降水量表现为不显著增加趋势,仅上游部分站点年降水有不显著减少趋势,上中游区域都为不显著增加趋势,仅下游为显著增加趋势。不同等级降雨中,小雨在全流域及其不同分区都呈显著减少趋势,且上中游减少趋势更加明显;全流域中雨表现为不显著下降趋势(下游除外);大雨和暴雨在全流域及其不同分区

都表现为显著增加趋势,且中游趋势更明显。刘卫林等<sup>[20]</sup>利用一元线性方程法对不同降雨等级的研究发现,赣江流域小雨、中雨的降水量呈现减少趋势,而大雨、暴雨的降水量为增加趋势。刘声洪等<sup>[23]</sup>研究发现赣江上游平江流域的年小雨、年中雨量呈下降趋势,年大雨、年暴雨量呈上升趋势,王永文等<sup>[24]</sup>研究发现赣江上游章水流域年降水量在缓慢增加。以上学者对赣江

流域及其子流域不同等级降水的研究结果与本文利用 MK 非参数检验得到的结果较为一致。

赣江流域降水主要集中在汛期(4—9月),主汛期(4—6月)总降水接近全年总降水的50%,6月和12月的降雨分别为全年最多和最少,该结果与韩会明等<sup>[21]</sup>和鲁向晖等<sup>[22]</sup>基于年内月度降水的研究结果一致。流域暴雨为单峰型变化,而小雨、中雨和大雨各分区月度降水变化均有先升后降,再升再降的多峰变化趋势。小雨集中在1—6月,最大值出现在3月,中雨量最大的两个月份之间无显著差别,中下游4—6月的大雨量不存在显著差别(上游除外),暴雨量6月值显著大于其他月份。刘声洪等<sup>[23]</sup>对赣江上游平江流域的月度降雨分析发现,小雨集中在1—6月,为双峰型,中雨和大雨同为多峰型,且占流域降雨主导地位,暴雨集中在5—8月,为单峰型,与本文上游研究结果较为相似,但与中下游略有不同,其中雨主峰出现在4月,而本文中下游的中雨主峰出现在3月,大雨主峰出现在6月,而本文一般出现在5月,但不同等级降雨的最低值月份分布与本文相同,该差异由研究区域范围不同导致。

#### 参考文献:

- [1] 黄国如,陈易偲,姚芝军.高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J].水科学进展,2021,32(2):161-170.
- [2] Asamoah Y, Ansah-Mensah K. Temporal description of annual temperature and rainfall in the Bawku Area of Ghana[J]. Advances in Meteorology, 2020,2020:1-18, Doi: org/10.1155/2020/3402178.
- [3] Anurag Malik, Anil Kumar. Spatio-temporal trend analysis of rainfall using parametric and non-parametric tests: case study in Uttarakhand, India[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020,140(1):183-207.
- [4] 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.
- [5] 陈晓艺,姚筠,霍彦峰,等.安徽省主要气象灾害趋势演变及其对粮食总产的影响[J].长江流域资源与环境,2020,29(10):2285-2295.
- [6] 王秋京,马国忠,朱海霞,等.黑龙江省主要农业气象灾害演变特征及对水稻产量的影响[J].灾害学,2020,35(1):76-83.
- [7] Ju H, Zhang D, Zhang X Y, et al. Effects of Climate Extremes on Cereal Production in the North China Plain During 1950-2015[J]. International Journal of Sustainable Development Research, 2022,8(2):66-75.
- [8] 刘明霞.赣江上游流域植被覆盖度变化及其驱动因素研究[D].江西赣州:江西理工大学,2021.
- [9] 赵君,王鹏,余小芳.温度和降水对赣江流域土地利用方式与河流氮磷营养盐相关性的影响[J].江西师范大学学报:自然科学版,2018,42(6):655-660.
- [10] 肖农,闫峰,胡振鹏,等.气候变化对鄱阳湖赣江流域水文情势影响的实证研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(11):39-49.
- [11] 王容,李相虎,薛晨阳,等.1960—2012年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征[J].湖泊科学,2020,32(1):207-222.
- [12] 雷享勇,高路,马苗苗,等.鄱阳湖流域极端降水时空分布和非平稳性特征[J].应用生态学报,2021,32(9):3277-3287.
- [13] 王怀清,赵冠男,彭静,等.近50年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究[J].长江流域资源与环境,2009,18(7):615-619.
- [14] 沈许英,孙嘉翔,王乐.长江流域分区面雨量特征分析[J].人民长江,2021,52(9):79-85.
- [15] 曹博,张勃,马彬,等.基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J].生态学报,2018,38(17):6258-6267.
- [16] 李林.变化环境下中国不同强度降雨的时空变化特征[J].水电能源科学,2021,39(3):8-11,23.
- [17] 董满宇,田相佑,胡木兰,等.1960—2017年太湖流域不同等级降水时空特征[J].热带地理,2020,40(6):1063-1074.
- [18] 张珊,杨树文,王恒亮,顾及黄土滑坡的兰州市不同等级降雨时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(1):184-191.
- [19] 申露婷,张方敏,黄进,等.1981—2018年内蒙古不同等级降水时空变化特征[J].气象科学,2022,42(2):162-170.
- [20] 刘卫林,吴滨,李香,等.赣江流域不同等级降水变化特征及其与大尺度气候相关性研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(3):659-672.
- [21] 韩会明,郭红虎,游文荪,等.赣江流域降水时空分布特征[J].江西水利科技,2020,46(6):449-455.
- [22] 鲁向晖,张海娜,胡羊羊.赣江流域1966—2015年降水量多尺度时空变化特征分析[J].水土保持研究,2021,28(2):168-175.
- [23] 刘声洪,刘惠英,罗萍,等.赣江上游平江流域近30年不同量级降雨时空分布特征[J].水土保持研究,2022,29(3):106-114.
- [24] 王永文,刘惠英.赣江上游章水流域1955—2015年降雨量时空变化[J].水土保持研究,2019,26(4):105-110.
- [25] 江西省.江西河湖大典[M].武汉:长江出版社,2010.8.
- [26] 中国气象局.《降水量等级》(GB/T28592-2012)[M].北京:中国标准出版社,2012.
- [27] 周凯,王义民.基于 EOF 的渭河流域干旱时空分布特征研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(1):146-154.

- [27] 梁彩群, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原人工刺槐林土壤团聚体中不同活性有机碳从南到北的变化特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1095-1102.
- [28] Soinne H, Hyvaluoma J, Ketoja E, et al. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 1-9.
- [29] 华娟, 赵世伟, 张扬, 等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [30] Haynes R J, Beare M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(11/12): 1647-1653.
- [31] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [32] Segoli M, De Gryze S, Dou F, et al. AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 263: 1-9.
- [33] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413.
- [34] 张富荣. 植被恢复对土壤有机碳固存及其周转速度的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [35] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3591.
- [36] Zeng Q C, Liu D, An S S. Decoupled diversity patterns in microbial geographic distributions on the arid area (the Loess Plateau) [J]. *Catena*, 2021, 196: 104922.
- [37] Xu M P, Li W J, Wang J Y, et al. Soil ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation after vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152918.
- [38] Cui Y X, Moorhead D L, Wang X X, et al. Decreasing microbial phosphorus limitation increases soil carbon release [J]. *Geoderma*, 2022, 419: 115868.

(上接第 233 页)

- [28] Bi S B, Qiu X K, Wang G J, et al. Spatial distribution characteristics of drought disasters in Hunan Province of China from 1644 to 1911 based on EOF and REOF methods [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(16): 533.
- [29] Xu X R, Tian H Y, Tian W S, et al. The spatiotemporal patterns of the upper-tropospheric water vapor over the Tibetan plateau in summer based on EOF analysis [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(15): 5033-5051.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [31] 刘慧媛, 邹磊, 邢万里. 1961—2018 年海河流域极端降水时空演变特征 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(12): 1-6.
- [32] 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.
- [33] 南庆红, 杨舵, 杨青. 应用 EOF 方法分析新疆降水变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2003(5): 78-83.

(上接第 240 页)

- [23] Du S, Wang Y L, Kume T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 1-10.
- [24] Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, et al. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(9): 951-960.
- [25] Meinzer F C, James S A, Goldstein G. Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(8): 901-909.
- [26] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (Second Edition) [M]. New York: Springer, 1998.
- [27] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [28] 种培芳. 荒漠植物红砂、白刺和沙拐枣抗旱指标及抗旱性综合评价研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [29] Kozłowski T T. Water deficit and plant growth. Vol. 1. Development, control and measurement [M]. New York, London: Academic Press, 1968.