

# 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

刘卫林 吴滨 李香 何昊 刘丽娜<sup>1</sup>

(南昌工程学院 江西省水文水资源与水环境重点实验室, 江西 南昌 330099)

**【摘要】:** 为阐明赣江流域近 60a 不同等级降水变化特征及其可能影响因子, 基于赣江流域 11 个气象站点 1960~2017 年的逐日降水数据, 采用一元线性趋势、滑动 t 检验、小波分析和反距离加权空间插值等方法分析了赣江流域各等级降水量、降水日数及降水强度的时空变化特征, 并探讨了其与北极涛动等 21 个大尺度气候指数的相关性。结果表明: (1) 1960~2017 年期间, 赣江流域小雨、中雨的降水量和降水日数呈现减少趋势, 2000 年减少趋势最为显著; 而大雨、暴雨的降水量和降水日数表现为增加趋势, 1990 年增加趋势最为显著; 各等级降水强度均呈现增加态势; 各指标均存在 26 和 19 年的 2 个明显的变化周期; (2) 赣江流域大雨和暴雨的降水量、降水强度及降水日数表现为由东北向西南递减趋势, 小雨量和小雨日数呈现西高东低的分布特征; 总降水强度和小雨日数分别在流域呈显著增强和减少趋势, 大雨量和大雨日数在流域东北部呈显著增加趋势; (3) 东大西洋遥相关型、西太平洋副热带高压面积、强度和西伸脊线位置对流域当年大雨和暴雨影响显著; 北大西洋涛动对次年中雨和大雨影响显著。

**【关键词】:** 赣江流域 不同等级降水 降水量 降水日数 降水强度 大尺度气候指数

**【中图分类号】:** P426.616 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)03-0659-14

在全球气候变化背景下, 我国降水的空间格局正发生着改变<sup>[1]</sup>。降水在时间和空间上的变化, 将引起干旱、暴雨、洪涝等极端气象水文事件的发生, 进而对农业生产和社会经济的可持续发展产生严重影响。因此, 研究降水的时空变化特征, 对于揭示区域气候变化、合理应对洪旱灾害具有重要的意义。

赣江流域是鄱阳湖流域内最大的子流域, 由于地处亚热带季风气候区, 年内降水量在时间上严重的分配不均, 汛期(6~8月)降水量约占全年降水量的 50%, 在季节交替时易发生旱涝急转事件<sup>[2]</sup>。不少学者基于年降水量或极端降水量等指标研究了赣江流域、江西省和鄱阳湖流域降水特征的时空变化。姬志军等<sup>[3,4,5,6]</sup>研究表明流域降水的年代际变化较为明显。而潘国艳等<sup>[7]</sup>研究发现, 流域极端降水指标呈上升趋势, 在多雨年和汛期很可能会使流域及下游地区面临严峻的水情灾情形势。皱海波等<sup>[8]</sup>对江西省持续性强降水的气候特征进行了研究, 发现江西省强降水主要集中在 6 月, 冬季无持续性强降水。以往研究大多集中于年(季节)降水量或极端降水事件在时空上的变化特征研究, 有关赣江流域不同等级降水事件的时空变化特征研究报道则较少。而在其它地区, 基于精细化降水所开展的研究已经取得了一些进展。张丽亚等<sup>[9]</sup>研究了华东地区各等级降水的变化及其影响因素, 发现低空增暖是小雨显著减少的主要原因; 起永冬等<sup>[10]</sup>分析了汉江流域不同量级雨量、雨强和雨日的空间分布, 发现流域西南部为多雨中心; 彭贵芬等<sup>[11]</sup>对云南不同量级雨日的研究发现, 量级越大, 干湿两季越明显; 而宋苗等<sup>[12]</sup>对广西不同等级降水变化特征的研究

**作者简介:** 刘卫林(1978~), 男, 教授, 主要研究方向为水文水资源. E-mail: weilin\_liu@nit.edu.cn

**基金项目:** 江西省教育厅科技项目(GJJ170980); 国家自然科学基金(52069015); 江西省科技厅自然基金项目(20192BAB206047); 江西省优势科技创新团队建设计划项目(20171BCB24012); 江西省水利厅科技项目(KT201728); 江西省水利厅科技项目(KT201705)

究表明，小雨降水量呈显著减少趋势，而暴雨降水量呈增加趋势。

已有研究表明季风和西太平洋副热带高压(简称副高)对我国大部分地区的降水有显著影响<sup>[13,14]</sup>，夏季风直接影响中国大部分地区的水汽含量<sup>[15]</sup>，而副高的活动会引起中国东部地区降水的动态变化。此外，地区的气候涛动会以改变大气环流等方式对降水时空分布产生影响<sup>[16,17]</sup>。谭本植等<sup>[18]</sup>总结了北半球主要大气遥相关对东亚气候的影响，如北极涛动(Arctic Oscillation, AO)/北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)在不同的气候背景下对东亚季风的动态影响以及太平洋/北美遥相关型(Pacific/North American, PNA)等对环流和气候的影响；唐红玉等<sup>[19]</sup>研究发现厄尔尼诺事件和印度洋偶极子的相互叠加会造成重庆夏季降水偏多；陈亮等<sup>[20]</sup>分析了大气环流和中国降水的联系也发现不同大气环流类型对中国不同区域、不同季节降水的影响不尽相同。这些研究说明了大尺度气候指标的变化对研究区域降水变化是复杂的，而已有的相关研究成果主要集中于年、季、月尺度的降水变化对这些指标的响应，因此精细化降水特征分析及可能影响因子的相关研究，能进一步丰富降水变化特征研究成果。

鉴于此，本文利用赣江流域 11 个气象站点 1960~2017 年的逐日降水数据，对不同等级降水量、降水日数及降水强度的时空变化特征进行了更精细化研究，并探讨了其与北极涛动等大尺度气候指数的相关性，以期全面认识赣江流域的降水变化特征，为合理应对涝旱灾害、农业生产及生态环境建设提供科学依据。

## 1 数据来源及处理方法

### 1.1 数据来源

本文主要采用赣江流域内南昌、宜丰、樟树、宜春、永丰、吉安、莲花、遂川、宁都、赣州、龙南共 11 个站点的日降水数据，降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。依据我国降水划分标准<sup>[21]</sup>，将降水划分为小雨、中雨、大雨及暴雨，划分标准见表 1。年降水强度为年内总降水量与总降水日数之比，各等级降水强度则是对应等级降水的总降水量与相应降水日数的比值。

表 1 各等级降水划分标准

指标	定义
小雨	$9.9\text{mm} \geq \text{日降雨量} \geq 0.1\text{mm}$
中雨	$24.9\text{mm} \geq \text{日降雨量} \geq 10\text{mm}$
大雨	$49.9\text{mm} \geq \text{日降雨量} \geq 25\text{mm}$
暴雨	日降雨量 $\geq 50\text{mm}$

在大尺度气候指标中，包括了影响我国天气气候的季风指标、副高指标以及北半球遥相关指标。其中在北半球主要遥相关指标如 AO、NAO 等外，还选择了对我国降水有影响的南方涛动指数(Southern Oscillation Index, SOI)、太平洋年代际涛动指标(Pacific Decadal Oscillation, PDO)和热带印度洋年代际涛动(Tropical Indian Decadal Oscillation, TIDO)，以初步研究其对流域降水的可能影响。考虑到一些气候遥相关对流域的影响可能存在滞后性，除了对当年流域降水的影响外，本文还分析当年大尺度气候特征指标(1959~2016 年)与次年的降水指标(1960~2017 年)进行相关性分析。其中热带/北半球遥相关型(Tropical/Northern Hemisphere, TNH)是冬季(12月至次年2月)的一种气候涛动，本文以当年12月至次年2月的均值说明当年 TNH 整体状况。所选的大尺度气候指标共有 21 个，计算所用的时间序列长度及相应月份情况见表 2。季风数据来自李建平教授

个人主页 (<http://ljp.gcess.cn/dct/page/1>), 副高数据来自中国气象局国家气候中心 (<http://cmdp.ncc-cma.net/cn/index.htm>), 遥相关数据数据皆来自美国气候预测中心 (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov>)。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 基于最小二乘法的线性趋势分析

对于长度为  $n$  的时间序列, 某  $t_i$  时的样本为  $x_i$ , 建立  $x_i$  与  $t_i$  的一元线性回归方程

$$\hat{x}_i = a + b t_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中回归常数  $a$  和回归系数  $b$  可由最小二乘法计算得出, 在本文  $b$  为各等级降雨的降水量、降水强度和降水日数随时间的变化趋势。

### 1.2.2 滑动 $t$ 检验

滑动  $t$  检验是判断数据序列是否突变的一种突变检验方法<sup>[22]</sup>, 同时其对数据趋势的具体变化过程也具有良好的表现力。本文使用该方法研究各降雨指标的趋势变化过程以及是否发生了显著变化。

表 2 大尺度气候指标

指标	计算时间(年, 月)
北极涛动	1959~2017, 1~12
东大西洋遥相关型	1959~2017, 1~12
东大西洋/西俄罗斯遥相关型	1959~2017, 1~12
北大西洋涛动	1959~2017, 1~12
东太平洋/北太平洋遥相关型	1959~2017, 1~11
太平洋/北美遥相关型	1959~2017, 1~12
极地/欧亚遥相关型	1959~2017, 1~12
太平洋过渡遥相关型	1959~2017, 8~9
斯堪的纳维亚遥相关型	1959~2017, 1~12
热带/北半球遥相关型	1959~2018, 12~2
西太平洋遥相关型	1959~2017, 1~12
太平洋年代际涛动	1959~2017, 1~12
热带印度洋年代际涛动	1959~2017, 1~12

南方涛动指数	1959~2017, 1~12
东亚夏季风指数	1959~2017, 6~8
南亚夏季风指数	1959~2017, 6~9
南海夏季风指数	1959~2017, 6~9
西太平洋副热带高压面积	1959~2017, 1~12
西太平洋副热带高压强度	1959~2017, 1~12
西太平洋副热带高压脊线位置	1959~2017, 1~12
西太平洋副热带高压西伸脊点	1959~2017, 1~12

对于一组时间序列，人为给定基准点，基准点前的子序列为  $x_1$ ，长度为  $n_1$ ，均值为  $\bar{x}_1$ ，方差为  $s_1^2$ ；基准点后的子序列为  $x_2$ ，长度为  $n_2$ ，均值为  $\bar{x}_2$ ，方差为  $s_2^2$ 。定义统计量：

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2)$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (3)$$

统计量  $t$  服从自由度  $n_1+n_2-2$  的  $t$  分布。按时间逐步调整基准点，便可观察降水的变化过程。本文的子序列长度为 10a。

### 1.2.3 小波分析

小波分析的基本原理是通过增加或减小伸缩尺度来得到的信号低频或高频信息，通过对不同频率信号的分辨，可以识别信号的周期成分。限于篇幅原因，小波分析方法原理见参考文献<sup>[23]</sup>。本文使用的小波函数为 Morlet 小波，数据进行了对称性拓展以减小边界效应。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同等级降水量、降水强度和降水日数空间分布特征

为了解不同等级降水量、降水强度和降水日数在流域空间上的分布，采用反距离权重插值法对流域内 11 个站点的降水量、降水强度和降水日数进行插值，得到各指标空间分布。

从图 1 可以看出，赣江流域总降水量分布呈现“东北部降水多，西南部降水少”的特点，大雨量和暴雨量的分布与总降水量的分布吻合；小雨量和中雨量则在南昌及赣州地区呈现明显低值。流域总降水强度具有“东北部大于西南部”的特征，大雨强度

和暴雨强度也具有相同的特征。在降水日数上，流域总降水日数分布较为分散，且与小雨日数分布十分吻合，总降水量分布特征主要取决于小雨日数。以南昌地区为例，尽管与流域内其它地区相比，南昌地区平均每年有5~6d的暴雨日数，暴雨日较多，然而由于其小雨日和中雨日较少，因此与其它地区相比南昌地区的总降水日数偏低，为136d。

总体上，赣江流域降水具有“东北部地区的大雨和暴雨降水量、降水强度、降水日数高于西南部地区；西部地区的小雨量和小雨日数高于东部地区”的分布特征。

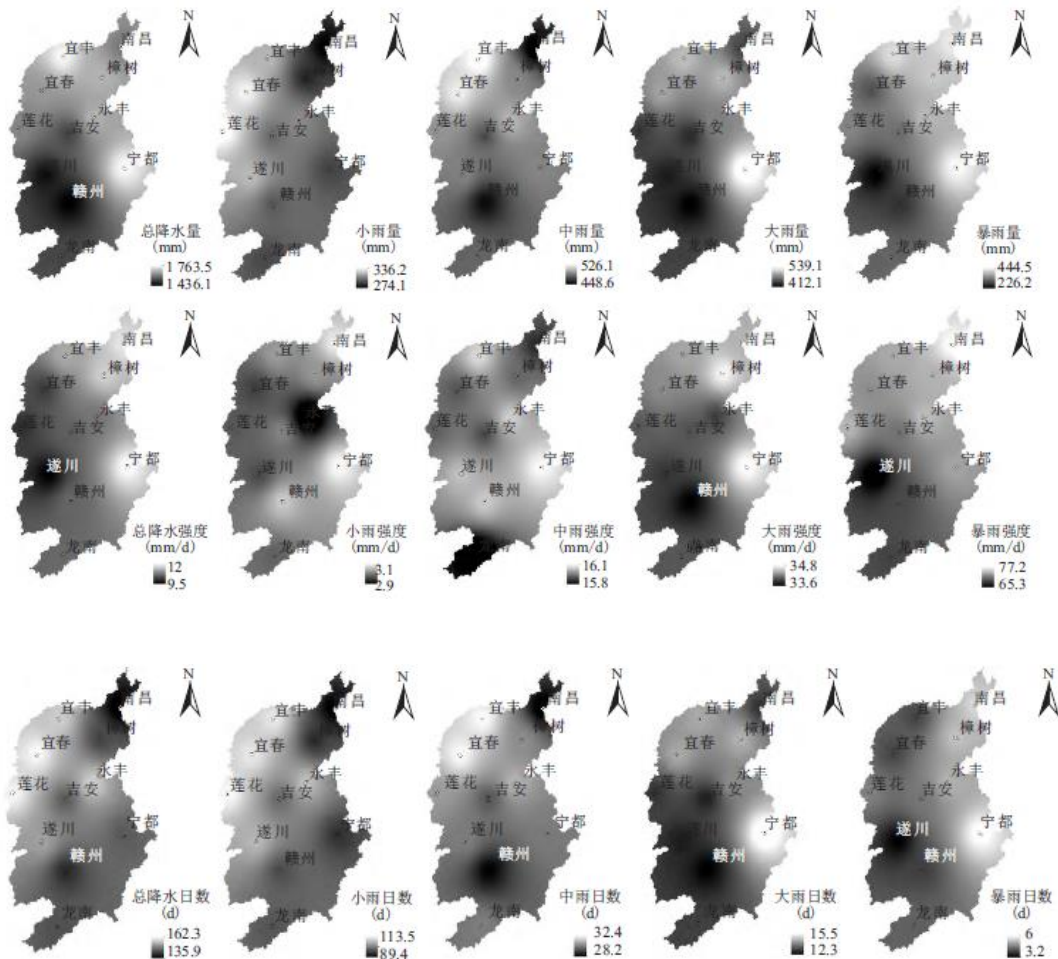


图1 赣江流域不同等级降水量、降水强度和降水日数空间分布

## 2.2 不同等级降水量、降水强度和降水日数变化趋势分析

表3为赣江流域1960~2017年降水量变化结果。由表可知，流域年降水量呈增加趋势，其增加幅度为28mm/10a。此外，不同等级降水量的变化趋势呈现较大的差异，其中小雨量和中雨量分别呈现出4、1mm/10a的减少趋势，大雨量和暴雨量则呈现出16、18mm/10a的显著增加趋势(P<0.05)。整个流域表现出了“小雨中雨降水量减少，大雨暴雨降水量增多”的降水变化特征，与一些学者的研究一致<sup>[24, 25]</sup>。

表3 赣江流域不同等级降水量变化显著性

降水指标	一元线性回归方程	P 值
总降水量	$y=2.879x-4119.734$	0.1645
小雨量	$y=-0.412x+1122.662$	0.0765
中雨量	$y=-0.128x+742.075$	0.8146
大雨量	$y=1.672x-2772.496$	0.0313
暴雨量	$y=1.792x-3211.976$	0.0453

不同等级降水强度都呈现出增加趋势(表 4),其中总降水强度趋势约为  $0.33(\text{mm}/\text{d})/10\text{a}$  ( $P<0.01$ ),小雨强度趋势约  $0.03(\text{mm}/\text{d})/10\text{a}$  ( $P<0.01$ ),中雨强度趋势约为  $0.01(\text{mm}/\text{d})/10\text{a}$ ,大雨强度趋势约为  $0.04(\text{mm}/\text{d})/10\text{a}$ ,暴雨强度趋势约为  $0.7(\text{mm}/\text{d})/10\text{a}$  ( $P<0.1$ )。结合降水量变化结果可以发现,容易引起城市、地区内涝的大雨和暴雨都表现出了“降水量和降水强度同时增加的趋势”,而保持城市、地区湿润且基本不会引起内涝的小雨和中雨则表现出“降水量减少,降水强度基本不变或略微增加的趋势”。在这种变化趋势下,流域未来可能会面临更多的内涝和干旱事件。

表 4 赣江流域不同等级降水强度变化显著性

指标	公式	P 值
总降水强度	$y=0.033x-55.251$	0.0001
小雨强度	$y=0.003x-3.214$	0.0036
中雨强度	$y=0.001x+14.631$	0.7790
大雨强度	$y=0.004x+26.217$	0.4114
暴雨强度	$y=0.07x-67.248$	0.0918

表 5 为赣江流域降水日数的变化结果。赣江流域年降水总日数约为 150d,约占全年日数的 41.1%。其中,小雨降水日数约为 102d,约占全年 27.9%,占总降水日数约 68%;中雨日数约为 30d,约占全年 8.2%,总降水日数 20%;大雨日数约 13d,占全年日数的 3.6%,总降水日数的 8.7%;暴雨日数约 5d,占全年日数的 1.4%,总降水日数的 3.3%。从小雨日数对总降水日数的高占比可以看出,流域小雨日数的变化会明显影响总降水日数的变化;小雨日数以  $-2.8\text{d}/10\text{a}$  的显著变化趋势 ( $P<0.01$ ),推动着流域总降水日数以  $1.9\text{d}/10\text{a}$  的趋势逐年减少 ( $P<0.1$ );暴雨的降水日数趋势变化较明显,以  $0.2\text{d}/10\text{a}$  的趋势逐年增加 ( $P<0.05$ ),而中雨、大雨的降水日数变化趋势不明显,分别为  $-0.03$  和  $0.4\text{d}/10\text{a}$ 。赣江流域的不同等级降水日数变化趋势特征与降水量吻合,流域具有“小雨、中雨降水量和降水日数减少,大雨、暴雨降水量和降水日数增多”的特征。

表 5 赣江流域不同等级降水日数变化显著性

指标	日数	公式	P 值
总降水日	150	$y=-0.197x+542.01$	0.0774

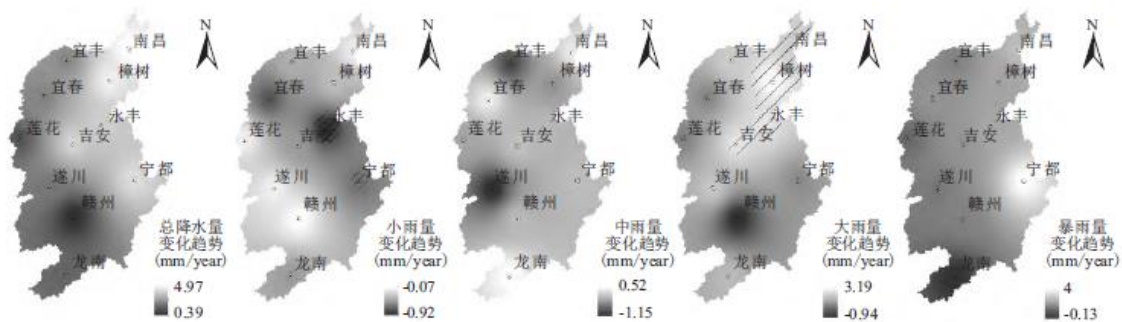
小雨日	102	$y=-0.284x+667.798$	0.0001
中雨日	30	$y=-0.003x+35.912$	0.9331
大雨日	13	$y=0.041x-68.537$	0.0587
暴雨日	5	$y=0.022x-39.795$	0.0474

### 2.3 不同等级降水量、降水强度和降水日数空间趋势分析

从各降水指标在流域空间上的变化趋势(图 2)可以看出,在降水量上,全流域总降水量呈增加趋势,且流域东北部增加趋势高于西南部;而小雨量全流域呈减少趋势,其中流域东部的永丰和宁都减少趋势显著(通过 95%信度检验);大雨量除赣州局部区域呈减少趋势外,全流域总体呈增加趋势,其中流域东北部增加趋势显著;暴雨量除流域西南局部区域呈减少趋势外全流域大体呈增加趋势。在降水强度上,总降水强度全流域呈增加趋势,且增加趋势显著;小雨强度除流域西北小部分区域呈现减少趋势外全流域总体呈增加趋势,其中永丰、莲花、赣州局部区域增加趋势显著;暴雨强度增加地区主要分布流域南部和流域西北部,其中赣州局部区域增加趋势显著。在降水日数上,流域总降水日数呈减少趋势,显著减少区主要分布在流域中部的莲花、宜春和永丰地区;小雨日数在全流域呈减少趋势,且减少趋势显著;大雨日数和暴雨日数变化趋势空间分布大体一致,除流域西南部表现为减少趋势,流域总体呈现增加趋势,且表现为由东北向西南减少,其中,流域东北部大雨日数增加趋势显著,这与一些学者极端降水变化、阈值和频次的结果基本一致<sup>[6,7]</sup>。

### 2.4 不同等级降水量、降水强度和降水日数变化突变分析

图 3 显示了赣江流域不同等级降水量滑动 t 检验结果。可以看出,1960~1970 年相对于 1970~1980 年是少雨期,在 70 年代初流域降水量出现明显由少转多的变化,其中大雨量变化超过了 0.05 的显著性水平;1970~1980 年为多雨期;1980~1990 年的降水量与 1970~1980 年相比未出现显著的变化;在 1990 年初,大雨量、暴雨量和总降水量由少转多且均超过了 0.05 的显著性水平,小雨量和中雨量变化微弱,1990~2000 年的多雨期是由大雨量和暴雨量增多导致的;而在 2000 年,小雨量和中雨量减少且超过了 0.01 的显著性水平,大雨、暴雨变化微弱,2000~2010 年的少雨期是由小雨量和中雨量减少所导致的。



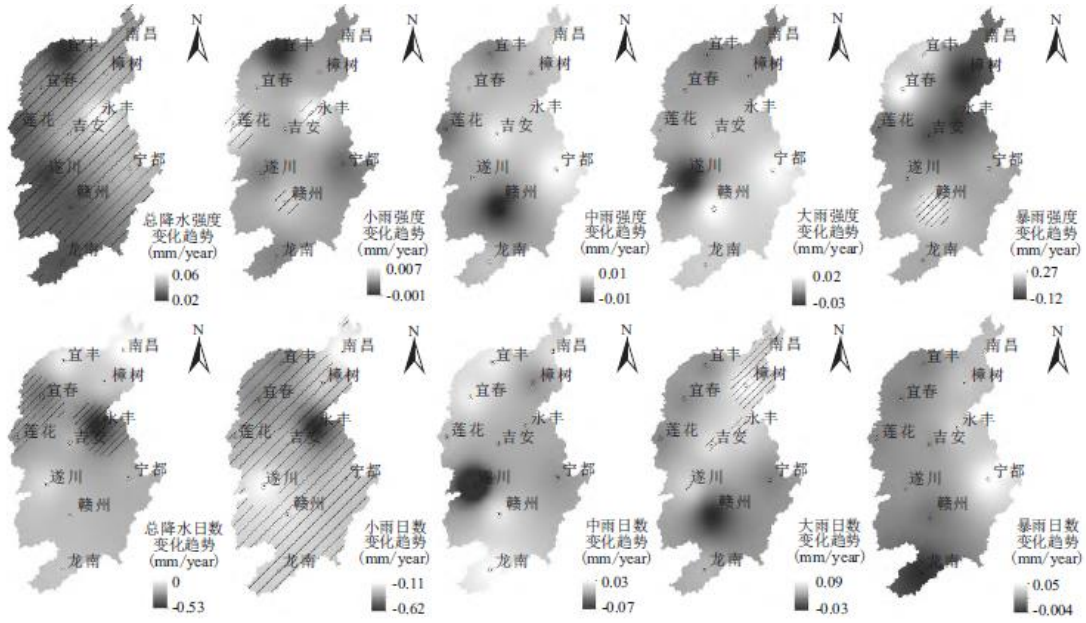


图2 赣江流域不同等级降水量、降水强度和降水日数空间变化趋势

注：斜线区表示通过 95%的信度检验.

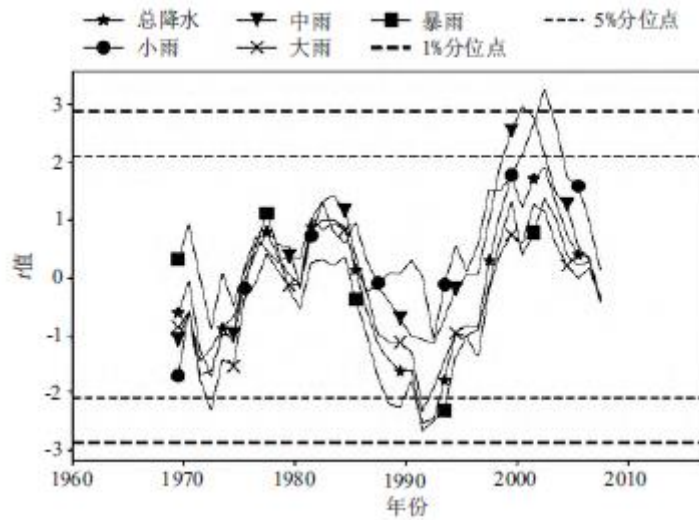


图3 赣江流域不同等级降水量滑动 t 检验

图4 是不同等级降水强度的滑动 t 检验图。从图可以看出，各等级降水强度的年代际变化差异较大，同时显著变化的时间与雨量相比较晚。在 1970~1975 年，小雨强度开始由弱转强且 t 值超过了 0.01 的显著性水平，而暴雨强度则由强转弱且超过了 0.05 的显著性水平。在 1981~1983 年，大雨强度减弱且变化达到 0.05 的显著性水平。在 1993 年，大雨和暴雨强度由弱转强且超过了 0.05 的显著性水平。在 2005 年，小雨强度减弱，变化超过 0.05 显著性水平。

图5 为不同等级降水日数的滑动 t 检验结果。可以看出，在 1970、1980、1990 和 2000 年 t 值分别为显著极小值、显著极

大值、显著极小值、显著极大值，说明流域降水日数具有明显的变多、变少、变多、变少的年代际变化特征。其中在 1980 年，小雨日显著减少；在 1990 年，暴雨日显著增加；在 2000 年，小雨日、中雨日和总降水日显著减少。

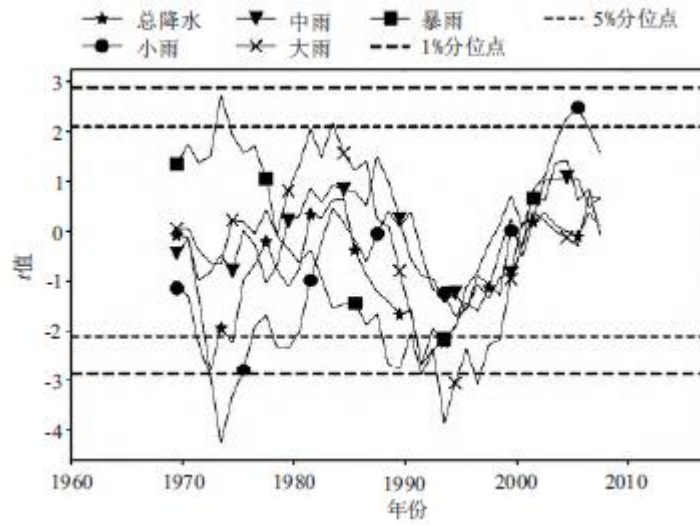


图 4 赣江流域不同等级降水强度滑动 t 检验

综合图 3、图 4 与图 5 的结果可以看出，赣江流域在 1960~2017 年间其降水具有一定的年代际变化特征，其中降水日数的年代际变化最为明显。有不少学者的研究指出，1990 和 2000 年赣江流域或附近地区的降水量也分别发生了由少转多，由多转少的显著变化<sup>[13,26,27]</sup>，与本文的研究结果相同。同时本文研究结果表明，90 年代的变化主要以大雨和暴雨变化为主，而 2000 年的变化主要以小雨和中雨为主。

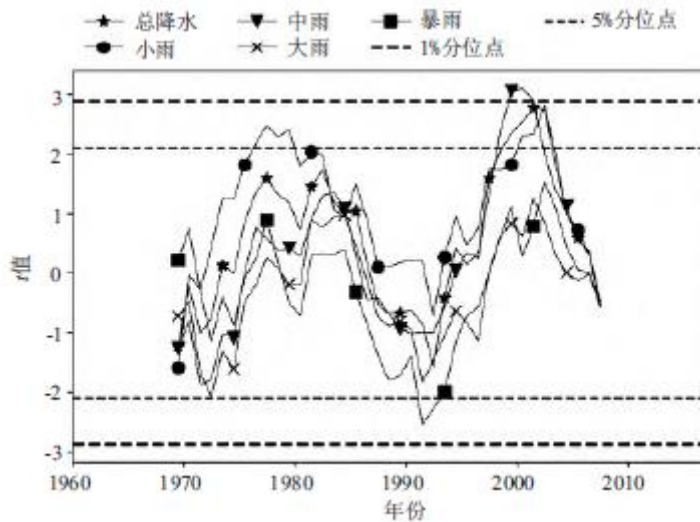


图 5 赣江流域不同等级降水日数滑动 t 检验

## 2.5 不同等级降水量、降水强度和降水日数变化周期分析

对赣江流域不同等级降水量进行小波变换后，求得的小波系数实部如图 6(a~e)。可以看出，赣江流域总降水量和不同等级

降水量普遍存在第 1 周期和第 2 周期，周期长度为 26 和 19 年，暴雨量还具有较明显第 3 和第 4 周期(图 6e), 周期长度分别为 12 和 4 年，同时第 2 周期的小波方差大于第 1 周期，说明 19 年周期对流域的影响大于 26 年周期。

图 7 为不同等级降水强度的小波变换结果，从子图 a~e 可以看出，各等级降水强度与降水量一样存在 26 年周期长度的第 1 周期和 19 年长度的第 2 周期。其中第 1 周期的影响大于第 2 周期(图 7~f)。

通过观察各等级降水日数的小波变换(图 8), 并对比降水量的小波变换(图 6)可以发现，赣江流域 1960~2017 年降水日数和降水量的周期成分十分相似，都具有明显的 26 年周期长度的第 1 周期和 19 年周期长度的第 2 周期，同时暴雨还有第 3 周期及第 4 周期，周期长度分别为 12 和 4 年。

从赣江流域各等级的降水量、降水强度及降水日数的小波分析结果可以看出，1960~2017 年赣江流域降水变化具有 2 个明显的周期特征，其周期长度分别是 26 和 19 年，其中 19 年长度的周期特征与一些学者的研究结论一致<sup>[28, 29]</sup>。值得注意的是，上文已经提到了大多数指标在 90 年代具有由少转多的变化特征，其中暴雨的变化最为显著，而在小波分析中，暴雨量和暴雨日数的第 2 主周期和第 3 主周期 90 年代的小波系数实部正好处于 0 值左右，即正处于干旱末期，并开始向湿润期转变的时期(图 9)，与滑动 t 检验结果吻合，这说明赣江流域在 90 年代发生的以暴雨量和暴雨日数显著增多为主的降水变化可能是流域降水第 2 周期和第 3 主周期共同由旱转湿的所引起的。

## 2.6 不同等级降水量、降水强度和降水日数与大尺度气候特征指标相关性分析

将赣江流域不同等级降水量、降水强度和降水日数等降水指标与 WP、EA 等 21 个大尺度气候指标进行皮尔逊相关系数分析，相关系数的统计学意义使用 t 检验法进行检验。检验结果见图 10 和图 11。

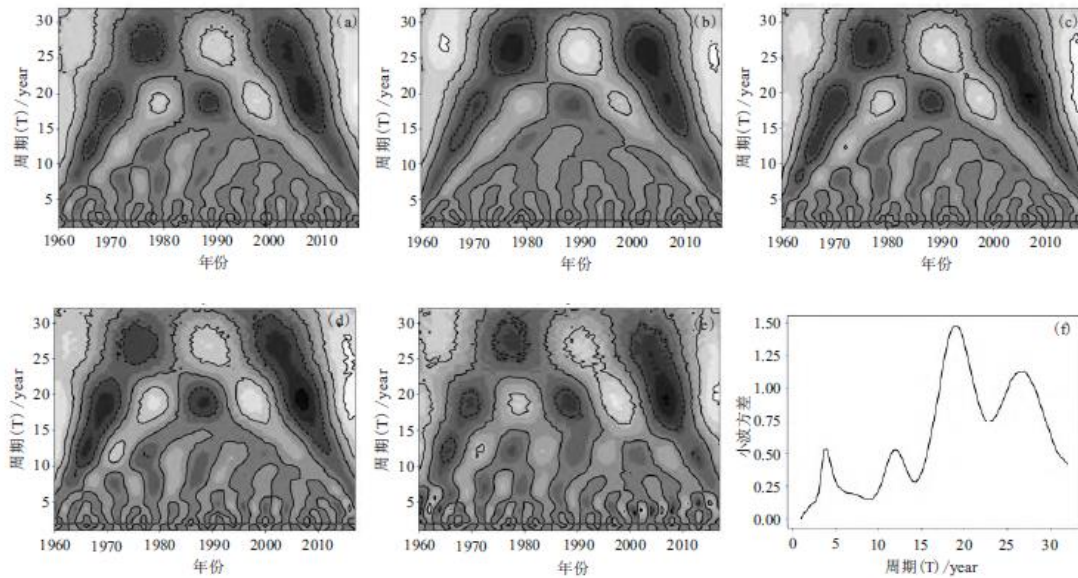


图 6 赣江流域不同等级降水量小波分解

注：a. 总降水量小波系数实部，b. 小雨量小波系数实部，c. 中雨量小波系数实部，d. 大雨量小波系数实部，e. 暴雨量小波系数实部，f. 暴雨量小波方差。

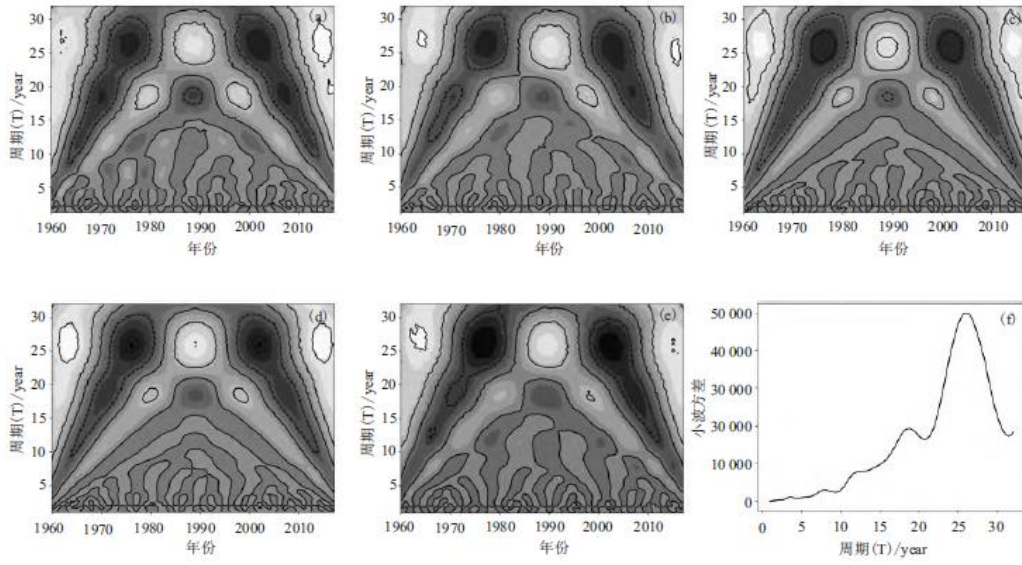


图7 赣江流域不同等级降水强度小波分解

注：a. 总降水强度小波系数实部, b. 小雨强度小波系数实部, c. 中雨强度小波系数实部, d. 大雨强度小波系数实部, e. 暴雨强度小波系数实部, f. 暴雨强度小波方差.

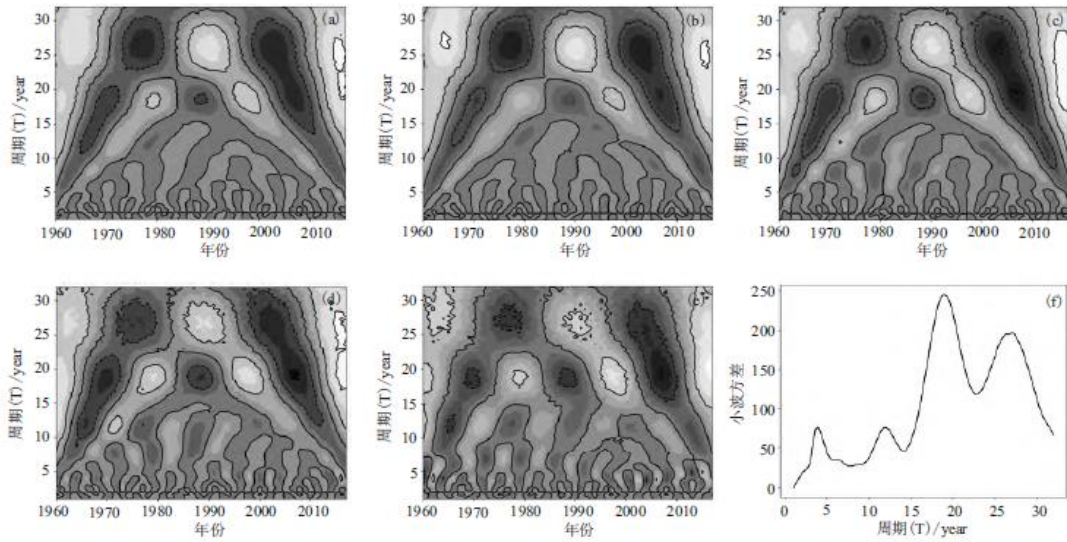


图8 赣江流域不同等级降水日数小波分解

注：a. 总降水日数小波系数实部, b. 小雨日数小波系数实部, c. 中雨日数小波系数实部, d. 大雨日数小波系数实部, e. 暴雨日数小波系数实部, f. 暴雨日数小波方差.

图10 呈现了当年大尺度气候特征指标与赣江流域降水特征的显著相关性。与赣江流域降水呈显著相关的大尺度气候特征指标有 PDO、EA、EATL\_WERU、PNA、P\_E、PT、SCAND、SOI、EASMI、SCSSMI、GM、GQ、GX、GD。从与降水指标显著相关的数量上看，EA、GM、GQ 指标对流域降水影响明显。其中 EA、GM、GQ 对流域各类降水指标显著影响完全一致，与大雨和暴雨降水量及降

水日数呈显著正相关，与小雨日数呈显著负相关；而 GD 则完全相反。可以看出，北大西洋 500hPa 气压偏高、副高面积和强度偏大及位置偏西，可能会导致赣江流域大雨暴雨量及日数增加和小雨日减少。

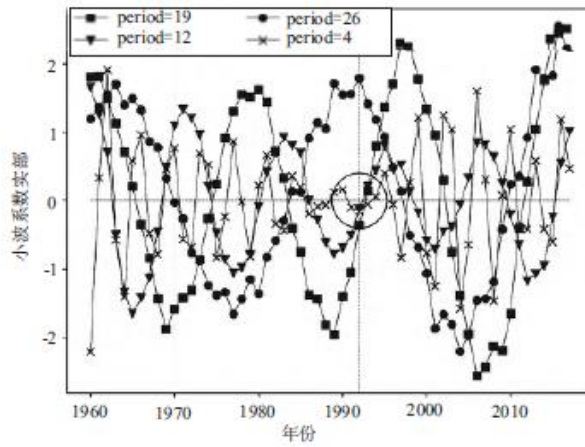


图 9 暴雨日数各主周期小波系数实部

从图 11 可以看出，与赣江流域次年降水特征呈显著相关的大尺度气候特征指标有 TIDO、PDO、AO、EA、NAO、SCAND、THN、WP、SASMI、GM、GQ、GD。从与降水指标显著相关的数量上看，NAO 对流域降水影响明显。NAO 与流域中雨和大雨的降水量及降水日数呈正相关，说明北大西洋地面气压偏高可能会导致赣江流域明年中雨大雨量和日数增加。同时 EA 和副高对流域明年降水影响小于对当年降水的影响，但北大西洋 500hPa 气压、副高面积和副高强度偏高仍可能减少流域明年小雨日数。

结合图 10 和图 11 的大尺度气候指标对流域降水显著相关结果可知，北大西洋地区气压遥相关指标 NAO 和 EA 对赣江流域降水的影响明显，其中 NAO 主要影响赣江流域次年降水，而 EA 则主要影响流域当年降水。有研究表明，12 月 NAO 造成的环流异常在次年 2 月会扩展到东亚地区<sup>[30]</sup>，这种冬季环流异常影响了江淮入梅时间；当 NAO 增强时，江淮入梅早，而当 NAO 减弱时，江淮入梅晚<sup>[31]</sup>；这可能是导致流域降水增加的原因之一。EA 作为北大西洋第 2 个显著的遥相关型，其正相位表征北大西洋 500hPa 高度偏高，负相位则相反；1~3 月亚欧大陆南冷北暖的热力差异可能导致华南和长江中下游地区降水偏多<sup>[32]</sup>，而 EA 变化与东亚冬季气候变化显著相关<sup>[33]</sup>，这可能是 EA 与赣江流域大雨暴雨呈正相关的原因之一。

从 GM、GQ、GX 和 GD 对赣江流域降水的显著相关结果可知，年副高面积、强度的偏大以及西伸脊点的偏西会增加当年流域大雨和暴雨的降水量及降水日数。有研究表明了副高的加强及西伸使得长江中下游降水异常偏多<sup>[34,35]</sup>，这说明了在年际震荡尺度上，副高面积、强度和西伸脊点能在一定程度上描述赣江流域大雨暴雨的情况；每年 6 月上旬，北下的冷空气与南上的暖空气江淮地区汇合形成准静止锋，江淮地区梅汛期开始；而副高的季节性南北移动和北跳影响着中国东部江淮入梅、出梅时间<sup>[36]</sup>；图 10 结果表明副高脊线位置的年平均纬度对流域年降水影响并不显著，这说明副高脊线位置年际震荡对赣江流域降水变化不敏感；本文的研究中进一步印证了副高年际变化对赣江流域降水的影响，GM、GQ 和 GD 的监测有利于赣江流域大雨暴雨的准确预报。

本研究 PDO 仅对当年和次年赣江流域小雨强度有着显著正相关，而在一些学者的研究中，PDO 对降水的影响在不同时期、不同地区及不同降水指标上不尽相同<sup>[37,38,39,40]</sup>，AO 指标也有相似的结论<sup>[41]</sup>。结合本文和其它学者的相关研究结论可以看出，在不同地区、不同时间，大尺度气候指标对降水的影响不同，本文虽说给出了大尺度气候因子与赣江流域降水指标的显著相关性，但这些因子对流域降水的具体影响，可能需要进行深入的研究与讨论。

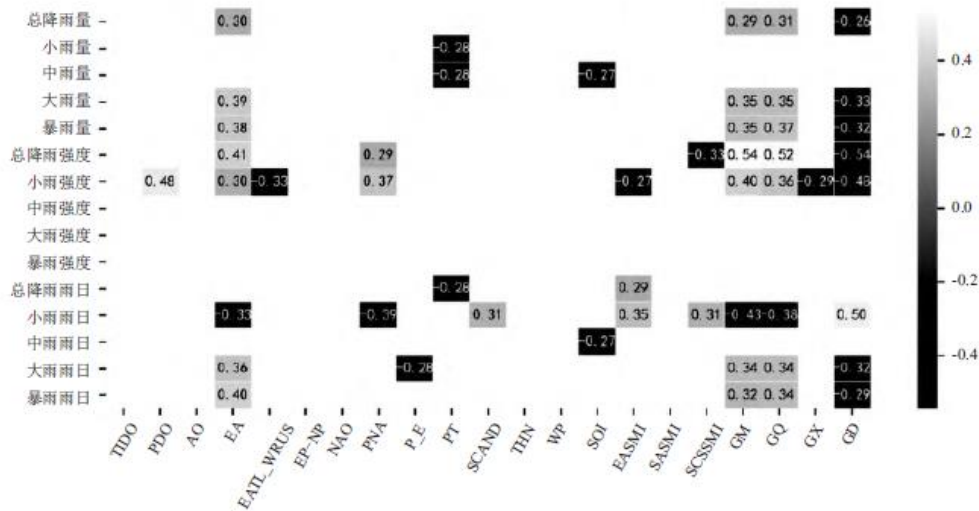


图 10 赣江流域不同等级降水量、降水强度、降水日数与当年大尺度气候特征指标显著相关系数 (P<0.05)

### 3 结论

本文采用一元线性趋势、滑动 t 检验、小波分析和反距离加权插值等方法分析了赣江流域 1960~2017 年不同等级降水的时空变化特征，并探讨了其与北极涛动等大尺度气候特征指标相关性，得到如下结论：

(1) 赣江流域总降水量呈增加趋势，其中小雨、中雨降水量呈现减少趋势，而大雨暴雨降水量表现为增加趋势。流域各等级降水强度变化皆呈现增加趋势，其中暴雨强度的趋势最大。各等级雨日变化与降水量相似，也呈现出“小雨中雨减少，大雨暴雨增多”的特征。

(2) 赣江流域大雨和暴雨的降水量、降水强度及降水日数表现为由东北向西南递减趋势，小雨量和小雨日数呈现西高东低的分布特征；总降水强度在全流域总体呈显著增强趋势，小雨量在全流域基本呈显著的减少趋势，大雨量和大雨日数在流域东北部呈显著增加趋势。

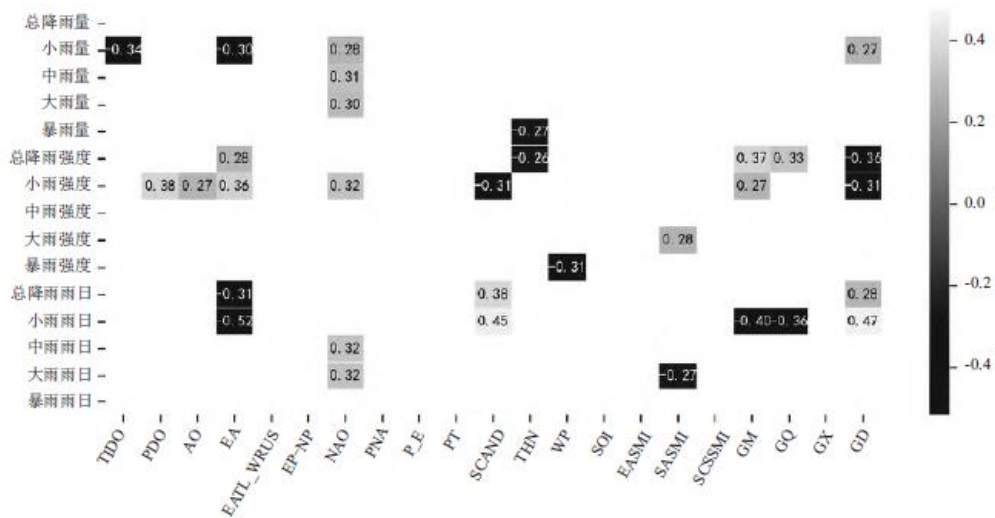


图 11 赣江流域不同等级降水量、降水强度、降水日数与前 1 年大尺度气候特征指标显著相关系数(P-value<0.05)

(3) 赣江流域的降水量、降水强度和降水日数具有年代际变化特征, 1990 和 2000 年的变化最为显著; 1990 年降水量、降水日数和降水强度都发生了由少转多、由弱转强的变化, 主导雨级是大雨和暴雨; 而 2000 年则发生了由多转少, 有强转弱的变化, 主导雨级是小雨和中雨。

(4) 赣江流域不同等级降水量、降水强度和降水日数均具有 26 和 19 年的 2 个明显的变化周期, 而暴雨量和暴雨日数还呈现出明显的 12 年和 4 年的变化周期; 赣江流域暴雨在 1990 年的明显变化可能是 19 和第 12 年周期同时转向多雨期导致。

(5) 对赣江流域次年降水呈显著相关的大尺度气候特征指标有 TIDO、PDO、AO、EA、NAO、SCAND、TNH、WP、SASMI、GM、GQ、GD, 其中 NAO 对流域中雨大雨影响最显著; 对流域当年降水呈显著相关的大尺度特征指标有 PDO、EA、EATL\_WERU、PNA、P\_E、PT、SCAND、SOI、EASMI、SCSSMI、GM、GQ、GX、GD, 而 EA、GM、GQ、GD 对流域大雨暴雨影响最为显著。

本文对赣江流域不同等级降水量、降水强度和降水日数进行了时空演变分析, 同时初步揭示了影响流域降水变化的可能影响因子。然而以上研究主要基于统计学的角度进行分析讨论, 虽然给出了大尺度气候因子与赣江流域降水指标相关性结论, 但这些因子对赣江流域降水影响的动力学机制以及降水变化特征对流域水循环的影响, 仍需进一步深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6):1032-1040.
- [2] 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.
- [3] 姬志军, 张连明. 鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 人民黄河, 2019, 41(6):81-84.
- [4] 原立峰, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 近 50 年来鄱阳湖流域降雨多时间尺度变化规律研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3):434-440.
- [5] 马锋敏, 章毅之, 唐传师, 等. 近 52 年江西省汛期极端降水事件的时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10):1348-1355.
- [6] 王永文, 卢怡诗, 刘裕辉. 1961-2015 年赣江流域极端降水时空变化特征分析[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(6):50-56.
- [7] 潘国艳, 曹夏禹, 张翔, 等. 赣江流域近 50 a 来极端降水时空变化特征[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1):102-108.
- [8] 邹海波, 单九生, 吴珊珊, 等. 江西持续性强降雨的气候特征及其大尺度环流背景[J]. 气象科学, 2013, 33(4):449-456.
- [9] 张丽亚, 周伟东, 吴润. 1980-2013 年华东小雨减少及其主要影响因子分析[J]. 大气科学, 2019, 43(5):1005-1018.
- [10] 起永东, 何明琼, 郑永宏, 等. 汉江流域降水结构时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):2830-2838.
- [11] 彭贵芬, 刘瑜. 云南各量级雨日的气候特征及变化[J]. 高原气象, 2009, 28(1):214-219.

- 
- [12]宋苗, 杨东. 近 51 年来广西不同等级降水的变化特征[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35):201-209.
- [13]罗玉, 秦宁生, 王春学, 等. 长江源区夏季径流量变化及其与高原夏季风和南亚夏季风的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(10):2209-2218.
- [14]王庆万, 胡淑娟, 贾蓓, 等. 基于全球大气环流三型分解的西太平洋副热带高压指数的新定义[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(6):625-636.
- [15]王欢, 李栋梁. 21 世纪初青藏高原感热年代际增强对中国东部季风雨带关键区夏季降水年代际转折的影响[J]. 地球物理学报, 2020, 63(2):412-426.
- [16]韩进军, 王建萍, 陈亮, 等. 影响柴达木盆地降水量变化的主要天气动力因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2):314-324.
- [17]马梦阳, 韩宇平, 王庆明, 等. 海河流域极端降水时空变化规律及其与大气环流的关系[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6):1-4+74.
- [18]谭本旭, 陈文. 中高纬度大气遥相关动力学及其对东亚冬季气候影响的研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5):908-925.
- [19]唐红玉, 吴遥, 董新宁, 等. 赤道印度洋偶极子对重庆夏季降水的影响分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(2):52-61.
- [20]陈亮, 段建平, 马柱国. 大气环流形势客观分型及其与中国降水的联系[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4):396-403.
- [21]中国气象局. 降水量等级 GB/T28592-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [22]霍雨, 王腊春, 陈晓玲, 等. 1950s 以来鄱阳湖流域降水变化趋势及其持续性特征[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3):454-462.
- [23]王文圣, 丁晶, 李越清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:1-3.
- [24]宁亮, 钱永甫. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2008, 27(5):1010-1020.
- [25]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.
- [26]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.
- [27]刘明霞, 刘友存, 刘燕, 等. 赣江流域气象因子时空变化特征与成因分析[J]. 江西理工大学学报, 2020, 41(3):52-60.
- [28]刘成, 张翔, 肖洋, 等. 鄱阳湖五河流域入湖年径流变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5):1-4, 18.
- [29]刘星根. 赣江流域年降雨和径流量的周期特征分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(6):54-60.
- [30]乔少博. 冬季北极涛动/北大西洋涛动对后期东亚气候的影响及其年际间联系的变化[D]. 兰州大学, 2018.
- [31]徐海明, 何金海, 董敏. 江淮入梅的年际变化及其与北大西洋涛动和海温异常的联系[J]. 气象学报, 2001, 59(6):694-

- [32] 晏红明, 王灵, 李蕊. 1-3 月欧亚大陆热力变化及其与中国降水的关系[J]. 应用气象学报, 2016, 27(2):209-219.
- [33] FAN S M, YANG X S. Arctic and East Asia winter climate variations associated with the Eastern Atlantic Pattern[J]. Journal of Climate, 2017, 30(2):573-583.
- [34] HUANG R H, ZHANG R H, ZHANG Q Y. The 1997/ 98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(3):348-362.
- [35] 金爱浩, 曾刚, 余晔, 等. 南亚高压与西太平洋副热带高压经纬向位置配置对中国东部夏季降水的影响[J]. 热带气象学报, 2018, 34(6):806-818.
- [36] 苏同华, 薛峰, 陈敏艳, 等. 季节内振荡影响西太平洋副热带高压两次北跳的机制[J]. 大气科学, 2017, 41(3):437-460.
- [37] GAO R L, ZHANG R H, WEN M, et al. Interdecadal changes in the asymmetric impacts of ENSO on wintertime rainfall over China and atmospheric circulations over Western North Pacific[J]. Climate Dynamics, 2019, 52(12):7525-7536.
- [38] KAO P K, HUNG C W, HONG C C. Increasing influence of central Pacific El Niño on the interdecadal variation of spring rainfall in Northern Taiwan and Southern China since 1980[J]. Atmospheric Science Letters, 2018, 19(12):e864.
- [39] ZHU Y L, WANG H J, MA J H, et al. Contribution of the phase transition of Pacific Decadal Oscillation to the late 1990s' shift in East China summer rainfall[J]. Climate Dynamics, 2015, 120(17):8817-8827.
- [40] 孙博, 王会军, 周波涛, 等. 中国水汽输送年际和年代际变化研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5):644-653.
- [41] 王蕊, 陈阿娇, 贺新光. 长江流域月降水的时空变化及其与 AO/NAO 的时滞相关分析[J]. 气象科学, 2018, 38(6):730-738.