

甘贝贝, 刘梅冰. 1962—2021 年闽江流域干湿演变特征及其对 ENSO 事件的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 545-556. GAN B B, LIU M B. Dry-wet evolution characteristics and response to ENSO events in the Minjiang River basin from 1962 to 2021[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 545-556. (in Chinese)

# 1962—2021 年闽江流域干湿演变特征 及其对 ENSO 事件的响应

甘贝贝<sup>1</sup>, 刘梅冰<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 碳中和未来技术学院, 福州 350117; 2. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350117; 3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350117)

**摘要:** 基于 1962—2021 年闽江流域 29 个气象观测站的日降水量数据, 运用标准化降水指数(standard precipitation index, SPI), Mann-Kendal 趋势检验(M-K 检验)以及 Morlet 小波分析等多种方法, 深入分析不同时间尺度下闽江流域干湿演变特征, 同时, 结合海温异常指数(sea surface temperature anomaly, SSTA), 进一步探究闽江流域干湿对厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件的响应。结果表明: 近 60 年来, 闽江流域整体呈不显著湿润化趋势, 夏季在 20 世纪 90 年代后显著湿润化, 秋季在 1995 年后有干旱化倾向, 冬季比其他季节更容易出现极端干湿事件; 从空间上看, 流域东南部湿润化趋势明显, 具有春季流域中部干旱化, 夏季北部以及东南部湿润化, 秋季南部干旱化的态势; 全流域各级湿润和干旱事件均呈增加趋势, 湿润事件多出现在夏季, 干旱事件多出现在秋、冬季; 闽江流域在 20~30 a 的范围内存在干—湿—干的周期变化。ENSO 对闽江流域干湿有显著影响, 且具有一定的滞后性, 暖、冷事件的影响分别在滞后 1~4 个月和 3~5 个月最显著。

**关键词:** 标准化降水指数; 干湿事件; 干湿演变特征; ENSO 事件; 闽江流域

**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0056

在变化环境中, 干旱和洪涝问题已经成为水文学研究的焦点问题。国内外大量研究结果显示, 全球正处于一个显著干旱化的过程<sup>[1]</sup>, 但存在明显的区域差异性。其中, 欧洲南部、美国西部以及澳大利亚东部呈显著干旱趋势, 而美国东部、欧洲东部和北部高纬度地区则表现为湿润化趋势<sup>[2]</sup>。近 40 a 来, 中国自东南向西北呈现干旱加剧的分布态势<sup>[3]</sup>, 南方地区持续性干旱事件发生频率较低, 主要出现在我国西南以及华南的部分区域<sup>[4]</sup>。近 55 a 来长江中下游流域在年度以及春、秋季均呈现不同程度的干旱化趋势, 而在夏、冬季则呈现不显著的湿润化趋势<sup>[5]</sup>。珠江流域在 20 世纪 90 年代后夏季降水呈显著上升趋势, 而秋季呈下降趋势<sup>[6]</sup>。闽江流域在 1961—2005 年降水不显著增加, 其中降水在春、秋、冬季均表现为不显著增加, 而在夏季呈不显著减少趋势<sup>[7]</sup>。前人对干湿演变特征的研究多集中于黄河、

长江等流域, 而对闽江流域的研究则相对较少。此外, 现有对闽江流域的研究多从年度和季节尺度出发, 揭示长时间尺度的干湿特征, 而对空间分布、周期变化以及对气候变化极为显著的近 20 a 的研究还不足。

ENSO 被普遍认为是探究干湿形成机理的关键要素。ENSO 是全球变化过程中大气环流与海洋相互作用的强烈信号, 引起大气环流的变化和全球气候的异常<sup>[8]</sup>。相关研究指出, ENSO 对降水的影响存在显著的地区差异性。在我国, 降水对 ENSO 的滞后响应总体表现为由南向北滞后时间逐渐延长的特征: 珠江流域降水对当年的 ENSO 事件呈极显著性正相关关系<sup>[9]</sup>; 长江中下游地区存在显著的时滞效应, 在滞后 1 个月时最显著, 一般不会超过 4 个月<sup>[10]</sup>; 黄河流域存在 1~4 个月的滞后<sup>[11]</sup>。上述研究深化了人们对大尺度范围内 ENSO 对干湿特征滞后性影

收稿日期: 2023-11-07 修回日期: 2024-03-23 网络出版时间: 2024-05-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240524.1845.004>

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“变化环境下多元驱动的闽江流域水循环全要素演变归因研究”(U22A20554)

作者简介: 甘贝贝(2000—), 女, 安徽安庆人, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: 2847249108@qq.com

通信作者: 刘梅冰(1981—), 女, 福建福清人, 副教授, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: lmb\_18@163.com

响的认识,但对闽江流域干湿变化与 ENSO 之间响应关系还尚未得到充分的探讨。

闽江流域地处我国东南沿海地区,受东亚季风影响,年降水量充沛,但是降水的时空变率较大,发生旱涝事件的频率不断增加。目前关于近年来闽江流域干湿时空演变特征及周期性变化的研究还较少,因此,选取闽江流域 29 个气象站 1962—2021 年的日降水序列,利用标准化降水指数(standard precipitation index, SPI)分析闽江流域不同时间尺度下干湿时空演变特征及其与 ENSO 事件的响应关系,以期为流域水资源管理、防灾减灾策略制定提供科学支撑。

## 1 研究区概况

闽江是福建省流域面积最大的河流,干流全长 577 km,流域面积  $6.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占福建省的一半。流域自西北向东南呈阶梯状降低,主要有富屯溪、建溪和沙溪三大支流,年平均径流量 621 亿  $\text{m}^3$ 。流域地处  $116^\circ 23' \sim 119^\circ 35' \text{E}$ 、 $25^\circ 23' \sim 28^\circ 16' \text{N}$ ,属于亚热带季风气候区,平均温度在  $17 \sim 21^\circ \text{C}$ ,平均降雨量在 1 500~2 000 mm,降雨充沛,受大尺度的气候影响降水具有一定的时间差异性,汛期为 4—9 月份,非汛期为 10 月—次年 3 月份,具有汛期周期长,降水量丰富的特点。降水量年变化呈双峰型,5—6 月是降水集中期,降水量的第 1 个峰值为全年最大值,在 6 月之后降水明显减少,8—9 月降水明显增加,并出现次高峰,主要与台风降水有关。闽江流域虽然雨量充沛,但由于降雨存在时空分布不均、变率大的特征,少雨期易发生干旱,多雨期易引发洪涝灾害,极易诱发地质灾害。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

选择闽江流域 29 个气象站 1962—2021 年的日降水序列。数据经过严格的质量控制,有 2 个站点的数据存在缺测,为了确保数据的可靠性,采用 29 个气象站的降水数据进行插值校正:如果某站点缺测日少于 5 d,则采用线性插值法替代;如果站点缺测日大于 5 d,则使用同一天的多年平均值替换,并对插值后的数据进行极值检验和时间一致性检验。

考虑大尺度气候条件对闽江流域干湿特征的影响,选用 Nino 3.4 区的平均海平面温度距平指数(sea surface temperature anomaly, SSTA)作为代表

ENSO 的指标,该数据来源于美国大气海洋局地球系统研究实验室(National Oceanic and Atmospheric Administration-Earth System Research Laboratories, NOAA-ESRL)。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 标准化降水指数

SPI 在 1993 年由美国学者 Mckee 等<sup>[12]</sup>提出,早期被用来监测科罗拉多州的干旱情况,是定量分析不同时期降水出现概率的指数。SPI 的具体过程参考相关文献<sup>[13]</sup>。根据表 1 的标准对各等级干湿事件进行划分。

表 1 SPI 分类标准

Tab. 1 SPI classification standard

SPI	旱涝等级	SPI	旱涝等级
$2.0 < \text{SPI}$	极端湿润	$-1.0 \leq \text{SPI} < -0.5$	轻度干旱
$1.5 < \text{SPI} \leq 2.0$	严重湿润	$-1.5 \leq \text{SPI} < -1.0$	中等干旱
$1.0 < \text{SPI} \leq 1.5$	中等湿润	$-2.0 \leq \text{SPI} < -1.5$	严重干旱
$0.5 < \text{SPI} \leq 1.0$	轻度湿润	$\text{SPI} < -2.0$	极端干旱
$-0.5 \leq \text{SPI} \leq 0.5$	正常		

研究<sup>[14]</sup>表明:3 个月尺度的 SPI 可以在一定程度上反映区域季节的干湿状况,与农业干湿有较好的相关性;12 个月尺度的 SPI 可以很好地反映土壤水分、河流径流量和水利设施库容等长时间序列的变化规律。因此,着重分析年、季节尺度的干湿特征。其中,春、夏、秋、冬 4 个季节分别以 5 月、8 月、11 月和次年 2 月的  $\text{SPI}_3$  为代表。

#### 2.2.2 ENSO 事件强度划分

ENSO 可以分为暖事件和冷事件,强度划分是通过太平洋月平均海表温度指数与同期多年平均海表温度之差得出的,具体参照王绍武等<sup>[15]</sup>相关研究,并结合 SSTA 对 ENSO 事件强度进行划分: $1.20 < \text{SSTA}$  为暖强事件、 $0.85 < \text{SSTA} \leq 1.20$  为暖中等事件、 $0.50 < \text{SSTA} \leq 0.85$  为暖弱事件、 $-0.75 < \text{SSTA} \leq -0.50$  为冷弱事件、 $-1.00 < \text{SSTA} \leq -0.75$  为冷中等事件、 $\text{SSTA} \leq -1.00$  为冷强事件。

#### 2.2.3 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendal 趋势检验(M-K 检验)是目前国际上普遍采用的一种非参数检验法<sup>[16]</sup>,主要用来预测降水、温度等长期演化趋势。由于 M-K 检验对降水等时间序列的趋势分析具有较好的适应性,且不受分布类型和样本量的影响,因而被应用于气象水文序列的趋势性分析中<sup>[17]</sup>。

## 2.2.4 小波分析

小波分析作为一种多分辨率的周期性分析方法,已被广泛应用在水文气象等领域中。其中, Morlet 小波可以较好地监测多个周期波动,反映多个时间尺度上的动态变化,并能定性估计未来的变化趋势<sup>[18]</sup>。小波系数轮廓线表示实部值,当其大于 0 时,说明该时段内的降水量大;反之,则表示降水量较少。

## 3 结果与分析

### 3.1 SPI 时空变化特征

#### 3.1.1 SPI 时间变化特征

图 1 为 1962—2021 年闽江流域年度和四季 SPI 变化过程。结果显示,全流域年度和四季的 SPI 均呈增加趋势,但均未通过显著性检验,表明近 60 a 来,闽江流域整体呈不显著湿润化趋势。春季

变化较不明显,倾向率仅为 0.006/(10 a),严重干旱事件呈现“两头多,中间少”的特征,在 1960 年代和 2010 年之后发生严重干旱事件,严重湿润事件则发生在 1970 年代。夏季 SPI 上升速率较大,倾向率达到 0.072/(10 a),尤其是在 20 世纪 90 年代后, SPI 发生突变,呈显著湿润化趋势,1998 年发生近 60 a 来最严重的湿润事件,达到严重湿润程度(SPI 为 1.6)。秋季总体呈现不明显湿润化趋势,1995 年前秋季仅发生 3 次中等干旱事件,而 1995 年后出现 2 次严重干旱和 3 次中等干旱事件,1995 年后秋季干旱趋势开始加强。冬季 SPI 上升趋势较缓慢,近 60 a 来闽江流域冬季共发生 2 次极端干旱和 2 次极端湿润事件,分别出现在 1963 年(SPI 为 -2.34)和 2009 年(SPI 为 -2.17)以及 1998 年(SPI 为 2.53)和 2016 年(SPI 为 2.22),可见,近年来闽江流域冬季比其他季节更容易出现极端干湿事件。

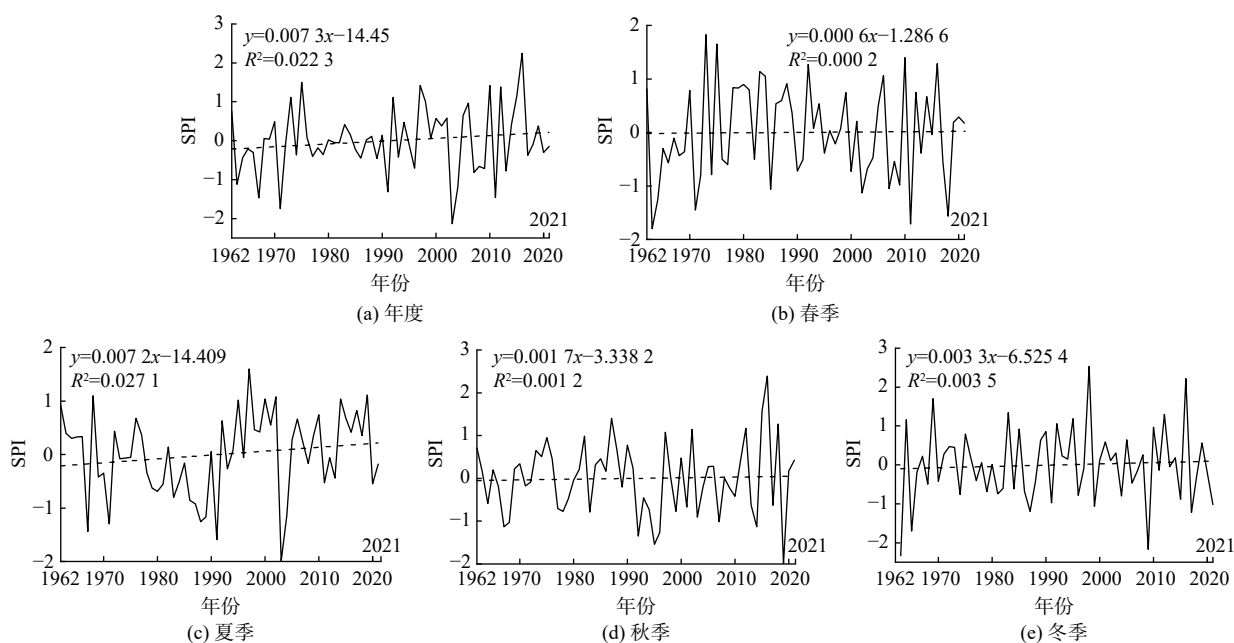


图 1 闽江流域 1962—2021 年年度和四季 SPI 变化趋势

Fig. 1 Annual and seasonal SPI trends in Minjiang River basin from 1962 to 2021

#### 3.1.2 SPI 空间变化特征

图 2 为 1962—2021 年闽江流域多年平均年和季节尺度 SPI 的空间分布。从年尺度来看,闽江流域 SPI 呈上升趋势的站点占总站点数的 96.55%,多年平均倾向率为 0.726/(10 a),其中:流域东南部的上升趋势达到 0.05 的置信度检验,达到显著性上升水平;而西南部的连城呈不显著干旱。从季节尺度来看:春季 SPI 有 62.07% 的站点呈下降趋势,流域自东向西呈现湿—干—湿—干的分布态势,南部、中部以及北部的下降趋势较大,倾向率在 -0.011~

-0.045/(10 a),容易发生春旱。夏季 SPI 有 89.66% 的站点呈上升趋势,但空间差异明显:流域在东南部上升趋势显著,其次是西北部,倾向率为 0.135~0.147/(10 a);而南部呈下降趋势。秋季 SPI 分别有 65.52% 和 34.48% 的站点呈上升和下降趋势, SPI 在流域南部的下降趋势较高,集中在 -0.067~-0.042/(10 a)。冬季 SPI 有 79.31% 的站点呈不显著下降趋势;部分呈上升趋势的站点集中在南部的清流、三明、尤溪、闽清和闽侯一带,倾向率为 0.058~0.078/(10 a)。

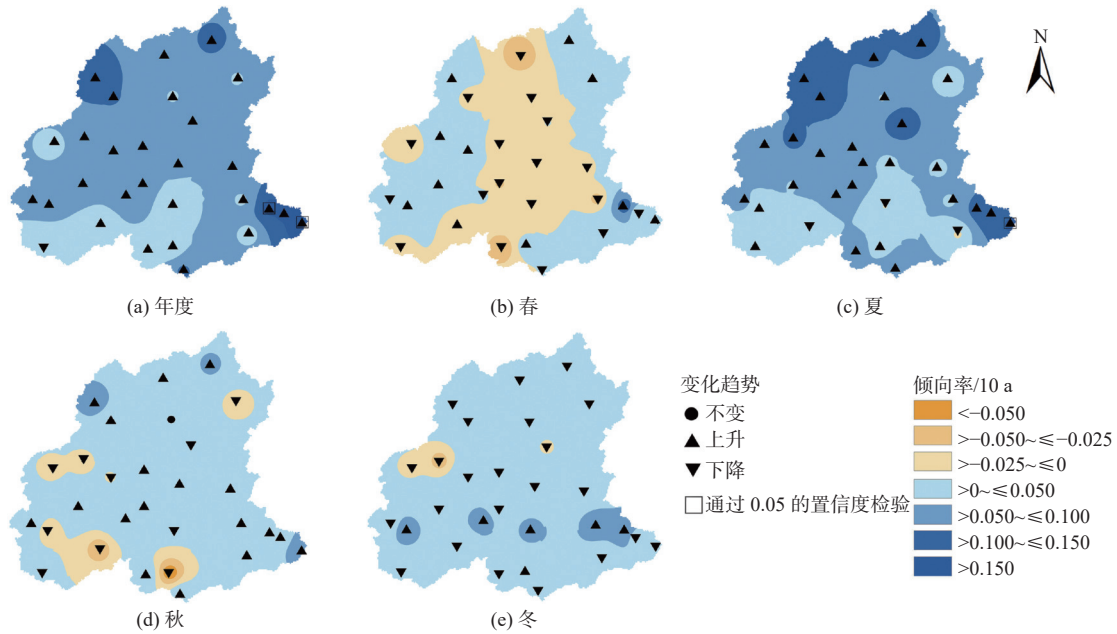


图 2 1962—2021 年闽江流域干湿变化趋势空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of SPI change trend in Minjiang River basin from 1962 to 2021

### 3.2 干湿事件变化特征

#### 3.2.1 干湿事件年际变化特征

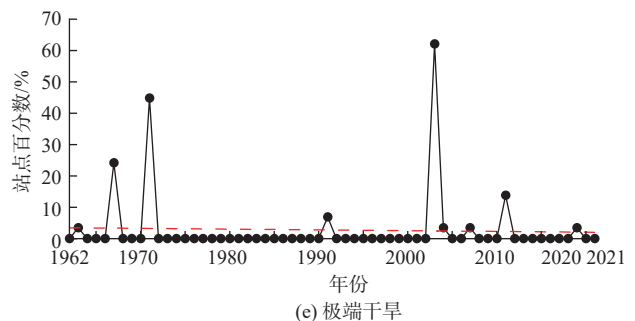
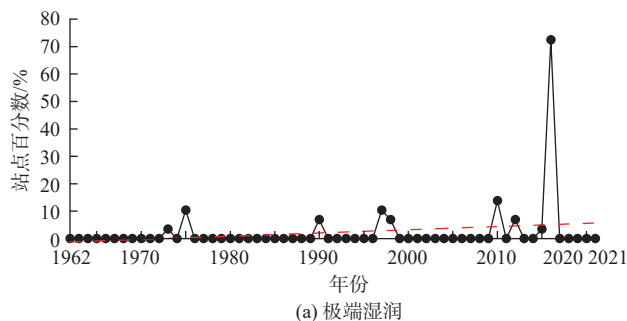
图 3 为闽江流域年尺度 8 类干湿事件站点百分数的变化趋势。可以看出:近 60 a 来,闽江流域受各等级湿润事件影响的站点数均表现为不显著的上升趋势,1990 年代后进入极端湿润、严重湿润、中等湿润多发期,尤其是 2016 年受极端湿润影响的站点数达到 72.41%。近 60 a 来闽江流域干旱事件变化趋势表现不明显,总体呈现“两头多,中间少”的特征,20 世纪 60 年代至 70 年代初以及 21 世纪极端干旱和严重干旱事件频发,而中间时段则较少,尤其是 2003 年受极端干旱影响的站点数达到 62.07%。受极端干旱影响的站点总体上呈不显著性下降趋势,其他级别的干旱变化不明显。可以看出,近 60 a 来,闽江流域湿润事件呈增加趋势,干旱事件呈减少趋势,闽江流域整体向湿润化方向发展。

#### 3.2.2 干湿事件四季变化特征

图 4 为闽江流域季节尺度 8 类干湿事件站点百分数的变化趋势。极端湿润在夏、秋、冬季均为增

加趋势,尤其是在 20 世纪 60 年代末至 70 年代初期、90 年代中后期和 2015 年前后;极端湿润在春季减少,且主要发生在 1970 年代初期。严重湿润在四季均表现为增加趋势,春、夏、冬季的变化趋势与极端湿润相似,不同的是,秋季严重湿润主要发生在 1980 年代和 1995 年之后,中等湿润在夏、秋季增多而在春、冬季减少。轻度湿润在除夏季以外呈减少趋势。

极端干旱在春、夏、冬季均为减少趋势,呈现“两头多,中间少”的特征,极端干旱事件在 1970 年代中期之前以及 1990 年代之后频发;秋季极端干旱呈增加趋势,主要发生在 1990 年代和 2010 年前后。严重干旱在春、夏季减小,在秋、冬季增大。其中,春季严重干旱主要发生在 1975 年前和 2010 年后,夏季严重干旱在 1980 年代频发,秋季严重干旱在 1990 年代后呈增加趋势,冬季严重干旱事件发生在 1965 年之前和 2005 年之后。中等干旱事件在春、冬季增多,夏、秋季减小,轻度干旱事件在除夏季外都为增多趋势。



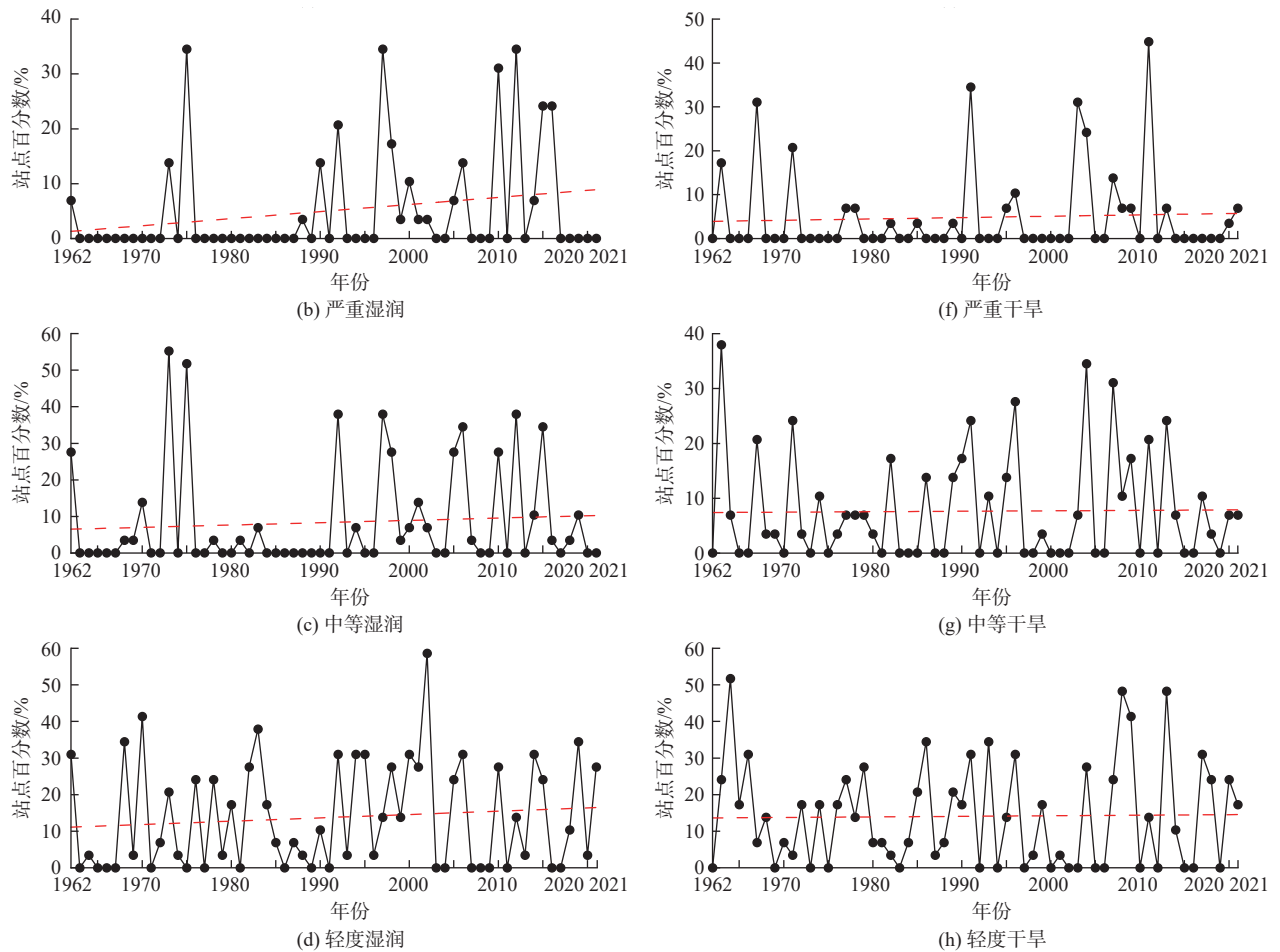
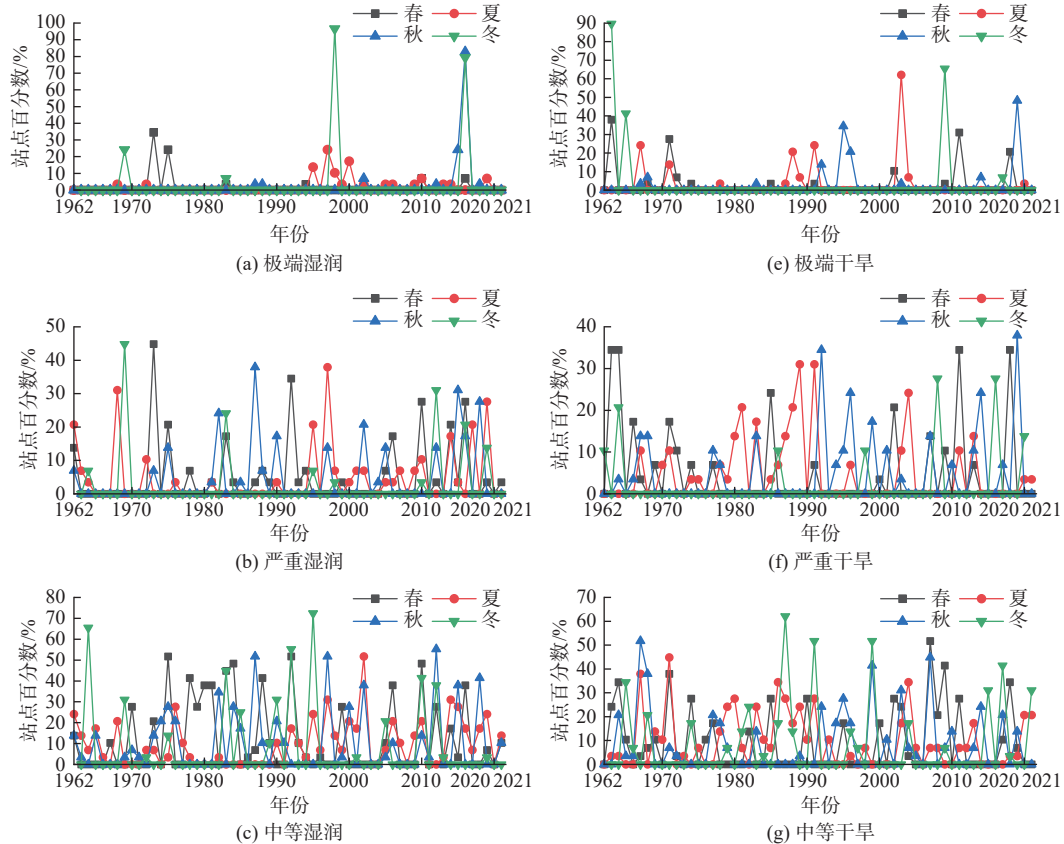


图3 1962—2021 年闽江流域年度 8 类干湿事件站点百分数变化趋势

Fig. 3 Variation trend of annual percentage of 8 types of dry and wet events in Minjiang River basin from 1962 to 2021



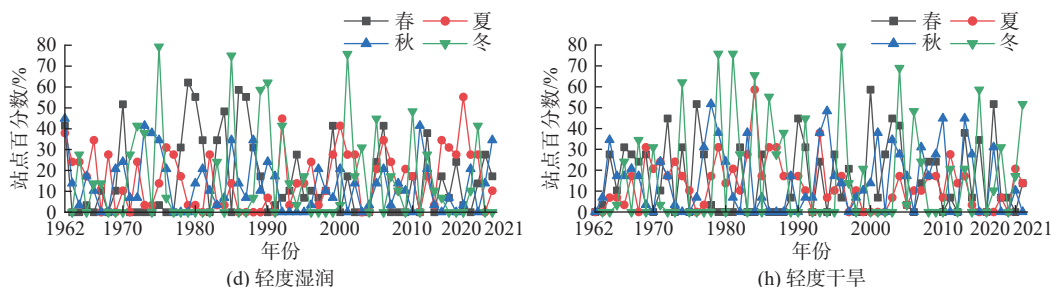


图 4 1962—2021 闽江流域四季 8 类干湿事件站点百分数变化趋势

Fig. 4 Variation trend of the percentage of 8 types of dry and wet events in four seasons in Minjiang River basin from 1962 to 2021

### 3.3 SPI 周期变化特征

采用 Morlet 连续复小波变换对闽江流域 1962—2021 年气候干湿演化周期进行分析, 见图 5。图 5(a) 出现多个尺度正负相间的振荡中心, 即在近 60 a 间, 闽江流域表现出干湿周期性交替的特征。在 1962—2021 年闽江流域年度 SPI 既存在 3~8 a、11~16 a 的短周期变化规律, 又存在 20~30 a 的长周期变化规律。在 20~30 a 的长周期中存在干—湿—干的 3 次干湿交替振荡, 周期平稳, 在 11~16 a 和

3~8 a 这 2 个尺度上干湿变换更加频繁。从图 5(b) 可以看出, 存在 3 个高值, 分别对应着 26 a、6 a 和 3 a。原始序列对应 26 a 周期的值最大, 周期振荡最强烈, 是第一主周期。6 a 和 3 a 分别是年度 SPI 变化的第二和第三个主周期。这表明, 围绕 26 a、6 a 和 3 a 的周期性波动在整个时间尺度上控制着闽江流域年度 SPI 的周期性变化特征。从小波实部等值线图的未闭合曲线推测, 目前年 SPI 正处于偏少期, 未来一段时间内闽江流域将进入降水偏少期。

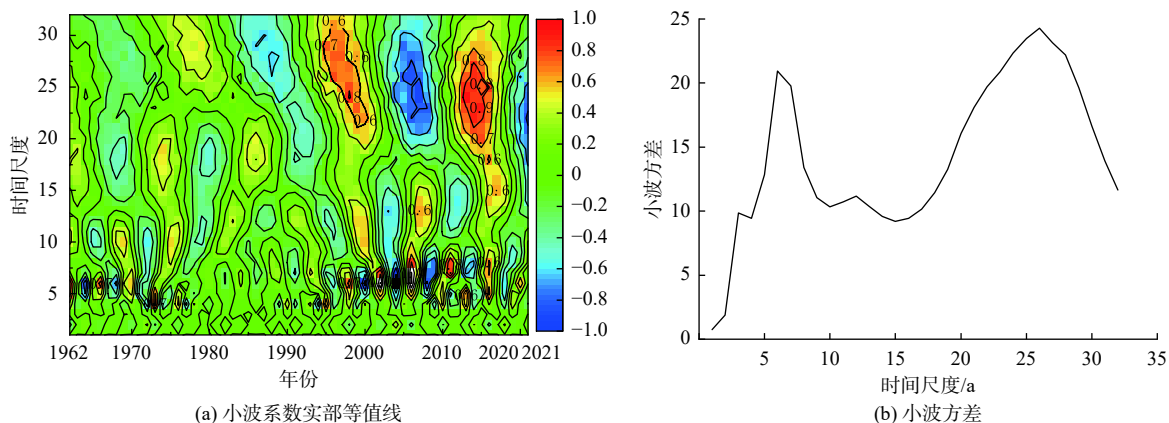


图 5 1962—2021 年闽江流域 SPI 小波系数实部等值线与小波方差

Fig. 5 Real isoline and wavelet square difference plot of SPI wavelet coefficients in Minjiang River basin from 1962 to 2021

### 3.4 ENSO 事件对闽江流域干湿的影响

#### 3.4.1 ENSO 事件与 SPI 的关系

为探究 ENSO 与闽江流域干湿状况的关系, 对 1962—2021 年 ENSO 事件的出现次数以及强度进行了统计分析, 结果见表 2。研究表明: 当冷、暖事件发生时, 相应的 SPI 平均值分别为 -0.124, 0.193; 在未发生 ENSO 冷、暖事件即正常年份时, SPI 的平均值为 -0.088。当 ENSO 为暖事件时, SPI 的平均值会高于正常年份的月均值, 导致湿润事件发生; 当 ENSO 为冷事件时, SPI 的平均值低于正常年份, 导致干旱事件发生。这主要是因为: 当 ENSO 进入暖相位时, 西太平洋的反气旋环流异常加强, 使得西南风增强了水汽输送, 有利于我国南方降水增多;

当 ENSO 为冷相位时, 降水较少<sup>[19]</sup>。

闽江流域年尺度 SPI 和 ENSO 两个事件强度的相关性进行分析见图 6。结果发现: SPI 与 ENSO 冷事件强度的相关系数为 -0.158 ( $p < 0.05$ ), SPI 与暖事件强度的相关系数为 0.242 ( $p < 0.01$ ), 进一步验证了 ENSO 事件对闽江流域干湿变化具有重要作用: 当暖事件发生时, 湿润的概率更大, 暖事件强度越高, 发生严重湿润的概率越高; 当发生冷事件时, 干旱的概率更大, 冷事件强度越高, 发生严重干旱的概率越高。

#### 3.4.2 ENSO 事件对干湿影响的滞后性

相关文献<sup>[20]</sup>表明, 赤道东太平洋海温异常与流

域的降水异常并非同步,二者需要一定的时间相互作用和影响。表 3 对 ENSO 暖、冷事件下 SSTA 与闽江流域同期以及滞后 1~6 个月 SPI 进行分析,结果可知: ENSO 暖事件发生初始,对闽江流域干湿存在极显著性影响,相关系数为 0.454( $p < 0.01$ );在滞后 1~4 个月时,尽管相关系数有所减小,仍达到极显著性相关;在滞后 5 个月时,时滞时间愈长,相

关性愈弱。当 ENSO 冷事件发生时,同期到滞后 2 个月的相关性均不显著,滞后 3~5 个月时相关性才开始显著,在滞后 4 个月时为极显著性相关,相关系数为 0.2;滞后 6 个月相关性开始减弱。由此可见, ENSO 暖事件的发生对闽江流域同期至滞后 4 个月的干湿有明显的影响, ENSO 冷事件对滞后 3~5 个月的干湿事件存在显著影响。

表 2 1962—2021 年 ENSO 事件及强度等级  
Tab. 2 ENSO events and their intensity levels from 1962 to 2021

暖事件					冷事件				
开始年月	结束年月	持续月数	强度	SPI-1	开始年月	结束年月	持续月数	强度	SPI-1
1963年6月	1964年2月	9	2	0.28	1964年5月	1965年1月	9	-1	-0.53
1965年5月	1966年4月	12	3	0.12	1970年7月	1972年1月	19	-2	-0.31
1968年10月	1969年5月	8	1	0.20	1973年5月	1976年4月	36	-3	0.19
1969年8月	1970年1月	6	1	0.19	1983年9月	1984年1月	5	-1	-0.40
1972年5月	1973年3月	11	3	0.18	1984年10月	1985年8月	11	-1	-0.03
1976年9月	1977年2月	6	1	0.07	1988年5月	1989年5月	13	-3	-0.02
1977年9月	1978年1月	5	1	0.01	1995年8月	1996年3月	8	-2	-0.21
1979年10月	1980年2月	5	1	-0.59	1998年7月	2001年2月	32	-3	0.04
1982年4月	1983年6月	15	3	0.40	2005年11月	2006年3月	5	-1	-0.04
1986年9月	1988年2月	18	2	-0.03	2007年6月	2008年6月	13	-3	-0.16
1991年5月	1992年6月	14	2	0.07	2008年11月	2009年3月	5	-2	-0.69
1994年9月	1995年3月	7	1	0.10	2010年6月	2011年5月	12	-3	-0.30
1997年5月	1998年5月	13	3	0.79	2011年7月	2012年4月	10	-2	0.48
2002年6月	2003年2月	9	2	0.56	2016年8月	2016年12月	5	-1	0.71
2004年7月	2005年2月	8	1	0.04	2017年10月	2018年4月	7	-1	-0.52
2006年9月	2007年1月	5	1	0.02	2020年8月	2021年12月	17	-1	-0.19
2009年7月	2010年3月	9	2	0.32					
2014年10月	2016年4月	19	3	0.41					
2018年9月	2019年6月	10	1	0.52					

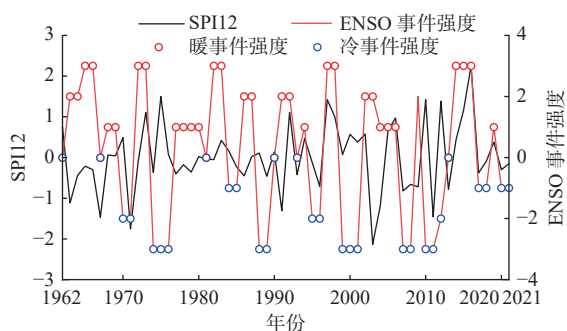


图 6 ENSO 事件强度与 SPI12 对应关系

Fig. 6 The correlation between ENSO event intensity and SPI12

## 4 讨论

### 4.1 闽江流域干湿变化特征

1962—2021 年闽江流域在年尺度上呈不显著

湿润化趋势,与我国整体干湿变化趋势较一致<sup>[3]</sup>。Wang 等<sup>[14]</sup>根据 1960—2006 年数据分析闽江流域的干湿变化,指出 1998 年和 2003 年分别是极湿和极干的年份,且极端干旱主要集中在春、夏、秋三季。本文基于 1962—2021 年更长时间尺度的研究发现: 2003 年和 2016 年分别是最干旱和最湿润的年份; 2000 年以前,极端干湿事件少发; 2000 年之后,夏、秋、冬季更容易发生极端事件,且冬季发生极端事件的可能性更高。可见,随着选取数据资料和研究时间尺度的延长,闽江流域极端干湿特征有所不同。此外,已有研究<sup>[21]</sup>表明,21 世纪后全球增温趋势显著导致降水变率上升,尤其是在气候湿润区域,极端干湿事件发生更加频繁。Li 等<sup>[22]</sup>研究发现,未来闽江流域将出现极端降水和持续干旱发生频率共

同增加的状况,当前气候条件下每 100 年发生 1 次的极端事件,到 21 世纪末重现期缩短为 18.6 年。本研究针对闽江流域 SPI 的小波实部等值线图也可以推断,流域在 2020 年左右将进入降水偏少期,同时表现出 20~30 a 的长周期变化规律。杨阳等<sup>[23]</sup>对我国南方地区干湿变化的研究也发现,未来 30 a 我国南方地区降水相较于 1976—2005 年将减少 10%~20%,这也印证了本文的结论。

从季节尺度变化来看,近 60 a 闽江流域整体呈现不显著湿润化趋势,但存在年代际和季节内差异性。根据表 4 可知,闽江流域春季湿润化趋势不明显,而夏季在 20 世纪 60—80 年代均处于干旱化状态,90 年代后才开始呈现显著性湿润化趋势,与隋月等<sup>[24]</sup>对我国南方夏季降水的变化结论一致。这主要是受全球气候变暖影响,副热带夏季风环流略有增强,导致东亚地区的夏季降水在 21 世纪有所增加<sup>[25]</sup>,中国东南部夏季强降水事件更加频繁,而闽江流域未来也将面临更多、更高的极端降水风险<sup>[26]</sup>。闽江流域秋季 SPI 呈现明显的年代际特征,近 60a 来秋季整体呈现“干—湿—干”的分布态势。整体来看,闽江流域秋、冬季在 21 世纪表现出干旱化趋

势,这与 Zhang 等<sup>[27]</sup>对 21 世纪中国南方地区秋季平均降水监测的结果一致。且随着气温升高,干旱发生频率和强度以及受干旱影响地区的增加,发生秋、冬旱的可能性更大<sup>[28]</sup>。Wen 等<sup>[29]</sup>通过 RCP 2.6 以及 RCP 8.5 情景分别计算 SPI 和 SPEI,指出未来闽江流域秋、冬季的干旱将有继续增加的可能性,且冬季干旱增加趋势更显著。

表 3 SSTA 与闽江流域在 0~6 个月的 SPI 相关性分析  
Tab. 3 Correlation analysis of SSTA with SPI in the Minjiang River basin at 0-6 months

滞后时间	暖事件		冷事件	
	Pearson 相关系数	显著性水平	Pearson 相关系数	显著性水平
同期	0.454**	<0.001	0.115	0.100
1个月	0.418**	<0.001	0.122	0.079
2个月	0.351**	<0.001	0.047	0.500
3个月	0.267**	<0.001	0.142*	0.042
4个月	0.236**	0.001	0.200**	0.004
5个月	0.140	0.055	0.140*	0.048
6个月	0.084	0.249	0.108	0.126

注: \*表示在 0.05 级别上存在显著性相关, \*\*表示在 0.01 级别上存在显著性相关。

表 4 1962—2021 年闽江流域四季年代际干湿变化倾向率

Tab. 4 Interdecadal dry and wet change tendency rate of Minjiang River basin in four seasons from 1962 to 2021

时间	1962—2021	1962—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2010	2011—2021
春季	0.006	1.004	1.576	-0.521	-0.459	0.683	0.396
夏季	0.072	-1.283	-0.078	-0.474	1.776	0.622	0.294
秋季	0.017	-0.584	-0.774	0.432	0.862	-0.318	-0.497
冬季	0.033	2.394	-0.728	0.653	0.233	-0.722	-0.896

秋季是中国大部分地区从炎热潮湿夏季向寒冷干燥冬季过渡的季节,在季风气候条件下,冷暖空气强度变化和交汇区的多样性使气温和降水的波动更明显,这种针对气温和降水发生转变的季节更容易出现干旱。此外,当赤道太平洋东部地区海温偏低时,为西太平洋地区台风的生成和发展创造了有利条件,进而影响我国东部地区的降水。有研究表明台风对东南沿海地区降水的贡献率超过 40%<sup>[30]</sup>,每年登陆和影响福建省的台风平均 5 个<sup>[31]</sup>,使福建省成为台风灾害重灾区。夏秋两季是台风发生最频繁的季节,7~9 月又是台风登陆最多的月份,然而,在过去 40 a 中,西北太平洋的台风频次呈现出周期性降低的趋势,登陆华南地区的数目比常年减少,

尤其是 21 世纪后,台风登陆次数下降趋势明显<sup>[32]</sup>。尽管全球变暖使较高的海面温度为热带气旋的形成提供了更有利的条件,但 Chen 等<sup>[33]</sup>预计未来西太平洋的台风生成数量和台风频率都将减少,而台风强度和平均降水率将会增加,这使得未来闽江流域秋季降水情况变得更加复杂。作为降水的重要影响因子,ENSO 对秋季影响比对夏季的影响更为突出<sup>[34]</sup>,在 El Niño 发生年,西北太平洋海洋性大陆附近的对流活动减弱,导致对流冷却异常,使我国南方地区秋季降水明显偏多,相反,在 La Niña 年秋季,我国南方降水显著偏少<sup>[35]</sup>。由表 2 对近 60 a 发生 ENSO 冷暖事件及强度的统计可知,在 2000 年后,共发生 6 次 El Niño 事件,其中仅 1 次为强事件,事



件累积长达 60 个月,而 La Niña 事件共发生 9 次,有 3 次为强事件,累积长达 88 个月。可见,2000 年后 La Niña 事件表现出累积时间长、发生强度高的特征,这也导致 2000 年后闽江流域秋季降水量有所减少,呈现干旱化态势。

#### 4.2 闽江流域干湿特征对 ENSO 的响应

我国南方地区降水与赤道东太平洋地区海温之间存在着一致的年代际振荡关系<sup>[36]</sup>,因此 ENSO 是导致闽江流域干湿形成的一个重要原因。本文从月尺度讨论了 ENSO 事件对应的 SPI 变化,发现 ENSO 暖事件期间的 SPI 平均值大于冷事件期间的平均值,即暖事件倾向于引发湿润事件,而冷事件往往会引发较高的干旱风险,与 Huang 等<sup>[37]</sup>对珠江流域干湿与 ENSO 的响应关系研究结果一致。这是因为:在 ENSO 暖事件期间,赤道东太平洋地区 SST 异常增高,而西太平洋 SST 降低,导致东亚季风减弱,西太平洋副热带高压南移,使我国主要季风雨带偏南,并在南方的停滞时间延长,从而使闽江流域夏、秋季降水偏多<sup>[19]</sup>;而冷事件的成因恰好相反,导致华南地区夏、秋季降水偏少,干旱频发<sup>[35]</sup>。IPCC AR6 认为,未来 ENSO 引起的降雨变率很可能会随着 21 世纪全球变暖而加剧,区域尺度上相关的 ENSO 降水变率也有可能加剧<sup>[38]</sup>,在未来高排放情景下,强东太平洋型 El Niño 事件的频率将增加,我国东南部降水将变得更加严重和复杂<sup>[39]</sup>。

在进一步探究 ENSO 事件对闽江流域干湿的影响时,发现闽江流域干湿对 ENSO 事件存在显著的滞后性响应,其中,闽江流域干湿对 El Niño 事件存在同期至 4 个月的滞后,对 La Niña 事件存在 3~5 个月的滞后。本结论与朱圣男等<sup>[40]</sup>在抚河流域的研究基本相符:抚河流域干旱对 El Niño 事件在滞后 1 个月时相关性最强,对 La Niña 事件在滞后 4 个月时呈显著性相关( $p < 0.05$ );而闽江流域干湿对 El Niño 事件的响应在同期时最高,对 La Niña 事件在滞后 4 个月时呈极显著性相关( $p < 0.01$ )。相关研究表明,ENSO 对降水和温度的影响并不同步<sup>[20]</sup>,ENSO 事件与降水和径流变化之间存在 3~5 个月的滞后,并且气象干旱滞后于 ENSO 事件 3 个月以上<sup>[41]</sup>。Wang 等<sup>[19]</sup>首先指出当 ENSO 发生时,西北太平洋地区的异常反气旋可以从冬季持续到次年夏季,使 ENSO 事件对东亚地区降水具有滞后效应。闽江流域位于亚热带湿润性季风气候区,水汽主要来自西北太平洋的水汽输送,通过副热带高压西南

侧的东南季风环流输送到闽江流域形成降水。因此,东南季风水汽输送的异常引起降水的异常,与闽江流域干湿存在密切联系,而 ENSO 所导致的西北太平洋反气旋异常,则是通过对东南季风的间接影响,从而对我国降水产生影响<sup>[42]</sup>。因此,闽江流域干湿对 ENSO 的滞后性响应与“ENSO-西北太平洋地区反气旋-季风”的耦合系统有关。

## 5 结论

采用 SPI,对近 60 a 闽江流域不同时间尺度干湿演变的时空特征以及对 ENSO 事件响应的滞后性进行分析,得出以下结论:

闽江流域近 60 a 呈不显著湿润化趋势:夏季是全年最湿润的季节,在 1990 年代后湿润化趋势显著;秋季在 1995 年后干旱趋势开始加强;而极端干湿事件易发生在冬季。空间上,近 60 a 全流域均以湿润化趋势为主,年尺度流域东南部存在显著湿润化趋势;春季流域自东向西呈现湿—干—湿的分布态势;夏季在流域东南方和流域北方表现出显著湿润化趋势;秋季流域南部有干旱化倾向。

闽江流域各等级干旱和湿润事件在年尺度上均表现为增加趋势。在季节尺度上,夏季 4 类湿润事件增加;秋季极端、严重以及轻度干旱事件增加,且主要发生在 1990 年代后。

闽江流域存在 20~30 a、11~16 a 以及 3~8 a 这 3 种时间尺度的周期性演变特征,在 20~30 a 内存在干—湿—干的交替变换,另两种时间尺度在干湿交替上表现得更加频繁。目前年 SPI 正处于偏少期,未来近一段时间内闽江流域将进入降水偏少期。

ENSO 事件发生强度影响闽江流域的干湿, SPI 与 ENSO 暖事件强度呈正相关,与冷事件强度呈负相关关系。ENSO 对闽江流域干湿特征的影响具有时间滞后性,当暖事件发生时,存在 1~4 个月的滞后性,在同期时相关性最高;当冷事件发生时,存在 3~5 个月的时滞性,相关系数在 4 个月时最高。

#### 参考文献:

- [1] ROHDE M M. Floods and droughts are intensifying globally[J]. *Nature Water*, 2023: 226-227. DOI: 10.1038/s44221-023-00047-y.
- [2] VICENTE-SERRANO S M, PEÑA-ANGULO D, BEGUERÍA S, et al. Global drought trends and future projections[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering*

- Sciences, 2022, 380(2238): 20210285. DOI: [10.1098/rsta.2021.0285](https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285).
- [3] 陈亚利, 赵强, 艾明乐, 等. 1959—2019年辽河流域气象干旱时空特征分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 42-52. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.004](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.004).
- [4] 郑航, 刘悦忆, 赵建世, 等. 极端干旱下河口咸潮上溯对径流过程的响应(I): 特征与规律[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 121-131. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.009](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.009).
- [5] 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. DOI: [10.5846/stxb201707011185](https://doi.org/10.5846/stxb201707011185).
- [6] 靖娟利, 徐勇, 王永锋, 等. 1960—2019年珠江流域多尺度旱涝特征研究[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(3): 557-569. DOI: [10.13872/j.1000-0275.2021.0065](https://doi.org/10.13872/j.1000-0275.2021.0065).
- [7] 张星, 陈惠, 林秀芳. 近45年闽江流域气候变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 107-110.
- [8] AMOS C M, CASTELAO R M. Influence of the El Nino-Southern Oscillation on SST fronts along the west coasts of North and South America[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(10): e2022JC018479. DOI: [10.1029/2022JC018479](https://doi.org/10.1029/2022JC018479).
- [9] YAN Y, WU H, GU G, et al. Exploring the ENSO impact on basin-scale floods using hydrological simulations and TRMM precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(22): e2020GL089476. DOI: [10.1029/2020GL089476](https://doi.org/10.1029/2020GL089476).
- [10] 李煜, 陈敏, 罗剑锋, 等. 1951—2016年长江中下游气候变化及其与厄尔尼诺/拉尼娜的相关性[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(6): 16-21. DOI: [10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2018.06.004](https://doi.org/10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2018.06.004).
- [11] 黄婷婷, 林青霞, 吴志勇, 等. 黄河流域干旱时空特征及其与ENSO的关联性分析[J]. *人民黄河*, 2021, 43(11): 52-58. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.11.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.11.010).
- [12] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993, 17(22): 179-183.
- [13] 王洁, 李王成, 李晨, 等. 基于SPI指数的宁夏干旱特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 528-538. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0056](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0056).
- [14] WANG Y F, CHEN X W, CHEN Y, et al. Flood/drought event identification using an effective indicator based on the correlations between multiple time scales of the Standardized Precipitation Index and river discharge[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(1-2): 159-168. DOI: [10.1007/s00704-015-1699-0](https://doi.org/10.1007/s00704-015-1699-0).
- [15] 王绍武, 龚道溢. 百年来的ENSO事件及其强度[J]. *气象*, 1999, 25(1): 10-14. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0526.1999.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0526.1999.01.002).
- [16] WANG F, SHAO W, YU H, et al. Re-evaluation of the power of the Mann-Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 14. DOI: [10.3389/feart.2020.00014](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014).
- [17] ZHAO Y, XU X, HUANG W, et al. Trends in observed mean and extreme precipitation within the Yellow River basin, China[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2019, 136(3-4): 1387-1396. DOI: [10.1007/s00704-018-2568-4](https://doi.org/10.1007/s00704-018-2568-4).
- [18] CHONG K L, HUANG Y F, KOO C H, et al. Spatiotemporal variability analysis of standardized precipitation indexed droughts using wavelet transform[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127299. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.127299](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127299).
- [19] WANG B, WU R, FU X. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect east Asian climate?[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536. DOI: [10.1175/1520-0442\(2000\)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2).
- [20] MCPHADEN M J, ZEBIAK S E, GLANTZ M H. ENSO as an integrating concept in earth science[J]. *Science*, 2006, 314(5806): 1740-1745. DOI: [10.1126/science.1132588](https://doi.org/10.1126/science.1132588).
- [21] ZHANG W, FURTADO K, WU P, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. *Science Advances*, 2021, 7(31): eabf8021. DOI: [10.1126/sciadv.abf8021](https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8021).
- [22] LI X, CHEN X, YANG T, et al. Projection of extreme precipitation in the Minjiang River basin, Southeast China[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2022, 13(12): 4177-4193. DOI: [10.2166/wcc.2022.145](https://doi.org/10.2166/wcc.2022.145).
- [23] 杨阳, 戴新刚, 汪萍. 未来30年亚洲降水情景预估及偏差订正[J]. *大气科学*, 2022, 46(1): 40-54. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20241](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20241).
- [24] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 I. 降水资源演变特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1875-1882. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2012.0216](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2012.0216).
- [25] WANG B, YIM S Y, LEE J Y, et al. Future change of Asian-Australian monsoon under RCP 4.5 anthropogenic warming scenario[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(1-2): 83-100. DOI: [10.1007/s00382-013-1769-x](https://doi.org/10.1007/s00382-013-1769-x).
- [26] SUN Y, DONG S, HU T, et al. Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in Southeast-

- ern China since 1961[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(1): S79-S83. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0114.1.
- [27] ZHANG Q, YAO Y, WANG Y, et al. Characteristics of drought in Southern China under climatic warming, the risk, and countermeasures for prevention and control[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(3-4): 1157-1173. DOI: 10.1007/s00704-018-2541-2.
- [28] CHEN H, SUN J. Changes in drought characteristics over China using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5430-5447. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00707.1.
- [29] WEN Y, YANG A, FAN Y, et al. Stepwise cluster ensemble downscaling for drought projection under climate change[J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(5): 2318-2338. DOI: 10.1002/joc.7977.
- [30] ZHANG Q, LAI Y, GU X, et al. Tropical cyclonic rainfall in China: Changing properties, seasonality, and causes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(9): 4476-4489. DOI: 10.1029/2017JD028119.
- [31] 韩鹏, 郭桂祯, 李鑫磊, 等. 基于地理探测器的福建省台风灾情影响因素分析[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(2): 487-495. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.2.0487.
- [32] 王杰, 王洁, 代金圆, 等. 1977—2018年中国台风统计特征分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(6): 28-33. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2021.06.005.
- [33] CHEN Y, DUAN Z, YANG J, et al. Typhoons of western North Pacific basin under warming climate and implications for future wind hazard of East Asia[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 208: 104415. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104415.
- [34] 陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇, 等. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(4): 385-400. DOI: 10.11898/1001-7313.20190401.
- [35] ZHANG R H, SUMI A, KIMOTO M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1999, 16(2): 229-241. DOI: 10.1007/BF02973084.
- [36] LI J, HUANG D, LI F, et al. Circulation characteristics of EP and CP ENSO and their impacts on precipitation in South China[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, 179: 405-415. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.09.006.
- [37] HUANG C, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Spatio-temporal variation of dryness/wetness across the Pearl River basin, China, and relation to climate indices[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 318-332. DOI: 10.1002/joc.5005.
- [38] SUN Q, ZWIERS F, ZHANG X, et al. The effect of greenhouse gas-induced warming on the impact of El Niño and La Niña events on daily precipitation extremes in the boreal cold season[J]. *Journal of Climate*, 2023, 36(18): 6393-6407. DOI: 10.1175/JCLI-D-22-0713.1.
- [39] HUANG Y, REN H L, LIU M. Change of East-Asian summer precipitation associated with Strong El Niño under the future emission scenarios[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 771155. DOI: 10.3389/feart.2021.771155.
- [40] 朱圣男, 刘卫林, 万一帆, 等. 抚河流域干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 131-138. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.06.019.
- [41] CHIEW F H S, MCMAHON T A. El Niño-Southern Oscillation and Australian rainfall and streamflow[J]. *Australian Journal of Water Resources*, 2003, 6(2): 115-129. DOI: 10.1080/13241583.2003.11465216.
- [42] ZHANG T, YANG S, JIANG X, et al. Seasonal-interannual variation and prediction of wet and dry season rainfall over the maritime continent: Roles of ENSO and monsoon circulation[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(10): 3675-3695. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0222.1.

## Dry-wet evolution characteristics and response to ENSO events in the Minjiang River basin from 1962 to 2021

GAN Beibei<sup>1</sup>, LIU Meibing<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Carbon Neutrality Future Technology, College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;

2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;

3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Accessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350117, China)

**Abstract:** The global average temperature has risen by 1.09 °C over the past century. The increase in temperature leads to an increase in evapotranspiration and atmospheric water vapor content, which causes the rate of the water

cycle to accelerate, changing the global pattern of the spatial and temporal distribution of water and heat, thus causing the frequent occurrence of droughts, floods, and other extreme events. The Minjiang River basin is an important water conservation area in the southeast of China, with an average annual precipitation between 1 400 mm and 2 000 mm. But the inter-annual unevenness, inter-seasonal variability, and impulsive intra-seasonal distribution of precipitation, as well as the complexity of geographic distribution, make the basin regional, seasonal dry and wet problems occur frequently. Therefore, it is of great significance to study the characteristics of regional dry and wet evolution for economic and social development and ecological environment construction.

Based on the daily precipitation data of 29 meteorological stations in the Minjiang River basin from 1962 to 2021, the standardized precipitation index (SPI), combined with the Mann-Kendall test and Morlet wavelet analysis, were used to analyze the characteristics of spatial and temporal changes of dryness and wetness of the Minjiang River basin under different time scales, and combined with the sea surface temperature anomaly index (SSTA), to investigate the effects of ENSO events on the evolution of dryness and wetness in the Minjiang River.

The results showed that the Minjiang River basin showed a non-significant wetting trend at different spatial and temporal scales, with a weak wetting trend in spring, and the basin showed a wet-dry-wet-dry distribution from east to west. The summer SPI changed abruptly after the 1990s, showing a significant wetting trend, with a significant wetting trend in the southeastern part of the basin. In autumn, the drought trend began to intensify after 1995, with a tendency toward aridification in the southern part of the basin. Winter is more prone to extreme wet and dry events than other seasons. Extreme wet and dry events at all levels throughout the basin tended to increase on an annual scale. On the seasonal scale, the four types of wet events were on an increasing trend in summer, while extreme drought, severe drought, and mild drought events were all on an increasing trend in fall and mainly occurred after the 1990s. The SPI of the Minjiang River basin has a short-cycle change pattern of 3-8 a and 11-16 a and a long-cycle change pattern of 20-30 a. During the occurrence of ENSO cold and warm events, the mean value of SPI is  $-0.124$  and  $0.193$  respectively, and the correlation coefficients between SPI and the intensity of ENSO cold and warm events are  $-0.158$  and  $0.242$  respectively, which indicate that there is a greater possibility of wetness when warm events occur, and a greater possibility of drought when cold events occur. The occurrence of ENSO warm events has a significant effect on the wet and dry of the Minjiang River basin during the same period up to the 4-month lag months of dryness and wetness, and the occurrence of ENSO cold events has a significant effect on the dryness and wetness in the lag of 3-5 months.

The Minjiang River basin as a whole shows an insignificant wetting trend, with significant wetting in the summer after the 1990s, a tendency to drought in the fall after 1995, and a greater tendency to extreme wet and dry events in the winter than in other seasons. Spatially, a more significant wetting trend exists in the southeastern portion of the basin. There is an increasing trend of wetting and drying events at all levels throughout the basin, with wetting events occurring more often in the summer and drying events occurring more often in the fall and winter. There is a cycle shift of dry-wet-dry alternation in the Minjiang River basin in the 20-30 a scale range. The dry-wet and ENSO warm and cold events in the Minjiang River basin are most significant at a lag of 1-4 months and 3-5 months, respectively.

**Key words:** standardized precipitation index; dry-wet event; dry-wet evolution characteristics; ENSO event; Minjiang River basin