

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 1 - 52 - 06

# 基于多时间尺度 SPI 的闽江流域干湿变化 与洪旱事件识别

王跃峰<sup>1</sup> 陈兴伟<sup>1 2 3\*</sup> 陈莹<sup>1 2 3</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007;  
3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建 福州 350007)

**摘 要:** 为分析闽江流域气候干湿变化及其径流响应, 以闽江流域 25 个气象站 1960—2006 年逐月降水资料以及竹岐水文站月径流资料为基础, 采用标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, 简称 SPI) 和 Pearson 相关分析法进行研究。结果表明: 1. 长时间尺度的 SPI 在分析气候干湿变化上更具实用性, 更能清楚反映长期干湿变化特征; 2. 短时间尺度 (1 ~ 3 个月) SPI 与径流存在高相关性, 其中 2 个月时间尺度的 SPI 与径流的相关性最强; 且短时间尺度上二者的相关性有季节差异, 表现为春、夏季 ( $R > 0.75$ ) 相关性高于秋、冬季 ( $R < 0.7$ ); 3. 2 个月尺度 SPI 序列能够较精确地识别流域性的特大洪水事件和主要旱灾, 对流域性特大洪水的监测和预报具有潜在应用价值。

**关键词:** 标准化降水指数 (SPI); 时间尺度; 水文响应; 洪旱事件; 闽江流域

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

干旱和洪水灾害的发生主要受降水强度及其空间分布影响, 从而直接影响农业生产和经济发展<sup>[1-2]</sup>。但由于地区气候条件差异性, 干旱标准的界定也不尽相同, 各国学者根据地区特点提出了若干用于评价干旱的指标<sup>[3]</sup>。目前已得到普遍认可的有: PDSI 指数、Z 指数、SPI 指数等<sup>[4-6]</sup>。相比之下, SPI 计算简便, 鲁棒性好, 具有多时间尺度性, 能够识别到更多极端事件<sup>[7-9]</sup>, 因此该指数已被国内外学者广泛用于气象干旱监测<sup>[10-12]</sup>。近几年有学者开展了多时间尺度 SPI 与地表水资源 (径流、水库蓄水量) 的相关分析研究, 用以探讨多时间尺度 SPI 在地表水资源管理、极端洪旱事件识别中的应用, 目前国外已有少数学者开展类似研究<sup>[12-13]</sup>, 国内还鲜见报道。

闽江流域位于亚欧大陆东南边缘, 属东亚季风

交汇频繁区域, 年降水量较为丰富, 但由于降水时空变率大, 洪旱灾害时有发生。近些年, 学者们从不同角度研究了闽江流域气候要素及其干湿变化, 张章新<sup>[14]</sup>分析了闽江流域降水、蒸发和水文要素变化, 探讨了典型暴雨洪水的成因, 指出 80% 的暴雨形成于梅雨季节; 张星等<sup>[15]</sup>采用线性估计法分析了闽江流域 1960—2005 年 11 个气象站的降水、气温和日照时数的时空分布特征, 指出各要素的变化具有明显的区域性和季节性; 陈莹等<sup>[16-17]</sup>采用非参数方法分析了 1961—2006 年气候要素变化趋势, 结果发现降水和气温均有上升趋势, 并基于 12 个月尺度 SPI 分析了近 50 a 福建省干湿变化, 发现有干向湿转变的趋势。总体来看, 上述研究主要存在以下不足: 研究的时间尺度较为单一, 基本限于年, 且对流域内干湿变化与极端洪旱事件关系的研究还很少, 因此本

收稿日期 (Received date): 2013 - 07 - 14; 改回日期 (Accepted): 2013 - 08 - 17。

基金项目 (Foundation item): 2012 年福建省公益所专项 (N00298); 国家自然科学基金 (50979015)。[Supported by the Projection of Public Welfare of Fujian Province (N0.0298) and the Projection of National Natural Science Foundation of China (No.50979015).]

作者简介 (Biography): 王跃峰 (1987 -), 男 (汉), 山东临清人, 硕士研究生, 研究方向: 水文水资源学。[Wang Yuefeng (1987 -), male (han), born in Linqing Shandong, graduate student, major in hydrology and water resource.] E-mail: wyf2046@163.com

\* 通信作者 (Corresponding author): 陈兴伟 (1963 -), 教授, 主要从事水资源与水环境研究。[Chen Xingwei (1963 -), professor, major in water resource and water environment.] E-mail: cxwchen215@163.com

文将基于 SPI 指数,分析闽江流域多时间尺度的干湿变化,并通过分析多时间尺度 SPI 的径流响应来探讨它在极端事件识别中的应用价值。

## 1 数据与方法

闽江发源于武夷山脉,流域面积约  $6.1 \times 10^4$   $\text{km}^2$ 。流域介于  $116^\circ 23' \sim 119^\circ 43' \text{E}$ ,  $25^\circ 23' \sim 28^\circ 19' \text{N}$ ,地处亚热带季风区,干湿季显著,四季降水差异较大,流域形状呈扇形,干支流交成格状水系,地势西北高东南低,主要有富屯溪、建溪和沙溪三大支流。本研究以闽江流域 25 个地面气象站点 1960—2006 年逐月降水资料以及下游的竹岐水文站月径流资料为基础(图 1)进行分析,面降雨量采用泰森多边形法计算。

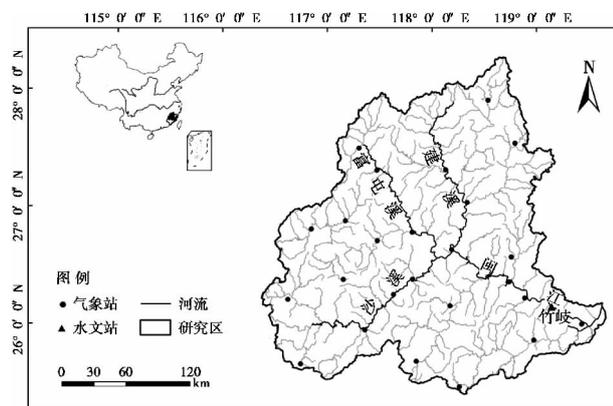


图 1 研究区位置及水文气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area with the distribution of hydrologic and meteorological stations

SPI 指数是由 Mc Kee 等<sup>[18]</sup>于 1993 年提出,早期主要用于美国科罗拉多州的干旱监测。鉴于其计算简便,且具有多时间尺度(如 2、6、12 和 24 个月,简称 SPI-2、SPI-6、SPI-12 和 SPI-24)特点,可对干湿变化过程进行定量化分析。目前,国内有关 SPI 分析的文献已经很多,计算过程详见文献<sup>[19]</sup>。干旱划分等级见表 1,其中  $\text{SPI} = -1.0$ 、 $\text{SPI} = 1.0$  分别为干湿临界值。本文主要基于 SPI-2、SPI-6、SPI-12 和 SPI-24 变化过程,分析了闽江流域不同时间尺度的干湿特征,并对多时间尺度 SPI 与径流标准化序列进行 Pearson 相关分析,同时探讨了 SPI 在极端事件识别中的应用价值。

表 1 SPI 干湿等级分类<sup>[18]</sup>

Table 1 Classification scales for SPI

SPI 值	干湿等级	SPI 值	干湿等级
$\text{SPI} \geq 2.0$	极湿	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	中干
$1.5 \leq \text{SPI} < 2.0$	重湿	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	重干
$1.0 \leq \text{SPI} < 1.5$	中湿	$\text{SPI} \leq -2.0$	极干
$-1.0 < \text{SPI} < 1.0$	正常		

## 2 结果分析

### 2.1 不同时间尺度下闽江流域干湿变化过程

图 2 为闽江流域 1960—2006 年 SPI-2、SPI-6、SPI-12、SPI-24 的变化过程。在短时间尺度上, SPI 值频繁地在 0 上下波动,表现为干湿期频繁交替出现,但随着时间尺度的增加,干湿期频率则有所降低,持续时间逐渐增长。从 SPI-2 可知,干旱期持续时间平均为 3.1 个月,湿润期为 2.9 个月,对于 SPI-6,干旱期平均持续时间分别为 4.6、4.9 个月, SPI-12 有所增加,分别为 7.6、7.2 个月,而 SPI-24 平均干旱期持续最长,分别为 10.9、10.3 个月,同时 SPI-24 清楚的检测出 3 次干旱期和 2 次湿润期。由此可见,随着时间尺度增长, SPI 对短期降水响应减缓,干湿变化趋于稳定,更能清楚地反映长期干湿变化特征。有研究<sup>[20]</sup>认为在分析降水干湿变化时,应更多关注其持续时间,因此长时间尺度 SPI 在分析干湿变化时更具实用性。

### 2.2 多时间尺度 SPI 与径流的相关性分析

竹岐水文站位于闽江下游,控制了 90% 的流域面积,将其月径流资料标准化后,进行多时间尺度 SPI 与径流的相关分析。图 3 为径流与多时间尺度(1~24 个月) SPI 的 Pearson 相关系数曲线。由图可知,相关系数均为正值,随着 SPI 时间尺度的增加,曲线先升高后降低,短、中时间尺度(1~6 个月)对应的相关系数较高,其中 2 和 23 个月尺度对应的 Pearson 系数为最大和最小( $R = 0.77$ ,  $0.35$ )。这说明闽江流域径流洪旱主要受近几个月累积降水的影响,而对较长时间尺度降水累积响应较弱,这与 Du 等<sup>[21]</sup>的研究结论一致。

图 4 为不同时间尺度 SPI 与径流标准化序列逐月的 Pearson 相关系数等值线图。由图可知,小于 12 个月尺度时,二者的相关系数基本超过 0.50,而超过 12 个月尺度时,二者相关性逐渐变弱。Pearson 系数高值区主要集中于短时间尺度(1~3 个月)相

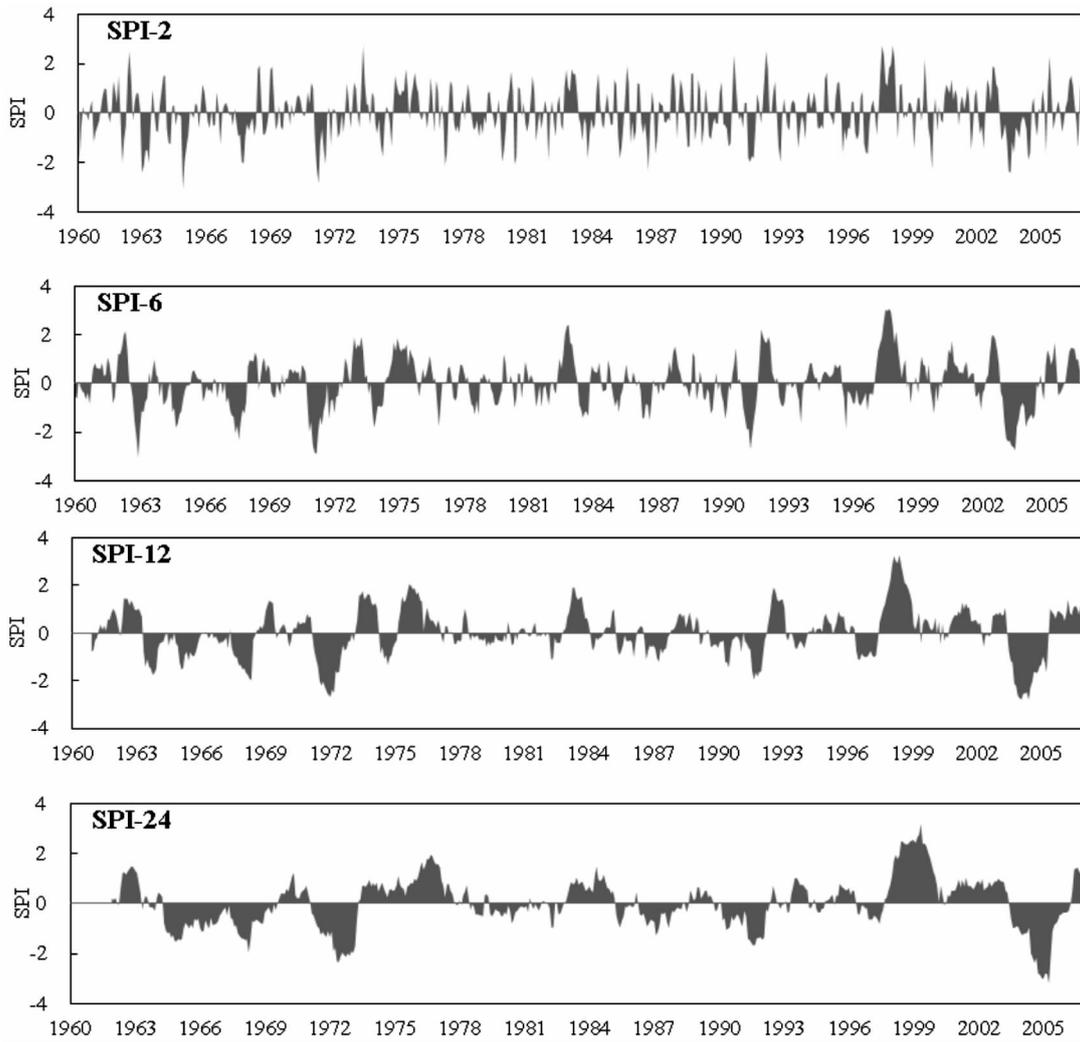


图2 1960—2006 年闽江流域不同时间尺度 SPI 变化过程

Fig.2 Evolution of the SPI at different time scales in Minjiang River basin during 1960—2006

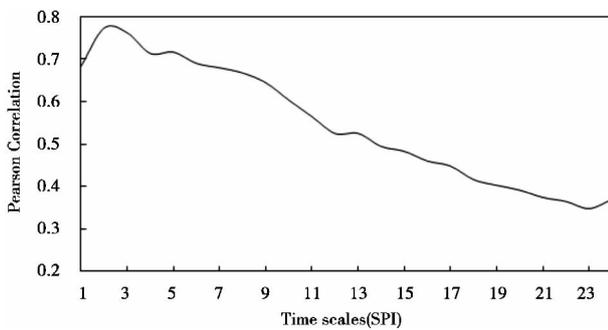


图3 闽江流域多时间尺度 SPI 与标准化径流序列的 Pearson 相关系数

Fig.3 Pearson correlation between standardized discharges and SPI at different time scales in Minjiang River basin

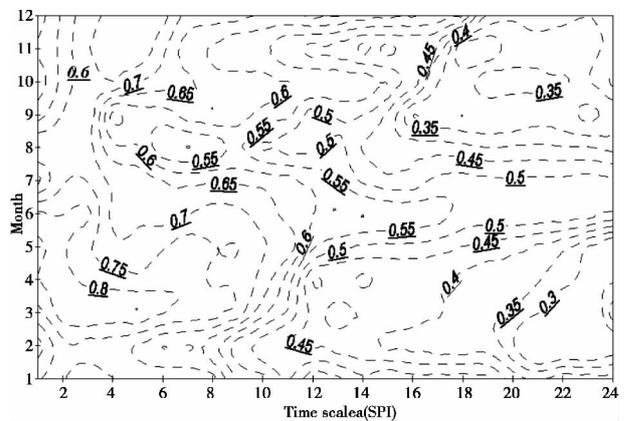


图4 闽江流域逐月径流与多时间尺度下逐月 SPI 的相关分析  
Fig.4 Correlation between the monthly discharges and monthly SPI at different time scales in Minjiang River basin

关程度最大值出现在 2 个月时间尺度的 4 月 ( $R = 0.85$ )。此外,图 5 还从季节尺度上揭示了径流与 SPI 的相关程度,在短时间尺度上,春、夏季(3~6

月)二者的相关系数较高,多数在 0.75 以上,而秋、

冬季节各月, 相关系数均基本在 0.70 以下。Vicente<sup>[11]</sup> 在分析地中海地区多时间尺度 SPI 径流响应时, 指出在短时间尺度(1~3 个月)上, 二者各月相关系数才会超过 0.5, 与本文超过 12 个月时间尺度的结论有差异, 造成这一差异的原因可能是研究区气候类型以及水文过程不同所致。

由上文可知, SPI-2 和径流标准化序列在 4 月相关性最强, 图 5 为 4 月二者变化过程, 可知变化一致性较好, 因此可通过 SPI-2 序列较好的揭示径流洪旱情况。

### 2.3 SPI 对洪旱水文极端事件的识别

上述研究表明, SPI-2 与径流序列相关性最强。从图 2 中 SPI-2 变化可知, 峰值大于 2.0 的年份有 1962、1968、1973、1990、1992、1998、1999、2005 年。表 2 为 SPI-2 序列识别的极端事件以及近 50 a 闽江流域洪水的实际观测<sup>[22]</sup>, 对比可知, 历史资料中最大的 5 次洪水事件均被 SPI-2 检测为极端事件, 对于最大的两场, 洪水发生当月的 SPI-2 值并非最大, 但洪水暴发前 3~4 个月 SPI-2 出现连续较大值; 接下来的 3 场, SPI-2 均在洪水发生当月出现最大值。除此之外, SPI-2 还把 1973、1990、1999 年检测为极端事件, 这与洪水历史记录有较大

差异, 如 1973 年 5 月洪峰流量仅为 14 700 m<sup>3</sup>/s, 1990 与 1999 年也与此类似。这表明 SPI-2 较好地识别了 5 次最大的洪水, 而对一般洪水事件的揭示有其不足, 因此 SPI-2 对于流域性特大洪水的预报有一定的参考价值。

对于干旱而言, 由 SPI-2 可知, 1963、1964、1971、1977、1980 等 10 个年份被识别为极端事件, 其中有 8 个年份与历史旱灾记录相一致(表 3)<sup>[22]</sup>。由表 3 可知, 近 50 a 福建省发生的严重旱灾(受灾面积 > 33 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>) 基本被 SPI-2 检测出, 1971、1977、1980 年的检测结果也与历史资料相一致。稍有不同的是, 历史资料表明 1964、1999 年未发生严重旱灾, 但这两年 12 月的 SPI 值均小于 -2.0, 表现为极端事件, 可能与当年冬季降水偏少有关。总体来看, SPI-2 可以识别出闽江流域近 50 a 发生的重大旱灾, 对可能旱情的出现也有一定的评估预报价值<sup>[23]</sup>。

鉴于 SPI 的计算仅仅是基于降水数据, 未考虑蒸发和气温等其他气候因素影响, 因此多因素共同作用下的闽江流域干湿变化及水文洪旱分析还有待于进一步研究。

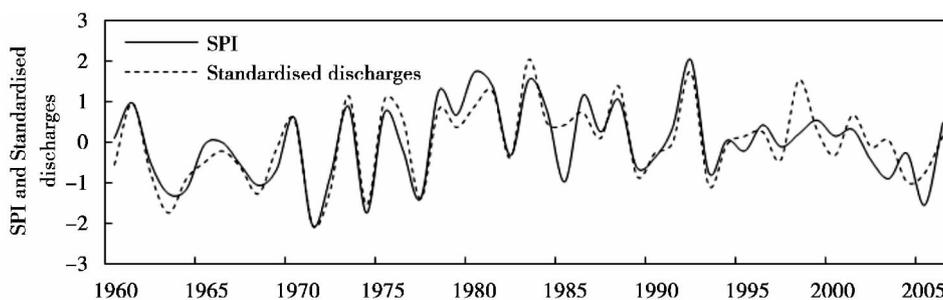


图 5 1960—2006 年闽江流域 4 月标准化径流指数与 SPI-2 变过过程

Fig. 5 Evolution of standardized discharges and SPI-2 in April in Minjiang River basin during 1960—2006

表 2 1960—2006 年闽江流域竹岐站洪水及 SPI-2 值统计<sup>[22]</sup>

Table 2 Flood events and SPI-2 values in Minjiang River basin during 1960—2006

洪号	洪峰流量 /(m <sup>3</sup> /s)	位次	洪水年 1~9 月 SPI-2 值统计								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
19980623	33 800	1	2.0	2.7	2.1	0.3	-1.0	1.1	1.2	-0.2	0.0
19920707	30 300	2	0.3	1.4	2.5	1.8	0.0	0.0	0.8	1.3	0.0
20050623	29 400	3	0.0	1.0	0.3	-1.6	1.1	2.3	0.8	-0.7	-0.3
19680619	29 400	4	-0.6	0.1	-0.2	-1.2	0.4	2.0	1.9	0.3	-0.9
19620629	27 000	5	-0.1	-2.0	-1.1	-0.5	1.5	2.5	1.3	-0.3	0.5
19730529	14 700	-	1.0	-0.1	-0.6	0.9	2.7	1.2	0.4	0.3	-0.5

表 3 1960—2006 年福建省旱灾及闽江流域 SPI-2 值统计

Table 3 Drought events in Fujian province and SPI-2 values in Minjiang River basin during 1960—2006

年份	农业受灾面积 ( $10^4 \text{ hm}^2$ )	旱灾年各月 SPI-2 值统计											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2003	>67	1.0	-0.2	-1.1	-0.9	-0.4	-1.1	-2.3	-2.4	-1.2	-1.6	-0.6	-0.7
1963	>33	-2.4	-2.2	-1.5	-1.5	-2.0	-0.4	1.0	0.0	-0.7	-0.8	0.3	0.9
1967		0.3	-0.1	0.0	-0.5	0.2	-0.4	-0.9	-0.9	-2.0	-2.0	-0.9	-0.4
1986		-0.1	-0.7	1.2	1.2	-0.4	-0.8	-0.4	-1.1	-2.3	-0.5	0.9	0.3
1991		-0.1	-0.6	0.4	0.4	-1.8	-2.0	-1.7	-1.8	-0.6	0.8	0.4	-0.4
1971	>20	1.0	-1.0	-2.2	-2.9	-1.3	-0.6	-1.5	-2.1	-0.1	0.2	-1.3	0.1
1977		0.4	-0.2	-2.1	-1.6	0.3	1.3	1.1	-0.4	-0.8	-0.5	-0.8	0.1
1980		-0.7	0.4	0.9	1.7	0.9	-2.1	-1.8	1.1	1.0	-0.2	0.4	-0.4

-492

### 3 结论

1. 随着 SPI 时间尺度增加,干湿期频率有所降低,持续时间逐渐增长,长时间尺度 SPI 在气候干湿变化分析上更具实用性。

2. 不同时间尺度 SPI 的径流响应研究表明,短时间尺度(1~3 个月)的 SPI 与径流存在高相关性,其中 2 个月时间尺度的 SPI 与径流的相关性最强,且二者的相关性存在一定的季节差异,在短时间尺度上表现为春、夏季的相关性( $R > 0.75$ )明显高于秋、冬季( $R < 0.7$ )。

3. 分析表明, SPI-2 能够识别出闽江流域近 50 a 发生的主要洪旱极端事件,且在流域特大洪水事件监测预估中具有潜在的应用价值。

#### 参考文献(References)

- [1] Patel N R, Chopra P, Dadhwal V. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index[J]. Meteorological Applications 2007, 14: 329-336
- [2] Ma Zhuguo, Fu Zongbin. The basic facts of northern China from 1951 to 2004 drought[J]. Chinese Science Bulletin 2006, 50(20): 2429-2439 [马柱国, 符凉斌. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报 2006, 50(20): 2429-2439]
- [3] Richard R, Hemi J. Translated by the Zhou Yuewu et al. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Arid Meteorology 2006, 24(1): 79-89 [Richard R, Hemi J. 周跃武等译. 美国 20 世纪干旱指数评述[J]. 干旱气象 2006, 24(1): 79-89]
- [4] Yoshia S, Satake T, Mackill D. High temperature stress in rice[J]. IRRI Research Series, 1981, 67: 1-15
- [5] Zhang Qiang, Li Jianfeng, Singh V P et al. SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China[J]. Nat. Hazards 2012, 64: 481
- [6] Palmer C W. Meteorological drought [R]. Department of Commerce Weather Bureau Research, 1965: 10-15
- [7] Ma Mingwei, Song Songbai. Study on spatial distribution of drought indices in the Weihe River basin[J]. Arid Zone Research 2012, 29(4): 681-691 [马明卫, 宋松柏. 渭河流域干旱指标空间分布研究[J]. 干旱区研究 2012, 29(4): 681-691]
- [8] Yuan Wenping, Zhou Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China[J]. Acta Phytocologica Sinica 2004, 28(4): 523-529 [袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529]
- [9] Simone R, Paulo B, Alessandro D, et al. Projection of occurrence of extreme dry-wet years and seasons in Europe with stationary and non-stationary standardized precipitation index[J]. Geophysical Research Abstracts 2013, 15: 3877-3977
- [10] Silva Y, Takahash K, Chavez R. Dry and wet rainy seasons in the Mantaro River basin (central Peruvian Andes) [J]. Advances in Geosciences 2007, 14: 1-4
- [11] Huang Wanhua, Yang Xiaoguang, Li Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2010, 26(7): 50-59 [黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. 农业工程学报 2010, 26(7): 50-59]
- [12] Vicente S M, Lopez J I. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences 2005, 9: 523-533
- [13] Vicente S M, Begueria S, Lopez J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate 2010, 23: 1696-1718
- [14] Zhang Xinzhang. Hydrologic characteristics analysis in Minjiang River basin [J]. Journal of Hydrology 2000, 20(6): 55-58 [张章

- 新. 闽江流域水文特性分析[J]. 水文 2000 20(6):55-58]
- [15] Zhang Xing ,Chen Hui ,Lin Xiufang. Changes of climatic features in the Minjiang River Basin in recent 45 years [J]. Research of Soil and Water Conservation 2009 ,16( 1) : 107 - 110 [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]
- [16] Chen Ying ,Chen Xingwei. Evolution of spatiotemporal characteristics of flood and drought in Fujian Province for recent 50 years: an SPI based analysis[J]. Journal of Natural Disasters 2011 20( 3) : 57 - 63 [陈莹. 陈兴伟. 福建省近 50 年旱涝时空特征演变——基于标准化降水指数分析[J]. 自然灾害学报 2011 20( 3) : 57 - 63]
- [17] Chen Ying ,Chen Xingwei ,Yin Yixing. Characteristics of runoff changes in the Minjiang River basin from 1960 to 2006 [J]. Journal of Natural Resources 2011 16( 8) : 135 - 145 [陈莹 陈兴伟 尹义星. 1960 ~ 2006 年闽江流域径流演变特征[J]. 自然资源学报 , 2011 16( 8) : 135 - 145]
- [18] McKee B T , Nolan J , Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [G] // The Eighth Conference on Applied Climatology , Anaheim California , 1993: 179 - 184
- [19] Che Shaojing , Li Chunqiang , Shen Shuanghe. Analysis of drought-flood spatial-temporal characteristics based on standardized precipitation index ( SPI) in Hebei Province during 1965 - 2005 [J]. Chinese Journal of Agro meteorology 2010 ,31( 1) : 137 - 143 [车少静 李春强 申双和. 基于 SPI 的近 41 年( 1965 ~ 2005) 河北省旱涝时空特征分析 [J]. 中国农业气象 , 2010 ,31( 1) : 137 - 143]
- [20] Wu Hong , Hayes M , Wilhite D A , et al. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation [J]. International Journal of Climatology 2005 25: 505 - 520
- [21] Du Juan , Fang Jian , Xu Wei , et al. Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province , China [J]. Stoch Environ Res Risk Assess 2013 27: 377 - 387
- [22] Lu Shijin , Wang Yan. The climate of Fujian [M]. Beijing: China Meteorological Press 2012: 439 - 440; 475 - 485 [鹿世瑾 王岩. 福建气象 [M]. 北京: 气象出版社 2012: 439 - 440 475 - 485]
- [23] Seiler R A , Hayes M , Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring [J]. International Journal of Climatology 2002 22( 22) : 1365 - 1376

## Based on Multiple Time Scales of SPI Dry/wet Conditions Variation and Identification of Flood and Drought Events in Minjiang River of Fujian

WANG Yuefeng<sup>1</sup> , CHEN Xingwei<sup>1 2 3</sup> , CHEN Ying<sup>1 2 3</sup>

( 1. College of geographical science Fujian Normal University , Fuzhou 350007 , China;

2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology , Fuzhou 350007 , China;

3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters , Fuzhou 350007 , China)

**Abstract:** Based on 25 meteorological monthly precipitation and discharges in Zhuqi Hydrological Station from 1960 to 2006 , the climate dry/wet changes and its hydrological response are analyzed through Standardized Precipitation Index and Pearson correlation coefficient in the Minjiang River basin of Fujian , China. The results are as following: Firstly , when analyzing the climate dry/wet changes , SPI at the longer time scales show greater utility and are able to reflect long period characteristics better. Secondly , there are high Pearson correlations between the SPI and discharges at shorter time scales ( 1 ~ 3 months) and the maximum correlation is found on the time scales of 2 months; what's more , there are important seasonal differences in the response of the river discharges to shorter time scales of SPI and the correlations of spring and summer (  $R > 0.75$  ) are found higher than that in fall and winter (  $R < 0.70$  ) . However , a valuable fact is found that SPI at 2 - month time scale can recognize the main flood and drought events and what's more , it has potential usefulness for basin flood monitoring and predicting.

**Key words:** Standardized Precipitation Index ( SPI) ; time scales; hydrological response; flood and drought; Minjiang River basin