

洗卓雁, 武传号, 黄国如. 基于 SPEI 的北江飞来峡流域干旱时空演变特征分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 198–203.  
[Xian Zhuoyan, Wu Chuanhao and Huang Guoru. Analysis on spatial and temporal characteristics of drought in the Feilaixia catchment of the Beijiang River based on SPEI [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 198–203.]

## 基于 SPEI 的北江飞来峡流域干旱 时空演变特征分析<sup>\*</sup>

洗卓雁<sup>1</sup>, 武传号<sup>1</sup>, 黄国如<sup>1, 2</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州, 510640)

**摘 要:** 气候变暖导致干旱事件频发, 利用 1969–2011 年北江飞来峡流域 24 个雨量站和 4 个气象站月降雨及气温数据, 计算标准化降水蒸散指数(SPEI), 采用 Mann-Kendall 趋势分析等方法分析了该地区多时间尺度的干旱时空变化特征。研究表明, SPEI 能较好地反映出流域内干湿变化特征。在过去的 43 年中, 流域内干旱事件频次总体上呈上升趋势, 且极端干旱事件有所增加, 从空间分布看, 流域上游和下游出口断面附近呈现出较为显著的干旱趋势, 随着时间尺度增加, 干旱趋势愈发显著, 趋势稳定性也有所增强。

**关键词:** 干旱; 标准化降水蒸散指数; 飞来峡流域; 时空特征; 趋势稳定性

**中图分类号:** X43; S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2015)03–0198–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2015.03.036

干旱是影响农作物生长、阻碍社会经济发展最严重的自然灾害之一, 水文气象变化、社会经济因素差异以及不同地区对水的需求不同, 使得干旱难以精准评定。干旱指数是评估干旱影响并区别不同干旱期的重要参数, 反映内容包括干旱强度、持续时间、严重程度及空间范围<sup>[1]</sup>。目前, 国内外干旱研究领域使用最为广泛的为帕默尔干旱指数 PDSI 和标准化降水指数 SPI。PDSI 由美国人 Palmer<sup>[2]</sup> 于 1965 年首次提出, 该指数基于土壤水平衡原理, 综合考虑前期降水和水分供需, 半个多世纪以来得到了广泛验证和进一步发展, 由于 PDSI 计算过程复杂且需要资料较多, 参数的空间区域性较强, 难以大范围推广使用<sup>[3]</sup>。SPI 由 McKee 等<sup>[4]</sup> 于 1993 年提出, 该指数紧扣降水量这个干旱主要影响因子, 不涉及具体的干旱机理, 其时空适应性较强, 多时间尺度特性可反映不同方面的水资源状况。但 SPI 忽略了蒸发对干旱的影响, 在全球变暖大背景下, SPI 局限性愈发不可忽略。

Vicente-Serrano 等<sup>[5]</sup> 以 SPI 为基础, 于 2010 年提出了标准化降水蒸散指数 SPEI, 以降水与蒸发的差值作为输入, 采用 log-logistic 概率分布函数来描述其变化, 再经正态标准化得到 SPEI 值。SPEI

考虑了地表蒸散发作用, 计算简单, 具有多时间尺度分析特性, 可用于干旱监测和识别。Vicente-Serrano 等<sup>[6]</sup> 基于 SPEI 建立了 1901–2006 年全球干旱趋势的数据集, 并分析了与 SPDI 监测结果的相关关系。López-Moreno 等<sup>[7]</sup> 研究西班牙埃布罗河流域不同时间尺度的 SPEI 的响应特征, 讨论了不同蓄水区与时间尺度的相关性。Potop 等<sup>[8]</sup> 计算 1901–2010 年间捷克共和国低洼地区的 SPEI 和 SPI, 发现两个指数对不同持续时间的干旱事件具有不同的敏感度。庄少伟等<sup>[9]</sup> 选取中国不同等级降水区的代表站点, 将累积水分亏缺量的经验概率分布与 log-logistic 概率分布进行对比, 分析 SPEI 在中国的适用性。李伟光等<sup>[10–11]</sup> 以 SPEI 为基础, 对全国范围和华南地区的干旱长期趋势和突变情况进行分析。

飞来峡流域地处北江中上游, 北江流域与西江汇合后流经佛山、广州、江门、珠海等城市, 为珠三角的经济发展和人民生活提供了重要保障, 流域内干旱将会干扰枢纽的发电、航运、生态等功能的正常发挥, 势必对下游珠江三角洲的经济社会发展造成一定的负面影响。在已有的研究成果中, 大多是针对整个广东省或华南地区进行研究, 或是以传统干旱指数为基础<sup>[12–14]</sup>。本

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014–11–07 修回日期: 2015–01–12

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301093, 201401048); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题项目(2014ZC09)

作者简介: 洗卓雁(1990–), 女, 广西桂平人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究. E-mail: 867325059@qq.com

通讯作者: 黄国如(1969–), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究. E-mail: huanggr@scut.edu.cn

文采用更加合理的 SPEI 作为干旱等级划分指标,综合描述北江飞来峡流域的干旱时空演变特征,为飞来峡流域的综合干旱监测、减少旱涝灾害损失提供参考依据。

## 1 研究区域及资料情况

飞来峡流域位于我国南方,是北江流域重要组成部分,北江是珠江流域第二大水系,是广东省最重要的河流之一。飞来峡流域的控制集雨面积为 34 097 km<sup>2</sup>,占北江流域面积的 73%。流域属于亚热带季风气候,夏季以东南风和偏南风为主,冬季则为北风和偏北风,年均降水量超过 1 700 mm,年内降水分布不均,主要集中在 4~9 月。多年平均气温约为 21 ℃,年内气温在 10~30 ℃ 之间变化,夏季最高温超过 30 ℃。

流域出口断面为飞来峡水利枢纽,该枢纽坐落在北江干流清远市飞来峡镇,以防洪为主,兼顾航运和发电。飞来峡流域对北江和广东省的社会、人文、环境意义重大,一旦发生持续恶劣的干旱事件,除了对流域内生产生活和生态环境具有不良影响外,对飞来峡水利枢纽的正常运作和下游珠江三角洲地区的社会经济发展也会造成一定影响。

本文以飞来峡流域为研究对象,研究资料主要包括流域内 24 个雨量站点的月降雨以及佛冈、连县、南雄和韶关等 4 个气象站点的月气温数据,时间序列长度均为 43 年(1969~2011 年),站点的位置分布如图 1 所示。

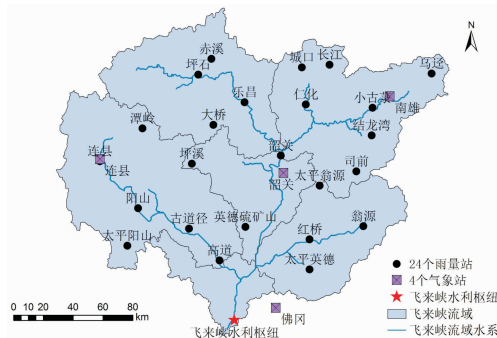


图 1 流域内雨量站点和气象站点分布

## 2 研究方法

### 2.1 标准化降水蒸散指数

根据研究区域 43 年数据资料计算不同时间尺度的 SPEI,尺度为 1、3、6、12 个月的计算结果分别用 SPEI1、SPEI3、SPEI6、SPEI12 表示,具体计算过程如下<sup>[5]</sup>。

(1)使用改进的 Thornthwaite 方法计算月潜在

蒸发量  $PE$ 。

$$PE = 16K\left(\frac{10T_i}{I}\right)^m, \quad (1)$$

式中: $T_i$  为月平均气温; $I$  为年热量指数; $m$  为与  $I$  相关的参数; $K$  为纬度和月份校正系数。

(2)建立不同时间尺度的累积水分亏缺量序列  $X_{i,j}^k$ ,时间尺度取  $k$  的情况下第  $i$  年的  $j$  月末  $X_{i,j}^k$  为前  $k-1$  个月与当月水分亏缺量之和,即:

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} (j < k), \quad (2)$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l} (j \geq k). \quad (3)$$

式中:当月水分亏缺量  $D = P - PE$ 。

(3)对  $X_{i,j}^k$  数据序列进行正态化处理,采用三参数的 log-logistic 概率密度函数拟合所建立的数据序列,累积概率分布函数如下:

$$F(x) = [1 + (\frac{\alpha}{x - \gamma})^\beta]^{-1}. \quad (4)$$

式中:参数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为尺度参数、形状参数和位置参数,采用线性矩法拟合得到。

(4)对  $X_{i,j}^k$  数据序列的概率分布  $F(x)$  进行标准化处理,获得相应的 SPEI。将累积概率密度标准化,即令  $P = 1 - F(x)$ 。

当  $P \leq 0.5$  时,  $W = \sqrt{-2\ln(P)}$ ,

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}. \quad (5)$$

式中: $c_0 = 2.515\ 517$ ,  $c_1 = 0.802\ 853$ ,  $c_2 = 0.010\ 328$ ,  $d_1 = 1.432\ 788$ ,  $d_2 = 0.189\ 269$ ,  $d_3 = 0.001\ 308$ 。

当  $P > 0.5$  时,  $W = \sqrt{-2\ln(1 - P)}$ , SPEI 取负值。

目前 SPEI 对于干旱程度的等级划分没有统一标准,综合比较了多种等级划分方法<sup>[13-16]</sup>,本文采用的 SPEI 干湿等级分类如表 1 所示。

### 2.2 趋势分析

Mann-Kendall 法为国内外学者广泛应用的非参数检验方法<sup>[17-19]</sup>,检验统计量  $|Z|$  值越大表示增加或减少的趋势越明显,如果  $|Z|$  大于或等于 1.64、1.96 和 2.57,分别表示序列通过了置信度为 90%、95% 和 99% 的显著性趋势检验。 $Z$  为正值表示趋向湿润,负值表示趋向干旱,且定义如下:  
①  $|Z| \leq 1.64$  为无明显趋势;  
②  $1.64 < |Z| \leq 1.96$  为微弱趋势;  
③  $1.96 < |Z| \leq 2.57$  为显著趋势;  
④  $|Z| > 2.57$  为非常显著趋势。

一般情况下,针对某一固定时间序列进行趋势检验,但可能由于所选序列时段不同导致趋势结果发生变化,难以判断时间序列真实变化趋势,为体现时段不同对序列趋势检测结果的影响,即判别序

列变化趋势是否稳定,本文计算极端指数趋势变化的稳定性<sup>[20]</sup>:

$$c = \frac{N_p}{M \times K} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $c$  为用于确定趋势稳定性的指标; $M$  为站点个数,本文针对单个站点进行稳定性分析,故  $M = 1$ ;  $K$  为全序列中滑动 30 个值的子序列总数,如全序列长度为 516,则  $K = 487$ ;  $N_p$  为通过置信度为 90% 的显著性检验的子序列个数。

本文对趋势稳定性的判别条件定义如下:①  $c \leq 25\%$  时,序列为不稳定趋势变化;②  $25\% < c \leq 65\%$  时,序列为稳定趋势变化;③  $c > 65\%$  时,序列为强稳定的趋势变化。

### 3 结果分析

#### 3.1 SPEI 多尺度序列分析

SPEI 时间尺度是前期影响时长的表达,尺度为 1、3、6、12 时,表示考虑前期影响期为 1 个月、3 个月、6 个月、12 个月。SPEI1 和 SPEI3 分别受每月和季节降水气温变化影响,前期累积影响时段较小,可反映短时段内土壤水分变化情况,在农业灌溉方面具有一定的优势;相对长尺度的 SPEI6 和 SPEI12 可反映下层土壤水、地下径流量和水库蓄水情况。时间尺度越大,受降水气温影响时间越长。在给定时间尺度上计算水分亏缺量累积概率,分析不同尺度 SPEI 值,可综合评价研究区域旱涝情况。对 24 个站点各时间尺度的 SPEI 进行算术平均计算,分析飞来峡流域整体干旱情况,结果见图 2。

从图 2 可以看出,短尺度下, SPEI1 和 SPEI3 对短期内降水和气温的变化反应较为敏感,波动性较大,充分反映出流域短期内干湿频繁交替特征。随着时间尺度增加, SPEI6 和 SPEI12 对降水和气温的响应减缓,变化波动性降低,能够很好地反映前期降水和气温变化对干湿程度的累积影响,体现出旱涝的长期变化特征。长尺度的 SPEI 值波动减少,主要是因为前期影响时长增加后,短时间内的降水气温变化不能彻底改变区域干湿程度。

据统计分析,1990 年代以来,华南地区进入干旱灾害频发期,2003 年降水量严重偏少,在此影响下 2004 年汛期少雨,旱情进一步严重,发生建国以来少有的干旱事件<sup>[21-22]</sup>。流域 SPEI 指数也有相应体现,2003-2004 年的 24 个 SPEI1 值中有 13 个为轻度干旱以上级别,除了 2003 年 7 月达到了严重干旱级别,2003 年 2 月和 2004 年 9 月达到中度干旱级别,其余的 10 个月均为轻度干旱级别。

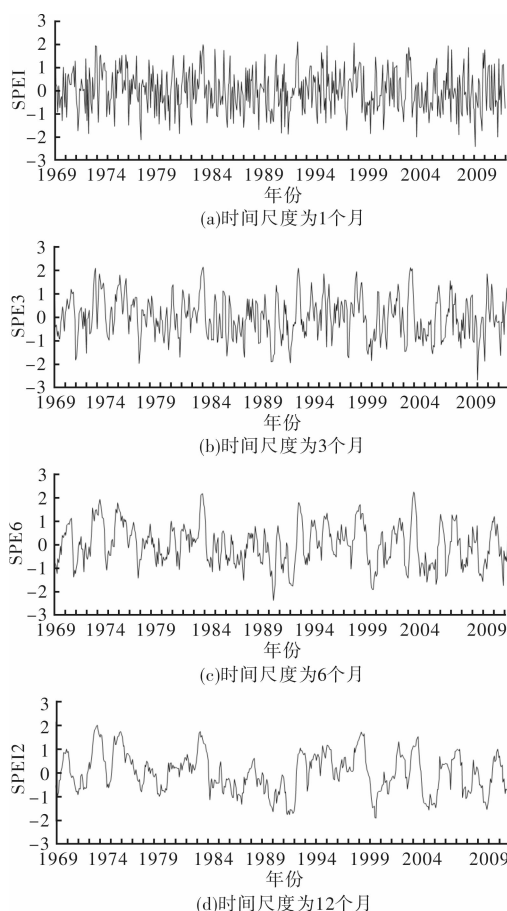


图2 1969-2011年间飞来峡流域内1、3、6和12个月时间尺度的SPEI动态特征

而 SPEI3 值则全为负值,其中有 16 个月达到轻度干旱以上级别,特大、严重、中度、轻度干旱的月份分别为 0 个、1 个、6 个、9 个,反映了该时段内全区域偏干的特征。SPEI6 显示 2003 年 1 月-2004 年 9 月受前期降水及气温影响,保持了一个较久的早期,2004 年 10 月开始转为正常偏湿润状态,轻度干旱以上级别的月份增加至 20 个,特大、严重、中度、轻度干旱的月份个数分别为 0 个、2 个、7 个、11 个。SPEI12 显示出稳定的干旱特征,多个月份达到了轻度干旱级别,其中特大、严重、中度、轻度干旱的月份个数分别为 0 个、1 个、13 个、3 个。以上分析表明,随着时间尺度增加,干旱程度有所提高,充分反映了前期水分亏缺的累积影响。

干旱形成主要是由于短时段内降水量减少、蒸发量增加而引起的土壤水分缺乏,或者长期的补给水分缺乏<sup>[23]</sup>。本文所采用的 SPEI 能够清楚地反映干湿变化不同方面的影响,多尺度综合应用可实现对飞来峡流域干旱的综合监测评价。

#### 3.2 干旱频次变化

为分析流域干旱事件在各年代的频次变化情况,取 1969-2011 年 43 年的 SPEI 值,根据表 1

表 1 SPEI 干旱等级分类

SPEI	$(-\infty, -2.0]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-0.5, +\infty)$
类型	特大干旱	严重干旱	中度干旱	轻度干旱	正常或湿润

表 2 飞来峡流域不同年代干旱事件频次

年份	时间 尺度/月	轻度干旱/%	中度干旱/%	严重干旱/%	特大干旱/%	累计频次 /%
1969 – 1980	1	12.50	10.07	5.06	1.39	29.02
1981 – 1990		16.81	12.36	5.24	0.80	35.21
1991 – 2000		15.03	10.00	5.21	1.08	31.32
2001 – 2011		18.75	12.03	4.26	2.53	37.57
1969 – 1980	3	13.40	7.67	3.07	1.22	25.36
1981 – 1990		17.33	10.35	6.56	1.98	36.22
1991 – 2000		13.89	9.69	6.08	1.88	31.54
2001 – 2011		16.82	12.53	5.97	1.36	36.68
1969 – 1980	6	13.39	7.97	3.10	0.23	24.69
1981 – 1990		15.90	10.59	5.17	2.08	33.74
1991 – 2000		12.01	9.24	6.35	2.60	30.20
2001 – 2011		17.39	13.76	7.20	1.07	39.42
1969 – 1980	12	13.41	7.26	2.00	0.06	22.73
1981 – 1990		18.68	12.78	4.97	1.04	37.47
1991 – 2000		9.97	8.92	7.29	3.47	29.65
2001 – 2011		16.64	13.10	6.69	1.20	37.63

统计不同年代间飞来峡流域的干旱事件发生频次，如表 2 所示。

飞来峡流域 4 个时间尺度的 SPEI 均显示 21 世纪初的干旱事件频次最多，其次为 1980 年代。年代干旱累计频次在 22% ~ 40% 范围内波动上升，增加幅度较大，长时间尺度的增幅更大。影响累计频次增加的主要因子随着时间尺度增加，由轻度干旱向严重干旱发展，1 个月尺度的累计频次变化主要是轻度干旱频次变化，3 个月尺度的主要是中度干旱和轻度干旱的变化，6 个月和 12 个月尺度的主要是中度干旱和严重干旱的变化。

特大干旱往往给农业生产和社会生活造成巨大影响，定义轻度干旱以上为干旱事件，统计特大干旱占有干旱事件的比例变化情况，如表 3 所示。

表 3 1969 – 2011 年特大干旱占干旱事件比例变化

时间尺度	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月
均值/%	3.99	3.91	2.75	2.09
M – K 趋势	1.18	-0.72	1.82	1.94

由表 3 可以看出，4 个尺度的特大干旱比例不超过 4%，1 个月和 3 个月尺度的特旱比例趋势变化不显著，6 个月和 12 个月尺度特旱比例的 M – K 趋势检验值通过了置信度为 90% 的显著性检验，增加趋势显著，也就是说飞来峡流域特大干旱所

占比例显著增加。

3.3 趋势变化空间分布

分析 SPEI 趋势变化对于揭示飞来峡流域内干湿变化情况具有重要参考价值，本文基于 M – K 趋势分析法，计算了 43 年来 24 个站点的 SPEI1、SPEI3、SPEI6、SPEI12 的趋势变化特征，不同尺度的 SPEI 趋势变化的空间分布情况如图 3 所示。

M – K 检验结果显示整个飞来峡流域的 SPEI1 整体上呈由东北向西南递减且无湿润趋势，流域下游多个站点呈现显著下降趋势，靠近流域出口断面的高道和红桥雨量站的 SPEI1 通过了置信度为 99% 的显著性检验，呈现非常显著的干旱趋势，也就是说飞来峡下游土壤含水量显著减少。

SPEI3 的趋势变化与 SPEI1 类似，24 个站点均无上升趋势，流域中部地区无明显变化，上游和下游多个站点的 SPEI3 显示出不同程度的下降趋势，其中下游靠近流域出口断面的站点表现出较为显著的干旱趋势，由此可以看出受前期降水气温变化影响，流域上游和下游季尺度的干旱程度有所增加。

随着时间尺度增加，飞来峡流域整体上显示出更加明显稳定的趋势。SPEI6 在流域上部 and 出口断面附近表现出不同程度的下降趋势，它主要反映深层土壤水和地下径流的干湿状况，其空间趋势变化特征体现出流域内受补给不足的影响，上

游和出口断面的干旱加剧。

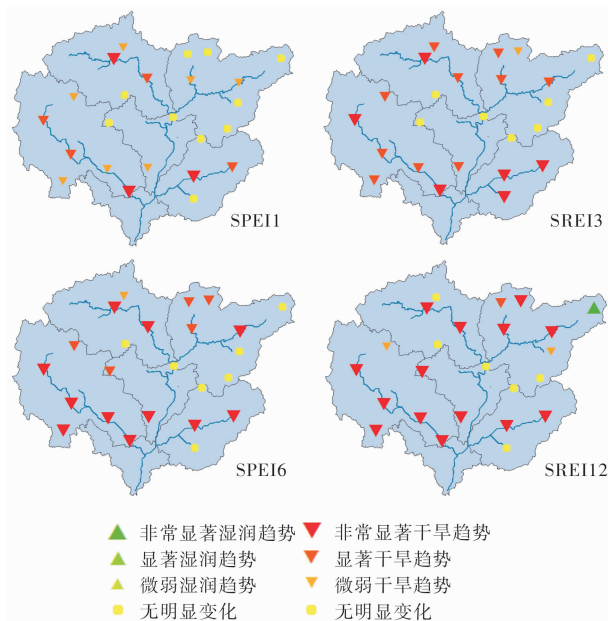


图3 飞来峡流域不同尺度 SPEI 指数的变化趋势空间分布图

较之小尺度的 SPEI 值, SPEI12 在上游与出口断面区域的下降趋势更显著, 包括乐昌、红桥在内的 14 个站点的下降趋势通过了置信度水平为 99% 的显著性检验, 这说明在长时间尺度上流域上游和下游干旱程度增加趋势非常显著, 这对飞来峡水利枢纽的水库蓄水及周边生态环境产生一定的负面影响。

### 3.4 趋势稳定性分析

变化趋势稳定即波动性较小, 在短期内干湿变化不大。根据定义对 4 个尺度的 SPEI 进行稳定等级划分, 其空间分布如图 4 所示。

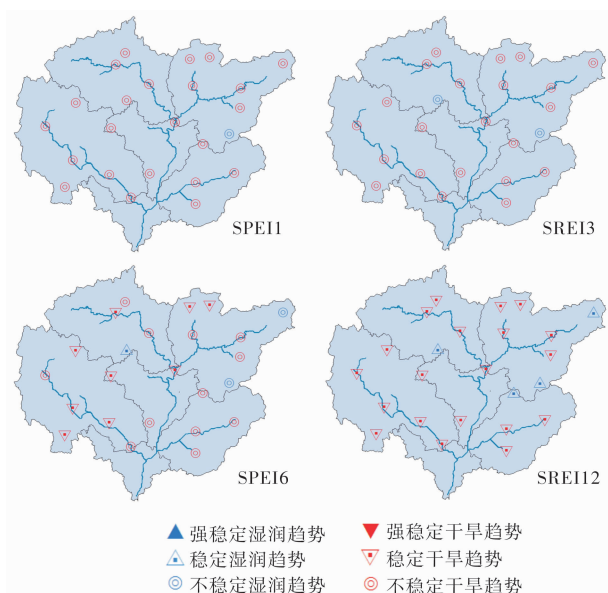


图4 飞来峡流域不同尺度 SPEI 指数的趋势稳定性空间分布图

由图 4 可以看出, SPEI1 和 SPEI3 反映流域内土壤含水量变化趋势的稳定性不佳, 在月尺度和季尺度上出现较大波动, 同时流域上下游的稳定性没有明显差别, 空间分布较为均匀。SPEI6 显示地下径流的干湿趋势稳定性存在空间差异, 呈现出由东南向西北稳定性递增的分布特征。受前期水分亏缺影响, SPEI12 显示全流域 24 个站点均表现出稳定的干湿趋势, 也就是说水库蓄水趋势变化较为稳定。总的来说, 随着时间尺度增加, 飞来峡流域干湿变化趋势稳定性有所增加, 但没有出现强稳定的变化情况。

## 4 结论

本文利用飞来峡流域内 1969–2011 年 24 个雨量站的逐月降水量和 4 个气象站的月平均气温, 应用标准化降水蒸散指数 (SPEI), 综合分析了飞来峡流域干旱时空演变特征, 得出以下结论。

(1) SPEI 能较好地表征流域内的干旱变化特征, 短时间尺度的 SPEI 对短期内干湿变化反应灵敏, 长时间尺度的 SPEI 反映前期累积影响, 可体现旱涝的长期变化特征。

(2) 在时间上, 飞来峡流域的干旱事件频次波动上升, 长时间尺度干旱事件增加更快, 以中度和严重干旱事件的增加为主, 随着全球气温的持续升高, 特大干旱事件所占比例总体上显著增加, 说明流域内干旱问题突出。

(3) 在空间上, 流域呈现上游和出口断面附近趋向干旱的特征, 流域中部地区无明显的干湿趋势变化, 长时间尺度的干旱趋势非常显著; 短时间尺度的干湿变化趋势稳定性不佳, 随着时间尺度增加, 稳定程度有所增加, 但未出现强稳定情况。

## 参考文献:

- [1] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391: 202–216.
- [2] Palmer W C. Meteorological drought[R]. US: Weather Bureau, 1965.
- [3] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index[J]. Journal of The American Water Resources Association, 1998, 34(1): 113–121.
- [4] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, American meteorological society, 1993: 179–184.
- [5] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized



- precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010(23): 1696–1718.
- [6] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index [J]. *Notes and Correspondence*, 2011(11): 1033–1043.
- [7] López-Moreno J I, Vicente-Serrano S M, Zabalza J, et al. Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2013(477): 175–188.
- [8] Potop V, Mozy M, Soukup J. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012(156): 121–133.
- [9] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(5): 617–625.
- [10] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 643–649.
- [11] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(4): 84–90.
- [12] 郭晶. 广东省干旱动态监测及其影响定量评估研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [13] 陈子燊, 黄强, 刘曾美. 1962–2007 年广东干湿时空变化特征分析 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 469–476.
- [14] 刘占明, 陈子燊, 黄强, 等. 7 种干旱评估指标在广东北江流域应用中的对比分析 [J]. *资源科学*, 2013, 35(5): 1007–1015.
- [15] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961–2012 年干旱变化特征分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 192–198.
- [16] 王劲廷. 湿润指数在我国江淮流域的适应性评估 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [17] 郑杰元, 黄国如, 王质军, 等. 广州市近年降雨时空变化规律分析 [J]. *水电能源科学*, 2011, 29(3): 5–8.
- [18] 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析 [J]. *资源科学*, 2009, 31(3): 501–508.
- [19] Wang L N, Shao Q X, Chen X H, et al. Flood changes during the past 50 years in Wujiang River, South China [J]. *Hydrological Processes*, 2012(26): 3561–3569.
- [20] Lupikasza E. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951–2006 [J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 30(7): 991–1007.
- [21] 李晓娟, 曾沁, 梁健, 等. 华南地区干旱气候预测研究 [J]. *气象科技*, 2007, 35(1): 26–30.
- [22] 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 58a 演变特征 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 50–59.
- [23] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 178–182.

## Analysis on Spatial and Temporal Characteristics of Drought in the Feilaixia Catchment of Beijiang River Based on SPEI

Xian Zhuoyan<sup>1</sup>, Wu Chuanhao<sup>1</sup> and Huang Guoru<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Drought events occurred frequently because of climate warming. Based on monthly precipitation and temperature data from 28 stations (24 rainfall stations and 4 meteorological stations) during the period 1969–2011 in the Feilaixia catchment of the Beijiang River basin, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) is calculated. The multi-scale spatial and temporal characteristics of drought are analyzed using the Mann-Kendall trend test method. The results show that the SPEI is a suitable index to describe the variation of wet and dry spells. Overall, the frequency of drought and the proportion of severe drought show increasing trends in the study area. A significant trend of drought is found in the upstream area and downstream area near the outlet. Furthermore, the trends of drought become more significant and more stable with the increase of time scales.

**Key words:** drought; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); Feilaixia catchment; spatial and temporal characteristics; stability of trends