

1960—2019 年西南岩溶区旱涝时空演变特征

靖娟利^{1,2}, 徐勇¹, 王永锋^{1,2}, 窦世卿¹, 殷敏^{1,2}

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对西南岩溶区旱涝灾害频繁发生的现象, 基于 1960—2019 年 68 个气象站点逐月降水观测资料, 计算多个时间尺度的标准化降水指数 (SPI), 并采用 ANUSPLIN 气象插值方法、Sen-Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数, 研究了近 60 年西南岩溶区旱涝时空演变特征。结果表明: (1) 不同时间尺度的 SPI 反映的旱涝等级及频率具有一定差异性, 旱涝等级以轻—中等为主; (2) 年尺度 SPI 呈不显著下降趋势, 整体呈现出由雨涝向干旱变化的趋势; 春、秋两季 SPI 呈不显著下降趋势 ($p > 0.05$), 夏、冬两季 SPI 呈不显著上升趋势 ($p > 0.05$); (3) 年尺度 SPI 以下降趋势为主, 集中分布在云南、贵州、重庆和湖北等地区; 季节 SPI 空间变化趋势具有一定差异性, 春、夏、秋三季 SPI 以下降趋势为主, 冬季 SPI 以上升趋势为主, 但绝大部分区域变化趋势不显著 ($p > 0.05$); (4) SPI 呈持续上升的区域占 39.76%, 集中分布在四川、云南、广东、广西等地区; 呈持续下降的区域占 50.33%, 主要分布在云南、贵州和重庆。研究结果可以为区域旱涝预警、制定减灾应对策略等方面提供依据。

关键词: SPI; 西南岩溶区; 趋势分析; Mann-Kendall 检验; Hurst 指数

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0179-08

Spatiotemporal Variation Characteristics of Drought and Flood in the Southwest Karst Area from 1960 to 2019

JING Juanli^{1,2}, XU Yong¹, WANG Yongfeng^{1,2}, DOU Shiqing¹, YIN Min^{1,2}

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: In view of frequent occurrence of drought and flood in southwest karst area, the multiscale Standard Precipitation Index (SPI) was calculated based on monthly precipitation data derived from sixty-eight meteorological stations from 1960 to 2019. The spatial and temporal variation of SPI from 1960—2019 were quantitatively analyzed by using ANUSPLIN meteorological interpolation method, Sen-Median method, Mann-Kendall test, and Hurst index. Results showed that: (1) there were some differences of drought and flood levels and frequencies among SPI at different time scales, and the levels of drought and flood were mainly dominated by light and medium; (2) the annual SPI showed an insignificant declining trend and had a changing trend from waterlogging to drought; the changing trend of seasonal SPI had some differences, SPI had an insignificant decrease trend in spring and autumn ($p > 0.05$), but an insignificant increasing trend in summer and winter was observed ($p > 0.05$); (3) the annual SPI presented a downward trend, spatially concentrated in Yunnan, Guizhou, Chongqing, Hubei and other regions; the spatial variation of seasonal SPI exhibited certain difference; SPI mainly showed a downward trend in spring, summer and autumn, while an upward trend was found in winter; however, the trends of most regions were not significant ($p > 0.05$); (4) SPI with a continuous increasing accounted for 39.76% at the study area, mainly concentrated in Sichuan, Yunnan, Guangdong, Guangxi, whereas SPI with a continuous decreasing accounted for 50.33%, mainly distributed in Yunnan, Guizhou and Chongqing. The results of this study can provide the basis for regional drought and flood warning and disaster mitigation strategies making.

Keywords: SPI; southwest karst area; trend analysis; Mann-Kendall test; Hurst index

收稿日期: 2020-08-29

修回日期: 2020-11-09

资助项目: 广西八桂学者专项项目; 国家自然科学基金项目 (42061059); 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室资助项目 (16-380-25-08)

第一作者: 靖娟利 (1977—), 女, 陕西长安人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为遥感与 GIS 应用。E-mail: jjgut2008@163.com

干旱是目前全球最严重的自然灾害之一,对区域社会经济及环境产生重大影响。随着全球气候的持续变暖,干旱等极端气候事件发生频率和强度呈显著增加趋势^[1]。据统计全球每年因干旱造成的经济损失可以达到 60~80 亿美元^[2],远超其他自然灾害。中国也是干旱灾害频繁发生的国家,近 30 a 呈现出由西北向东南扩散的趋势^[3]。研究旱涝灾害的时空分布特征,对抗干旱及防洪具有重要意义。

西南岩溶区生态环境极其脆弱,属于全球 3 大连续片岩溶发育区之一^[4],是黄河、长江和珠江的源头,提供约 46% 的中国水资源。由于其特殊的地质生态环境,形成了地表地下双层水文网的特殊岩溶水文地质现象,旱涝灾害频繁发生。2003 年夏季发生了百年一遇的高温伏旱、2 008 秋冬至 2 009 春季的秋冬连旱、2 009 秋季至 2010 年初的秋冬春连旱、2011 年又成为洪涝的重灾区,给生态环境、社会经济造成巨大损失^[5]。因此,研究西南岩溶区旱涝的时空演化特征及其持续性具有重要意义。

由于西南岩溶区特殊的气候、地形地貌、地质环境等特征,其旱涝问题受到国内学者的广泛关注。我国学者针对西南地区的旱涝灾害的成因^[5-6]、时空演变特征^[7-11]、及干旱的持续性等^[12-13]方面做了大量的研究工作。但大多研究主要集中在四川、重庆、云南、贵州、广西 5 个省(市、自治区),以西南岩溶区为整体,从多个时间尺度分析旱涝时空变化特征及其持续性的研究尚不多见。

干旱指数是研究干旱情形的重要参数,目前基于气象站点的干旱指数主要有 Palmer 指数、相对湿润指数、降水距平百分率、标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸发指数(Standard precipitation evaporation index, SPEI)。其中应用最为成熟的是 SPI,该指数主要反映气象干旱,计算过程简便,具有多时间尺度特征,相关研究已证明其在干旱监测中的优越性^[10]。因此,本文基于西南岩溶区 1960—2019 年的气象资料,运用 SPI 作为干旱指标,结合 ANUSPLIN 插值法、Sen-Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数,研究近 60 a 西南岩溶区年际及季节旱涝时空演化特征,为该区域的水资源合理利用和旱涝监测工作提供参考资料。

1 研究区概况

研究区位于东经 97°22′—117°11′,北纬 20°14′—34°19′,行政区包括贵州、云南、广西、湖南、湖北、重庆、四川、广东 8 省(区),是我国岩溶地貌分布最为集中的地区(图 1)。岩溶分布面积按碳酸盐岩分布面

积统计为 114 万 km²,按碳酸盐岩地层出露面积计为 76 万 km²^[14]。西南岩溶区属于热带、亚热带季风气候区,气候温暖湿润、雨热同期,降水量季节和区域差异明显,多年平均气温和降水量大致都是由东南向西北递减。研究区内碳酸盐岩大面积出露,岩溶作用强烈,土壤瘠薄,水土流失严重。区域内水资源丰富,河流纵横,峡谷广布,地表地下具有双层水文地质结构。岩溶地貌类型复杂多样,主要分布峰丛洼地、峰林平原、断陷盆地、岩溶峡谷、岩溶槽谷、溶丘、中高山岩溶等。生态环境脆弱,人口—资源—环境矛盾突出,属于全球变化的敏感地带。



图 1 研究区地理位置和气象站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

收集西南 8 省(区)174 个气象站点逐月降水观测资料,数据资料跨度为 1960—2019 年,其中西南岩溶区气象站点 68 个,数据资料来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),气象站点空间分布见图 1。为了保证数据的完整性、一致性,数据处理过程中对极少部分缺测数据采用线性插补方法进行插补。研究区 90 m 空间分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),为了后续数据分析,将 DEM 数据重采样为 1 km。可溶岩分布数据来源于中国地质科学院岩溶地质研究所编制的 1:400 万中国可溶岩类型图。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数 本文采用标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 来刻画西南岩溶区旱涝状况。SPI 最早由 McKee 等^[15]提出,是在计算出某时段内降水量的 Γ 分布概率后,再进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布来

划分干旱等级,详细计算过程参考文献[16]。

SPI 具有多时间尺度特征,可用于不同时间尺度和地区旱涝特征的对比分析。本研究主要分析 1,3,6,12 个月和季节尺度 SPI 的旱涝演变特征。其中,春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12—2 月。根据国家气象局制定的《气象干旱等级 GB/T20481—2006》中的分级标准对旱涝等级进行划分(表 1)。

表 1 SPI 旱涝等级划分

旱涝等级	SPI
极涝	$SPI \geq 2.0$
重涝	$1.5 \leq SPI < 2.0$
中涝	$1.0 \leq SPI < 1.5$
轻涝	$0.5 \leq SPI < 1.0$
正常	$-0.5 < SPI < 0.5$
轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
极旱	$SPI \leq -2.0$

2.2.2 ANUSPLIN 插值法 ANUSPLIN 是澳大利亚科学家 Hutchinson 基于薄盘样条理论编写的针对气象数据曲面拟合的专用插值软件^[17],该软件可以引入多个影响因子进行气象要素空间插值,适用于长时间序列的气象数据插值^[18],已在不同区域的气象插值中得到广泛应用^[19-21]。因此,本文选用 ANUSPLIN 对 1960—2019 年的年际及季节 SPI 序列数据进行插值,样条次数为 2,协变量为经度、纬度和高程,插值数据空间分辨率为 1 km。

2.2.3 趋势分析方法 Sen-Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验方法相结合,被广泛应用于气候变化和水文分析序列研究中,已成为长时间序列数据趋势分析的重要方法。两种方法用于 SPI 时间序列分析中,可以解释 SPI 长期变化趋势的显著性,详细计算方法参考文献^[22-23]。当 Sen-Median 趋势度 $\beta > 0$ 时,表示时间序列呈上升趋势,反之呈下降趋势,变化趋势的显著性用 Mann-Kendall 方法进行检验。对检验统计量 Z ,在给定 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,表示研究序列在 α 水平上存在显著变化。本文判断 $\alpha = 0.05$ 置信水平上 SPI 时间序列变化趋势的显著性。

2.2.4 Hurst 指数 Hurst 指数是定量描述时间序列信息长程依赖性的有效方法。基于重标极差分析法(Rescaled Range Analysis Method, R/S)的 Hurst 指数最早由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水文问题时提出,后 Mandelbrot 在理论上对该方法进行了补充和完善。具体计算原理参考文献^[24-25]。

Hurst 指数 H 取值范围为 $0 < H < 1$,当 $H = 0.5$ 时,表明序列是完全随机序列,不具有持续性,对过去的趋势没有依赖性; $H > 0.5$ 时,意味着未来的变化情况与过去一致,即持续性, H 越接近 1,持续性越强;而 $0 < H < 0.5$ 时,意味着未来的变化情况与过去相反,即反持续性, H 越接近 0,反持续性越强。

3 结果与分析

3.1 SPI 时间变化特征

3.1.1 不同尺度 SPI 变化特征 基于 1960—2019 年的气象观测数据,计算得到西南岩溶区不同时间尺度 SPI 序列值(图 2)。从图 2 可以看出,不同时间尺度 SPI 值随时间变化的敏感性存在显著差异,时间尺度越小,波动幅度越大。

1 个月尺度的 SPI_1 值在 0 上下频繁波动,表明受短期降水影响较大,旱涝交替比较频繁,并且以 1 a 为周期表现出周期变化的特点。这主要是因为 SPI_1 值在计算过程中没有考虑前期降水的影响,各月降水随机性比较强,因而时间持续性较弱。研究时段内,1963 年 1 月为最早月份, SPI_1 值为 -1.65 ,达到重旱等级;2015 年 12 月为最涝月份, SPI_1 值为 1.32 ,达到中涝等级。统计结果表明,1960—2019 年 1 个月尺度的旱涝事件发生的频次为:重旱 1 次、中旱 14 次、轻旱 300 次、正常 490 次、轻涝 306 次、中涝 39 次,旱涝月份占研究总时长的 31.94%;其中,中旱主要发生在秋季,轻旱在四季发生的次数差异不大,轻涝在冬季发生的次数稍多于其他 3 个季节,中涝主要发生在冬季和秋季。

3 个月尺度的 SPI_3 能够反映季节尺度的水分盈亏情况,可以较好地反映短期农业旱涝特征。从图 2 可以看出, SPI_3 的波动特点与 SPI_1 相似,但波动频率较小。在研究时段内,2011 年 9 月为最早月, SPI_3 值为 -1.51 ,达到重旱等级。统计结果表明,1960—2019 年季节尺度的旱涝事件发生的频次为:重旱 1 次、中旱 17 次、轻旱 94 次、正常 509 次、轻涝 84 次、中涝 13 次,旱涝月份占研究总时长的 29.11%;其中,中旱、轻旱和轻涝在四季均有发生,中旱在春季发生频率最高、夏季最少,轻旱在冬季和春季发生频率高、在夏季发生频率较低,轻涝在春季发生频率最高、在夏季最低,中涝主要发生在冬季和春季。

SPI_6 能够反映半年尺度的旱涝情况,旱涝变化未表现出明显的周期性特点。研究时段内,2011 年 8 月为最早月, SPI_6 值为 -1.57 ,达到重旱等级,2016 年 4 月为最涝月, SPI_6 值为 1.41 ,达到中涝等级。此外,出现重旱的年份还有 2011 年 9 月、2010 年 2 月。

统计结果表明,1960—2019 年半年尺度的旱涝事件发生的频次为:重旱 3 次、中旱 16 次、轻旱 65 次、正常 555 次、轻涝 68 次、中涝 8 次,旱涝月份占研究总时长的 22.38%;其中,重旱在夏、秋和冬季各 1 次,轻旱在春季发生的频率高于其他季节,轻涝在春、夏两季发生的频率略高于秋、冬两季,中涝集中发生在春季和冬季。

SPI₁₂代表了长时间内的水分盈亏情况,可以很好地反映降水量对于土壤墒情和地下水量变化的影响,能反映年尺度旱涝变化特点。从图 2 可以看出,2011 年 12 月是最早月份,SPI₁₂ 值为-1.51,达到重旱等级;2016 年 7 月为最涝月,SPI₁₂ 值为 1.20,达到中涝等级。连续时间大于等于 5 个月的旱涝事件主要为:1963 年 1—12 月(中旱—轻旱—中旱—轻旱),

1968 年 7 月—1969 年 3 月(轻涝),1973 年 7 月—1974 年 3 月(轻涝),1983 年 7—12 月(轻涝),1988 年 11 月—1989 年 3 月(轻旱),1992 年 11 月—1993 年 6 月(轻旱),1998 年 6—11 月(轻涝),2002 年 12 月—2003 年 4 月(轻涝),2003 年 12 月—2004 年 4 月(轻旱),2009 年 9 月—2010 年 8 月(轻旱—中旱—轻旱),2011 年 7 月—2012 年 6 月(中旱—重旱—中旱—轻旱),2015 年 12 月—2016 年 12 月(轻涝—中涝—轻涝—中涝—轻涝)。统计结果表明,1960—2019 年年尺度的旱涝事件发生的频次为:重旱 1 次、中旱 20 次、轻旱 65 次、正常 554 次、轻涝 65 次、中涝 4 次,旱涝月份占研究总时长的 21.86%;其中,中旱、轻旱四季发生频率基本相同,轻涝在冬秋两季发生频率略高于春夏两季,中涝集中发生在春、夏、秋三季。

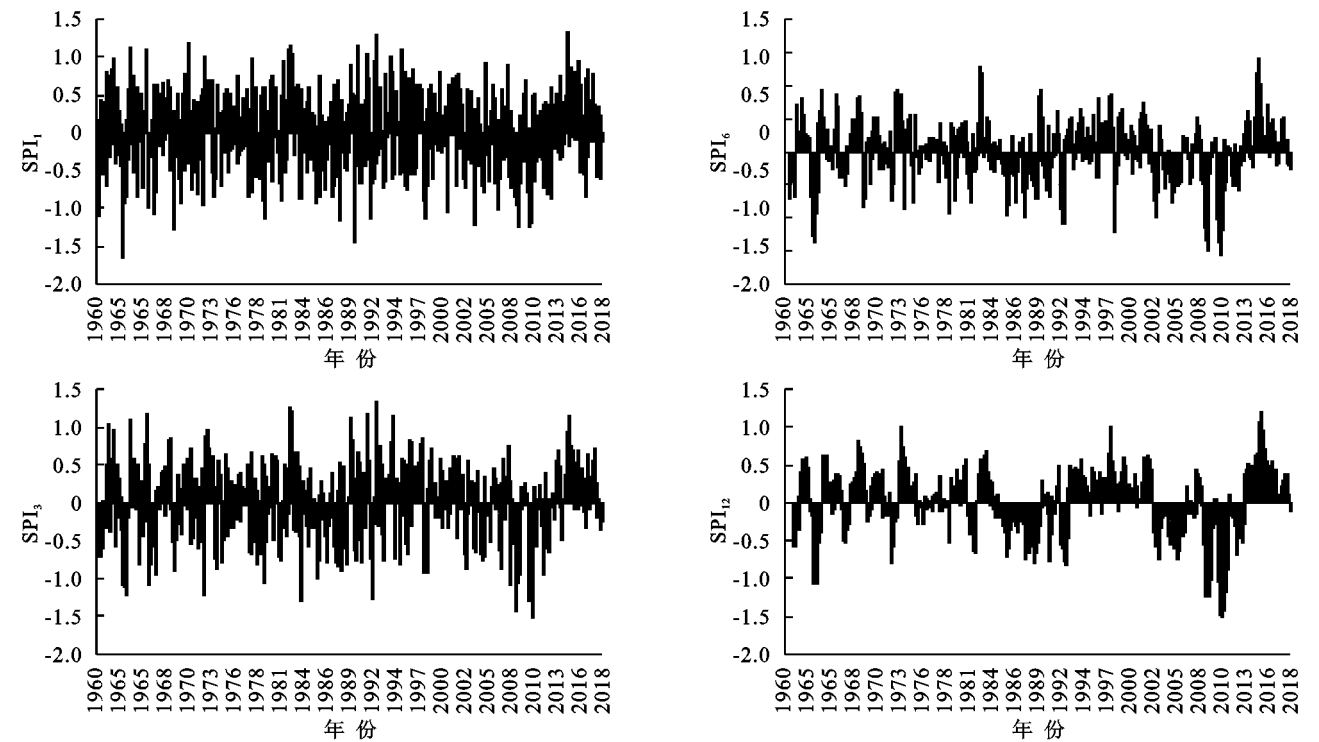


图 2 SPI₁,SPI₃,SPI₆ 和 SPI₁₂时间变化特征

3.1.2 SPI 年际变化特征 从图 3 可以看出,1960—2019 年西南岩溶区年际 SPI 值波动频繁,呈不显著下降趋势,线性倾向率为-0.016/10 a,说明 60 a 来研究区干旱程度呈不显著增加趋势。对年际 SPI 曲线进行 5 a 滑动平均,可以看出明显的阶段特征,1989 年、2002 年和 2013 年 SPI 出现明显的转折,表现出下降—上升—下降—上升的趋势。研究时段内,旱涝事件发生的频次为:重旱 1 次、中旱 1 次、轻旱 5 次、正常 46 次、轻涝 7 次;其中,重旱和中旱分别发生在 2011 年和 2009 年,SPI 值分别达到-1.51,1.17;轻旱主要分布在 1960 年、1963 年、1988 年、1992 年、2003 年。轻涝主要分布在 1961 年、1968 年、1973 年、1983 年、2002

年、2015 年和 2016 年。整体看来,1960—2019 年西南岩溶区呈现出由雨涝向干旱变化的趋势。

3.1.3 SPI 季节变化特征 从季节变化特征来看(图 4),春、秋两季 SPI 呈不显著下降趋势($p>0.05$),下降速率分别为 0.003/10 a 和 0.053/10 a;夏、冬两季 SPI 呈不显著上升趋势($p>0.05$),上升速率分别为 0.000 8/10 a 和 0.04/10 a。

春季 SPI 在-1.17~0.70 波动,旱涝呈交替发生的特点。旱涝事件发生的频次为:中旱 2 次、轻旱 7 次、正常 42 次、轻涝 9 次;其中,中旱出现在 1963 年和 2011 年,SPI 值分别为-1.12 和-1.17;轻旱主要出现在 1960 年、1969 年、1979 年、1986 年、1988 年、

1991 年和 1995 年;轻涝主要出现在 1961 年、1970 年、1973 年、1975 年、1978 年、1981 年、1990 年、2002 年和 2016 年。以上分析表明,春季干旱年份主要分布在 20 世纪 60—90 年代,雨涝年份主要分布在 20 世纪 70 年代。

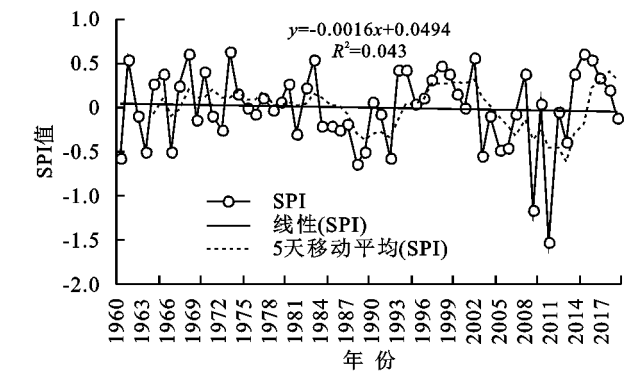
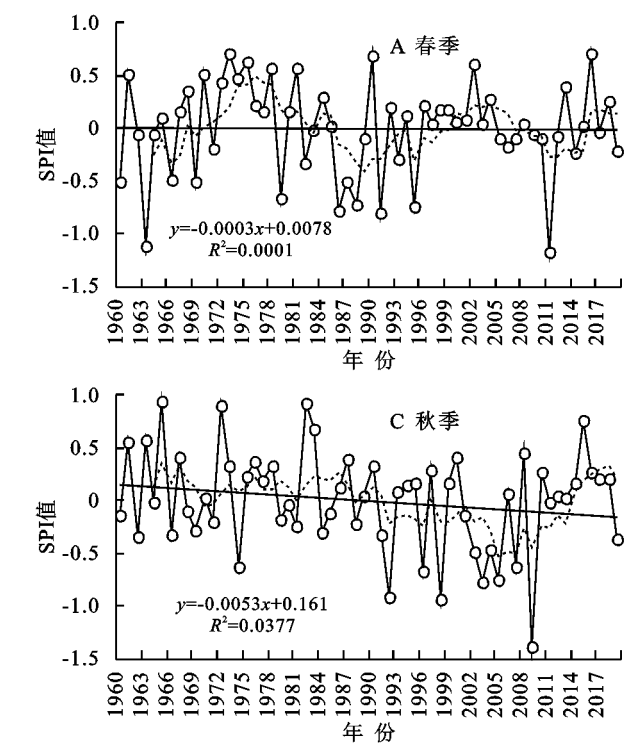


图 3 SPI 年际变化特征

夏季旱涝波动明显,旱涝事件发生的频次为:中旱 2 次、轻旱 5 次、正常 47 次、轻涝 6 次;其中,中旱发生在 1972 年和 2011 年,SPI 值分别为-1.23 和-1.15;轻旱发生在 1989 年、1990 年、1992 年、2009 年和 2013 年;轻涝



主要出现在 1968 年、1993 年、1998 年、1999 年、2002 年、2014 年。以上分析表明,旱涝事件在 20 世纪 90 年代及 21 世纪初期发生频率较高。

秋季旱涝波动相对较小,旱涝事件发生的频次为:2009 年发生中旱,SPI 值为-1.38;轻旱 7 次,发生年份为 1974 年、1992 年、1996 年、1998 年、2003 年、2005 年和 2007 年;轻涝 7 次,发生年份为 1961 年、1963 年、1965 年、1972 年、1982 年、1983 年、2015 年;正常 45 次。以上统计表明,旱涝事件在 20 世纪 60 年代、90 年代以及 21 世纪初期发生比较频繁。

冬季 SPI 在高低位之间震荡变化,旱涝交替显著。研究时段内,中旱 1 次,发生在 2009 年;轻旱 10 次,发生年份为 1963 年、1969 年、1974 年、1979 年、1986 年、1994 年、1996 年、1999 年、2010 年、2013 年;中涝 4 次,主要发生在 1983 年、1993 年、1995 年、2016 年;轻涝 7 次,出现在 1971 年、1990 年、1992 年、1998 年、2003 年、2004 年、2019 年;正常 37 次。通过以上统计数据可以看出,旱涝事件在 20 世纪 90 年代及 21 世纪初期发生频率较高。

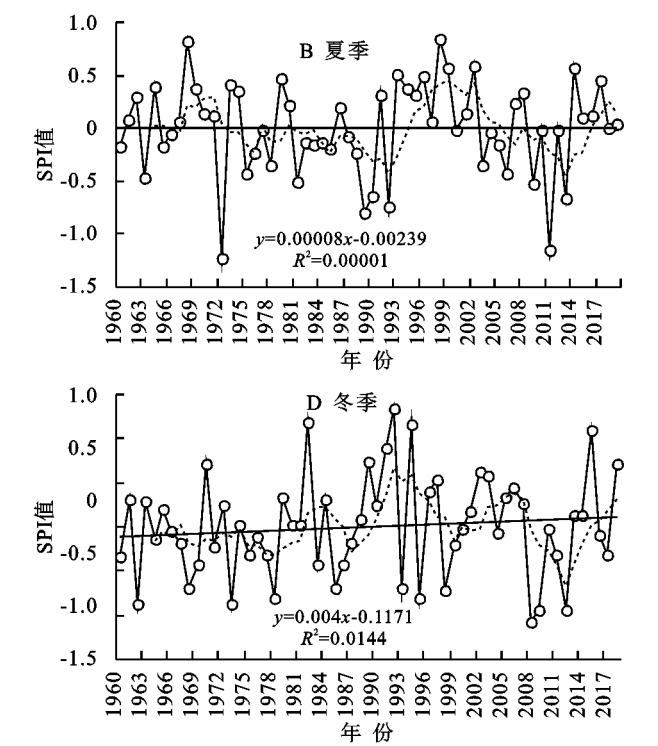


图 4 SPI 季节变化特征

3.2 SPI 空间变化趋势

3.2.1 SPI 年际变化趋势 为了从像元尺度反映西南岩溶区近 60 a SPI 在年际和季节尺度的变化趋势,对年际和季节尺度 SPI 序列进行 Sen-Median 趋势分析,并采 Mann-Kendall 方法对其变化趋势的显著性进行检验。

从年尺度来看,SPI 的 Sen-Median 趋势系数 β

介于 $(-0.14 \sim 0.25)/10 \text{ a}$, $\beta < 0$ 表示 SPI 呈下降趋势, $\beta > 0$ 表示 SPI 呈上升趋势。Mann-Kendall 统计指标 Z 值介于 $-2.64 \sim 3.64$,当 $|Z| \geq 1.96$,表示在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下,SPI 序列趋势变化显著。将 Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验结果进行叠加,并将结果分为 4 种类型:显著下降($\beta < 0$, $Z \leq -1.96$)、不显著下降($\beta < 0$, $|Z| < 1.96$)、不显著

上升($\beta > 0, |Z| < 1.96$)、显著上升($\beta > 0, Z \geq 1.96$)。

从图5可以看出,SPI呈下降趋势的区域集中分布在云南、贵州、重庆、湖北等地区,主要岩溶地貌类型有岩溶断陷盆地、岩溶峡谷、岩溶高原、岩溶槽谷等。这些区域以干旱化趋势为主,占研究区总面积的57.13%,其中占56.96%的区域变化趋势不显著,未通过 $p < 0.05$ 显著性检验。进一步分析发现,SPI呈下降趋势的区域主要位于地势的第二阶梯,绝大部分区域高程主要分布在500~2 000 m,同时这些区域主要分布纯碳酸盐岩,地表土壤瘠薄,植被以灌草为主,蓄水能力较差,对降水的响应比较敏感,容易出现旱涝灾害。SPI呈上升趋势的区域主要分布在广西的峰丛洼地、广东的峰林平原、湖南的岩溶丘陵区、四川南部的岩溶断陷盆地区和西部及北部的中高山岩溶区,占研究区总面积的42.07%,这些区域有雨涝化趋势,其中41.57%区域变化趋势不显著,未通过 $p < 0.05$ 显著性检验。

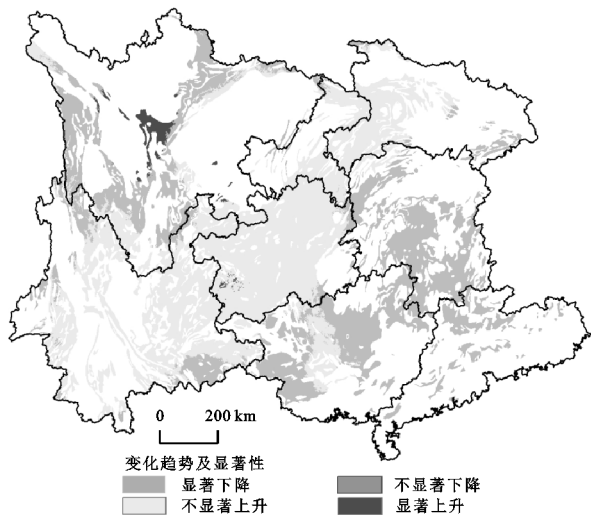


图5 年际SPI空间变化及其显著性检验

3.2.2 SPI季节变化趋势 季节尺度上,西南岩溶区SPI空间变化趋势表现出较大差异(图6)。这不仅与地形和大气环流的影响有关,使降雨量季节和区域分布不均衡;同时与岩溶区特殊的地质环境背景有很大关系,地上地下双层结构、土壤瘠薄、使得蓄水能力非常差,对旱涝的响应比较敏感。从图6可以看出,春、夏、秋三季SPI以下降趋势为主,分别占研究区总面积的55.10%,53.06%和84.25%,表明春、夏、秋三季呈现干旱化趋势;而冬季SPI呈上升趋势的比例为83.32%,表明冬季以雨涝化趋势为主;但绝大部分区域SPI下降或上升趋势不显著,未通过 $p < 0.05$ 显著性检验。

春季,SPI呈下降趋势的区域主要分布在云南东部、贵州、广西、湖南、湖北等区域的岩溶断陷盆地、岩溶峡谷、岩溶高原、岩溶槽谷、岩溶丘陵及岩溶峰丛洼

地区;其中显著下降的区域仅占研究区总面积的0.92%,集中分布在贵州西南部岩溶峡谷地区。SPI呈显著上升趋势的区域占研究区总面积的12.63%,集中分布在云南北部岩溶断陷盆地区、四川中高山岩溶区;呈不显著上升趋势的区域主要分布在云南、广西、广东、湖北、重庆局部地区也有分布。

夏季,SPI呈下降趋势的区域略高于呈上升趋势的区域,主要分布在云南、广西西北部、贵州北部及西南部、四川南部、西部及北部、湖北西北部等地区,以岩溶断陷盆地区分布最为广泛;显著下降的区域占研究区总面积的2.49%,主要分布在云南中部及西部地区。SPI呈上升趋势的区域主要分布在广西东北部、广东、湖南、贵州中部及东南部、四川中南部及中西部等地区;显著上升的区域占研究区总面积的3.84%,集中分布在湖南中部及与广西交接处的岩溶丘陵地区。

秋季,SPI呈下降趋势的区域相比春、夏两季有较大幅度增加,表明秋季以干旱化趋势为主。SPI呈下降趋势的区域广泛分布于云南、贵州、湖南、湖北、重庆及广西东北部和广东北部等地区;其中,显著下降的区域占研究区总面积的7.27%,集中分布在云南与贵州交接地区的岩溶断陷盆地区。SPI呈上升趋势的区域仅占研究区总面积15.75%,主要分布在广西西北部、四川中西部、湖南北部、广东也有离散分布,上升趋势不显著,均未通过 $p < 0.05$ 显著性检验。

冬季与春、夏、秋三季相比,SPI以不显著上升趋势为主导,占研究区总面积的77.70%,表明冬季大部分地区具有雨涝化趋势;呈显著上升趋势的区域仅占研究区总面积的5.62%,主要分布在广西西南部峰丛洼地区、四川中部和北部地区中高山岩溶区。SPI呈下降趋势的区域,主要分布在云南与四川交接地带的岩溶断陷盆地区、云南西部的岩溶峡谷区,下降趋势不显著,基本未通过 $p < 0.05$ 显著性检验。

3.3 SPI空间演化特征

基于R/S理论方法,对研究区近60 a的年际SPI序列值逐像元计算Hurst指数,其值域范围为0.245~0.907,均值为0.633。为了研究SPI的空间演化特征,将Hurst指数分为3种类型:反持续性变化($H < 0.5$)、弱持续性变化($0.5 < H \leq 0.75$)和强持续性变化($H > 0.75$)。统计结果表明,研究区Hurst指数以弱持续变化为主导,占研究区总面积的76.45%;其次为强持续变化区,占13.65%;反持续变化区域仅占9.90%。

从图7可以看出,Hurst指数呈强持续性的区域主要散布在贵州西北部与云南交界地区、四川中部及

与云南南部交接的岩溶峡谷地区、云南西部和东部岩溶断陷盆地区、广西东北部峰丛洼地区。反持续性区

域主要分布在湖北、湖南北部的岩溶槽谷地区、广西南部,广东西部及四川地区也有零星分布。

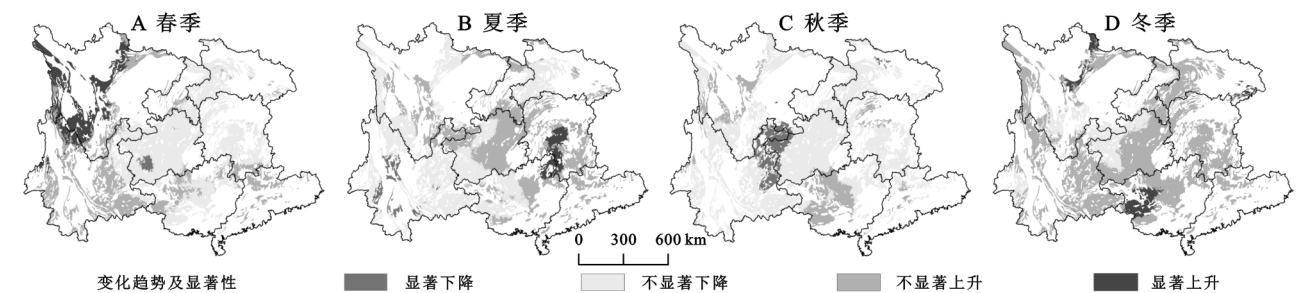


图 6 季节 SPI 空间变化及其显著性检验

为了进一步研究西南岩溶区 SPI 变化趋势及其可持续性,将 Sen-Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验结果与 Hurst 指数分类结果进行空间叠加分析。具体研究过程中,将 $\beta < 0$ 用代码 1 表示, $\beta > 0$ 用代码 2 表示;将 $\alpha = 0.05$ 置信水平上 Mann-Kendall 检验结果划分为:显著变化区($Z < -1.96$ 或 $Z \geq 1.96$)分别用代码 1,3 表示,不显著变化($-1.96 \leq Z < 1.96$)用代码 2 表示;对 Hurst 指数值 $H < 0.5$ 时,用代码 1 表示, $0.5 < H \leq 0.75$ 用代码 2 表示, $H > 0.75$ 用代码 3 表示;则 β 、 Z 和 H 的耦合结果见表 2 所示。从表 2 可以看出,SPI 持续减少的区域(类别 112,113,122,123)占 50.33%,高于持续增加的区域(类别 222,223,232,233)39.76%。

SPI 空间演化态势显著减少—强持续区域(类别 113)仅占 0.08%,主要在云南西部中高山岩溶区零星分布;显著增加—强持续区域(类别 233)占 0.92%,集中分布在四川中部中高山岩溶区;未来趋势无法确

定的区域(类别 121,221)占 9.90%,主要集中在广西西南部岩溶峰丛洼地区、湖北中西部以及湖南北部岩溶槽谷地区。以上 3 类地区是重点监测区域,以防止旱涝灾害发生。

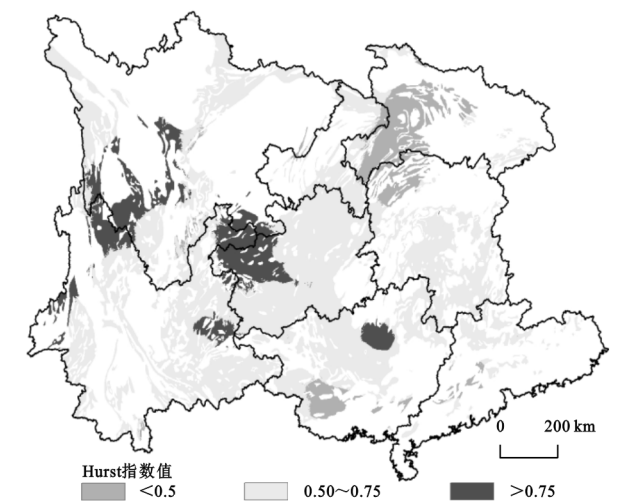


图 7 Hurst 指数空间分布

表 2 降水量变化趋势及 Hurst 指数统计结果

类别	β	Z	H	类型	面积百分比/%
112	<0	<-1.96	$0.5 < H \leq 0.75$	显著减少—弱持续	0.09
113	<0	<-1.96	$H > 0.75$	显著减少—强持续	0.08
122	<0	$-1.96 \sim 1.96$	$0.5 < H \leq 0.75$	不显著减少—弱持续	42.63
123	<0	$-1.96 \sim 1.96$	$H > 0.75$	不显著减少—强持续	7.53
222	>0	$-1.96 \sim 1.96$	$0.5 < H \leq 0.75$	不显著增加—弱持续	33.34
223	>0	$-1.96 \sim 1.96$	$H > 0.75$	不显著增加—强持续	5.12
232	>0	≥ 1.96	$0.5 < H \leq 0.75$	显著增加—弱持续	0.39
233	>0	≥ 1.96	$H > 0.75$	显著增加—强持续	0.92
121\221			≤ 0.5	未来变化无法确定	9.90

4 结论

(1) 时间变化上,不同时间尺度 SPI 随时间变化表现出不同的响应特征,时间尺度越小,波动幅度越大。年际 SPI 呈不显著下降趋势,表现出干旱化趋势。季节尺度,春、秋两季 SPI 呈不显著下降趋势;夏、冬两季呈不显著上升趋势。研究结论与王东

等^[10]结论基本一致,与 Li^[8]、杨金虎^[13]等的研究结论不完全一致,主要是因为研究区域不完全相同,选取的干旱指标不同,研究时间段长度也有差异。

(2) 空间分布上,云南、贵州、重庆、湖北等绝大部分地区年际 SPI 呈不显著下降趋势;广西、广东、湖南、四川南部和西部及北部绝大部分地区 SPI 呈不显著上升趋势。季节尺度上,春、夏、秋三季 SPI 以下降

趋势为主,冬季 SPI 以上升趋势为主,绝大部分地区变化趋势不显著。

(3) 从 SPI 空间演化态势来看, SPI 呈持续变化 ($H > 0.5$) 的区域占 90.10%。 β 、 Z 和 H 的耦合结果表明未来云南、贵州岩溶区干旱呈持续态势,广西、湖南、四川大部分岩溶区洪涝呈持续态势,其他地区未来变化趋势无法确定。

本文基于多尺度 SPI 研究了西南岩溶区旱涝时空演变特征,研究结果表明 SPI 能有效反映旱涝变化特征。但 SPI 仅考虑了单一的降水因子,在后续研究中可以同时考虑降雨、温度、土壤湿度、植被等因子对干旱的影响。

参考文献:

- [1] 杨涛,陆桂华,李会会,等.气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J].水科学进展,2011,22(2):279-286.
- [2] 姚玉璧,张强,李耀辉,等.干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J].资源科学,2013,35(9):1884-1897.
- [3] 翁白莎,严登华.变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J].资源科学,2010,32(2):309-316.
- [4] 苏维词.西南岩溶山区生态系统基本特征及其调控措施研究:以贵州省为例[J].水土保持通报,2004,24(2):55-59.
- [5] 郭纯青,周蕊,潘林艳.中国西南岩溶区 1900—2012 年旱涝灾害分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(2):12-15.
- [6] 黄荣辉,刘永,王林,等.2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].大气科学,2012,36(3):443-457.
- [7] Sun S L, Li Q Q, Li J J, et al. Revisiting the evolution of the 2009—2011 meteorological drought over Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019,568:385-402.
- [8] Li X, He B B, Quan X W, et al. Use of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index(SPEI) to Characterize the Drying Trend in Southwest China from 1982—2012[J]. Remote Sensing, 2015,7(8):10917-10937.
- [9] 刘小刚,冷险险,孙光照,等.基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估[J].农业机械学报,2018,49(12):243-252,306.
- [10] 王东,张勃,张调风,等.1960—2011 年西南地区干旱时空格局分析[J].水土保持通报,2013,33(6):152-156.
- [11] Wang Z L, Li J, Lai C G, et al. Increasing drought has been observed by SPEI_{pm} in Southwest China during 1962—2012[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018,133:23-38.
- [12] 刘琳,徐宗学.西南地区旱涝特征及其趋势预测[J].自然资源学报,2014,29(10):1792-1801.
- [13] 杨金虎,张强,王劲松,等.近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J].地理科学,2015,35(10):1333-1340.
- [14] 周军红.西南岩溶地区水资源信息系统构建[J].岩土工程技术,2005,19(6):271-275.
- [15] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8 th Conference on Applied Climatology, 1993,17(22):179-183.
- [16] 周扬,李宁,吉中会,等.基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J].自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
- [17] Hutchinson M F, Xu T B. Anusplin Version 4.4 User Guide[R]. Http://Fennerschool. Anu. Edu. Au/Files/Anusplin44. Pdf, 2013.
- [18] 刘志红,杨勤科,李锐.专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J].气象,2008,34(2):92-100.
- [19] 朱求安,江洪,宋晓东.基于空间插值方法的中国南方酸雨时空分布格局模拟及分析[J].环境科学研究,2009,22(11):1237-1244.
- [20] 李任君,高懋芳,李强,等.基于 ANUSPLIN 的降水空间插值方法研究[J].中国农业信息,2019,31(1):52-61.
- [21] 张晓东,朱文博,张静静,等.伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J].地理学报,2018,73(1):41-53.
- [22] Burn D H, Elnur M. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1):107-122.
- [23] Abdul Aziz O I, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006,319(1):282-294.
- [24] 王桂钢,周可法,孙莉,等.近 10 a 新疆地区植被动态与 R/S 分析[J].遥感技术与应用,2010,25(1):84-90.
- [25] Mandelbrot B. Statistical methodology for nonperiodic cycles:From the covariance to R/S analysis[M]// Annals of Economic and Social Measurement, Volume 1, Number 3. Nber, 1972.