

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.007

# 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估

袁 飞<sup>1,2</sup>, 章益棋<sup>1</sup>, 刘 懿<sup>1</sup>, 马明卫<sup>3</sup>, 张利敏<sup>1</sup>, 石佳勇<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046)

**摘要:**采用西江流域武宣站集水区 68 个气象站点 1961—2014 年的逐日气象观测资料和 12 个水文站点 1961—1989 年日径流资料以及植被、土壤数据, 驱动 VIC 水文模型计算水文要素的时空分布, 构建网格尺度的标准化帕尔默干旱指数 (SPDI), 结合游程理论识别历史干旱事件, 分析了 SPDI 在西江流域干旱评估的适用性以及历史干旱事件的时空变化特征。结果表明: SPDI 在西江流域干旱评估中具有良好的适用性; 1961—2014 年西江流域干旱频次、历时总体呈增加的趋势; 1960、1980 和 2000 年代属旱情较严重年代, 21 世纪以来西江流域干旱化趋势更为明显。

**关键词:** 标准化帕尔默干旱指数; 干旱评估; VIC 模型; 游程理论; 西江流域

**中图分类号:** P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)01-0046-07

**Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index** // YUAN Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yiqi<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, MA Mingwei<sup>3</sup>, ZHANG Limin<sup>1</sup>, SHI Jiayong<sup>1</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Based on the daily meteorological observation data of 68 meteorological stations from 1961 to 2014, daily runoff data of 12 hydrological stations from 1961 to 1989, vegetation data and soil data in the catchment area of Wuxuan Station in the Xijiang River Basin were used to drive VIC hydrological model to calculate the spatial and temporal distribution of hydrological elements, and to construct a standardized Palmer drought index (SPDI) of grid scale. The run theory was used to identify the historical drought events, and the feasibility of SPDI in drought assessment in the Xijiang River Basin was evaluated. Meanwhile, the spatiotemporal feature of historical drought events was analyzed. Results show that SPDI is feasible for drought assessment in the Xijiang River Basin. In the period of 1961-2014, drought frequency and duration in the Xijiang River Basin have an overall increasing trend. The 1960s, 1980s and 2000s are the serious drought years, and the trend of drought in Xijiang River Basin is more obvious since the 21st century.

**Key words:** standardized Palmer drought severity index; drought assessment; VIC model; run theory; Xijiang River Basin

气候变化加速了全球水循环, 导致全球不同尺度水资源重新分配, 极端水文事件(水旱灾害)显著增加<sup>[1]</sup>。受季风气候影响, 我国干旱灾害也呈现频发、广发的特点, 平均 2~3 年发生一场严重干旱, 并且受旱范围不断扩大。目前我国干旱频发区域不仅集中在北方干旱半干旱地区, 同时也呈向南方湿润区延伸的趋势<sup>[2]</sup>。如, 云南省自 1961 年以来干旱次数越来越多, 干旱间隔越来越短, 2009—2014 年是云南历史上最长的一个干旱期<sup>[3]</sup>; 西南地区在 2006

年、2009 年秋至 2010 年春连续发生多场极端干旱事件, 部分干旱事件重现期甚至超过 100 年, 严重威胁了当地工农业生产和人民生活。准确识别干旱过程、客观评估干旱等级及严重程度, 可为干旱防控和水资源适应性管理提供参考。

由于干旱形成过程复杂, 影响因素众多, 根据不同的关注对象, 目前学界已发展了 100 多种干旱指标, 其中帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)<sup>[4]</sup> 和标准化干旱指数 (standardized

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFA0601500); 国家自然科学基金 (51779070); 中央高校基本科研业务费专项 (2019B10314)  
作者简介: 袁飞 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: fyuan@hhu.edu.cn

index, SI)是最具代表性的两类干旱指数。常见的SI包括:标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)<sup>[5]</sup>、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)<sup>[6-7]</sup>、标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)<sup>[7-8]</sup>等,其中SPI是最杰出的代表。PDSI采用两层“水桶”模型概化模拟水文过程,具有一定物理机制,但计算过程复杂,时空可比性较差;SI则采用概率分布函数描述变量统计特征,计算简便,时空可比性强,且具有多时间尺度特点。杨礼箫等<sup>[9]</sup>基于PSDI和SPI对黑河上游的干旱特征进行了对比分析;周蕾等<sup>[10]</sup>利用SPI、PDSI探究中国2001—2010年的干旱变化趋势,分析了不同干旱指数在全国及区域上对干旱指示的差异;张林燕等<sup>[11]</sup>利用VIC模型结合PDSI分析了黄河源区干旱时空变化特征。在此基础上, Ma等<sup>[12]</sup>进一步开发了标准化帕尔默干旱指数(standardized Palmer drought severity index, SPDI),同时兼顾PDSI的物理机制和SI的统计优势,弥补二者不足,增强了干旱指数在不同气候区的适用性。

本文采用具有物理机制的分布式水文模型与SPDI耦合,构建物理机制更为完备、时空可比性强的综合干旱指数,进而剖析西江流域历史干旱事件的时空演变特征,评估干旱指数在湿润区的适用性,以期作为西江流域旱灾防治和水资源优化调配提供参考。

## 1 研究区域概况

西江发源于云南,流经贵州、广西和广东,在珠海市注入南海,干流全长2214 km,流域总面积34.6万km<sup>2</sup>,占珠江流域70%以上。西江流域属亚热带气候,多年平均气温为14~20℃,多年平均降水量为1200~2200 mm,年平均径流量为2.12万亿m<sup>3</sup>,水资源丰富。流域内降水时空分布不均,干旱是其主要气象灾害之一<sup>[13-14]</sup>。本文选取西江流域武宣水文站以上的集水区域为研究区(图1),集水面积

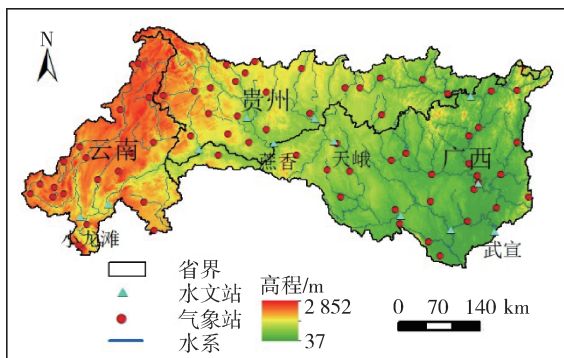


图1 研究区及水文、气象站点位置

Fig. 1 Location of study area and hydrological and meteorological stations

196255 km<sup>2</sup>,位于北纬23°02′~26°77′、东经102°25′~110°56′,跨越云南、广西、贵州等省区(下文简称云南区、广西区、贵州区)。该区域在1962—1963年经历了严重干旱,1984—1992年出现了长达9年的连续干旱,2009年秋至2010年春,西南地区遭受了百年一遇的干旱,严重影响流域内的航运、工农业生产和人民生活。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 资料来源

本文收集了中国气象局提供的西江流域68个气象站点1961—2014年的逐日气象观测资料,包括日降水、日最高、最低气温和风速;从水文年鉴中摘录并整理西江流域12个水文站1961—1989年的逐日流量资料。植被覆被类型资料来源于马里兰大学发布的全球1 km×1 km的土地覆被数据,土壤质地数据来源于美国NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)水文办公室提供的全球5′×5′土壤质地资料,各类土壤参数依据Cosby等<sup>[15]</sup>的成果确定。将以上数据分别转换为0.25°×0.25°空间分辨率,作为水文模型的输入数据。此外,还摘录了《中国水旱灾害公报》《中国气象灾害大典》(综合卷、广西卷、贵州卷、云南卷)等年鉴中西江流域1961—2014年期间历史干旱事件,用于验证SPDI在西江流域干旱评估的适用性。受气象数据获取影响,本研究的干旱评估年份仅至2014年,今后将延长数据长度,评估近期干旱演变情势。

### 2.2 基于VIC模型的SPDI构建

VIC(variable infiltration capacity)模型是基于物理机制的大尺度分布式水文模型,能够有效模拟网格尺度的水分循环过程。针对PDSI干旱指标水文分量计算过于概化,本文采用物理机制较强的VIC分布式水文模型代替两层土壤“水桶”模型,以充分考虑土壤、植被和地形等要素的空间变异性,并融合蓄满产流和超渗产流机制,通过对降雨-径流过程模拟得到网格单元的各项水文参量,最终构建基于VIC模型的SPDI。构建过程主要包括各水文分量和气候适宜降水量的计算、广义极值分布拟合以及标准化处理等3个环节。各水文分量表达式为

$$Q_{PR} = \max(w_{AWC} - w_0, 0) \quad (1)$$

$$R_p = w_{AWC} - Q_{PR} \quad (2)$$

$$Q_{PL} = Q_{PLs} + Q_{PLm} + Q_{PLu} \quad (3)$$

$$Q_R = \max(w - w_0, 0) \quad (4)$$

$$Q_L = |\min(w - w_0), 0| \quad (5)$$

式中: $Q_{PR}$ 为可能补水量,mm; $R_p$ 为可能径流深,mm; $Q_{PL}$ 为可能失水量,mm; $Q_R$ 为实际补水量,mm; $Q_L$ 为

实际失水量, mm;  $w_0$ 、 $w$  分别为 3 层土壤时段初和时段末的总含水量, mm;  $w_{AWC}$  为 3 层土壤的最大有效含水量, mm;  $Q_{PLs}$ 、 $Q_{PLm}$ 、 $Q_{PLu}$  分别为表层、中层和下层土壤的可能失水量, mm, 采用 3 层蒸发模型分别估算。此外, 气候适宜降水量所需的实际蒸散量  $ET$ 、实际径流深  $R$  和可能蒸散量  $ET_p$  等水文分量则由 VIC 模型计算。

气候适宜降水量的表达式为

$$\hat{P} = \alpha ET_p + \beta Q_{PR} + \gamma R_p - \delta Q_{PL} \quad (6)$$

$$d = P - \hat{P} \quad (7)$$

式中:  $P$  为降水量, mm;  $\hat{P}$  为气候适宜降水量, mm;  $d$  为水分偏离, mm;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  分别为蒸散、补水、径流、失水系数。

本文采用广义极值分布拟合水分偏离  $d$  序列, 估算相应累积概率分布, 对其进行标准正态分布的逆运算, 即得到相应的 SPDI 值, 具体公式为

$$I_{SPDI} = \Phi^{-1}[F(x)] \quad (8)$$

其中  $F(x) = \exp\left\{-\left[1 - k\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$

式中:  $x$  为水分偏离  $d$  的时间序列;  $\sigma$ 、 $\mu$ 、 $k$  分别为分布的尺度、位置和形状参数, 且  $\sigma > 0$ 。

本文采用 VIC 模型输出的  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  网格尺度相关水文变量进行 7 d 滑动平均预处理, 再根据上述公式计算以日为时间尺度的  $I_{SPDI}$  时间序列。本文构建基于日时间尺度的干旱指数, 相较于月尺度的干旱评估方法, 识别的干旱事件频次较高、历时较短, 更适合用于捕捉骤发干旱、旱涝急转等时空变化更为迅速的短历时极端事件, 对未来干旱监测与评估技术的发展具有重要参考价值。

### 2.3 干旱评估方法

根据  $I_{SPDI}$  的数值将干旱划分成 4 个等级:  $-1 < I_{SPDI} \leq -0.5$  为轻旱,  $-1.5 < I_{SPDI} \leq -1$  为中旱,  $-2 < I_{SPDI} \leq -1.5$  为重旱,  $I_{SPDI} \leq -2$  为极旱。采用游程理论<sup>[16]</sup>对已构建的  $I_{SPDI}$  时间序列进行分析, 识别并提取各历史干旱事件的历时、烈度等特征属性。如图 2 所示, 假设某一段反映干旱情况的  $I_{SPDI}$  时间序列  $x_i$  被给定阈值水平  $x_0$  ( $x_0 = -0.5$ ) 截取, 若  $x_i \leq x_0$ , 即出现负游程, 若负游程持续时间大于 14 d, 则判定为一次干旱事件; 若两次相邻干旱事件时间间隔小于 5 d, 则将两次干旱合并为一场干旱事件。干旱的历时、烈度分别用负游程长、负游程绝对值定量表示。

## 3 结果与分析

### 3.1 径流过程模拟

采用 VIC 模型模拟武宣站以上区域 1961—

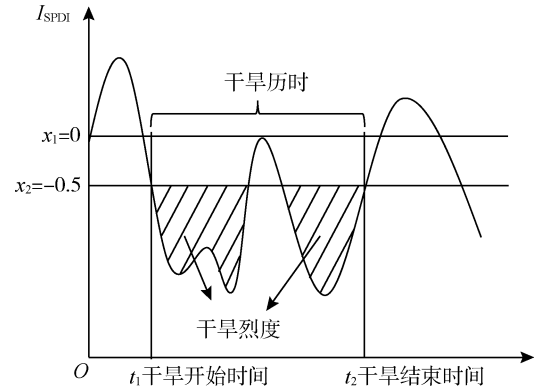


图 2 游程理论示意图

Fig. 2 Schematic diagram of theory of runs

2014 年的产流过程, 采用马斯京根分段连续演算法进行河道汇流演算。图 3 为武宣站率定期 (1969—1979 年) 和验证期 (1980—1989 年) 的日流量过程线, 可见 VIC 模型模拟的武宣站日流量过程与实测流量过程基本吻合。经统计, 率定期和验证期的确定性系数 (NSE) 分别为 0.889、0.883, 均高于 0.85; 径流深相对误差 (BIAS) 为  $-3.0\%$ 、 $0.9\%$ , 均在  $\pm 3\%$  以内。综上, VIC 模型在西江流域武宣站以上区域模拟精度较高, 满足后续研究需要。

### 3.2 历史干旱事件验证

选取 1963 年、1991 年、2009 年和 2010 年这 4 个不同年代且干旱较严重的年份作为典型年份, 将基于 SPDI 识别的干旱事件与年鉴记载的干旱事件进行对比, 分析 SPDI 在西江流域的适用性。图 4 为基于 SPDI 和游程方法计算的典型年份干旱烈度时空分布, 可以看出, 1963 年 1 月广西区、贵州区出现短暂冬旱, 2 月旱情缓解, 3 月贵州区春旱露头, 4 月旱情蔓延至全区并持续至 5 月, 6 月云南区旱情缓解, 其他区旱情持续发展, 7 月全区旱情缓解, 8 月贵州区、广西区出现轻度夏旱, 9 月云南区秋旱露头, 10 月开始全区旱情完全缓解; 1991 年 4 月广西区、贵州区春旱严重, 5 月旱情虽得到一定缓解, 但云南区、贵州西南部、广西西部旱情仍持续发展, 6 月开始旱情基本缓解, 8 月广西区秋旱露头并持续至 9 月, 10 月缓解, 12 月云南区出现轻度冬旱; 2009 年 9 月至 2010 年 3 月, 全区发生严重干旱, 4 月开始旱情基本缓解, 7—8 月, 部分地区又出现轻度干旱。结合年鉴记载的干旱事件 (表 1)<sup>[7-11]</sup>, 以上年份识别的干旱过程均与年鉴记载基本相符; 且从烈度强弱及干旱影响的空间范围整体分析, 2009—2010 年旱情最为严重, 其次为 1963 年和 1991 年, 与年鉴记载 2010 年西南 5 省旱情为百年一遇大旱、1991 年旱情次于 1963 年均相符, 表明 SPDI 适用于西江流域的干旱评估, 可以进一步分析西江流域历史干旱

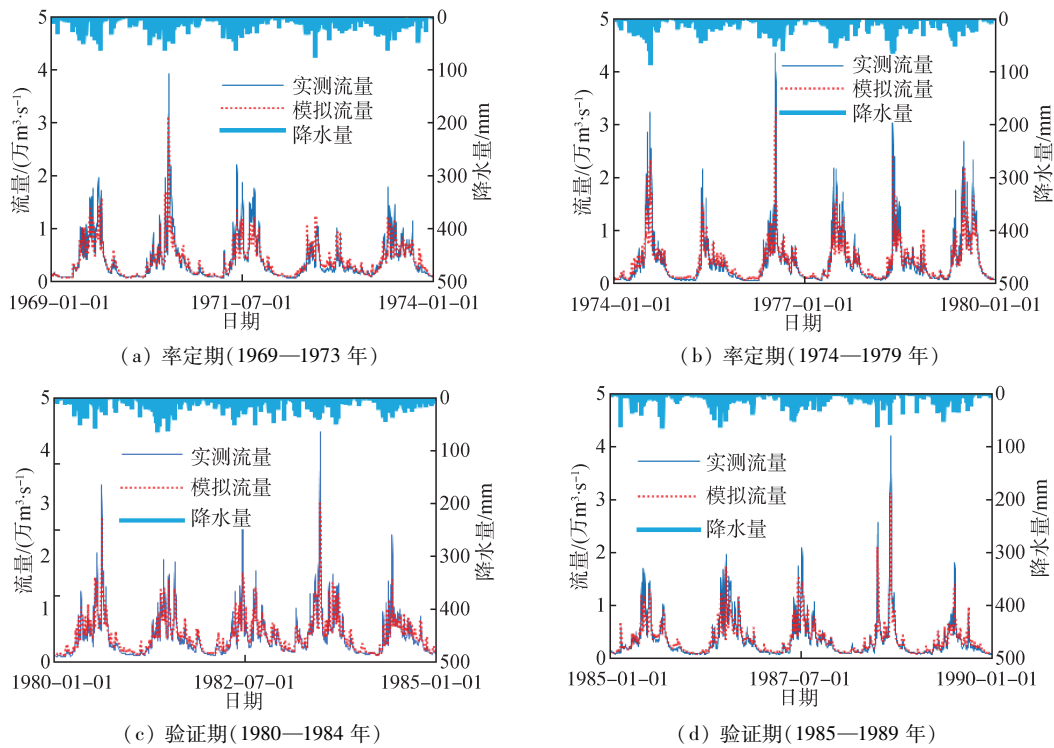


图3 VIC模型模拟的西江流域武宣站日流量过程

Fig. 3 Daily hydrographs simulated by VIC model at Wuxuan Hydrological Station in the Xijiang River Basin

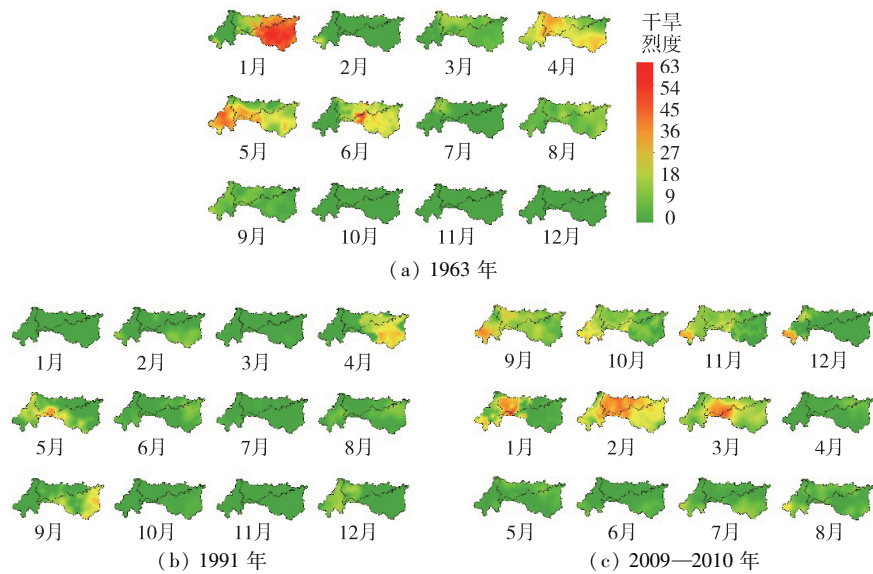


图4 西江流域典型年份干旱烈度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of drought intensity in typical years in the Xijiang River Basin

表1 西江流域典型年份实际旱情记载

Table 1 Records of historical droughts in typical years in the Xijiang River Basin

| 年份        | 干旱事件记录   |
|-----------|--|
| 1963      | 广西:4月上旬至9月上旬,除沿海和桂西北局部山区降水偏少,发生全区性长时期大旱,其中4月上旬至6月底旱情最严重。云南:全省性严重春旱和秋旱。贵州:3月上旬至5月初,中部以西地区发生较重干旱,其中灾情严重的有黔西南州/六盘水市、毕节地区大部、安顺地区西部等;夏季,全省大范围中度夏旱 |
| 1991      | 广西:春夏干旱波及全区,严重程度仅次于1963年同期;6月中旬旱情相继缓解;8月中旬至11月中旬秋旱严重。云南:4—5月,宣威、砚山、富宁、沾益、陆良、华宁、通海、开远、文山等县市发生不同程度干旱;12月轻度干旱。贵州:3—5月,全省春旱严重,其中黔西南州旱情最为严重       |
| 2009—2010 | 2009年入秋至2010年4月,西南5省发生百年一遇冬春连旱。2010年2月,西南5省(区)旱情加剧;4月初,广西西北部、贵州西部达到特大干旱;4月底至5月初,贵州局部旱情持续,其他地区基本解除;7月中旬至8月下旬,西南部分地区降水偏少                       |

的时空变化特征。

### 3.3 历史干旱时间变化特征

本文统计了西江流域和云南、广西和贵州各分区 1961—2014 年期间各年干旱频次、历时和烈度,并分析这 3 个干旱特征变量在年尺度上的变化趋势。如图 5 所示,无论是全流域还是各分区,其干旱频次、历时及烈度在年尺度上均呈现不同程度的波动;其中 2009 年全流域和各分区的 3 个干旱特征变

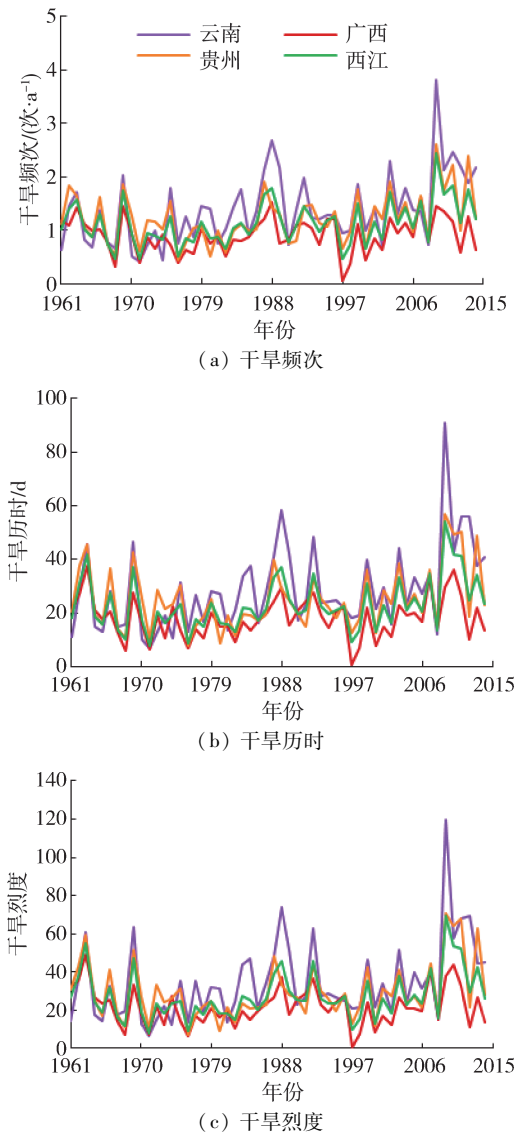


图 5 1961—2014 年西江流域和各分区的干旱特征变量的变化情况

Fig. 5 Temporal variation of drought variables in the Xijiang River basin and various sub-regions in 1961—2014

表 2 1961—2014 年西江流域和各分区干旱特征变量的 MK 统计值

Table 2 Mann-Kendall statistics of drought variables in the Xijiang River Basin and sub-regions in 1961—2014

| 流域和分区 | 干旱频次     | 干旱历时     | 干旱烈度     | 极旱历时   | 重旱历时    | 中旱历时     | 轻旱历时     |
|-------|----------|----------|----------|--------|---------|----------|----------|
| 云南    | 3.45 *** | 3.45 *** | 3.12 *** | 0.99   | 2.35 ** | 4.06 *** | 3.84 *** |
| 广西    | 0.80     | 0.69     | 0.27     | -0.63  | 0.19    | 1.15     | 1.45     |
| 贵州    | 1.81 *   | 1.54     | 1.37     | 1.89 * | 1.10    | 1.34     | 2.19 **  |
| 西江    | 2.30 **  | 2.31 **  | 1.87 *   | 0.57   | 1.34    | 2.52 **  | 2.98 *** |

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示干旱特征变量通过置信度 90%、95%、99% 的显著性检验。

量数值在所有年份中最高,尤其以云南区最明显,与年鉴所述 2009—2010 年发生百年一遇干旱相符合。

对西江流域和各分区 1961—2014 年期间各年干旱事件频次、历时、烈度及各等级干旱事件历时的时间序列进行 Mann-Kendall (MK) 趋势检验,结果见表 2。由表 2 可见,全流域轻旱历时的 MK 统计值大于 2.56,通过了置信度为 99% 的显著性检验,呈显著的增加趋势;干旱频次、历时及中旱历时的 MK 统计值均大于 1.96,通过了置信度为 95% 的显著性检验,即干旱频次、历时及中旱历时呈增加趋势;干旱烈度通过了置信度为 90% 的显著性检验,呈不明显的增加趋势。同理,云南区干旱频次、历时、烈度以及轻旱、中旱历时均呈显著增加趋势,重旱历时呈增加趋势;广西区各干旱特征变量无明显变化趋势;贵州区轻旱历时呈显著增加趋势,干旱频次、极旱历时呈增加趋势。根据重旱和极旱历时的统计结果,云南区和贵州区极端干旱事件发生的时间呈增加趋势,广西区无明显变化。

将 1961—2014 年划分为 5 个年代际 (1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2014 年,分别记为年代际 1、2、3、4、5),分别统计全流域和各分区各年代际干旱特征变量的年均值,分析年代际尺度上的干旱演变情势,结果见图 6。由图 6 可知,西江流域旱情在干旱频次、历时及烈度 3 个方面变化情势基本一致;20 世纪 60 年代和 80 年代是旱情相对严重的年代,21 世纪以来旱情最为严重,具体表现为干旱频次较高、历时较长以及烈度较强;20 世纪 70 年代到 21 世纪初,全流域及各分区的干旱频次、历时、烈度呈波动上升趋势,且 21 世纪初呈陡增趋势,其中云南区上升趋势最为明显,属旱情最严重地区,贵州区次之、广西区旱情程度最低。

### 3.4 历史干旱空间变化特征

图 7 为西江流域 1961—2014 年干旱事件的年均频次、年均历时的空间分布,可见西江流域大部分区域的年均干旱频次高于 2.25 次,其中中部偏西地区干旱频次相对偏低,其他地区年均干旱频次均较高(最高达 3.11 次);54 年间西江流域各网格年均干旱频率保持在 1.68 ~ 3.11 次,表明研究区干旱频

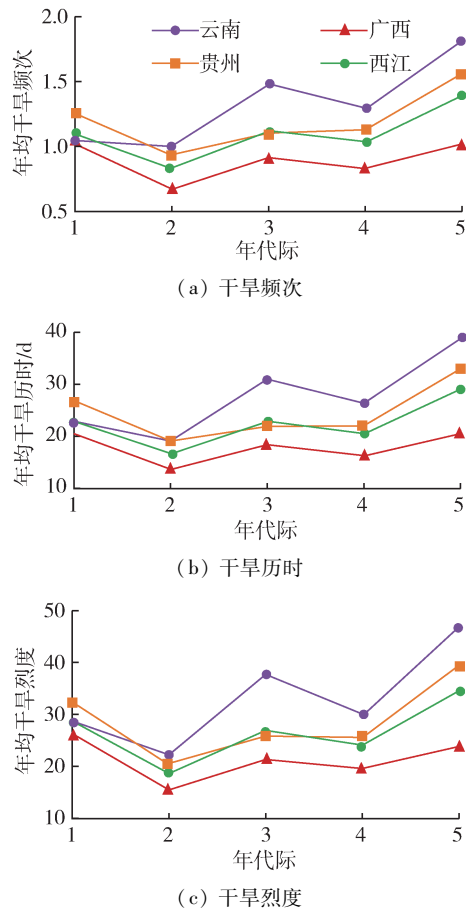


图6 西江流域及各分区干旱特征变量年代际变化情况  
Fig.6 Inter-decadal variation of drought variables in the Xijiang River Basin and various sub-regions

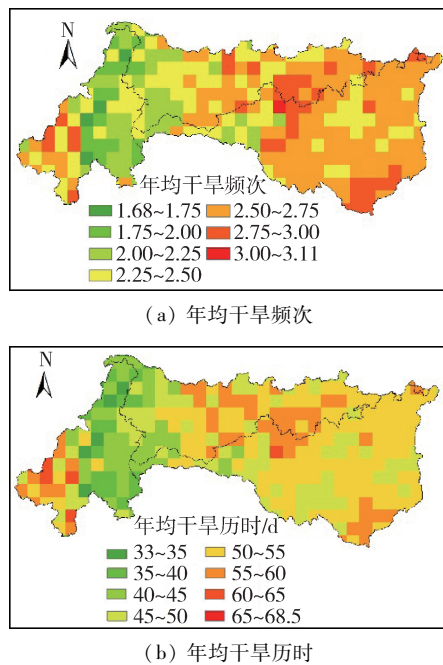


图7 西江流域1961—2014年年均干旱频次和历时的空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of mean annual drought frequency and duration in the Xijiang River Basin from 1961 to 2014

发。研究区年均干旱历时的空间分布与年均干旱频次基本一致,绝大部分区域年均干旱历时在50 d以上,最高可达68.5 d,即西江流域约13.7%~16.8%的时间受干旱影响。

图8为1961—2014年期间西江流域平均干旱烈度和最大干旱烈度的空间分布特征。如图8所示,西江流域中部及西部地区平均干旱烈度相对较高,东部地区则相对较低,但平均烈度数值变化范围较小,表明其空间分布差异性不明显;西江流域中部偏西(贵州西南部)地区的最大干旱烈度最高,西部(云南区)相对较高,东部(广西大部、贵州东南部)地区最低,且其数值变化范围较大,说明最大干旱烈度空间差异性明显。

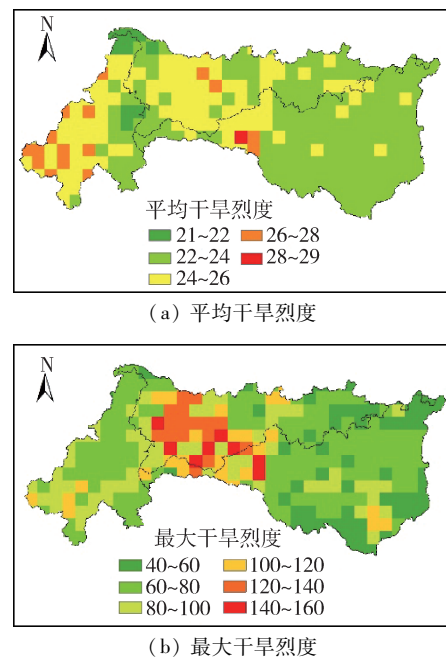


图8 1961—2014年西江流域平均和最大干旱烈度空间分布  
Fig.8 Spatial distribution of mean and maximum drought intensities in the Xijiang River Basin from 1961 to 2014

#### 4 结论

a. 采用SPDI识别的历史干旱事件时空变化过程与年鉴记载基本相符,表明SPDI适用于西江流域的干旱监测和评估。

b. 1961—2014年期间西江流域干旱频次、历时均呈显著上升趋势,云南区、贵州区极端干旱事件发生的时间呈增加趋势,1960、1980和2000年代属于旱情较严重年代,且21世纪以来西江流域总体呈显著干旱化趋势。

c. 西江流域中部偏西地区年均干旱频次较低,其他地区相对较高;干旱历时空间分布与频次基本一致;最大干旱烈度在流域中部偏西地区较高,其余地区相对较低,且空间分布差异明显;平均干旱烈度

空间分布较为均匀。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 杨肖丽,郑巍斐,林长清,等. 基于统计降尺度和SPI的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [ 2 ] 翁白莎,严登华. 变化环境下我国干旱灾害的综合应对[J]. 中国水利, 2010(7): 4-7. (WEN Baisha, YAN Denghua. Reflections on integrated coping strategies for drought in China in changing environment [J]. China Water Resources, 2010(7): 4-7. (in Chinese))
- [ 3 ] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南2009—2014年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29. (in Chinese))
- [ 4 ] HEIM R R J. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [ 5 ] 孙鹏,孙玉燕,姚蕊,等. 基于标准化径流指数的水文干旱特征分析:以塔里木河为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 261-268. (SUN Peng, SUN Yuyan, YAO Rui, et al. Analysis on hydrological drought characteristics based on standardized runoff index: a case study in the Tarim River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2): 261-268. (in Chinese))
- [ 6 ] 慈晖,张强,白云岗,等. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 7-14. (CI Hui, ZHANG Qiang, BAI Yungang, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 7-14. (in Chinese))
- [ 7 ] 张弘,王文卓,李琼芳,等. 不同干旱指数在唐山地区旱情评价中的应用[J]. 水资源保护, 2013, 29(6): 64-69. (ZHANG Hong, WANG Wenzuo, LI Qiongfang, et al. Drought evaluation of Tangshan region using multiple drought indices [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(6): 64-69. (in Chinese))
- [ 8 ] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于SPEI的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 8-13. (in Chinese))
- [ 9 ] 杨礼箫,曾晟轩,蒋忆文,等. 基于PDSI和SPI的黑河上游干旱特征对比分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 132-136. (YANG Lixiao, ZENG Shengxuan, JIANG Yiwen, et al. Comparison of drought characteristics in the upstream of the Heihe River Basin based on Palmer drought severity index and standard precipitation index [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 132-136. (in Chinese))
- [ 10 ] 周蕾,迟永刚,李悦. 基于多源数据的2001—2010年我国干旱时空分布特征[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(4): 448-455. (ZHOU Lei, CHI Yonggang, LI Yue. A multi-index evaluation of drought characteristics in China from 2001 to 2010 [J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences), 2019, 42(4): 448-455. (in Chinese))
- [ 11 ] 张林燕,郑巍斐,杨肖丽,等. 基于CMIP5多模式集合和PDSI的黄河源区干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 95-99. (in Chinese))
- [ 12 ] MA Mingwei, REN Liliang, YUAN Fei, et al. A new standardized Palmer drought index for hydro-meteorological use [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(23): 5645-5661.
- [ 13 ] FISCHER T, GEMMER M, SU B, et al. Hydrological longterm dry and wet periods in the Xijiang River Basin, South China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(1): 135-148.
- [ 14 ] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 51-56. (WU Zhiyong, LIN Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 51-56. (in Chinese))
- [ 15 ] COSBY B J, HORNBERGER G M, CLAPP R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. Water Resources Research, 1984, 20: 682-690.
- [ 16 ] YEVJEVICH V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [J]. Hydrology Papers (Colorado State University), 1967, 19: 23.

(收稿日期:2020-05-09 编辑:王 芳)