

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.006

基于标准化降水指数 SPI 的西江流域多尺度干旱特征及其驱动力分析

李大鹏，慕鹏飞，白 涛，黄 强，黄生志，张 迎

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048)

摘要：为了较为全面表征流域气象干旱的演变特征,本文基于西江流域33个气象站1960—2015年降雨资料,采用标准化降雨指数(SPI)作为干旱指标,分别从年尺度(SPI_{12})和季尺度(SPI_3)两个方面,分析了西江流域地区干旱站次比、干旱频率、干旱趋势和驱动力。结果表明:1)流域各地年降水量分布差异较大,且从东南往西北方向呈明显的逐步减少趋势;2)流域气象干旱处于正常的概率最大,发生极端干旱的概率最小;年尺度(SPI_{12})表征的长期干旱发生频率高于季尺度(SPI_3)表征的短期干旱发生频率;3)流域西北地区SPI序列呈现较为显著的下降趋势,气象干旱有加重的趋势;4)太阳黑子和部分大气环流异常因子对西江流域气象干旱的形成与演变有较大的影响,影响程度高低依次是太阳黑子、北极涛动和厄尔尼诺。研究成果对于评估西江流域干旱灾害的风险性、防旱减灾策略的制定具有一定的参考意义,为干旱的应对和防御提供科学依据。

关键词：气象干旱；标准化降雨指数(SPI)；驱动力分析；西江流域

中图分类号：P426.616 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-4710(2020)01-0041-10

Meteorological drought characteristics and driving force analysis of Xijiang River Basin based on variable scale SPI

LI Dapeng, MU Pengfei, BAI Tao, HUANG Qiang, HUANG Shengzhi, ZHANG Ying

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to comprehensively characterize the evolution characteristics of meteorological drought in the basin, this paper is based on the rainfall data of 33 meteorological stations in the Xijiang River Basin from 1960 to 2015, using the standardized rainfall index (SPI) as the drought index, from the annual scale (SPI_{12}) and the seasonal scale (SPI_3). In two aspects, the sub-ratio of drought stations, drought frequency, drought trend and driving force in the Xijiang River Basin were analyzed. The results show that: 1) The distribution of annual precipitation varies greatly from the southeast to the northwest. 2) The probability of meteorological drought in the basin is the highest, with the probability of extreme drought the smallest; the frequency of the long-term drought characterized by (SPI_{12}) is higher than the short-term drought characterized by seasonal scale (SPI_3). 3) The SPI sequence in the northwestern basin shows a significant downward trend, with the meteorological drought having aggravated. 4) Sunspot and some atmospheric circulation anomalies have a great influence on the formation and evolution of meteorological drought in the Xijiang River Basin. The degree of influence is sunspot, Arctic Oscillation or El Niño. The research results have the certain reference significance for assessing the risk of drought

收稿日期：2019-06-07； 网络出版日期：2020-04-29

网络出版地址：<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200429.0934.002.html>

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405900);中国博士后科学基金资助项目(2019T120933, 2017M623332XB);陕西省博士后科研资助项目(2017BSHYDZZ53);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2019JLM-52, 2018JQ5145);陕西省水利科技计划资助项目(2017slkj-16, 2017slkj-27)

第一作者：李大鹏,男,博士生,研究方向为环境工程。E-mail: dapeng.li@suez.com

通信作者：慕鹏飞,男,硕士生,研究方向为水资源系统工程。E-mail: pengfeimu@hotmail.com

disasters in the Xijiang River Basin and the formulation of drought prevention and mitigation strategies, providing a scientific basis for drought response and defense.

Key words: meteorological drought; standardized rainfall index (SPI); driving force analysis; Xijiang River Basin

随着全球气候变暖,在气候变化和人类活动的双重作用下,干旱等极端事件发生的频率和强度逐渐增加,对干旱的研究刻不容缓。

西江,我国第四大河流,是珠江水系的干流之一,也是珠江水系中最长的河流。西江流域属于热带、亚热带季风气候,由于处于极地大陆的高压边缘,冬季盛行偏东北季风,为干旱季节,暴雨较少^[1]。西江流域在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^[2],对云南、贵州等区域的社会生活和农业生产造成了极大影响。因此,从多个层面全面研究流域干旱演变特征显得尤为重要。

由于干旱的影响范围之大,程度之深,已经引起国内外专家的高度关注。其中干旱指标是描述干旱特征的基本工具,在分析干旱中起着重要作用^[3]。研究者们常采用影响干旱的不同因素建立不同的干旱指标,对干旱强度、干旱频率、持续时间等进行客观的时空比较,从而达到研究目的。近年来,国内外专家对干旱指标开展了大量的研究,提出了各种干旱指标的计算方法及使用范围^[4]。Heim Jr 等^[5]通过研究发现 SPI 比 Z 指数具有更好的计算稳定性。周扬等^[6]基于 SPI 指数,从干旱频率和强度等方面综合分析了内蒙古地区干旱时空分布特征。

为了全面地表征西江流域气象干旱的演变特征,本文选取不同时间尺度的 SPI 指数作为气象干旱分析的基础指标,从干旱站次比、干旱频率、干旱趋势和驱动力等方面分析了 1960—2015 年西江流域的气象干旱演变特征。研究成果对于评估西江流域气象干旱灾害的风险性、提出防旱减灾具有重要意义,对合理优化水资源利用方案以及规避气象干旱造成的灾害具有一定的指导意义。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

西江位于东经 $102^{\circ}14' \sim 114^{\circ}50'$, 北纬 $21^{\circ}31' \sim 26^{\circ}49'$ 之间, 发源于云南, 流经贵州、广西和广东。西江流域地势大体上是从西北向东南倾斜, 地貌主要有山地、丘陵和平原三种基本类型, 其中流域的上游多为高山, 中游多为丘陵和台地, 下游则为地势较低的平原^[1]。

1.2 数据

本文研究所用的 1960—2015 年日降雨数据以及地理高程数据分别来源于中国气象数据网和中国科学院数据云。处理后的数据覆盖了西江流域的 33 个气象站。

西江流域范围以及各站点所在位置见图 1。

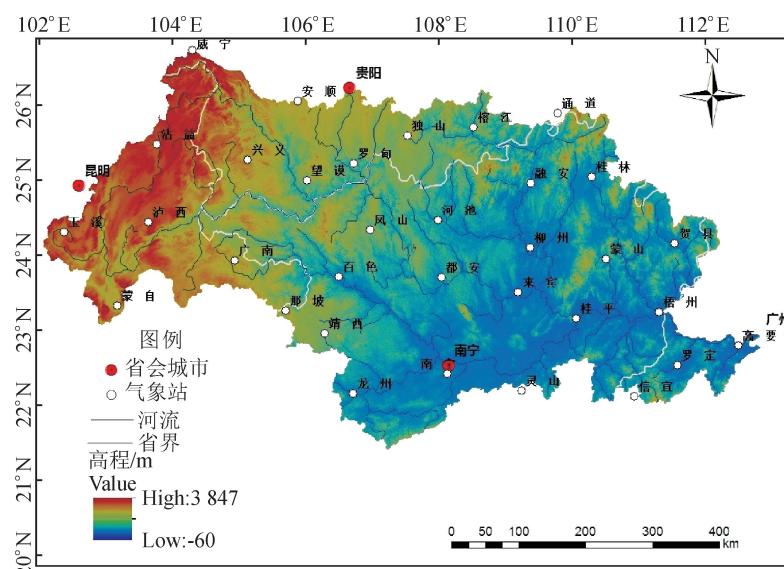


图 1 西江流域及代表性气象站点分布

Fig. 1 Distribution of Xijiang River Basin and representative meteorological stations

2 研究方法

2.1 标准化降水指数(SPI)

标准化降水指数 SPI 是比较常见的几种干旱指标之一,最早是由 Mckee 等^[7]在 1993 年提出,指数对应的干旱与湿润等级分类见表 1。

表 1 依据标准化降水指数的湿润与干旱等级

Tab. 1 Drought and wet period classification according to the SPI index

类型	SPI 值
极度干旱	($-\infty$, -2.0]
严重干旱	(-2.0, -1.5]
中度干旱	(-1.5, -1.0]
接近正常	(-1.0, 1.0]
中度湿润	(1.0, 1.5]
严重湿润	(1.5, 2.0]
极度湿润	[2.0, $+\infty$)

SPI 计算是基于反映干旱的主要因素—降水,同其它干旱指标相比,SPI 计算简单,具有稳定的计算特性,并且可以实现多时间尺度分析^[8],目前已广泛应用于气象干旱的监测^[9]。其中短时间尺度(一个月、三个月、六个月)的 SPI 表征短期干旱情况,常用于监测短时期内的水分盈亏情况,而年尺度及更长时间尺度(12 个月、24 个月等)的 SPI 代表流域较长时间内的水分盈亏情况,可以比较清楚地反映流域旱涝的阶段性变化^[9]。

2.2 交叉小波变换法

交叉小波变换(Cross Wavelet Transform, XWT)具有较强的信号耦合和分辨能力,可以分析两个时间序列(比如:干旱指数和各气候要素)中具有较高共振能量的共振周期及其相位关系^[10]。

交叉小波分析法采用 Morlet 小波^[11]分析两个序列($x(t), y(t)$)。两个序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的交叉小波谱为^[11]:

$$W_{xy}(a, \tau) = C_x(a, \tau)C_y^*(a, \tau) \quad (1)$$

式中: $C_x(a, \tau)$ 是序列 $x(t)$ 的小波变换系数; $C_y^*(a, \tau)$ 是序列 $y(t)$ 的小波变换系数的复共轭。交叉小波能量谱能够揭示出两个序列经小波变换在不同时频域上的结构特征^[11]。

2.3 干旱评价指标

本文从干旱发生频率、干旱趋势和干旱站次比三个方面评价西江流域近 55 年的干旱特征,各指标解释为如下^[6]。

1) 干旱频率 P_i :是指在有资料的年份内某研究

站点发生干旱的年份占总年份的百分比,计算公式为:

$$P_i = n/N \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 为该站发生干旱的总年数, N 为某站有气象资料的年数, i 代表不同的站点。本文把中度干旱(含中度干旱及以上)发生的年份均算为干旱。

2) Mann-Kendall 趋势检验:在时间序列趋势分析中,Mann-Kendall 检验法是一种已广泛使用的非参数检验方法^[12]。通过对检验的统计变量进行标准化得到统计量 Z 。若 $Z > 0$, 则序列呈上升趋势;若 $Z < 0$, 则序列呈下降趋势。在 $|Z| \geq 1.64$ 及 1.96 时, 分别表示序列通过了置信度 90% 和 95% 的显著性检验。

3) 干旱站次比 P_j :指某一区域内发生干旱的站点数占全部站点数的百分比,用于评价干旱的影响范围^[6]。计算公式为:

$$P_j = m/M \times 100\% \quad (3)$$

式中: m 为发生干旱的站数, M 为研究区域总气象站数(本文中 $M = 33$), j 代表不同的年份。干旱站次比表征的流域干旱影响范围等级划分见表 2^[6]。

表 2 流域干旱影响范围等级划分

Tab. 2 Classification of drought impact ranges in the basin

类型	干旱站次比 P_j 范围/%
无明显干旱	[0,10)
局域性干旱	[10,25)
部分区域性干旱	[25,33)
区域性干旱	[33,50)
全域性干旱	[50,100)

2.4 加权 Markov 链法

Markov 过程是研究事物的状态及状态转移的理论,通过不同状态的初始概率和状态的转移概率来确定状态之间的变化趋势,以达到预测的目的。它既适用于时间序列,也适用于空间序列。状态的变化过程需要满足 Markov 的无后效性(马氏性),即过程“现在”的状态已知,其“将来”的状态与“过去”的状态无关。

加权 Markov 链法预测的基本原理是确定序列中各个时段所处的状态,建立序列的各阶转移概率矩阵,利用规范化的自相关系数作为权重,将某一状态的各概率加权和作为指标值处于该状态的预测概率,从而预测该指标值所处的状态,分析序列的遍历性确定状态的重现期^[13]。

设 π_i 、 π_j 分别为状态 i, j 的平稳分布,存在下列方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_j = \sum_{i=1}^5 \pi_i p_{ij} \\ \sum_{j=1}^5 \pi_j = 1, \pi_j \geq 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

根据状态转移概率矩阵,可计算出平稳分布与各状态的重现期 $T_j = \frac{1}{\pi_j}$ 。

干旱指数是一系列相依的随机变量,因此运用加权 Markov 链法预测干旱状况时可通过各阶自相关系数来表征各滞时的干旱指数间的相关关系以及强弱。加权 Markov 链法预测实现的具体步骤为如下^[14]。

1) 依据标准化降水指数的湿润与干旱等级(见表 1)确定分级标准,建立指标值序列中各个时段所处的状态空间 $E=\{1,2,\dots,m\}$ 。

2) 计算状态转移概率矩阵,其公式为:

$$P_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^m f_{ij}} \quad (m \leq 5) \quad (5)$$

式中: f_{ij} 为指标值序列 x_1, x_2, \dots, x_n 为从状态 i 到状态 j 的频数, P_{ij} ($i, j \in E$) 为状态转移概率。

3) 随机过程是否满足“马氏性”是应用加权 Markov 链模型进行分析和解决问题的主要前提。通常可利用 χ^2 检验法对指标值序列进行马氏检验。当指标序列数充分大时,统计量服从自由度为 $(m-1)^2$ 的 χ^2 分布。通过给定显著性水平 α ,若 $\chi^2 > \chi_{\alpha}^2[(m-1)^2]$,则满足马氏性。

4) 计算各阶自相关系数;

$$r_k = \sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X}) / \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2 \quad (6)$$

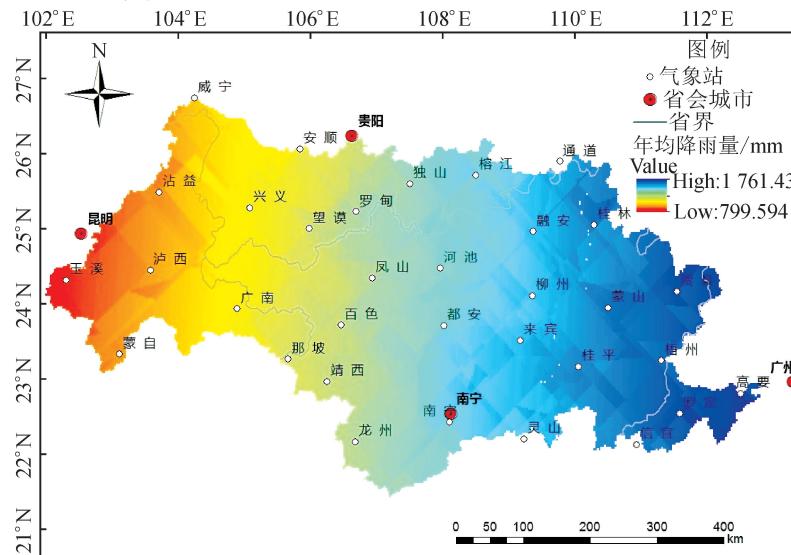


图 2 西江流域多年平均降水量分布
Fig. 2 Spatial distribution of annual precipitation in the Xijiang River Basin

式中: r_k 表示第 k 阶的自相关系数; X_t 为时间序列第 t 时刻对应的值, \bar{X} 为时间序列平均值; n 为时间序列长度。

5) 对各自相关系数进行规范化处理:

$$\omega_k = |r_k| / \sum_{k=1}^m |r_k| \quad (7)$$

式中: ω_k 为各种滞时的 Markov 权重, m 为预测时需要计算的最大阶数。

6) 对步骤 1) 的结果进行统计,得到不同步长的状态转移概率矩阵,进一步对加权 Markov 链的遍历性、平稳分布等进行分析^[13]。存在下列方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_j = \sum_{i=1}^5 \pi_i p_{ij} \\ \sum_{j=1}^5 \pi_j = 1, \pi_j \geq 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: i, j 为状态, π_i 、 π_j 分别为状态 i, j 的平稳分布; P_{ij} 为状态 i 到 j 的一步转移概率。根据状态转移概率矩阵,可计算出平稳分布与各状态的重现期 $T_j = \frac{1}{\pi_j}$ 。

3 结果分析

3.1 流域年平均降雨量分析

基于西江流域 33 个气象站点近 56 年日降雨数据(1960—2015)所得的各个站点年平均降雨量,使用 ArcGIS10.1 中协同 Kriging 插值法得到西江流域年均降雨量空间分布图,见图 2。

从图 2 中可知如下结果。

1) 西江流域各地年降水量分布差异较大,800~1 800 mm 均有分布,且从东南往西北方向呈明显的逐步减少趋势。

2) 流域内云南省地区地势相对较高,年降水量为 800~1 100 mm,为西江流域年降水量最少的区域;流域内广东省部分地区地势相对较低,年降水量为 1 600~1 800 mm,为西江流域年降水量最多的区域。

3.2 流域年度干旱特征

短时间尺度的 SPI(3 个月)受到短时间降雨的影响比较大,因而对逐月降雨的反映较为显著,能够很好的反映短期干旱的快速变化;长时间尺度(12 个月)虽然对短期降雨的反应减慢,但是能够更明显的表达干旱周期以及可以更直观清楚地反映干旱长期变化的特征。因此,本文基于 3 个月尺度 SPI(季尺度 SPI₃)表征短期干旱、12 个月尺度 SPI(年尺度 SPI₁₂)表征长期干旱来研究西江流域干旱演变特征。

基于标准化降雨指数,统计出西江流域干旱站次比,见图 3。

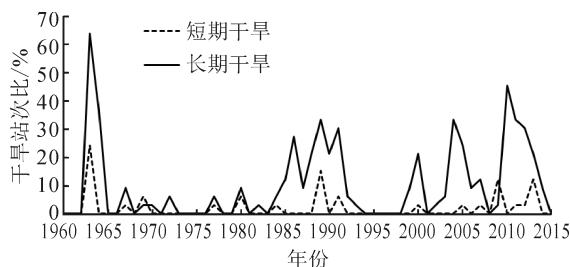


图 3 1961—2015 年西江流域干旱站次比演变

Fig. 3 Proportion of drought stations in the Xijiang River Basin from 1961 to 2015

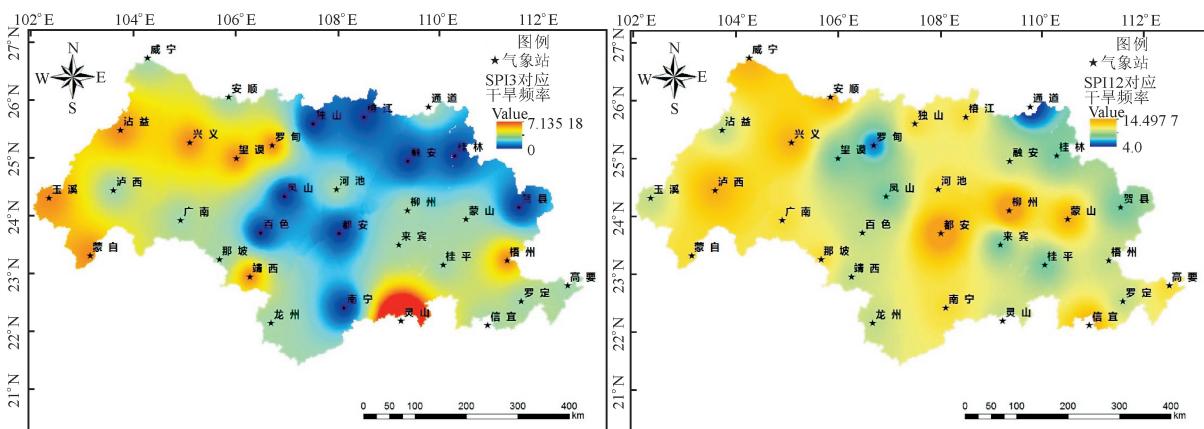


图 4 西江流域地区干旱频率分布

Fig. 4 Drought frequency distribution in Xijiang River Basin

根据干旱站次比的评判标准,从图 3 中可知如下结果。

1) 短期干旱在近 55 年中大部分年份站次比在 10% 以内,说明无明显干旱发生。

2) 短期干旱在 1963、1989、2009 年以及 2013 年干旱站次比在 10%~25% 之间,说明在这些年份流域发生过局域性干旱。

3) 长期干旱对应有 7 年干旱站次比在 10%~25% 之间,发生过局域性干旱;有 3 年干旱站次比在 25%~33% 之间,发生过部分区域性干旱;有 5 年干旱站次比在 33%~50% 之间,发生过区域性干旱。

4) 长期干旱在 1963 年干旱站次比高达 63%,可知流域内有一半以上的站点发生干旱,说明流域在 1963 年发生过全域性干旱。

5) 自 20 世纪 80 年代以来,长期干旱对应的干旱站次比有上升的趋势,与相关学者^[16]得出的结论“珠江流域整体呈现出干旱化的趋势”一致。

基于西江流域 33 个气象站点近 55 年(1961—2015)SPI₃ 和 SPI₁₂ 指数所得到的各气象站点的干旱频率,使用 ArcGIS10.1 中反距离权重插值法(IDW)得到研究区域干旱频率分布图,见图 4。

从图 4 中可知如下结果。

1) 流域内云南以及贵州部分地区 SPI₃ 对应的干旱频率在 3%~6%,广西境内的大部分地区 0%~2%(灵山气象站附近区域干旱频率 7% 左右),流域内广东省部分地区干旱频率在 1% 左右。

2) 流域内大部分地区 SPI₁₂ 对应的干旱频率在 9%~14%。

3) 不同时间尺度的 SPI 对干旱情况的表征效果不同。

3.3 应用加权 Markov 链的干旱概率分析

依据标准化降水指数的湿润与干旱等级^[8](见表 1), 将中度湿润、严重湿润和极度湿润划分为湿润, 对干旱进行分级, 见表 3。

表 3 湿润与干旱状态分级

Tab. 3 Wet and dry state classification

状态	类型	SPI 值
5	极度干旱	($-\infty, -2.0$)
4	严重干旱	($-2.0, -1.5$)
3	中度干旱	($-1.5, -1.0$)
2	正常	($-1.0, 1.0$)
1	湿润	($1.0, +\infty$)

对西江流域 1961—2015 年间 SPI₃ 和 SPI₁₂ 序列

进行状态划分, 部分结果见表 4。对 1961—2015 年间 SPI₃ 和 SPI₁₂ 序列资料进行马氏检验。利用 x^2 检验法进行检验, 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 查表对比分析可知: SPI₃ 和 SPI₁₂ 序列资料满足马氏性。

表 4 西江流域 1961—2015 年间 SPI₃ 和 SPI₁₂ 序列和状态Tab. 4 SPI₃ and SPI₁₂ sequences and states in the

Xijiang River Basin from 1961 to 2015

年/月	SPI ₃	SPI ₁₂
1961/1	-0.2	-0.89
1961/2	-0.58	-0.68
...
2015/12	2.72	1.87

计算 1~5 阶自相关系数及其权重, 结果见表 5。

表 5 1~5 阶自相关系数及其权重

Tab. 5 1~5 Order autocorrelation coefficient and its weight

序列	项目	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
SPI ₃	r_k	0.515 7	0.226 4	-0.011 0	-0.041 2	-0.065 9
	ω_k	0.599 5	0.263 2	0.012 8	0.047 9	0.076 6
SPI ₁₂	r_k	0.823 3	0.702 5	0.619 9	0.543 0	0.467 6
	ω_k	0.261 5	0.223 1	0.194 4	0.172 5	0.148 5

平稳分布与各状态重现期。根据 1961—2015 年间的 SPI₃ 和 SPI₁₂ 序列以及上述各个步长对应的 Markov 链状态转移概率矩阵, 选择相依性较强的步长为 2 的加权 Markov 链进行分析。标准化降雨指数

的 Markov 链的 5 个状态是互通的, 且非周期, 由 Markov 链理论可知, 此链具有遍历性, 且存在唯一的平稳分布。通过步长为 2 的状态转移概率矩阵以及式(8)计算出的平稳分布与各状态的重现期见表 6。

表 6 平稳分布与各状态的重现期

Tab. 6 Smooth distribution and return period of each state

序列	项目	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
SPI ₃	π_j	0.144	0.691	0.097	0.046	0.023
	T_j	7.0	1.4	10.4	21.8	43.8
SPI ₁₂	π_j	0.163	0.694	0.065	0.044	0.035
	T_j	6.2	1.4	15.3	22.8	28.7

按照本文的分级标准, 由表 6 可知: 在 1961—2015 年间, 流域短期和长期气象干旱均处于正常的概率最大, 平均每隔 1.4 月出现一次; 极端干旱情况出现的概率最小, 其中短期平均每隔 43.8 月才出现一次, 长期平均每隔 28.7 月才出现一次, 说明长期气象干旱发生频率高于短期气象干旱发生频率。

3.4 空间趋势分布分析

对西江流域各个气象站 1960—2015 年间的不同时间尺度 SPI 所对应的 MK 值在 ArcGIS10.1 软件中利用反距离权重插值法(IDW)进行插值, 分析干旱趋势的空间分布, 见图 5。

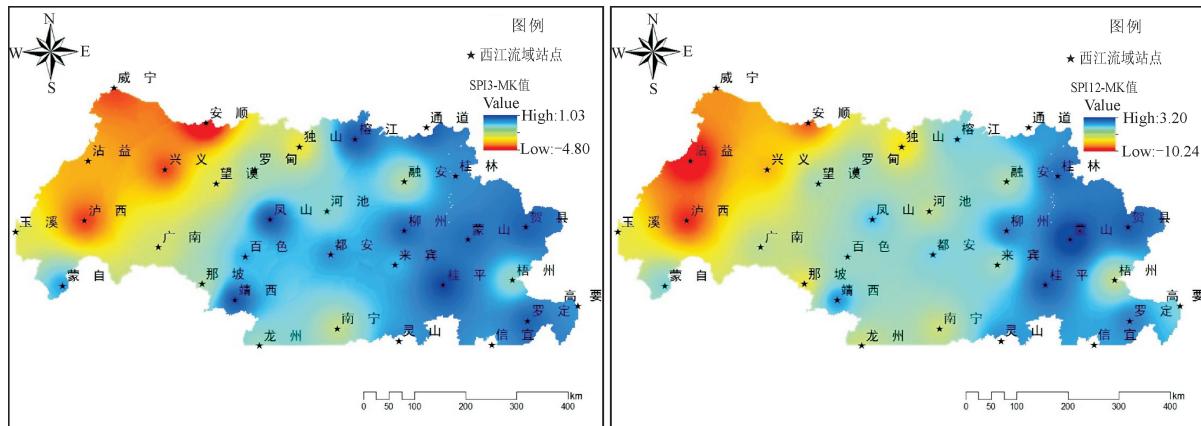


图 5 西江流域干旱趋势变化空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of drought trend change in Xijiang River Basin

从图 5 中可知如下结果。

1) 西江流域西北地势较高的地区(主要集中在流域内云南和贵州部分地区),SPI 呈现较为显著的下降趋势,干旱有加重的趋势,与相关学者得出的“近 57 年来该流域大部分地区干旱呈现显著的加重趋势”^[15]一致,且通过查阅流域内各省的干旱资料可知,2009 年 8 月广西、贵州、云南三省交汇区域降雨极少,遭遇了 50 年以来少有的极端干旱,进一步验证了结果的准确性和合理性。

2) 流域内广西以及广东部分地区 SPI 有不显著的上升趋势,干旱情况较为缓和。

3) 年尺度 SPI₁₂ 对应的显著性程度高于季尺度 SPI₃。

3.5 气象干旱演变的驱动力分析

为进一步探究除降雨因素外流域干旱的其他成因,本文通过交叉小波分析法分析干旱演变的驱动力。

对于气象干旱的主要驱动因素可以归纳为:太阳辐射、大气环流、下垫面以及人为因素。根据实际

情况,本论文主要选取太阳黑子、北极涛动(Arctic Oscillation, AO)、太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)以及 Nino3.4 区海温(ENSO)四种气象因子,分别分析它们对西江流域干旱的影响。

交叉小波图谱中:细黑线为有效谱值区,区内粗黑线为显著性水平为 95% 的置信区间,箭头表示相位差,箭头向右表示两时间序列变化相位一致,箭头向左表示两时间序列变化相位相反,箭头向上表示气象因子变化超前干旱指数变化,箭头向下表示气象因子变化落后干旱指数变化;最右侧小波变换系数越大代表相关性越高^[17]。

3.5.1 太阳黑子对 SPI 的影响

太阳辐射是气候系统的主要能源,并且是大气中一切物理过程和现象发展的基本动力,是气候形成的根本因素。其中太阳黑子是在太阳的光球层上发生的一种太阳活动,是太阳活动中最基本,也是最明显的活动现象。

基于交叉小波理论对太阳黑子与各尺度 SPI 在时频域层面进行分析,见图 6。

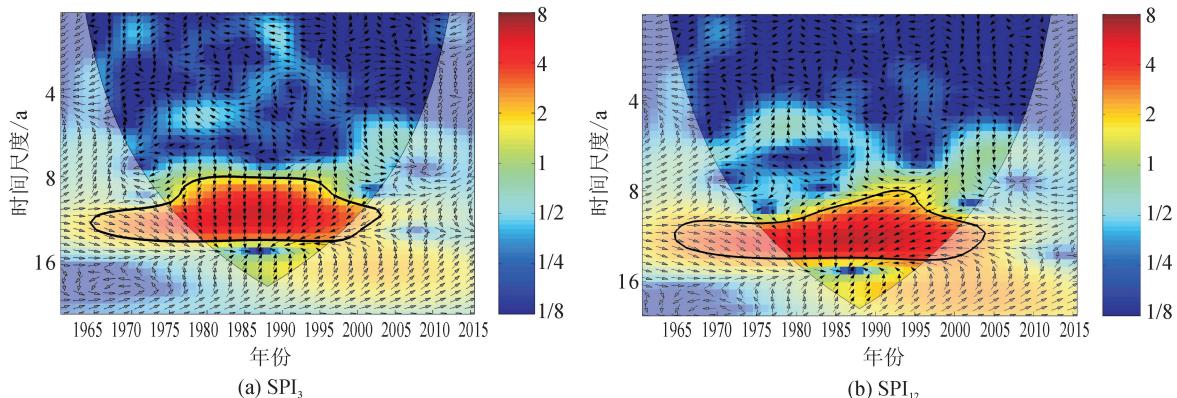


图 6 太阳黑子与不同时间尺度 SPI 之间的交叉小波关系

Fig. 6 Cross-wavelet relationship between sunspot activity and SPI at different time scales

由图6可知如下结果。

- 1) 太阳黑子与 SPI₃和 SPI₁₂之间均存在1个共振周期,其中SPI₃对应为7~13年左右(1964—2002)的周期,SPI₁₂对应为8~15年左右(1965—2005)的周期。
- 2) 高能区各尺度均集中在1975—1995附近。
- 3) 位相差表明太阳黑子与 SPI₃和 SPI₁₂在1985—2000之间呈现负相关关系。

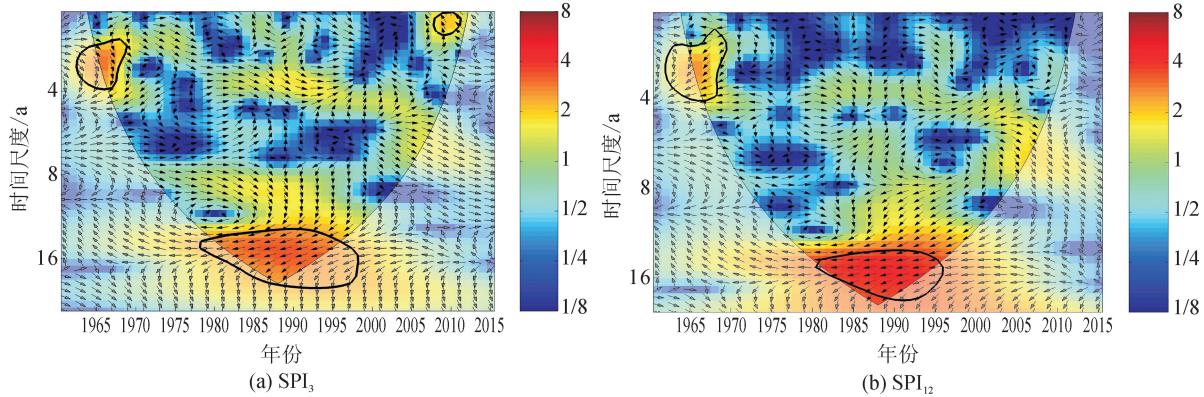


图7 北极涛动(AO)与不同时间尺度 SPI 之间的交叉小波关系

Fig. 7 Cross-wavelet relationship between arctic oscillation (AO) and SPI at different time scales

由图7可知如下结果。

- 1) AO与SPI₃存在3个共振周期,与SPI₁₂存在2个共振周期。
- 2) AO与SPI₃在1963—1969存在周期为2~4年的正相关关系,在1978—1999存在周期为14~17年的负相关关系。
- 3) AO与SPI₁₂在1962—1970存在周期为2~4年的负相关关系;在1980—1999存在周期为14~18年的负相关关系。

3) AO与SPI₁₂在1962—1970存在周期为2~4年的负相关关系;在1980—1999存在周期为14~18年的负相关关系。

- 4) 太阳黑子变化落后于各时间尺度的干旱指数。

3.5.2 北极涛动(AO)对 SPI 的影响

北极涛动是指位于极地主要动机海平面气压场活动中心都相应地围绕极地、以45°N为中心,呈环状分布都中纬度地区的距平变化相反的现象,对北半球及区域性气候有重要影响。基于交叉小波理论对北极涛动AO与各尺度SPI在时频域层面进行分析,见图7。

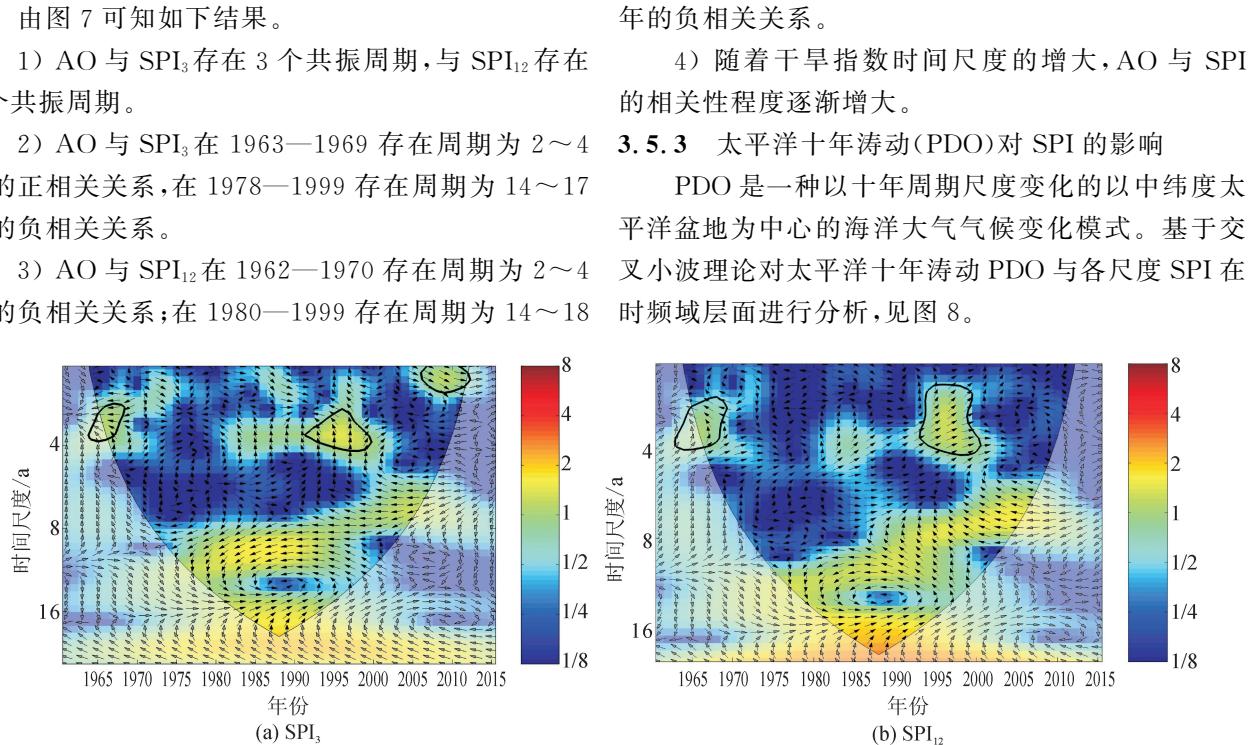


图8 PDO与不同时间尺度 SPI 之间的交叉小波关系

Fig. 8 Cross-wavelet relationship between PDO and SPI at different time scales

由图8中置信区域的色相程度变化可知:各尺度 SPI 与 PDO 的相关性程度均比较低。

3.5.4 Nino3.4 区海温对 SPI 的影响

Nino3.4是基于海表温度的若干厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)指标之一。ENSO事件的形成和发展

造成了北半球大气环流和我国气候异常,产生全球尺度的气候震荡,从而导致各地发生干旱以及洪水灾害^[18]。

基于交叉小波理论对厄尔尼诺与各尺度 SPI 在时频域层面进行分析,见图9。

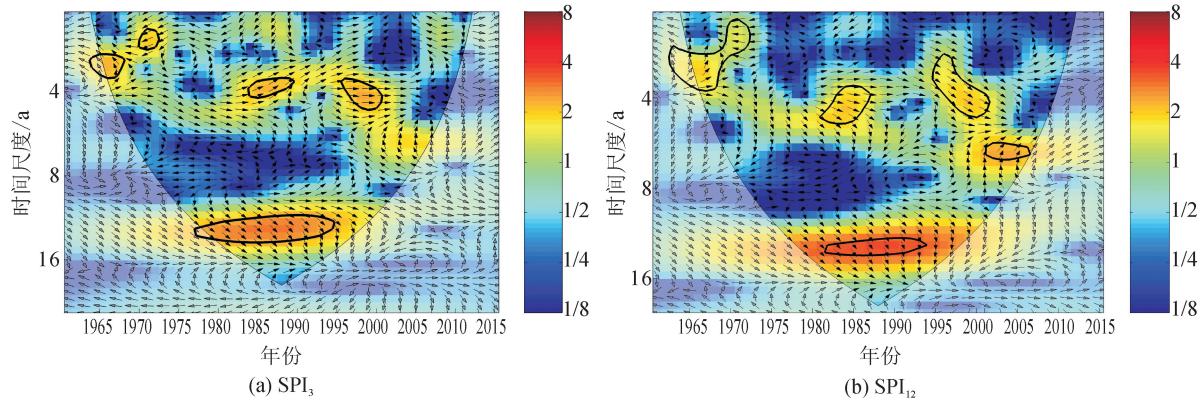


图 9 ENSO 事件与不同时间尺度 SPI 之间的交叉小波关系
Fig. 9 Cross-wavelet relationship between ENSO events and SPI at different time scales

由图 9 可知如下结果。

1) ENSO 与 SPI₃ 存在 5 个共振周期, 与 SPI₁₂ 存在 5 个共振周期。

2) Nino3.4 区海温与全流域 SPI₃ 在 1964—1968 有周期为 2~3 年的负相关关系, 在 1970—1973 有周期为 1~2 年的负相关关系, 在 1976—1995 有周期为 12~14 年的正相关关系, 在 1983—1988 有周期为 3~4 年的正相关关系, 在 1996—2001 有周期为 3~5 年的正相关关系。

3) Nino3.4 区海温与全流域 SPI₁₂ 在 1963—1968 有周期为 2~4 年的正相关关系, 在 1968—1972 有周期为 1~2 年的负相关关系, 在 1980—1995 有周期为 13~14 年的正相关关系, 在 1980—1986 有周期为 3~5 年的正相关关系, 在 1995—2002 有周期为 2~5 年的正相关关系。

4) 随着干旱指数时间尺度的增大, ENSO 与 SPI 之间的相关性程度越来越高。

3.5.5 小结

通过交叉小波图谱中置信区域的色相变化程度, 分析比较不同时间尺度下的 SPI 与太阳黑子和各大气环流异常因子之间的相关性程度。对比分析发现两点结论。①太阳黑子活动以及各大气环流异常因子对标准化降雨指数(SPI)的影响程度高低依次为: 太阳黑子活动、AO、ENSO。②随着 SPI 时间尺度的增大, 大气环流异常因子与 SPI 之间的相关性程度有明显的增强; 但太阳黑子活动与 SPI 之间的相关性程度变化不明显。

4 结论与展望

1) 西江流域气象干旱主要以局域性干旱为主, 且主要发生在流域的西北地区并有逐渐加重的趋势。因此, 流域相关部门应该加大对西江流域西北地区的干旱监测力度, 需要提前做好防旱减灾的准备。

2) 西江流域气象干旱情况处于正常的概率最

大, 处于极端干旱的概率最小。长期干旱发生频率高于短期干旱发生频率, 自 20 世纪 80 年代以来, 大部分年份均有局域性干旱发生。因此, 需要考虑采取有效措施来应对在未来可能发生的上述情况。

3) 西江流域气象干旱的演变受到太阳黑子活动和大气环流异常因子的共同影响。其中, 太阳黑子的活动是其主要的驱动力。

4) 从季尺度到年尺度, AO、ENSO 与 SPI 之间的相关性程度逐渐增强, 这可能是由于大气环流异常因子在地理空间上涉及广泛, 短时间尺度的干旱指数相比于长时间尺度干旱指数, 其响应大气环流异常因子较为滞后。

本文仅考虑了气象干旱, 未将水文干旱、农业干旱以及社会经济干旱等结合起来综合考虑, 下一步将对西江流域地区的综合干旱指标、干旱演变特征和干旱预警进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 张峰. 西江流域分布式水文模拟及其应用研究[D]. 上海:东华大学,2012.
ZHANG Feng. Research on distributed hydrological simulation and its application in Xijiang River Basin[D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [2] 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.
- [3] 钟锋,粟晓玲,宋悦. 泾惠渠灌区干旱指数的变化趋势及其敏感性分析[J]. 自然灾害学报,2015,24(6):97-104.
ZHONG Feng, SU Xiaolin, SONG Yue. Trend and sensitivity of aridity index in Jinghuiqu irrigation area[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(6): 97-104.
- [4] HEIM JR R R. 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] HEIM JR R R, 周跃武, 冯建英, 等. 美国 20 世纪干旱指数评述[J]. 干旱气象, 2006, 24(1): 79-89.
- HEIM JR R R, ZHOU Yuewu, FENG Jianying, et al. A review of Twentieth-century drought index in the United States[J]. Arid Meteorology, 2006, 24(1): 79-89.
- [6] 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.
- ZHOU Yang, LI Ning, JI Zhongui, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on standard precipitation index (SPI) in Inner Mongolia during 1981-2010 [J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28 (10): 1694-1706.
- [7] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration of time scales [C]//American Meteorological Society. 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim: American Meteorological Society, 1993: 179-184.
- [8] 黄生志, 黄强, 王义民, 等. 基于 SPI 的渭河流域干旱特征演变研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 15-22.
- HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yiming, et al. Evolution of drought characteristics in the Weihe River Basin based on standardized precipitation index[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 15-22.
- [9] 王连喜, 边超钧, 李琪, 等. 陕西省干旱变化特征及其对玉米产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 193-199.
- WANG Lianxi, BIAN Chaojun, LI Qi, et al. Characteristics of drought change in Shaanxi Province and their influence on corn yield[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 193-199.
- [10] 胡胜, 邱海军, 宋进喜, 等. 气候变化对秦岭北坡径流过程的影响机制研究-以灞河流域为例[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 967-978.
- HU Sheng, QIU Haijun, SONG Jingxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on runoff process in the north slope of Qinling Mountains: a case of the Bahe River Basin[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 967-978.
- [11] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37 (6): 1137-1146.
- LIU Zhifang, LIU Youcun, HAO Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1137-1146.
- [12] 肖紫薇, 石朋, 胡健伟, 等. 淮河流域上游不同尺度降雨集中度时空变化分析[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33 (1): 74-79.
- XIAO Ziwei, SHI Peng, HU Jianwei, et al. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(01): 74-79.
- [13] 钱会, 李培月, 王涛. 基于滑动平均-加权马尔科夫链的宁夏石嘴市年降雨量预测[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(1): 6-9.
- QIAN Hui, LI Peiyue, WANG Tao. Precipitation predictionon Shizuishan City in Ningxia Province based on moving average and weighted markov chain[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(1): 6-9.
- [14] 杜懿, 麻荣永, 赵立亚. 南宁市年降水量的加权马尔科夫链预测研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(2): 5-7.
- DU Yi, MA Rongyong, ZHAO Liya. Study on the weighted markov chain prediction of annual precipitation in Nanning City[J]. Pearl River, 2018, 39(2): 5-7.
- [15] 张立杰, 李健. 基于 SPEI 和 SPI 指数的西江流域干旱多时间尺度变化特征[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 560-567.
- ZHANG Lijie, LI Jian. Spatiotemporal change of drought at various time scales indicated by SPEI and SPI in Xijiang River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(2): 560-567.
- [16] 罗岚心, 姜彤, 孙赫敏, 等. 珠江流域旱涝变化及其与大气环流关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 142-147.
- LUO Lanxin, JIANG Tong, SUN Hemin, et al. Variation of droughts and floods and their connection with atmospheric circulation in the Pearl River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31 (4): 142-147.
- [17] 张迎, 黄生志, 黄强, 等. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 703-714.
- ZHANG Ying, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 703-714.
- [18] 李艳玲, 畅建霞. 基于 Morlet 小波的径流突变检测[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(3): 322-325.
- LI Yanling, CHANG Jianxia. Detection of the abrupt changes in runoff based on the Morlet wavelet[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 322-325.

(责任编辑 王绪迪)