

# 南盘江流域水文干旱对气象干旱的响应特征

张建龙<sup>1</sup>, 王 龙<sup>1</sup>, 杨 蕊<sup>1</sup>, 李依耘<sup>1</sup>, 阮建清<sup>2</sup>

(1. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 2. 云南省水利水电建设管理与质量安全中心, 昆明 650224)

**摘要:** 选取南盘江流域3个站点40年(1970年-2009年)的逐月径流资料和20个站点同期逐月降水资料, 计算标准化径流指数(SSFI)和不同时间尺度的标准化降水指数(SPI), 从中选取水文干旱样本和同期的SPI进行统计分析, 研究水文干旱对气象干旱的响应特征。结果表明: 南盘江流域SSFI对SPI具有良好的响应关系; SSFI对SPI的响应关系随时间尺度的不同相关性不同; 总体来看, 流域内水文干旱对气象干旱的响应时间约为6个月。

**关键词:** 南盘江流域; 水文干旱; 气象干旱; 响应; 统计分析

**中图分类号:** P338+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0029-04

## Response Characteristics of Hydrological Droughts to Climatic Droughts in Nanpan River Basin

ZHANG Jian long<sup>1</sup>, WANG Long<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>1</sup>, LI Yi yun<sup>1</sup>, RUAN Jian qing<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources, Hydraulic Power and Architecture, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Water Conservancy and Hydropower Construction Management and Quality Safety Center, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The monthly streamflow data at 3 stations and monthly precipitation data at 20 stations of 40 years (1970 to 2009) in the Nanpan River Basin were selected to calculate the standardized streamflow index (SSFI) and standardized precipitation index (SPI) of different time scales (3, 6, 9, 12, 24 months). The SSFI for the hydrological drought samples from the computing results and SPI of the same period were selected to perform statistical analysis and then to investigate the response of hydrological droughts to climatic droughts. The results showed that (1) SSFI has good response to the SPI in the Nanpan River Basin; (2) the correlation between SSFI and SPI varies with time scale; and (3) the response time of hydrological droughts to climatic droughts is about 6 months in general.

**Key words:** Nanpan River Basin; hydrological drought; climatic drought; response; statistical analysis

气象干旱是指某时段内, 因蒸发量和降水量收支不平衡, 水分支出大于收入而造成水分短缺现象<sup>[1]</sup>。水文干旱则指一个地区水文循环的某些部分长期缺水的现象<sup>[2]</sup>, 这里的空间尺度至少为一个流域, 时间尺度为月、季或年等, 水文循环部分一般指河川、地下径流及水库、湖泊蓄水。气象干旱发展、结束较快, 水文干旱则是气象干旱的结果。两种干旱类型在一定程度上反映了干旱发展的不同阶段, 一般而言, 水文干旱晚于气象干旱, 延迟时间取决于产流过程以及水库和湖泊储水<sup>[3]</sup>。因此, 研究水文干旱对气象干旱的响应特征, 对通过气象干旱监测预警水文干旱具有重要意义。

不同地区水文干旱对气象干旱的响应特征取决于流域的物理属性(地质、土壤、植被覆盖率)、气候条件(蒸发率、雪覆盖率、降雨强度)以及流域管理等因素<sup>[4-6]</sup>。因此, 本文以

南盘江流域为研究区域, 根据水文干旱对气象干旱响应的季节性及其空间差异性, 分析水文干旱对不同时间尺度(3、6、9、12、24个月)气象干旱的响应特征。

## 1 研究区概况

本文选取位于云南省境内的南盘江流域为研究区, 南盘江属珠江流域西江水系, 发源于云南沾益县马雄山南麓, 至三江口出云南, 云南境内河长655 km, 境内流域面积约为4.32万km<sup>2</sup>。流域内属亚热带季风气候, 多年平均气温为13℃~20℃, 多年平均降雨量1070 mm, 其中干季(11月-次年4月)雨量约占20%, 湿季(5月-10月)约占80%。降雨一般由北向东递增, 向西递减, 形成罗平一带的多雨区, 山区年降雨量可达1800 mm, 蒙自一带的少雨区, 蒙子坝仅

收稿日期: 2013-12-06 修回日期: 2014-02-26 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.006.html>

基金项目: 公益性行业(水利)科研专项(201001044); 国家科技支撑计划项目(2012BAD4B00)

作者简介: 张建龙(1988-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事区域水资源开发与利用研究。E-mail: pzljz18890@163.com

通讯作者: 王 龙(1975-), 男, 四川射洪人, 副教授, 主要从事变化环境下的水旱灾害研究。E-mail: yndw1@126.com

730 mm。上游因受盆地滞蓄影响,洪水过程比较平缓,中下游洪水过程线比较尖瘦。流域地处滇东岩溶高原湖盆和岩溶山地区,地形西北高而东南低,地质构造比较复杂,岩溶作用极为强烈<sup>[7]</sup>。研究区范围及雨量、径流站点分布见图 1。

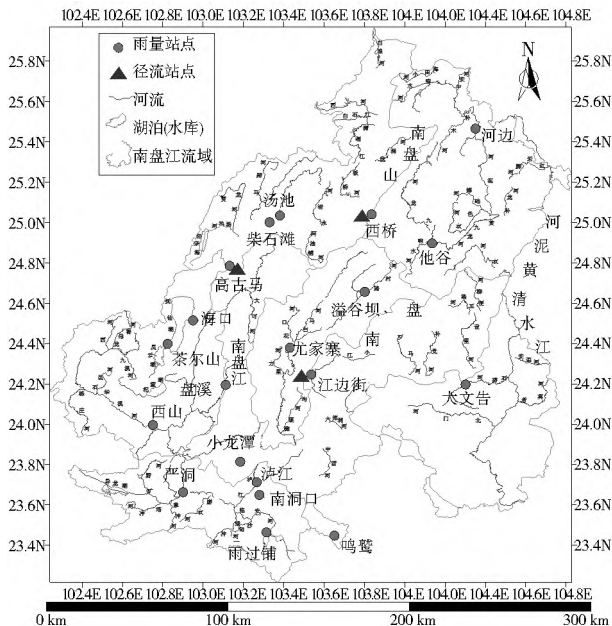


图 1 研究区范围及雨量、径流站点分布

Fig. 1 The study area and distribution of monitoring stations

## 2 研究方法

### 2.1 标准化径流指数的计算

选取流域内 3 个水文站(上游西桥、中游高古马、下游江边街) 40 年(1970 年- 2009 年)间的逐月径流资料,在确定某时段内径流量适合的分布类型(偏态分布)后,进行正态标准化处理,得到标准化径流指数(Standard Streamflow Index, SSFI),最后利用 SSFI 来划分干旱等级。

以  $\Gamma$  分布为例,假设某一时段的径流量为  $x$ , 则其  $\Gamma$  分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0) \quad (1)$$

式中:  $\beta$  和  $\gamma$  分别为尺度和形状参数,  $\beta > 0, \gamma > 0$ , 可用极大似然估计法求得:

$$\gamma = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (2)$$

$$\beta = \bar{x} / \gamma \quad (3)$$

其中

$$A = \text{Lg} \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Lg} x_i \quad (4)$$

式中:  $x_i$  为径流量资料样本;  $\bar{x}$  为径流量平均值。

确定概率密度函数中的参数后,对于某一年的径流量  $x_0$ , 可求出随机变量  $x < x_0$  事件的概率为:

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \quad (5)$$

上式中不包含  $x = 0$  的情况,而实际径流量可以为 0。径流量为 0 时的事件概率为:

$$F(x = 0) = m/n \quad (6)$$

式中:  $m$  是径流量为 0 的样本数;  $n$  为样本容量。

对  $\Gamma$  分布概率进行正态标准化处理,进行近似求解可得:

$$Z = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \quad (7)$$

其中

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}} \quad (8)$$

当  $F > 0.5$  时,  $S = 1$ ; 当  $F \leq 0.5$  时,  $S = -1$ 。

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189268, d_3 = 0.001308$$

由 (7) 式求得的  $Z$  值就是标准化径流指数  $SSFI$ 。 $SSFI$  的干旱分级标准见表 1。

表 1  $SSFI$  干旱等级的划分

Table 1 Categories of  $SSFI$  (standardized streamflow index) to drought

等级	类型	$SSFI$	等级	类型	$SSFI$
1	无旱	$-0.5 < SSFI$	4	重旱	$-2.0 < SSFI \leq -1.5$
2	轻旱	$-1.0 < SSFI \leq -0.5$	5	特旱	$SSFI \leq -2.0$
3	中旱	$-1.5 < SSFI \leq -1.0$			

### 2.2 标准化降水指数的计算

选取南盘江流域 20 个雨量站及水文站的同期逐月降水资料,根据径流资料站点的地理位置,分别通过算术平均法和普通克里金插值法计算逐月面雨量,计算标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)。普通克里金插值考虑了各样本点的空间相关性,不但给出待插值点的估算值,还可给出表示估算精度的方差,优于其他空间插值法<sup>[8]</sup>。

$SPI$  是常用的气象干旱监测指标,计算方法见文献<sup>[9]</sup>。本次研究选用 3、6、9、12、24 个月时间尺度的  $SPI$  来量化气象干旱。

### 2.3 $SSFI$ 与 $SPI$ 关系分析

计算出  $SSFI$  及  $SPI$  后,从中选取水文干旱样本,并选取同期  $SPI$ ,采用 spearman 秩相关系数<sup>[10]</sup>来计算  $SSFI$  与  $SPI$  的相关系数。

(1) 编秩: 将两变量  $X, Y$  成对的观察值分别从小到大顺序编秩,用  $R_i$  表示第  $i$  个  $x$  值的秩,  $S_i$  是第  $i$  个  $y$  值的秩,若观察值相同取平均秩次。 $\bar{R}, \bar{S}$  分别是  $R_i$  和  $S_i$  的平均值。

(2) 将秩次带入公式计算:

$$r = \frac{\sum (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (R_i - \bar{R})^2 \sum (S_i - \bar{S})^2}} \quad (8)$$

实际应用中,通常简化为:

$$r = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (9)$$

式中,  $d_i = R_i - S_i$ 。

(3) 要判断由样本算得的秩相关系数是否有统计学意义,应作假设检验,当  $N \leq 10$  时,  $r$  的样本分布可以标准化为近似的  $t$  分布:

$$t = \frac{\sqrt{n-2} \cdot r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (10)$$

式中:  $r$  为相关系数;  $n$  为样本观测数;  $(n-2)$  为自由度。当  $t > t_{\alpha}(n-2)$  时,  $p < \alpha$  拒绝原假设,即  $X, Y$  相关。

### 3 计算结果与分析

西桥、高古马、江边街站 1970 年- 2009 年各月 *SSFI* 计算结果见图 2。由图 2 可知,在南盘江流域,水文干旱大多发生于 12 月- 次年 5 月。

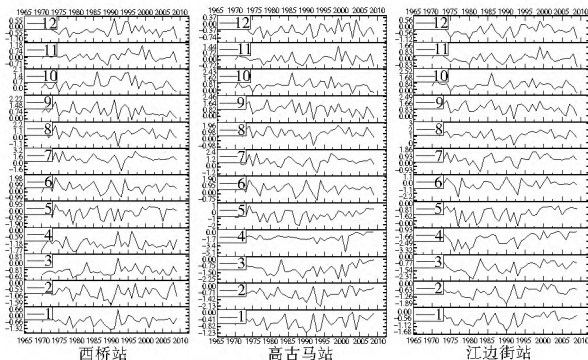


图 2 西桥、高古马、江边街站 *SSFI* 计算成果

Fig. 2 *SSFI* calculation results of Xiqiao, Gaoguma, and Jiangbianjie stations

西桥、高古马、江边街站所对应区域 1970 年- 2009 年 3 个月时间尺度的 *SPI* 计算结果见图 3。限于篇幅,其他时间尺度的计算结果不再一一列出。

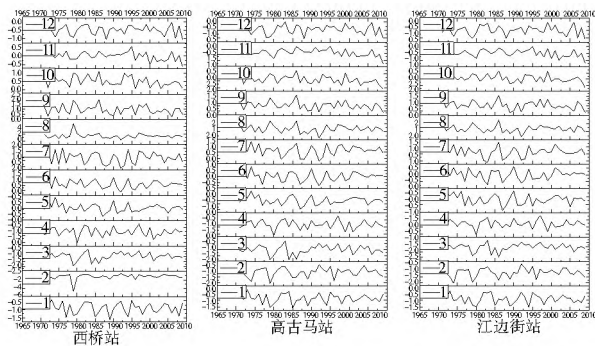


图 3 西桥、高古马、江边街站所对应区域 *SPI*<sub>3</sub> 计算结果

Fig. 3 *SPI*<sub>3</sub> calculation results of corresponding region of Xiqiao, Gaoguma, and Jiangbianjie stations

三个径流站 *SSFI* 与 *SPI* 的相关系数计算结果见表 2、表 3、表 4。可以看出,各径流站的 *SSFI* 与所对应区域的 *SPI* 的相关系数随 *SPI* (从 1970 年 1 月到 2009 年 12 月) 的时间尺度不同而不同。

在西桥站,与 *SSFI* 相关性最好的是 *SPI*<sub>6</sub> ( $r = 0.57$ , 通过了置信度为 0.01 的显著性检验), 3、12、24 个月时间尺度相关系数最低,说明短时间尺度(3 个月)和长时间尺度(12、24 个月)响应均较差。

表 2 西桥站 *SPI*、*SSFI* 相关系数

Table 2 Correlation coefficient between *SPI* and *SSFI* of Xiqiao station

<i>SPI</i> 尺度	相关系数	置信度	<i>SIG</i>	<i>N</i>
3 个月	0.14		0.10	137
6 个月	0.57	0.01	0.00	134
9 个月	0.47	0.01	0.00	134
12 个月	0.16		0.07	134
24 个月	0.14		0.11	131

在高古马站,与 *SSFI* 相关性最好的是 *SPI*<sub>6</sub> ( $r = 0.62$ , 通过了置信度为 0.01 的显著性检验), 24 个月时间尺度相关系数最低,说明 24 个月的长时间尺度响应较差。

表 3 高古马站 *SPI*、*SSFI* 相关系数

Table 3 Correlation coefficient between *SPI* and *SSFI* of Gaoguma station

<i>SPI</i> 尺度	相关系数	置信度	<i>SIG</i>	<i>N</i>
3 个月	0.30	0.01	0.00	145
6 个月	0.62	0.01	0.00	142
9 个月	0.49	0.01	0.00	142
12 个月	0.18	0.05	0.03	142
24 个月	0.16		0.07	139

在江边街站,与 *SSFI* 相关性最好的是 *SPI*<sub>9</sub> ( $r = 0.46$ , 通过了置信度为 0.01 的显著性检验), 其次为 *SPI*<sub>6</sub> ( $r = 0.45$ , 通过了置信度为 0.01 的显著性检验), 3 个月时间尺度相关系数最低,说明短时间尺度(3 个月)响应较差。

表 4 江边街站 *SPI*、*SSFI* 相关系数

Table 4 Correlation coefficient between *SPI* and *SSFI* of Jiangbianjie station

<i>SPI</i> 尺度	相关系数	置信度	<i>SIG</i>	<i>N</i>
3 个月	0.10		0.24	140
6 个月	0.45	0.01	0.00	138
9 个月	0.46	0.01	0.00	138
12 个月	0.28	0.01	0.01	138
24 个月	0.17	0.05	0.05	136

流域内不同位置的水文干旱对气象干旱的响应特征存在差异,可能与流域内产流条件差异有关:流域内降水量分布具有由北向东递增、向西递减的特征;气温具有由东北向西南递增的变化趋势<sup>[1]</sup>,故蒸发量在西南地区较大,从而综合影响水文干旱对气象干旱的响应特征和程度;南盘江流域喀斯特地貌发育<sup>[12]</sup>,岩溶水对地表径流的补给影响具有空间差异性。

### 4 结论

通过对南盘江流域不同时间尺度的 *SPI* 和 *SSFI* 的相关性进行统计分析,得到如下结论。

(1) 南盘江流域水文干旱对气象干旱具有良好的响应关系, *SSFI* 对 *SPI* 的响应关系随时间尺度的不同相关性不同。

(2) 上游西桥站、中游高古马站、下游江边街站在较短时间尺度(3 个月)和较长时间尺度(24 个月)时, *SPI* 和 *SSFI* 相关系数均较低,而在时间尺度为 6 个月、置信度为 0.01 时,均具有显著的相关性。因此,南盘江流域水文干旱对气象干旱的响应时间约为 6 个月。

为了减小南盘江流域在空间上存在的蒸散发差异和地表径流补给差异对 *SSFI* 与 *SPI* 相关性研究的影响,未来可以考虑采用两种方法:一是以标准化降水蒸发指数 (*SPEI*) 替代 *SPI*<sup>[13-14]</sup>;二是在对流域内径流补给条件进行充分调查的基础上,以消除主要岩溶补给对径流的突变性影响。

### 参考文献(References):

[1] 王维第. 水文干旱研究的进展和展望[J]. 水文. 1993, (5): 64

65. (WANG Wei di. The Development and Future of Research of Hydrological Droughts[J]. Hydrology. 1993, (5): 61-65. (in Chinese))
- [2] 耿鸿江, 沈必成. 水文干旱的定义及其意义[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(4): 91-94. (GENG Hong jiang, SHEN Bi cheng. Definition and Significance of Hydrologic Droughts[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1992, 10(4): 91-94. (in Chinese))
- [3] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778. (ZHANG Qiang, ZHANG Liang, CUI Xiancheng, et al. Progresses and Challenges in Drought Assessment and Monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763-778. (in Chinese))
- [4] Medved Cviki B, CEGLAR A, KAJFE BOGATAJ L. The Response of Hydrological Droughts to Climatic Droughts at Different Time Scales in Dravinja, Savinja and Krka Basins in Slovenia[M]. Ohrid, Republic of Macedonia: BALWOIS, 2012.
- [5] POST D A, JAKEMAN A J. Relationships Between Catchment Attributes and Hydrological Response Characteristics in Small Australian Mountain ash Catchments[J]. Hydrological Processes, 1996, 10: 877-892.
- [6] FLEIG A K, TALLAKSEN L M, HISDAL H, et al. Regional Hydrological Drought in Northwestern Europe: linking a new Regional Drought Area Index with Weather Types[J]. Hydrological Processes, 2011, 25: 1163-1179.
- [7] 《云南河湖》编纂委员会. 云南河湖[M]. 昆明: 云南出版集团公司, 云南科技出版社, 2010: 61-66. (Editorial Committee of Rivers and Lakes in Yunnan. Rivers and Lakes in Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Publishing Group Company, Yunnan Science and Technology Press, 2010: 61-66. (in Chinese))
- [8] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究—以 2009 年中国降水为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818. (ZENG Hong wei, LI Lijuan, ZHANG Yongxuan, et al. Study on Spatial Interpolation of Precipitation with Large Scale Samples: a Case Study on 2009's Precipitation of China[J]. 2011, 30(7): 811-818. (in Chinese))
- [9] MCKEET B, DOESKEN N J, KLEIST J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[J]. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993: 179-184.
- [10] Myers Jerome L, Well Arnold D. Research Design and Statistical Analysis[M]. Lawrence Erlbaum Associates, Incorporated. 2003: 508.
- [11] 杨茂灵, 王龙, 杨蕊, 等. 南盘江流域季节性干旱时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 251-256. (YANG Maoling, WANG Long, GAO Rui, et al. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Seasonal drought in Nanpan River basin[J]. Yangtze River, 2013, 22(2): 251-256. (in Chinese))
- [12] 赵莉, 杨世瑜, 王嘉学. 珠江源头南盘江流域旅游环境信息耦合研究[J]. 云南师范大学学报, 2010, 30(5): 49-55. (ZHAO Li, YANG Shiru, WANG Jiayue. The Coupling Research on the Tourism Environment Information in Nanpan River Basin of the Source of Pearl River[J]. Journal of Yunnan Normal University, 2010, 30(5): 49-55. (in Chinese))
- [13] 高瑞, 王龙, 杨蕊, 等. 基于 SPEI 的南盘江流域近 40 年冬春干旱时空特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 67-70. (GAO Rui, WANG Long, YANG Rui, et al. Spatiotemporal Characteristic of Winter and Spring Drought Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Nanpanjiang basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 67-70. (in Chinese))
- [14] 高瑞, 王龙, 杨蕊, 等. 三种干旱指数在南盘江流域识别干旱能力中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 9-12. (GAO Rui, WANG Long, YANG Rui, et al. Application of Three Drought Index in Identification of Drought Capability in Nanpanjiang Basin[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 9-12. (in Chinese))

## 《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿网站: [www.nsbdkq.net](http://www.nsbdkq.net) 邮箱: [nsbdqk@263.net](mailto:nsbdqk@263.net)

电话: 0311- 85020507 85020512 85020535

《南水北调与水利科技》编辑部