

Applicability of Standardized Precipitation Index with Alternative Distribution Functions*

Xingjun Hong, Shenglian Guo, Yanlai Zhou

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: hongxingjun1989@gmail.com

Received: Nov. 24th, 2012; revised: Dec. 16th, 2012; accepted: Dec. 23rd, 2012

Abstract: Standardized Precipitation Index (SPI) can be applied to multiple time-scales and Gamma distribution is suggested to compute SPI values. Based on the monthly precipitation data of 13 meteorological stations in the Poyang Lake basin from 1961 to 2001, three distribution functions (Gamma, Pearson Type III and Normal) are adapted to fit long-term precipitation series on different time-scales of 1, 3, 6, 12 and 24 months. The Kolmogorov-Smirnov (K-S) test is used to decide which distribution function could fit cumulative precipitation series better. The SPI values of different time scales are calculated by these three distribution functions and compared by using Pearson correlation coefficient and Nash efficiency coefficient. It is concluded that the Pearson Type III distribution is the best for fitting precipitation data series. It is also found that for SPI values with 12 or 24-month cumulative precipitation data series, there is little difference between distribution functions, in which the average Pearson correlation coefficients and Nash efficiency coefficients are over 0.99 and 98%, respectively.

Keywords: Drought Index; SPI; Gamma Distribution; Pearson Type III Distribution; Normal Distribution; Comparative Study

标准化降水指数 SPI 分布函数的适用性研究*

洪兴骏, 郭生练, 周研来

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: hongxingjun1989@gmail.com

收稿日期: 2012 年 11 月 24 日; 修回日期: 2012 年 12 月 16 日; 录用日期: 2012 年 12 月 23 日

摘要: 标准化降水指数(SPI)是适用于多时间尺度的一种干旱指标, 常采用 Gamma 分布进行拟合。以鄱阳湖流域 13 个气象站为研究对象, 选择 1961~2001 年的逐月降水量为实验数据, 采用三种分布函数, 即 Gamma 分布、P-III 分布、正态分布拟合了 1, 3, 6, 12, 24 月时间尺度下的时段累积降雨, 以 K-S 方法检验了各分布的拟合效果, 以 Pearson 相关系数和 Nash 效率系数为评价指标, 比较分析了不同时间尺度下各分布计算的 SPI 值的差异, 研究表明: P-III 分布是用于拟合鄱阳湖流域各时段累积降雨量的最适宜分布函数; 在 12 和 24 个月的时间尺度下, 三种分布计算的 SPI 值差异很小, 平均的相关系数均超过 0.99, 平均的 Nash 效率系数均超过 98%, 可以互相替代。

关键词: 干旱指标; SPI; Gamma 分布; P-III 分布; 正态分布; 比较研究

*基金项目: 国家自然科学基金(51079100, 51190094)资助项目。
作者简介: 洪兴骏(1989-), 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源配置方面的研究。

1. 引言

干旱是一种发生频率高、持续时间长、波及范围

广的自然灾害, 长期困扰着工农业生产。美国气象学会在总结各种干旱定义的基础上, 将干旱分为四种类型^[1]: 气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。

干旱指标是研究干旱气候的基础, 也是衡量干旱程度的标准和关键环节。原则上说, 好的指标应该具备明确的物理意义, 不但可以反映干旱的成因、程度、开始、结束和持续时间, 而且资料应易于收集、参数计算简便。目前, 关于干旱指标的研究已经比较丰富^[2,3]。根据建立途径的不同, 可把干旱指标大致归纳为两类: 一类是通过研究干旱机理, 力图细致地反映干旱涉及的各个物理过程, 以提高对干旱强度和持续时间的反应精度; 另一类则是通过气象学方法, 研究降水量的统计分布规律, 以反映干旱的强度和持续时间。第二类指标, 相对于第一类, 具有计算简单, 所需资料容易获取等优点, 而且由于指标不涉及具体的干旱机理, 时空适应性较强。代表性指标是 Mckee 等(1993)在研究美国科罗拉多干旱状况时提出的标准化降水指标 SPI(Standard Precipitation Index)^[4]。该指标除了只需要较长时间的降水量(一般应超过30年)资料以外, 另一个显著的优点是消除了降雨的时空差异, 对干旱的变化反应敏感, 适用于多时间尺度(1, 3, 6, 12, 24 个月), 因而得到广泛应用^[5]。

SPI 的计算原理是将某一时间尺度的降水量时间序列看作是服从某种分布, 通过降水量的这种分布概率密度函数推求累积概率, 然后将累积概率转化成标准正态分布而得。Mckee 等在提出 SPI 这一指标时采用 Gamma 概率分布来描述降水量的变化^[4]。采用不同的分布函数来描述降水序列可以得到不同的 SPI 值, Guttman(1999)分别采用两参数 Gamma、三参数 Pearson Type III(P-III)、三参数广义极值、四参数 Kappa、五参数 Wakeby 等五种概率分布, 计算美国 1035 个站点至少 60 年观测资料的 SPI 值, 发现在长时间尺度下, 各 SPI 值的差异很小^[6]。Lana 和 Burgueno(2000)采用 Gamma、对数正态和 Poisson-gamma 三种分布拟合西班牙地中海沿岸 7 个站点的月尺度和年尺度降水, 都能取得不错的效果^[7]。Sergio(2006)在用 SPI 研究伊比利亚半岛的干旱空间分布特征时, 采用 P-III 分布拟合不同时间尺度的降雨, 发现 P-III 分布可以灵活适应时间尺度的变化^[8]。Angelidis 等(2012)比较了葡萄牙瓜迪亚纳河流域 19 个站点各个时间尺度下由 Gamma、对数正态和正态分布计算得到的 SPI 值, 发现在 6、12

和 24 个月时间尺度下, SPI 值的差异不大^[9]。

用合适的分布函数去拟合某一时间尺度的降雨, 是 SPI 值计算的关键环节。国外关于这方面的研究成果较多, 而国内的研究相对薄弱。本文以我国鄱阳湖流域 13 个气象站 1961 年~2001 年的逐月降水量为实验数据, 分别采用 Gamma 分布、P-III 分布和正态分布拟合了 1, 3, 6, 12, 24 个月不同时间尺度的时段累积降雨量, 并以 Gamma 分布计算的 SPI 值为参照, 比较分析了由 P-III 和正态分布计算得到的相应时间尺度的 SPI 值与 Gamma 分布计算的 SPI 值的差异, 探讨这三种分布函数的适用性。

2. 研究区域与数据

鄱阳湖流域(23°~31°N, 113°~118°E)属于亚热带季风区, 位于长江中下游南岸, 控制流域面积 162,225 km², 占长江流域面积的 9%, 涉及赣、湘、闽、浙、皖五省。鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊, 鄱阳湖水系呈现辐射状, 由赣江、抚河、信江、饶河、修水五大水系, 环湖直接入湖河流以及鄱阳湖湖区组成。

鄱阳湖对长江中下游地区具有举足轻重的作用, 但是受气候变化和异常的影响, 鄱阳湖流域的自然灾害频繁, 防洪减灾、水资源综合利用、水资源与生态环境保护等任务十分繁重。鄱阳湖湖区洪枯水位变幅大, 特别是近几年来鄱阳湖枯水期长期维持低水位, 造成沿湖城乡供水和农业灌溉季节性困难、水资源利用程度低、枯水期航深不足等。因此, 研究气候变化及异常对鄱阳湖水文水资源的影响, 对指导防洪抗旱、保护生态、开发利用水资源和保证流域社会经济协调发展具有重要的意义。

本研究以鄱阳湖流域 13 个气象站(修水、宜春、吉安、遂川、赣州、波阳、景德镇、南昌、樟树、贵溪、玉山、南城、广昌)1961 年~2001 年共 41 年的逐月降水量为实验数据, 数据主要来自中国气象局国家气象信息中心。

3. 研究方法

本文采用 Gamma、P-III 和正态分布三种分布函数分别拟合降雨量, 计算相应的 SPI 值。Mckee 等采用 Gamma 概率分布来描述降水量的分布变化^[5]。假设某一时段的降水量为 x , 则其满足 Gamma 分布的概

率密度函数为:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

式中: $\alpha > 0$ 为形状参数, $\beta > 0$ 为尺度参数, $x > 0$ 为降水量。 $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数, 其概率函数为:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

最佳的 α 、 β 估计值可采用极大似然估计法求得:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \\ \hat{\beta} &= \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}, \\ A &= \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x_i)}{n} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x_i 为降水量序列的样本, \bar{x} 为降水量序列的平均值, n 为计算序列的长度。于是给定时间长度的累积概率可由下式计算:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (4)$$

由于 Gamma 方程中不包含 $x = 0$ 的情况, 而实际的降水量可能为 0, 所以累积概率表示为:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (5)$$

式中: q 是降水量为 0 的概率。如果设 m 为降水时间序列中降水量为 0 的数量, 则有 $q = m/n$ 。

累积概率 $H(x)$ 可通过下式转换为标准正态分布函数:

$$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (6)$$

对其进行近似求解得到以下结果:

当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时:

$$\begin{aligned} \text{SPI} &= - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \\ t &= \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \end{aligned} \quad (7)$$

当 $0.5 < H(x) < 1$ 时:

$$\begin{aligned} \text{SPI} &= \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \\ t &= \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

与 Gamma 分布类似, P-III 分布具有偏态的特点, 其密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (9)$$

式中: $a_0 < x$ 为位置参数, 其他参数符号同 Gamma 分布。同样可采用极大似然法估计参数。累积概率的推求和标准正态转换方法均可参考 Gamma 分布。

由中心极限定理可知, 当降水量的统计时段选得较大时, 随着计算序列的长度 n 的增加, Gamma 分布函数的形状参数 α 趋于无穷大, 这时 Gamma 分布会逐渐趋于正态分布, 因而, 可以用正态分布来代替 Gamma 分布计算 SPI 值:

$$\text{SPI} = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (10)$$

式中: μ 为样本序列的均值, σ 为其标准差。

为了探讨分布函数的适用性, 本文采用这三种分布函数, 分别拟合了不同月尺度的累积降雨序列, 并以 Kolmogorov-Smirnov(K-S)方法检验拟合效果。K-S 检验采用如下统计量:

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |F_n^*(x) - F(x)| \quad (11)$$

式中: $F_n^*(x)$ 为经验分布函数, $F(x)$ 为拟合的分布函数。

给定可信度 α 时, 根据样本容量查表得临界值 D_n^α , 如果 $D_n < D_n^\alpha$, 表明假设的理论分布与样本分布的差异不显著, 可以用此理论分布拟合降水量。

然后, 采用 Pearson 相关系数 r 、Nash 效率系数 DC 指标, 来衡量各个时间尺度下由 P-III 分布和正态分布计算得到的 SPI 值与由 Gamma 分布计算得到的 SPI 值的差异。它们的表达式分别为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})(z'_i - \bar{z}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \sum_{i=1}^n (z'_i - \bar{z}')^2}} \quad (12)$$

$$DC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \right] \times 100\% \quad (13)$$

式中: z_i 为由 Gamma 分布计算的 SPI 值, 作为参照值, \bar{z} 为其均值, z'_i 为 P-III 或正态分布计算的 SPI 值, \bar{z}' 为其均值。| r | 越接近 1, 表明两变量间的线性相关程度越高。 $DC \geq 90\%$, 说明两变量间的拟合精度较高。

4. 结果与分析

4.1. 多时间尺度降水量拟合效果统计检验

分别统计 13 个台站不同时间尺度下的时段累积降雨分段频数, 并绘制频率直方图, 可以直观地看出时段降雨的频率分布随着时间尺度的增加而产生的变化。以宜春站为例, 其各时间尺度时段累积降雨频率直方图见图 1。从图 1 可知, 在小时间尺度(如 1 或 3 个月)下, 时段累积降水量的频率分布基本呈现偏态的特征, 但随着时间尺度的增加, 频率分布逐渐趋于正态化。

为了直观地比较三种分布对各时间尺度时段累积降雨的拟合效果, 分别以时段累积降水量为横坐标, 以其经验频率和由三种分布计算而得的理论概率

为纵坐标, 绘制拟合曲线。图 2 给出宜春站 12 个月累积降雨序列的拟合曲线。从图 2 可知, 当时间尺度增加到 12 个月时, 用三种分布拟合时段降水量, 均能取得不错的效果。为了量化这种效果, 采用 K-S 方法进行拟合效果检验。在 $\alpha = 0.05$ 的置信水平下, 各站不同时间尺度三种分布的降水量拟合效果如表 1 所示。

表 1 中, “N” 所在列表示正态分布的检验结果, “P” 所在列表示 P-III 分布的检验结果, “G” 所在列表示 Gamma 分布的检验结果, “√” 表示该种分布在该时段累积降雨量拟合效果通过了 K-S 检验, 而阴影单元格表示在该时间尺度下三种分布中拟合效果最好的分布。从表 1 中可知, 在时间尺度较小(如 1 或 3 个月)时, 属于偏态分布的 Gamma 和 P-III 分布能够更好地拟合时段雨量, 而正态分布几乎不适用。而当时间尺度增大后, 正态分布在某些站点的时段累积降雨量拟合中逐渐能够通过检验, 甚至能够在一些检验中成为三种分布中拟合最好的一种分布。而 Gamma 和 P-III 分布在各个站点不同时段累积降雨的拟合中基本都能通过检验, 具有良好的适用性。特别是 P-III 分布, 在 65 次检验中, 一共通过了 63 次, 通过率达到了 96.92%, 其中有 50 次为最优分布, 这表明 P-III 分布最适宜用来拟合各时段累积降雨序列。

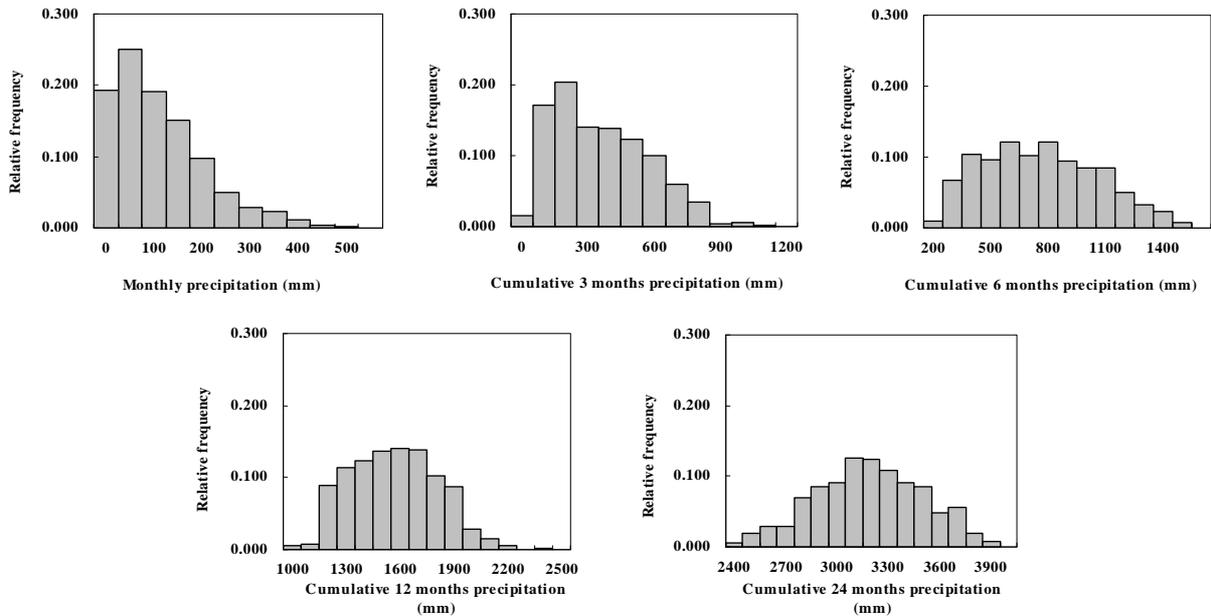


Figure 1. Histogram of precipitation on different time scales at the Yichun station
图 1. 宜春站各时间尺度时段降雨频率分布直方图

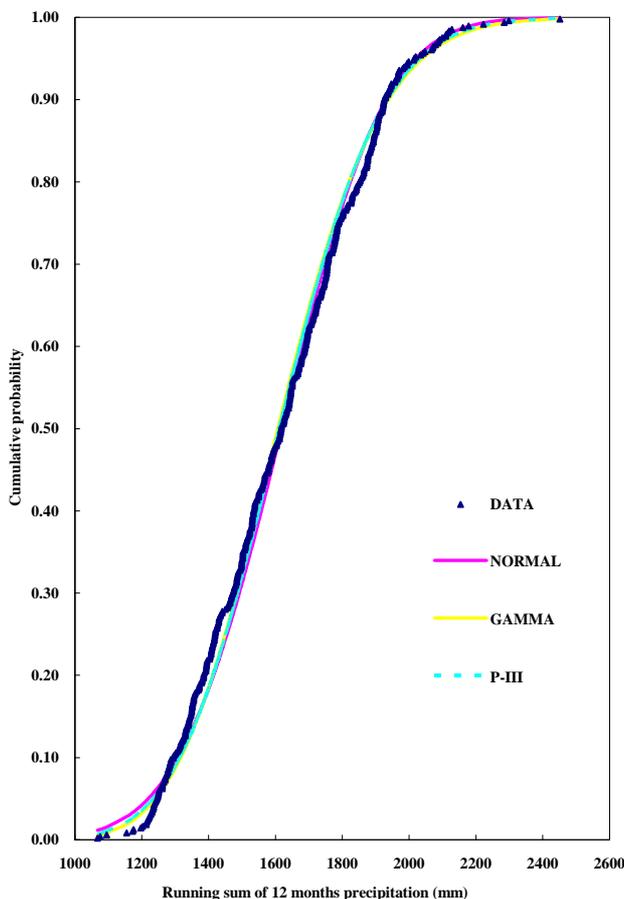


Figure 2. Empirical frequency curves of 12-month cumulative precipitation at the Yichun station
 图 2. 宜春站 12 个月尺度时段降雨经验频率拟合曲线

Table 1. K-S test results of different time scales and distributions
 表 1. 各时间尺度下不同分布 K-S 检验结果统计表

站名	1月			3月			6月			12月			24月		
	N	P	G	N	P	G	N	P	G	N	P	G	N	P	G
修水		√	√		√	√		√	√		√			√	√
宜春		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
吉安		√	√		√	√	√	√	√		√	√	√	√	√
遂川		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	√		√
赣州		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
波阳		√	√		√	√	√	√	√		√			√	
景德镇		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
南昌		√	√		√	√		√	√		√				√
樟树		√	√		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√
贵溪		√	√		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√
玉山		√	√		√	√		√	√		√		√	√	√
南城		√	√		√	√		√	√	√	√		√	√	√
广昌		√	√		√	√		√	√		√	√	√	√	√
√	0	13	13	1	13	13	6	13	13	7	13	8	10	11	12
	0	11	2	0	10	3	0	13	0	1	9	3	3	7	3

4.2. 多时间尺度不同分布 SPI 值的拟合效果分析

分别计算鄱阳湖流域 13 个气象站 1, 3, 6, 12, 24 个月尺度下, 由 Gamma 分布和 P-III 分布求得的 SPI 值之间、由 Gamma 分布和正态分布求得的 SPI 值之间的 Pearson 相关系数和 Nash 效率系数, 计算结果分别见表 2 和表 3。各表中 G/P 表示由 Gamma 分布与 P-III 分布求得的相应数值间的关系, G/N 表示由 Gamma 分布与正态分布求得的相应数值间的关系。由表 2 和表 3 可知, 同为偏态分布的 P-III 分布和 Gamma 分布在各时间尺度下均有较好的拟合效果, 各站点平均的相关系数均超过了 0.97, 平均的 Nash 效率系数均超过了 94%。特别是在时间尺度较小(如 1 个月)时, P-III 分布的拟合效果明显优于正态分布, 平均的相关系数和 Nash 效率系数分别为 0.9815 和 96.01%, 均明显高于正态分布的 0.9539 和 90.87%。随着选用的时间尺度逐渐增大, 正态分布的拟合效果逐渐好转。而当所选用的时间尺度较大(如 12 或 24 个月)时, 不论是由 P-III 分布计算的 SPI 值, 还是由正态分布计算的 SPI 值, 与由 Gamma 分布计算的 SPI 值之间的相关系数和 Nash 效率系数均较高, 各站点平均的相关系数均达到了 0.99 以上, 这表明时间尺度较大时, 二者之间的线性相关性很强; 平均的 Nash 效率系数均达到 98% 以上, 这表明它们之间的拟合差别很小。

为了更清楚地表述拟合效果随着时间尺度增加而产生的变化, 以玉山站为例, 以由 Gamma 分布计算得到的 SPI 值为横坐标, 以由 P-III 分布或正态分布计算得到的 SPI 值为纵坐标, 绘制各时间尺度下的散点图如图 3 所示。从图 3(a)~(c)可知, 当降雨的时间尺度较小(如 1, 3, 6 个月)时, 所描绘的点据具有一定的相关关系, 然而, 在我们较为关心的极端情况(如极涝和极旱)下, 三种分布计算的 SPI 值出入却较大。随着所选的降雨时间尺度逐渐增大, 点据则逐渐往一条近似 $y = x$ 的直线靠拢, 最终与这条直线基本重合, 这表明此时三种分布计算得到的 SPI 值基本可以互相替代。

5. 结论

标准化降水指数 SPI, 具有计算资料需求少, 适用于多时间尺度等优点, 选取合适的分布函数来拟合降水, 是其计算的核心环节。本文采用 Gamma、P-III 和正态分布拟合不同时间尺度的时段累积降雨, 并比较分析它们所计算的 SPI 值的差异, 探讨了三种分布的适用性, 可以得出以下结论:

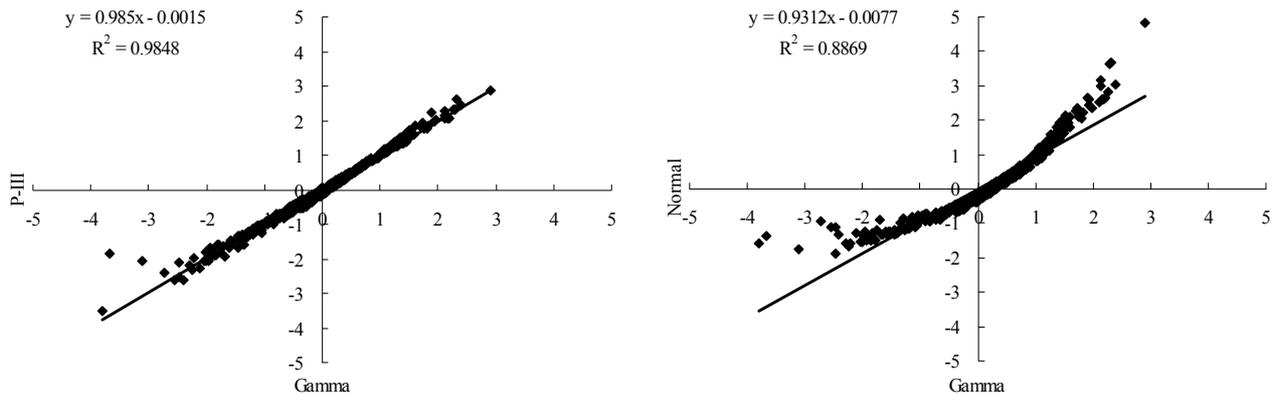
- 1) 在 Gamma、P-III 和正态三种分布中, P-III 分布最适宜用来拟合时段累积降水量序列, 计算 SPI 值。
- 2) 随着降水量统计时段的增加, 其分布逐渐趋于

Table 2. Pearson correlation coefficients (r) of different SPI values and time scales
表 2. 各时间尺度下不同分布求得的 SPI 值的 Pearson 相关系数 r

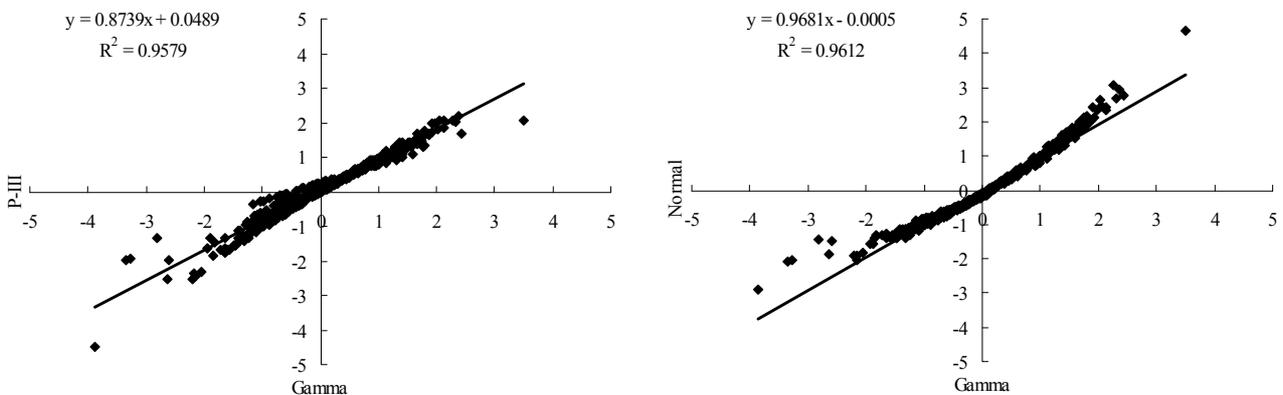
站名	1 月		3 月		6 月		12 月		24 月	
	G/P	G/N								
修水	0.9745	0.9585	0.9824	0.9876	0.9873	0.9948	0.9876	0.9972	0.9976	0.9986
宜春	0.9737	0.9589	0.9803	0.9866	0.9719	0.9947	0.9982	0.9984	0.9989	0.9991
吉安	0.9812	0.9527	0.9751	0.9803	0.9766	0.9946	0.9958	0.9975	0.9969	0.9988
遂川	0.9884	0.9600	0.9929	0.9841	0.9833	0.9930	0.9960	0.9963	0.9929	0.9989
赣州	0.9891	0.9485	0.9633	0.9827	0.9803	0.9929	0.9978	0.9970	0.9992	0.9987
波阳	0.9836	0.9526	0.9739	0.9805	0.9898	0.9920	0.9752	0.9972	0.9935	0.9985
景德镇	0.9810	0.9535	0.9735	0.9818	0.9860	0.9925	0.9977	0.9959	0.9983	0.9968
南昌	0.9887	0.9499	0.9715	0.9800	0.9801	0.9935	0.9796	0.9971	0.9695	0.9976
樟树	0.9729	0.9591	0.9812	0.9796	0.9825	0.9925	0.9979	0.9966	0.9988	0.9982
贵溪	0.9900	0.9484	0.9799	0.9797	0.9921	0.9913	0.9974	0.9962	0.9976	0.9981
玉山	0.9924	0.9417	0.9773	0.9804	0.9901	0.9926	0.9946	0.9968	0.9981	0.9982
南城	0.9681	0.9594	0.9833	0.9794	0.9895	0.9922	0.9981	0.9964	0.9993	0.9983
广昌	0.9765	0.9576	0.9692	0.9816	0.9780	0.9934	0.9981	0.9971	0.9982	0.9984
平均	0.9815	0.9539	0.9772	0.9819	0.9837	0.9931	0.9934	0.9969	0.9953	0.9983

Table 3. Nash efficiency coefficients (DC) of different SPI values and time scales
表 3. 各时间尺度下不同分布求得的 SPI 值的 Nash 效率系数 DC

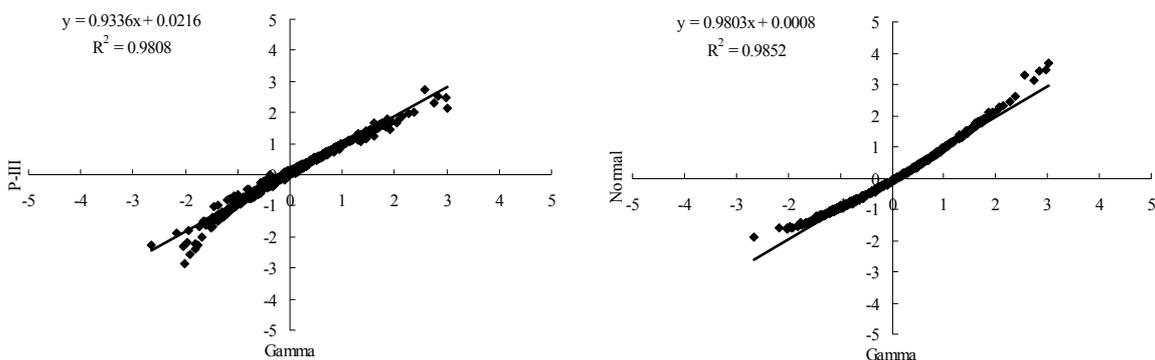
站名	1月(%)		3月(%)		6月(%)		12月(%)		24月(%)	
	G/P	G/N	G/P	G/N	G/P	G/N	G/P	G/N	G/P	G/N
修水	94.81	91.74	94.87	97.53	96.61	98.96	96.66	99.43	99.32	99.70
宜春	94.01	91.87	95.16	97.34	94.11	98.94	99.64	99.67	99.75	99.81
吉安	96.21	90.65	95.00	96.09	95.06	98.92	99.15	99.48	99.38	99.75
遂川	97.00	92.07	97.24	96.84	96.11	98.60	98.36	99.25	97.56	99.76
赣州	97.39	89.82	92.61	96.57	95.57	98.58	99.55	99.38	99.69	99.72
波阳	96.81	90.58	94.05	96.13	98.02	98.40	95.04	99.44	98.61	99.69
景德镇	95.57	90.81	93.96	96.38	97.13	98.50	99.55	99.17	99.66	99.35
南昌	97.38	90.08	93.64	96.04	95.41	98.70	95.38	99.40	91.53	99.51
樟树	94.21	91.85	96.25	95.96	96.47	98.49	99.58	99.31	99.76	99.62
贵溪	97.45	89.80	95.13	95.97	98.46	98.26	99.45	99.23	99.47	99.62
玉山	98.48	88.45	94.82	96.11	97.81	98.52	98.88	99.34	99.50	99.63
南城	93.79	91.97	96.75	95.92	97.79	98.45	99.57	99.27	99.76	99.64
广昌	94.99	91.63	94.00	96.34	95.18	98.68	99.62	99.41	99.61	99.67
平均	96.01	90.87	94.88	96.40	96.44	98.62	98.49	99.37	98.74	99.65



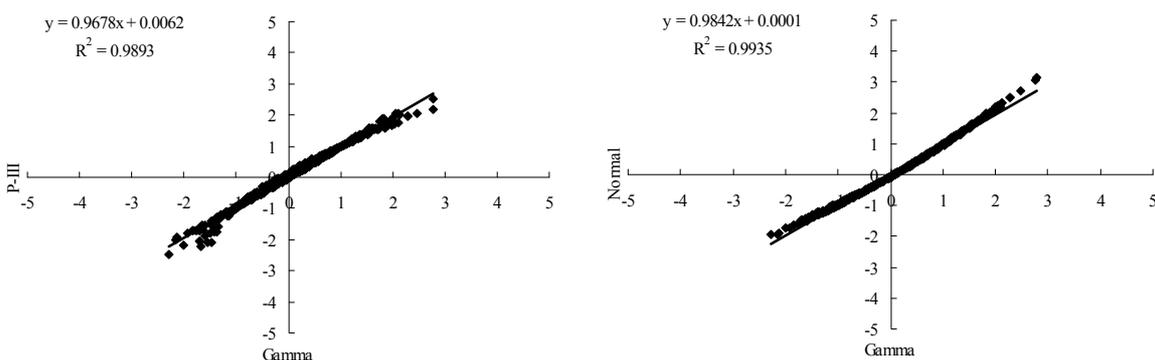
(a) 1个月尺度(1 month)



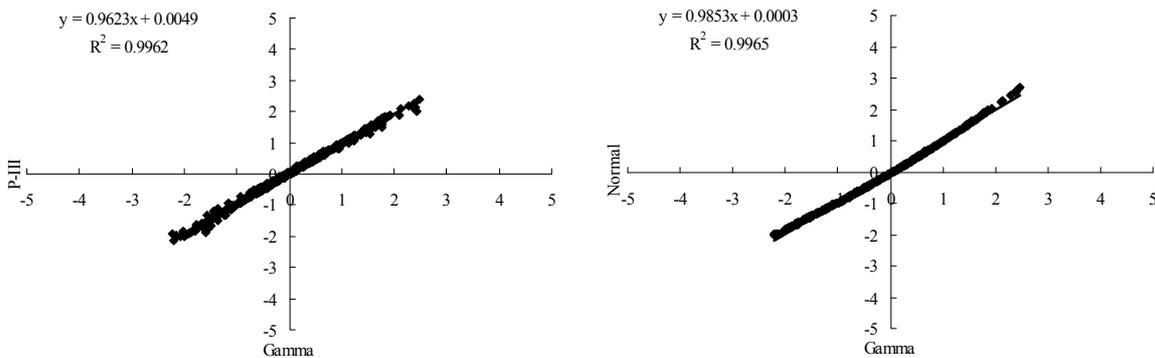
(b) 3个月尺度(3 months)



(c) 6 个月尺度(6 months)



(d) 12 个月尺度(12 months)



(e) 24 个月尺度(24 months)

Figure 3. Scatter diagrams of different SPI values on different time scales at the Yushan station
图 3. 玉山站各时间尺度不同 SPI 值散点图

正态化, 当降水量的统计时段较长, 如 12 或 24 个月时, 三种分布计算得到的 SPI 值差异很小, 基本上可以互相替代。

参考文献 (References)

[1] American Meteorological Society. Meteorological drought—Policy statement. Bulletin of American Meteorological Society, 1997, 78: 847-849.

[2] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.
YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Theoretical study and research prospect on drought indices. Advance in Earth Science, 2004, 19(6): 982-991. (in Chinese)

[3] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.
WANG Jinsong, GUO Jiangyong, ZHOU Yuewu, et al. Progress and prospect on drought indices research. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 60-65. (in Chinese)

[4] MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J. and KLIEST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology, Boston:

- American Meteorological Society, 1993: 179-182.
- [5] HAYES, M. J., SVOBODA, M. D., WILHITE, D. A., et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1999, 80: 429-438.
- [6] GUTTAMN, N. B. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 311-322.
- [7] LANA, X., BURGUENO, A. Some statistical characteristics of monthly and annual pluviometric irregularity for the Spanish Mediterranean coast. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, 65: 79-97.
- [8] VICENTE-SERRANO, S. M. Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management*, 2006, 20: 37-60.
- [9] ANGELIDIS, P., MARIS, F., KOTSOVINOS, N., et al. Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Water Resources Management*, 2012, 26: 2453-2473.