
基于 GEV 干旱指数和 DFA 的 方法的苏北地区季节性干旱研究

龚艳冰^{1,2}, 胡娜¹, 刘高峰¹, 冯兰萍¹

(1. 河海大学 水利信息统计与管理研究所, 江苏 常州 213022;

2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

【摘要】为分析近年来江苏省苏北地区季节性干旱灾害特征, 利用苏北五市 1989-2013 年的逐月降水量资料, 建立月降水量的广义极值分布函数, 通过分析广义极值干旱指数 (GEVI), 研究苏北五市近 25a 的季节性干旱分布和干旱等级的时空变化特点。在此基础上, 利用去趋势波动分析方法 (DFA) 对苏北五市月平均降水量的周期性规律进行研究。结果表明, 苏北五市的月降水量均服从广义极值 Fr6chet 概率分布, 且具有从西北 (徐州) 地区向东南沿海 (盐城) 地区递增的空间分布特征, 整体上属于干旱灾害频发的地区, 且以轻旱为主且季节性特征明显。苏北五市的月降水量存在幂律相关性, 即降水量具有较强的正长程相关性, 因此, 未来苏北地区干旱的总体趋势将与过去特征正相关。

【关键词】苏北地区; 干旱; 广义极值分布干旱指数; 去趋势波动分析法

【中图分类号】P468 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1004-5227 (2016) 01-0140-07

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201601017

近年来, 我国干旱灾害已经从传统的干旱半干旱地区转移到气候相对湿润的南部、西南地区, 成灾频率大幅增加[1]。在全球变暖和新型城镇化的背景下, 由于受区域分布和南北气候差异的影响, 作为江苏省粮食主产区的苏北地区, 经常发生季节性

收稿日期: 2015-04-07 ; **修回日期:** 2015-06-02

基金项目: 江苏省社会科学基金项目 (14GLC004) [Social Science Foundation of Jiangsu Province (14GLC004)]; 国家自然科学基金项目 (71303074) [National Natural Science Foundation of China (71303074)]; 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目 (2013B107) [Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science (2013B107)] ; 河海大学常州校区研究生科技创新项目 (XZX/14B001-07) [Science and Technology Innovation Project of Changzhou Campus of Hohai University (No. XZX/14B001-07)] ; 中央高校基本科研业务费项目 (2015B23914, 2015B28014) [Fundamental Research Fund for the Central University of China (2015B23914, 2015B28014)]

作者简介: 龚艳冰 (1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为水旱灾害管理. E-mail : yanbg79 @ 163.com

干旱灾害。根据江苏省民政厅和气象局的年度报告,2013年6月下旬,江苏淮河以南地区遭大范围、持续高温天气,共有43.467万 hm^2 耕地受旱,2014年6月以来,苏北地区的徐州、连云港、宿迁3市12个县发生严重旱灾,共有475.1万人受灾,农作物受灾面积356.9千 hm^2 。

目前,国内外学者对于干旱问题的研究主要采用McKee等人[2]在评价美国科罗拉多州干旱灾情时提出的基于降水量累计概率的标准化降水指数(SPI),SPI指数已经广泛应用于国内外各种干旱灾害的分析[3-10]。由于降水量其值域下限为零而上限不确定,往往表现出向右偏的偏态分布,所以采用正态分布来拟合分布形态是不合理的。因此,学者王澄海等[11]提出可以用广义极值分布来描述降水量,从而定义一个描述气象干旱的指数(广义极值分布干旱指数,GEVI),王芝兰等[12]将SPI指数与GEVI指数进行了对比,结果表明SPI指数与GEVI指数在一定程度上衡量某一地区干旱程度和干旱范围方面具有一致性和可替代性,但GEVI指数在拟合降水量分布函数时更为详尽客观。本文以江苏省苏北地区五市1989-2013年的月平均降水量数据为研究对象,结合GEVI指数和DFA方法分析苏北地区干旱时间序列季节性分布特征和干旱等级情况,在此基础上对降水量的周期性进行分析,从而定量化的研究了苏北地区干旱灾害的趋势特征,有助于各级政府和领导及时了解灾情发生的规律,科学指挥抗灾救灾。

1 研究方法

1.1 广义极值分布干旱指数(GEVI)

假定某一时段的月平均降水量 x 及从广义极值分布(GEV),则其分布函数为

$$H(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right\} \quad (1)$$

式中: $1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$, μ 为位置参数; σ 为尺度参数; ξ 为形状参数。当 $\xi < 0$ 时,GEV为Weibull分布;当 $\xi > 0$ 时,GEV为Fréchet分布;当 $\xi = 0$ 时,GEV为Gumbel分布。相应的,GEV分布的密度函数为:

$$h(x; \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} H(x; \mu, \sigma, \xi) \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-(1+1/\xi)} \quad (2)$$

GEV分布应用的关键且较为困难的问题是3个参数的估计值 $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$ 。常用的参数估计方法主要有极大似然估计、线性矩估计和间隔最大积估计,本文使用极大似然方法进行参数的估计。

气象干旱通常指出现降水短缺的程度和历史再现的时间尺度。因此，可以将 GEV 分布函数的复合负对数定义为 GEV 干旱指数，即

$$GEVI = -\ln[-\ln(H)] = -\frac{1}{\hat{\xi}} \ln \left[1 - \frac{\hat{\xi}(x_i - \hat{\mu})}{\hat{\sigma}} \right] \quad (3)$$

其中， x_i 为逐月的降水量，如果 $1 - \hat{\xi}(x_i - \hat{\mu})/\hat{\sigma} \leq 0$ ，则 $GEVI = 0$ 。

$$T = \frac{1}{H} = \exp(\exp(-GEVI)) \quad (4)$$

GEV 干旱指数作为一种新构建的干旱指标，对各干旱等级对应的指数范围并没有统一的规定，可以通过干旱程度与重现时间或者与 SPI 指数之间的关系定义干旱等级 [11, 12]。若 $H(H \leq 0.5)$ 或 $1 - H(H > 0.5)$ 的倒数为重现期 T （年）， H 、 T 和 $GEVI$ 与具体的观测数据并无关系。当 $GEVI = 0$ 时， $T = e = 2.78$ 。根据公式（4）可以得到干旱事件发生时相应的重现时间 T ，可根据干旱的程度和重现时间定义干旱等级。

1.2 去趋势波动分析方法 (FA)

DFA 方法是由 Peng 等 [13] 学者首先提出，后来经 Kantelhardt 等 [14] 学者的改进完善，已经发展成为一种被广泛使用于分形标度特性的确定和对噪声与非稳时间数列中长范围相关性的检测等方面的统计方法。目前，DFA 方法已经在我国多个地区的降水量特征分析中被应用 [15-19]。DFA 法的计算步骤由以下五个步骤组成：

(1) 对长度为 N 的一组时间序列 $\{x_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ ，建立一组新的序列

$$y(i) = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}), (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

(2) 将新的序列 $\{y(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ 从始端开始将数列长度刀分成等标度，的非重叠的 $N_s = \text{int}(N/s)$ 个部分。由于数列的长度 N 通常不一定是 s 的倍数，上述的划分可能还会有数列末尾的一小部分没被包括进，所在再从序列的末端开始重复以上的划分过程，最终得到总共 $2N_s$ 个部分。

(3) 在每个子区间用最小二乘方法计算每部分中 $y(i)$ 的拟合函数 $y_v(i)$, 然后求如下方差: 等标度 $s = [75, 60, 50, 30, 25, 20, 15, 12, 10, 6, 5, 4]$,

$$F^2(v, s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (y[(v-1)s+i] - y_v(i))^2, \quad (6)$$

$$v = 1, \dots, N_s$$

$$F^2(v, s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (y[2N_s - (v-N_s)s+i] - y_v(i))^2$$

$$v = N_s + 1, \dots, 2N_s \quad (7)$$

其中每部分的拟合函数 $y_v(i)$ 可以是线性多项式、二次多项式或者更高阶的多项式。

(4) 求所有 $2N_s$ 部分中的方差 $F^2(v, s)$ 的平均值, 从而可得数列的波动函数:

$$F(s) \equiv \left(\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F^2(v, s) \right)^{1/2} \quad (8)$$

(5) 通过分析 $F(s)$ 关于标度, 变化的 $\log F(s) \sim \alpha \log s$ 图判定波动函数 $F(s)$ 的标度行为, 其中 α 为 \log - \log 图中的曲线斜率, 即 DFA 标度指数。

2 江苏省苏北地区干旱分析与讨论

2.1 研究区域概况和数据选择

研究区域位于 $116.60^\circ - 124^\circ \text{ E}$, $32.07^\circ - 34.83^\circ \text{ N}$ 之间的江苏省苏北地区, 包括徐州、连云港、宿迁、淮安、盐城五个地级市。根据 1961 年以来的相关气象资料, 苏北地区多年平均年降水量为 900 mm, 主要集中于夏季, 占全年的 56.4%, 春、秋、冬季分别占 17.7%、18.6% 和 7.1%, 季节分配不均。在季风环流的影响下, 苏北地区多年平均降水量呈现从东南向西北递减的空间分布特征 [20]。气象观测站主要选取各地级市 (5 个) 和下辖县的代表性观测站点 (23 个), 虽然, 近年来苏北地区部分地市的行政区划进行了调整, 这些观测站点并没有受到影响, 因此, 所选数据具有一致性。所用数据资料来源于苏北地区 28 个气象观测站 1989-2013 年的月平均降水量资料, 如图 1 所示。



图 1 江苏省苏北地区28个站点分布图

Fig.1 Distribution of 28 Stations in Northern Region of Jiangsu Province

2. 2 降水量的 GEV 分布估计和 GEVI 干旱指数分析

为了分析近年来苏北地区的季节性干旱情况，以 1989-2013 年苏北五市的月平均降水量数据为研究对象，利用 Matlab 软件对月平均降水量进行广义极值分布拟合，采用极大似然估计方法对参数进行估计，结果如表 1 所示。表 1 给出了苏北五市月平均降水量对数极大似然估计拟合广义极值分布的形状参数、尺度参数和位置参数的估计值。由形状参数可知，苏北五市的形状参数都大于 0，说明苏北地区的降水量统一服从 Fr6chet 概率分布（如图 2 所示），这与苏北五市的地理位置、气候特征相一致；位置参数反映月平均降水量的平均值，较好的表现出苏北地区的月降水量由江苏的西北（徐州）地区向东南沿海（盐城）地区递增的空间分布特征，这与张宗磊等 [20] 的分析结果一致；尺度参数反映降水量的标准差，很好的再现出苏北东南部沿海地区是月降水量最大的地区，同时也是降水月际变化最大的地区。

表 1 极大似然估计参数

Tab.1 Maximum Likelihood Estimation Parameters

城市	形状参数	位置参数	尺度参数
徐州市	0.755 7	23.577 1	28.426 6
连云港市	0.807 4	24.286 0	30.213 8
宿迁市	0.681 9	28.723 4	32.300 8
淮安市	0.667 1	31.310 7	32.679 4
盐城市	0.490 3	37.067 9	37.104 6

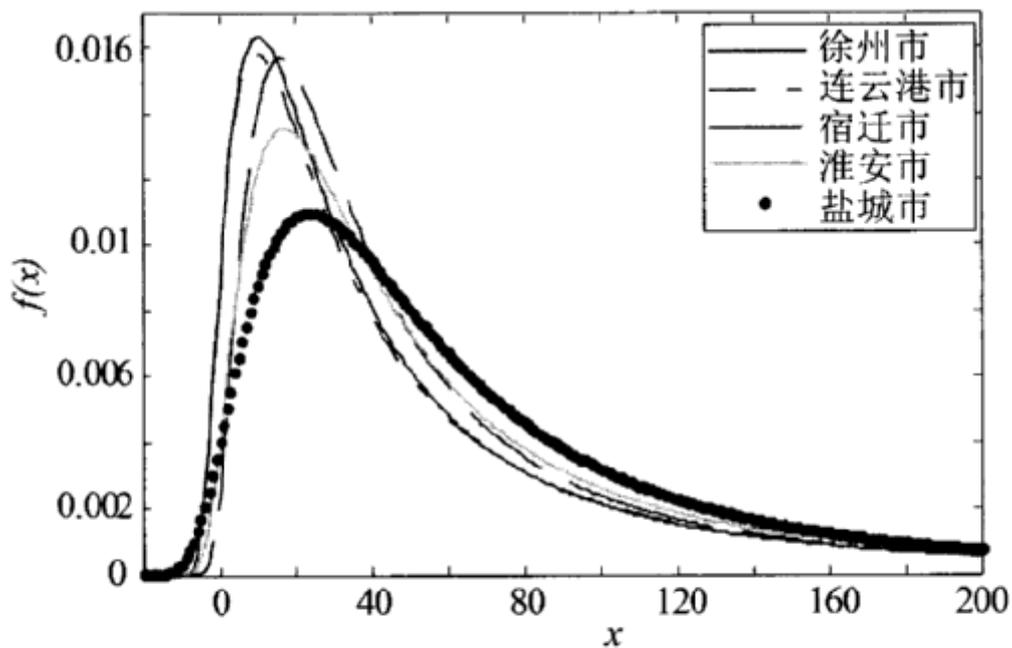


图 2 苏北五市降水量极值分布的密度函数

Fig.2 Extreme Value Distribution Density Function of Precipitation in Five Cities

根据 GEVI 干旱指数的定义，将表 1 的参数估计值代入式 (3) 和式 (4)，结合苏北地区五市自身季节性的干旱特点，利用 Matlab 软件编程计算 1989-2013 年近 300 个月的干旱指数，并根据重现期对干旱等级进行分类[11]，如表 2 所示。

表 2 干旱重现期时间与等级划分

Tab.2 Recurrence Period and Drought Category in Five Cities

干旱指数GEVI	重现时间 T/a	干旱等级
$0 < GEVI$	0~2	无旱
$-0.55 \leq GEVI < 0$	2.8~5.7	轻旱
$-0.83 \leq GEVI < -0.55$	6~10	中旱
$GEVI < -0.83$	>10	重旱

由于 SPI 指数和 GEVI 指数都只是考虑降水量，将某一时期的降水量作为一个序列，用特定的概率密度函数拟合降水量分布形态对应的累积概率划分旱涝尺度。所以，能否更为客观地遵循降水量的分布形态是评价和衡量这两种干旱指标优劣的重要标准 [12]。为了和现有通用的 SPI 干旱指数方法进行比较，我们以徐州站和盐城站的降水量数据为例，分别用这两种指数进行计算，结果如表 3 所示。

表 3 苏北五市的SPI指数和GEVI指数干旱等级划分

Tab.3 SPI and GEVI Drought Category in Five Cities

地区		无旱	轻旱	中旱	重旱
徐州市	SPI3	209	35	23	21
	SPI6	194	51	28	15
	SPI12	200	34	35	19
	GEVI	196	72	15	17
盐城市	SPI3	188	53	30	17
	SPI6	189	53	31	15
	SPI12	190	63	19	16
	GEVI	190	74	14	22

从表 3 可看出，SPI 指数和 GEVI 指数在衡量干旱程度上具有很好的一致性，均能有效的反应苏北地区的干旱状况，但两种指数得到的结果还是存在一定的差距的，造成这种差距的主要原因是由于所采用的降水量拟合分布函数和对干旱强度的划分有所差异所造成的。王澄海等[11]指出 GEVI 指数与目前广泛使用的 Ci 指数检测结果较为一致，GEVI 指数的优点主要在于降水量的拟合分布函数（广义极值分布）是 3 种偏态分布的统一，因此在拟合降水量分布函数时能够更好的适应不同地区的降水量特征，同时，可以针对不同特点的地区采用灵活的干旱划分标准。

为了分析苏北地区季节性干旱灾害情况,按照气象学的季节划分规则,以一年的3月至次年2月为一个季节循环。即3-5月为春季,6-8月为夏季,9-11月为秋季,12月至次年2月为冬季。以徐州市为例,根据该季节划分方法对1989-2013年徐州市的GEVI值分季节进行统计,结果如图3所示。由图3可知,徐州市季节性旱灾主要发生在春、秋和冬季。例如,春季发生重旱的年份为2000年3月份和2001年5月份;夏季发生重旱的年份为1996年(6月);秋季发生重旱的年份为1990年、1991年和2002年(10月)、1998年(9月)、1995年、1995年、2002年和2010年(11月);冬季发生重旱的年份为1996年和1997年(12月),1995年、2006年、2007年和2009年(1月)。同时,在发生旱灾的分界线0以下,徐州市经常是冬旱连春旱,初夏旱、伏旱和秋旱交替发生,具有连旱的特点,这与徐州市干旱实际是基本一致的,苏北其他4个市的情况具有类似的特征。

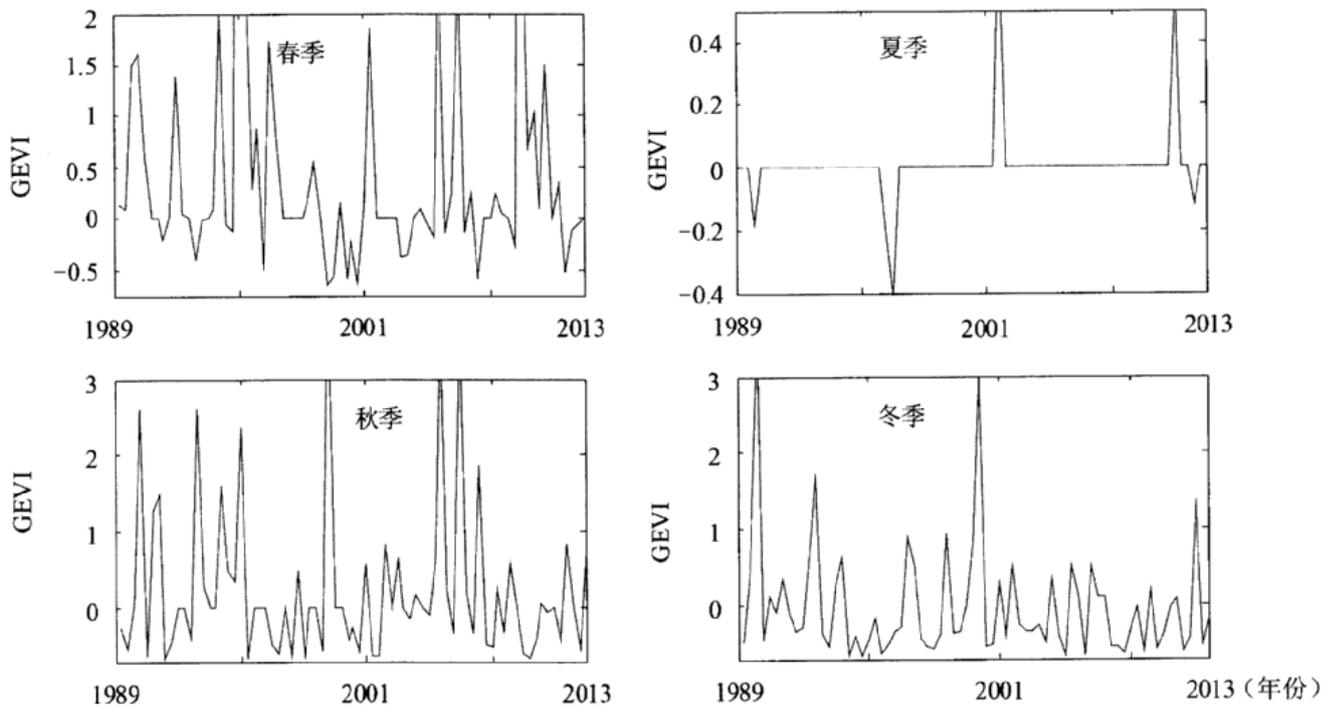


图3 徐州市季节性干旱GEVI指数分析

Fig.3 Seasonal Drought GEVI Index Analysis of Xuzhou City

2.3 DFA 分析

通过 GEVI 干旱指数分析可知苏北地区的干旱季节性分布特征,下面将研究苏北地区干旱的长程相关性,即研究干旱发生是否具有规律性。按照 DFA 算法步骤,首先对降水量进行离差化,累积离差结果如图4所示,从图4可以看出,徐州市月降雨量的变化趋势在不同阶段表现出一定的持续性,整体上存在三次比较明显的突变,在整个20世纪90年代-2005年降水量有涨有落,整体上处于平稳下降,2005-2008年呈现增加趋势,2008-2011年持续减少,2011年出现明显拐点,降水量突然增加之后又出现持续减少的趋势。

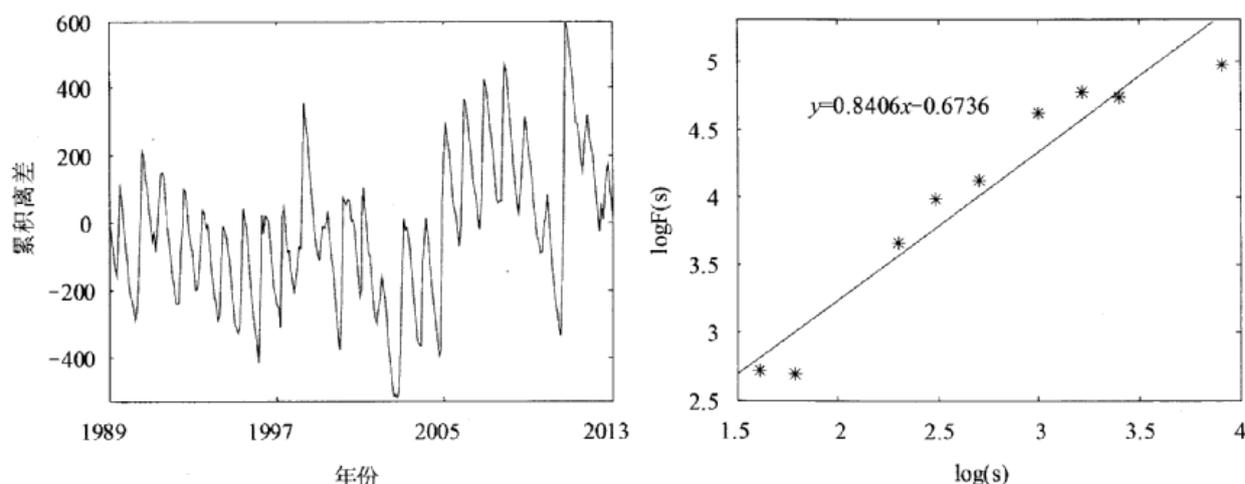


图 4 徐州市降水累积离差和DFA对数关系图

Fig.4 Precipitation Accumulated Deviation and DFA log in Xuzhou City

以上初步分析表明徐州市月降水量存在持续性特征，为弄清楚这种特征是在什么时间尺度上的一种长程行为。下面采用 DFA 方法对序列进行分析，将离差累积序列 $\{y(i), i = 1, 2, \dots, 300\}$ 从始端开始将数列长度 300 分成等标度 s 的非重叠的 $N_s = \text{int}(N/s)$ 个部分。为了便于计算，我们选取等标度 $s = [75, 60, 50, 30, 25, 20, 15, 12, 10, 6, 5, 4]$ ，采用二阶多项式拟合函数 $y_v(i)$ ，利用 Matlab 软件对徐州市的离差累积数据进行 DFA 分析，图 4 为 $F(s)$ 关于标度 s 变化的 $\log F(s) \sim \alpha \log s$ 图，其中 α 为 \log - \log 图中的曲线斜率，即 DFA 标度指数 α （徐州）= 0.8406 > 0.5，这说明徐州市的降水量序列具有长程相关性，即将来序列的变化趋势与过去保持一致，即 2011 年之后降水量出现持续减少的趋势，则未来将也是整体减少的趋势，出现干旱的可能性加大。同样的，可以计算其他城市的 DFA 标度指数 α （连云港）= 0.7831， α （宿迁）= 0.8636， α （盐城）= 0.9029， α （淮安）= 0.8856。

从上述 DFA 分析可以得出如下结论：苏北五市的 DFA 标度指数 a 值均满足 $0.5 < a < 1$ ，这说明苏北五市的降水量序列具有正长程相关性，即将来序列的变化趋势与过去保持一致，若过去是整体增加的趋势，则未来将也是整体增加的趋势，若过去是整体减少的趋势，则未来将也是整体减少的趋势，其中， α （盐城）= 0.9029 的值趋近于 1，说明盐城市降水量序列长程相关性较苏北其他市强。

3 结论

以全球变暖为主要特征的全球气候变化已经并将继续对环境、生态和社会经济系统产生重大影响，并通过对农业生产和相关产业的影响直接威胁国家和全球的粮食安全。为了了解近年来江苏省苏北地区干旱变化特征，并对未来的可能变化趋势做出预测，从气象干旱的角度，通过对苏北五市的月降水量时间序列进行 GEVI 指数分析和 DFA 分析，得出以下结论：

（1）苏北地区五市的月平均降水量均服从广义极值 Fréchet 概率分布，并且月降水量具有从江苏省的西北（徐州市）地区向东南沿海（盐城市）地区递增的空间分布特征，苏北东南部沿海地区是月降水量最大的地区，同时也是降水月际变化最大的地区。

(2) GEVI 干旱指数基于降水量服从偏态分布而定义的干旱指数, 计算简单且资料容易获取, 通过计算苏北地区的 GEVI 干旱指数, 可知苏北地区整体上属于干旱灾害频发的地区, 以轻旱为主且季节性特征明显。GEVI 指数和 SPI 指数采取了两种不同的偏态分布, 对干旱等级的衡量效果不尽相同, 但是, GEVI 指数降水量服从广义极值分布, 是 3 种偏态分布的统一, 因此在拟合降水量分布函数时更为详尽和客观, 具有更大的灵活性。

(3) 通过 DFA 方法分析, 显示苏北地区月降水量在变化上均具有长程正相关性, 即将来序列的变化趋势与过去保持一致, 这对苏北地区的干旱灾害的特征分析、评估与监测研究具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 张乐, 王慧敏, 佟金萍. 云南极端旱灾应急管理模式构建研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24 (2) : 161-165.
- [2] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C].//The 8th conference on applied climatology, American Meteorological Society, 1993 : 179-184.
- [3] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28 (4) : 523-529.
- [4] 冶明珠, 李林, 王振宇. SPI 指数在青海东部地区干旱监测中的应用及检验[J]. 青海气象, 2007 (4) : 21-24.
- [5] 韩萍, 王鹏新, 王彦集, 等. 多尺度标准化降水指数的 ARIMA 模型干旱预测研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26 (2) : 212-218.
- [6] 袁云, 李栋梁, 安迪. 基于标准化降水指数的中国冬季干旱分区及气候特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30 (4) : 917-925.
- [7] 林盛吉, 许月萍, 田焯, 等. 基于 Z 指数和 SPI 指数的钱塘江流域干旱时空分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (2) : 20-26.
- [8] 罗艳青, 邹滨, 邱永红. 华东地区干旱灾害时空演化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27 (10) : 58-64.
- [9] 付丽娟, 曹杰, 德勒格日玛. 三种气象干旱指标在内蒙古地区的适用性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27 (2) : 105-113.
- [10] 马海娇, 严登华, 翁白莎, 等. 典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J]. 干旱区研究, 2013, 30 (4) : 728-734.
- [11] 王澄海, 王芝兰, 郭毅鹏. GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验[J]. 地球科学进展, 2012, 27 (9) : 957-965.
- [12] 王芝兰, 王劲松, 李耀辉, 等. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J]. 高原气象, 2013, 32 (3) : 839-847.
- [13] PENG C K, HAVLIN S, STANLEY H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series [J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 1995, 5 (1) : 82-87.

-
- [14] KANTELHARDT J W , ZSCHIEGNER S A , KOSCIELNY-BUNDE E , et al . Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J].Physica A : Statistical Mechanics and its Applications , 2002 , 316 (1/4) : 87-114 .
- [15] 郜建华, 薛惠文. 对云量的长程相关性研究[J].北京大学学报(自然科学版), 2011 , 47 (4) : 613-618.
- [16] 郑腾飞, 郭建茂, 尹继福, 等. 基于 DFA 法的江苏省极端降水时空分布特征研究[J].自然灾害学报, 2012, 21 (4) : 76-83.
- [17] 高沈瞳, 徐长春. 额尔齐斯河流域上游地区近 50 a 来气温和降水变化的 DFA 分析[J].冰川冻土, 2014, 36 (3) : 706-716.
- [18] 于伟红, 贾康丽, 潘学平, 等. 河北省降水和气温的非趋势性波动分析[J].干旱区资源与环境, 2015 , 29 (1) : 134-139 .
- [19] 王纪军, 潘攀, 胡彩虹, 等. 河南省旬日照时数的标度不变性分析[J].应用生态学报, 2015, 26 (2) : 521-526.
- [20] 张宗磊, 缪启龙, 王喜林. 江苏省 GEF 项目区气候变暖的农业效应[J].气象与减灾研究, 2011 , 34 (2) : 55-62.