

# 鄱阳湖水位多时间尺度动态变化特性分析<sup>1</sup>

张范平<sup>1</sup>, 方少文<sup>2\*</sup>, 周祖昊<sup>3</sup>, 温天福<sup>1</sup>, 张梅红<sup>1</sup>

( 1 . 江西省水利科学研究院, 江西南昌 330029 ; 2 . 江西省水文局, 江西南昌 330002 ; 3 . 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038 )

**【摘要】**利用鄱阳湖湖口、星子、鄱昌、吴城、棠荫和康山水位站多年逐日水位资料, 采用统计分析法、趋势分析法、Mann-Kenda 川卜参数检验法和 Morlet 小波分析法分析了鄱阳湖水位年内变化特征、年际变化趋势、极值变化、突变特征及其周期性。结果表明: 鄱阳湖水位在年内具有高动态变化的特征, 月最高水位一般出现在 7 月份, 平均水位为 17.75m, 最低水位一般出现在 1 月份, 平均水位为 10.5m, 年内变化幅度达 6.95m; 鄱阳湖水位在多年尺度上呈现微弱的下降趋势, 但是自 2003 年以来下降幅度较大, 并多次出现极低枯水位; 按年代际来对比, 则 2000 年以后的平均水位是所有年代中最低的; 鄱阳湖日、月、年最高水位出现在 1954 年和 1998 年, 年最低水位出现在 2003 年, 月和日最低水位出现时间不一致, 但都主要集中在 2003 年之后; 鄱阳湖水位有 2 个比较明显的突变点, 即 1965 年附近和 2006 年附近, 其中都昌站突变前后最大水位差达到了 1.3m; 鄱阳湖水位受多种因素的影响, 并没有表现出明显的周期特性, 只在 28 时间尺度上表现出微弱的周期特性。

**【关键词】**鄱阳湖; 水位动态变化; Mann-Kenda; Morlet 小波

**【中图分类号】**TV123

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1004-8227(2017)01-0126-08

**【DOI】**10.11870/cjlyzyyhj201701015

鄱阳湖 (28° 22' - 29° 45' N, 115° 47' - 116° 45' E) 位于江西省北部, 长江南岸, 上承赣江、抚河、信江、饶河、修水“五河”来水, 调蓄以后经九江市湖口县注入长江, 是我国面积最大的淡水湖泊, 也是长江中下游仅存的两个通江湖泊之一。鄱阳湖水位受五河入湖水量和长江干流顶托作用, 在年内和年际间变化幅度都比较大[11]。鄱阳湖高动态的水位特征, 形成其

**收稿日期:** 2016-06-13

**修回日期:** 2016-09-22

**基金项目:** 江西省水利科技重大项目 (KTZ01411) [ The Water Conservancy science and Technology Foundation of Jiangxi Province (KTZ01411) ]; 江西省水利厅重大水利科技竞争性项目 (KTZ01501) [ The Major Water Conservancy science and Technology Competitive Foundation of Jiangxi water conservancy bureau (KTZ01501) ]; 江西省水利科技重大项目 (KTZ01508) [ The Water Conservancy science and Technology Foundation of Jiangxi Province (KTZ01508) ]; 江西省博士后科研择优资助项目 (Z016KY19) [ Post-doctoral Preferentially Research Foundation of Jiangxi Province (2016KY19) ]

**作者简介:** 张范平 (1986-), 男, 博士后, 主要从事水文水资源系统分析及水文生态学研究. E-mail: fanPingzhang@163.com  
\* 通讯作者 E-mail: swfangsoo@sina.com

独特的“夏秋一水连天，冬春荒滩无边”湖泊湿地景观和生态格局。但近年来，鄱阳湖湖区低水位提前且持续时间延长的现象日益明显，湖区水位不断突破历史最低值 [2]，导致湿地生态系统出现退化趋势，湿地生态安全和水安全面临极大的挑战。多年观测资料显示，鄱阳湖极枯水位多发生于每年 12 月份至次年的 1 月份。然而受长江来水不足及江西省境内降水偏少的影响，2013 年 11 月 17 日鄱阳湖星子站水位跌破 8m，相应的湖区通江水体面积不及丰水期面积的十分之一，鄱阳湖极枯水位出现时间大幅提前。近年来，受极端气候和高强度人类活动的影响，鄱阳湖区洪涝灾害和干旱发生概率明显增加，这给鄱阳湖的防洪安全、用水安全和生态安全提出了严峻的考验。针对鄱阳湖面临的一系列问题，国内很多学者以长系列水位观测资料和现场试验对鄱阳湖水位变化特征及其驱动因素 [3]、三峡工程运行后鄱阳湖和长江之间水量交换关系 [4-7] 以及水位变化对湿地生态系统的影响 [8-10] 等多个方面做了深入研究。湖泊湿地水位动态变化是流域 / 区域内气象水文条件变化和人类活动共同作用的结果，同时也是湿地生态系统发展和演变的主要驱动因素之一，分析其变化趋势、极端水位出现时间、突变特征以及周期特征对于维持区域供水安全、防洪安全和生态安全具有重要意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 资料来源

本文选用鄱阳湖湖区湖口、星子、都昌、吴城、棠荫和康山 6 个水位站多年实测逐日水位数据，从多个时间尺度上分析鄱阳湖水位动态变化过程。6 个水位站的具体位置见图 1，水位站的详细数据特性见表 1。

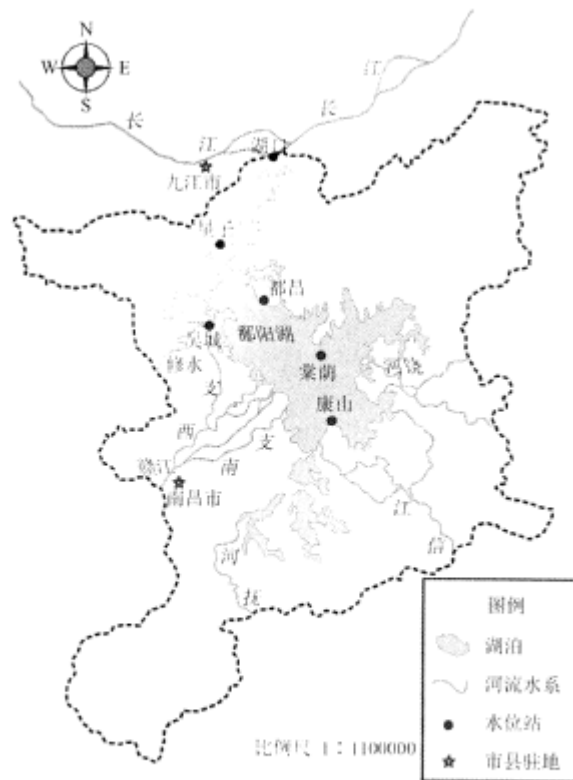


图 1 鄱阳湖区主要水位站点分布图

Fig.1 Locations of Water-level Station at Poyang Lake

表 1 鄱阳湖主要水位站点水位变化特征统计表  
Tab.1 Characteristics of Water-level at the Poyang Lake

站名	序列长度(年)	不均匀系数 $C_u$	月极值比	变差系数 $C_v$	水位(m)			年极值比
					最大值	最小值	平均值	
星子	1953-2014	0.218	1.97	0.07	16.12	10.96	13.37	1.48
都昌	1952-2013	0.172	1.69	0.07	16.42	10.97	13.79	1.50
康山	1952-2013	0.088	1.31	0.05	17.27	13.80	15.19	1.25
棠荫	1958-2013	0.124	1.46	0.07	16.43	12.67	14.55	1.30
吴城	1990-2012	0.153	1.57	0.08	16.76	12.18	14.60	1.38
湖口	1953-2013	0.253	2.17	0.05	15.59	10.79	12.84	1.44
平均值	-	0.168	1.64	0.065	16.43	11.895	13.96	1.39

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 统计分析法

应用统计分析法描述水位在年内及年代际的变化特性。对于水位年内变化特性，用不均匀系数  $C_n$  表示：

$$C_n = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} \frac{(h_i/\bar{h} - 1)^2}{12}} \quad (1)$$

式中： $h_i$  为月平均水位，单位：m， $i=1, 2, \dots, 12$ ； $\bar{h}$  为年平均水位，单位：m。 $C_n$  越大表明水位年内变化幅度越大。

对于水位年际变化特性采用变差系数  $C_v$  和水位极值比  $K$  (年最高水位和最低水位之比) 表示。

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{H}} \quad (2)$$

其中： $\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_j$ ， $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (H_j - \bar{H})^2}{n}}$ 。

式中： $H_j$  为第  $j$  年的年平均水位，单位：m， $j=1, 2, \dots, n$ ； $n$  为观测年限； $\bar{H}$  为多年平均水，单位：m。 $C_v$  和  $K$  的值越大表明水位年际变化越大。

### 1.2.2 Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 法属于非参数检验方法，可以用来检验一个时间序列的变化趋势和识别序列是否有突变点[11]。该方法的优点是不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，更适用于类型变量和顺序变量，且计算简单，被广泛应用于气象、水文资料的趋势分析和突变检测中[12-15]。

### 1.2.3 小波分析法

小波分析 (Wavelet Analysis) 是 20 世纪 50 年代后期在 Fourier 变换的基础上发展起来的一种信号的时间-频率 (时间-尺度) 分析方法, 是发展起来的新的应用数学分支, 它的思想来源于伸缩和平移方法。和 Fourier 变换相比, 小波变换是个时间和频域的局部变换, 它适用于处理局部或暂态信号, 因而能有效地从信号中提取信息, 通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化分析 (Multiscale Analysis), 解决了 Fourier 变换不能解决的许多困难问题。近年来, 小波分析在水文学和气象学中的应用逐渐增多, 如水文气象序列周期分析、水文序列滤波、水文序列趋势分析、水文序列奇异性检测和水文序列预测预报等 [16-19]。

## 2 结果与分析

### 2.1 水位年内变化规律

鄱阳湖 6 个水位站多年月平均水位年内变化过程见图 2。从图中可以看出, 鄱阳湖月最高水位一般出现在 7 月份, 平均水位为 17.75m, 最低水位一般出现在 1 月份, 平均水位为 10.8m, 年内变化幅度达 6.95m。从表 1 中不均匀系数  $C_n$  和月极值比的统计结果可以看出, 6 站水位年内变化极值比 (即最高水位与最低水位的比值) 分别为湖口 (2.17)、星子 (1.97)、都昌 (1.69)、吴城 (1.57)、棠荫 (1.46) 和康山 (1.31), 可以看出鄱阳湖水位年内变化受长江水位的影响很大, 越靠近湖口, 水位年内变化幅度越大。

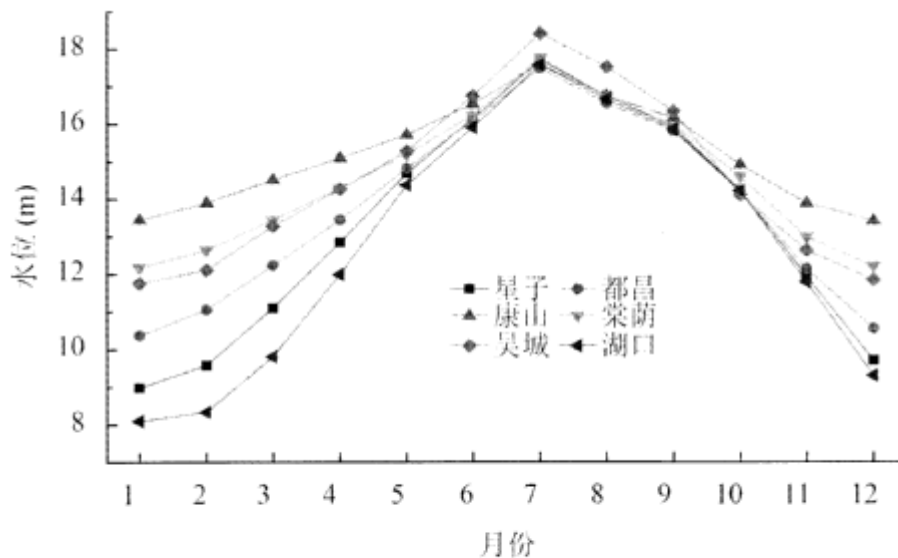


图 2 鄱阳湖水位年内变化过程

Fig.2 Monthly Changing Process of Water-level at Poyang Lake

### 2.2 水位年际变化趋势

由于湖口、星子、都昌和康山 4 站的水位观测时间序列比较完整 (1953 — 2013 年), 本文以该四站水位的平均值作为鄱阳湖的平均水位, 分析鄱阳湖水位多年变化趋势。

从图 3 中可以看出，鄱阳湖水位在多年尺度上呈现微弱的下降趋势，但是自 2003 年以来下降幅度较大，并多次出现极低枯水位。应用 Mann-Kendall 方法对鄱阳湖 6 个水位站多年径流变化趋势进行分析，统计量 Z 值见表 2。从表中可以看出，6 个水位站的 Z 值全部为负值，即水位整体呈现下降趋势。其中星子、都昌、康山、棠荫和湖口的统计量 Z 的绝对值  $|Z| < 1.65$ ，没有通过显著性检验，说明这 5 站水位下降趋势并不明显；吴城站统计量  $1.96 < |Z| < 2.58$ ，通过了 95% 显著性水平检验，但由于该站水位序列长度仅为 23a (1990—2012 年)，并不适合用 Mann-Kendall 作趋势分析。结合鄱阳湖年平均水位距平统计结果 (图 4) 可以看出，鄱阳湖水位在 2000 年以后下降趋势明显，只有 2002、2003、2005、2010 和 2012 年的水位高于多年平均水位，2006—2009 年发生了持续性的低水年，2011 年出现了有观测数据以来的最低水位。

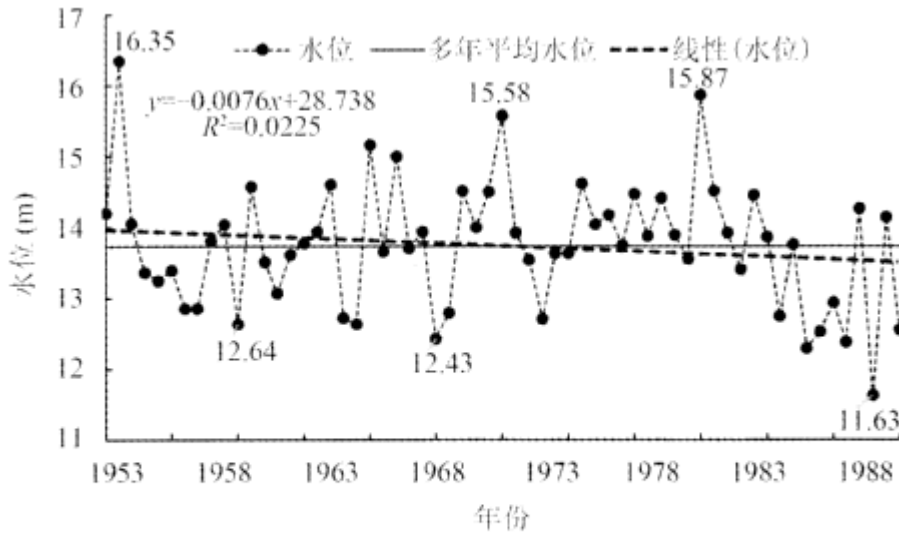


图 3 鄱阳湖水位多年变化趋势

Fig.3 Annual Changing Process of Water-level at Poyang Lake

表 2 鄱阳湖各水位站 Mann-Kendall 趋势变化统计

Tab.2 Mann-kendall Test Results of Tendency at Poyang Lake

水位站	Z 值	变化趋势	显著性水平
星子	-0.74	降低	不显著
都昌	-1.15	降低	不显著
康山	-0.87	降低	不显著
棠荫	-0.94	降低	不显著
吴城	-2.43*	降低	显著
湖口	-0.72	降低	不显著

注：\*表示通过 95% 显著性检验。

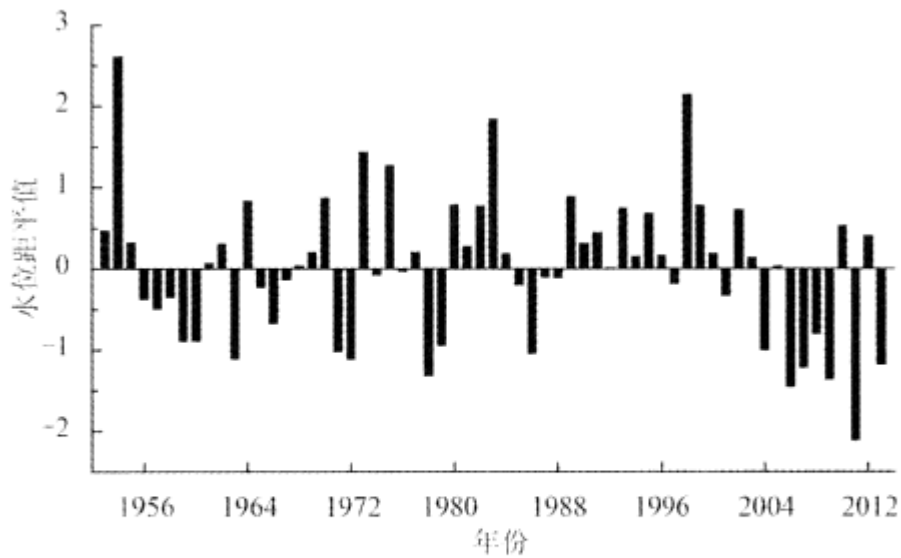


图4 鄱阳湖水位距平图

Fig.4 Anomalies of Annual Water-level at Poyang Lake

从鄱阳湖水位的累积距平图（图5）可以看出，鄱阳湖的水位在1955-1972年处于下降趋势，1973-1979年之前出现波动，1980-2003年处于上升趋势，2004年之后下降趋势明显，并且下降速度加快。

鄱阳湖6个水位站实测水位在年际间的变化特征统计结果见表3。从图表中可以明确看出，2000年以后鄱阳湖各水位站的水位均出现大幅下降，出现了有记录以来历史最低水位。与上世纪90年代的水位和多年平均水位相比，21世纪以后鄱阳湖水位分别下降了1.08m和0.52m。

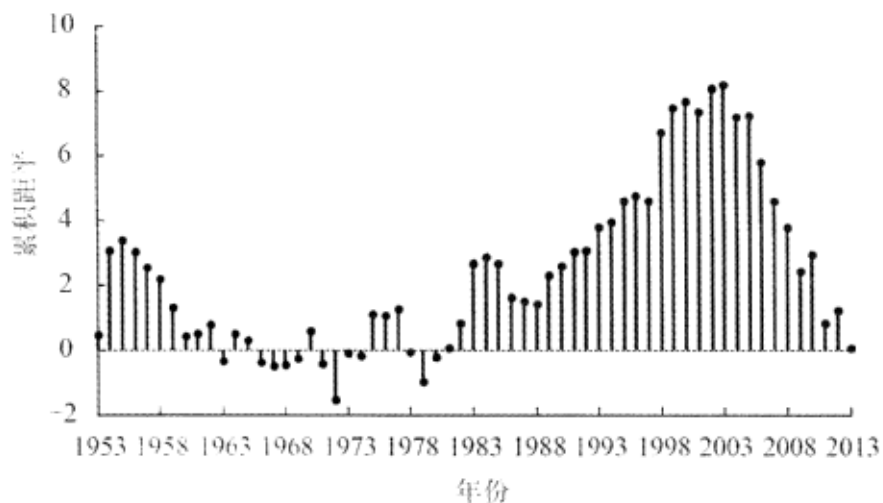


图5 鄱阳湖水位累积距平图

Fig.5 Accumulated Anomaly of Annual Water-level at Poyang Lake

表 3 鄱阳湖水位年际变化特征(m)

Tab.3 Water-level Changing Process Among Decades

水位站 年代	1950~1959	1960~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000年至今	多年平均水位
星子	13.47	13.15	13.24	13.73	13.90	12.70	13.37
都昌	14.03	13.60	13.73	14.11	14.28	13.02	13.79
康山	15.43	15.00	15.10	15.29	15.49	14.82	15.19
棠荫	-	14.44	14.51	14.77	14.95	14.09	14.55
吴城	-	-	-	-	15.16	14.05	14.60
湖口	13.05	12.58	12.60	13.14	13.36	12.31	12.84
平均水位	14.04	13.71	13.84	14.21	14.52	13.44	13.96

表 4 鄱阳湖极端水位情况统计表(m)

Tab.4 Extreme Water-levels at Poyang Lake

站名	星子	都昌	康山	棠荫	吴城	湖口
日最低水位	7.11	7.53	11.97	9.64	9.21	5.91
出现日期	2004-02-04	2013-12-15	2004-01-11	2007-12-18	2012-01-05	1963-02-06
月最低水位	7.28	8.3	12.2	9.92	9.64	6.07
出现月份	2004-02	2009-01	2004-01	2007-12	2007-12	1963-02
年最低水位	10.96	10.97	13.80	12.67	12.18	10.79
出现年份	2011	2011	2011	2011	2011	2011
日最高水位	22.52	22.43	22.43	22.57	22.98	22.53
出现日期	1998-08-02	1998-08-02	1998-07-30	1998-07-30	1998-08-02	1998-07-30
月最高水位	21.96	21.85	21.86	21.96	22.42	22.01
出现月份	1998-08	1998-08	1998-08	1998-08	1998-08	1998-08
年最高水位	16.12	16.42	17.27	16.43	16.76	15.59
出现年份	1954	1954	1954	1998	1998	1954

### 2.3 水位极值变化规律

表 1 中 6 个水位站的水位变差系数  $C_v$ 、水位最大最小值和年极值比的统计结果表明, 鄱阳湖水位在多年间存在较大的差异, 水位变化年极值比在 1.25-1.50 之间, 距离长江干流较近的湖口、星子和都昌站变化幅度更大, 最高水位和最低水位差分别达到了 4.8、5.16 和 5.45m。综合来说, 鄱阳湖在上世纪 90 年代平均水位最高, 而在 2000 年以后平均水位最低。表 4 统计了鄱阳湖 6 个水位站日、月、年尺度上最高、最低水位及其出现的时间, 对比图 3 可以看出, 鄱阳湖年平均最高水位出现在 1954 和 1998 年(棠荫和吴城站没有 1954 年的实测水位), 最低水位出现在 2011 年。

### 2.4 水位突变特性

应用 Mann-Kendall 法检验时间序列的突变特性时, 将 UF 和 UB 两条统计量序列曲线和  $uF_{0.05} \pm 1.96$  两条直线绘制在同一张图上。如果 UF 和 UB 两条曲线在两条临界线  $uF_{0.05} = \pm 1.96$  之间相交, 则说明该序列有突变, 交点对应的时刻便是突变开始的时间。通过对比分析发现, 鄱阳湖 6 个水位站的水位突变情况几乎相同, 有 3 个比较明显的突变点, 即 1955、1965 和 2006 年, 但是由于 1955 年之前的数据样本太少, 因此舍去突变点 1955 年不作分析, 其余两个点突变前后水位变化情况见表 5。下面以湖口站和康山站的 Mann-Kendall 检验图分析鄱阳湖水位突变情况。

表 5 鄱阳湖水位Mann-Kendall突变检验结果(m)

Tab.5 Mann-Kendall Saltation Test Results of Water-levels at Poyang Lake

水位站	突变时间	突变前 平均水位	突变后 平均水位	突变前后水 位变化幅度
都昌	1965	13.86	13.94	0.08
	2005	13.94	12.63	-1.31
星子	1965	13.34	13.46	0.12
	2007	13.46	12.43	-1.03
康山	1968	15.17	15.26	0.09
	2006	15.26	14.63	-0.63
棠荫	2005	14.65	13.9	-0.75
吴城	2006	14.93	13.62	-1.31
湖口	1969	12.79	13.02	0.23
	2005	13.02	12.06	-0.96

从图 6 中可以看出，康山站和湖口站都发生了 2 次明显的水位突变，突变点分别为 1968(1969) 年和 2006(2005) 年。康山站 1968 年之前的平均水位为 15.17m, 1969-2006 年的平均水位为 15.26m, 平均水位升高 0.09m; 2006-2013 年的平均水位为 14.63m, 平均水位降低 0.63m。湖口站水位受长江干流的影响较大，水位的突变表现的也更明显。湖口站 1969 年之前的平均水位为 12.79m, 1969-2005 年的平均水位为 13.02m, 平均水位升高 0.23m; 2006-2013 年的平均水位为 12.06m, 平均水位降低 0.96m。

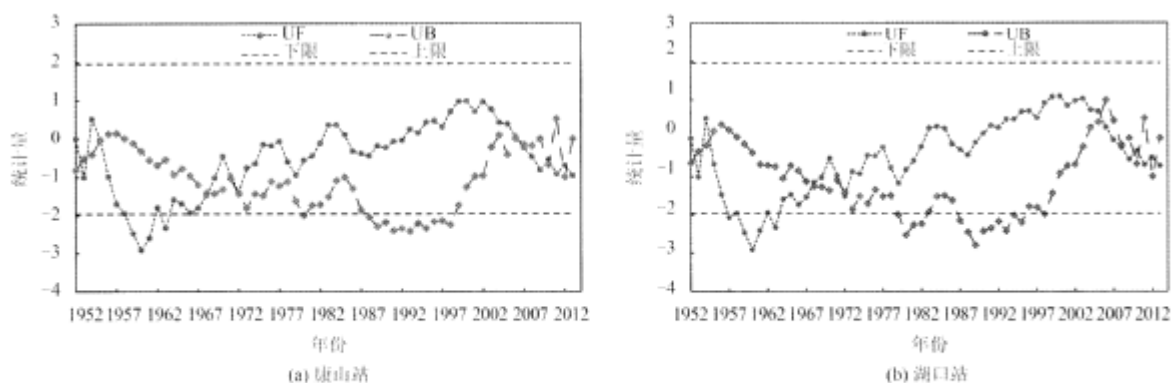


图 6 鄱阳湖水位Mann-Kendall突变检验结果

Fig.6 Mann-Kendall Curve of Annual Water-level at Poyang Lake

## 2.5 水位变化周期规律

下面以湖门、星子、都昌和康山 4 站的水位的平均值作为鄱阳湖的水位，应用小波分析法对鄱阳湖水位变化的周期特性进行分析。本文应用 Morlet 复值小波对预处理后的鄱阳湖的年水位时间序列进行分解，得到小波系数。绘制小波系数实部等值线图，见图 7。

当小波系数实部值为正时，代表水位较高，为负时表示水位较低。从图 6 中可以看出鄱阳湖水位变化没有明显的周期特性，只在 12a 以上尺度（周期中心约为 28）表现出一定的周期性，但也不甚明显。鄱阳湖位于鄱阳湖生态经济开发区的核心地带，受人工取用水的扰动比较大，加之气候变化和“五河”流域与长江干流大型水库调蓄过程的影响，使得鄱阳湖湖区水位过程发生变异，表现出明显的不规则特性。

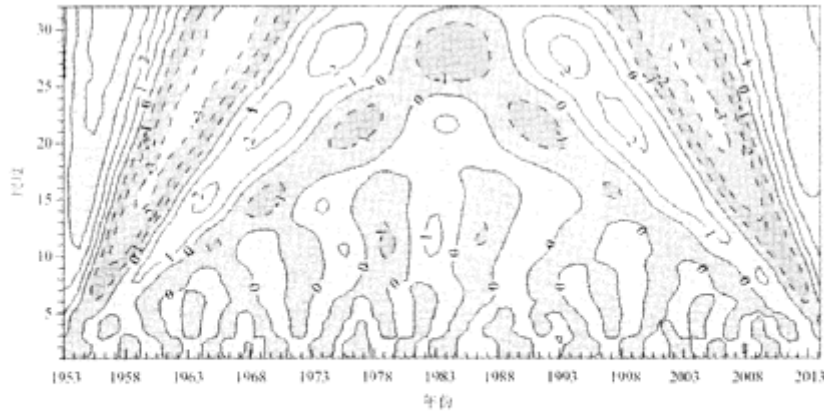


图 7 小波系数实部等值线图

Fig.7 Contour Map of Real Part of Wavelet Coefficients

小波方差图能反映水位时间序列的波动能量随尺度的分布情况，可用来确定水位演变过程中存在的主周期。从鄱阳湖水位小波方差图（图 8）中可以看出，只有 1 个相对明显的峰值，对应 28a 的时间尺度。

根据小波方差的检验结果，绘制出了控制鄱阳湖水位变化的 28a 尺度周期的小波系数图（图 9）C 从主周期趋势图中可以分析出在不同的时间尺度下，水位存在的平均周期及丰-枯变化特征。图 9 显示了在 28a 特征时间尺度上，鄱阳湖水位变化的平均周期为 18a 左右，大约经历了 3.5 个丰-枯变化期。

### 3 结论与讨论

鄱阳湖水位变化既受流域降水、径流、蒸散发等自然因素的影响，也受到流域水库调节、环湖区农业、工业和社会用水、采砂、围垦等人工措施的影响。本文通过多种方法从多个角度对鄱阳湖水位年内年际的变化特征进行分析，得出如下结论：

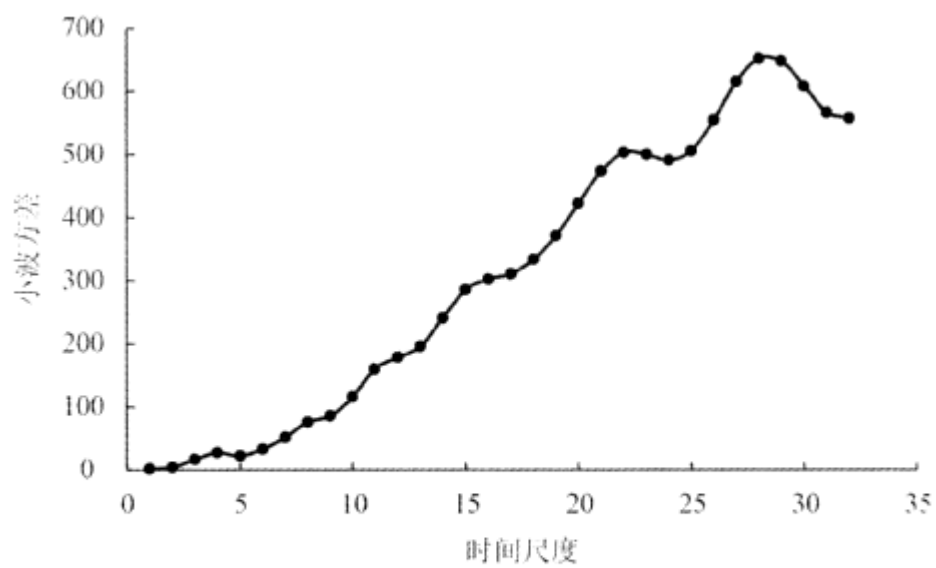


图8 小波方差图

Fig.8 Wavelet Variance Figure

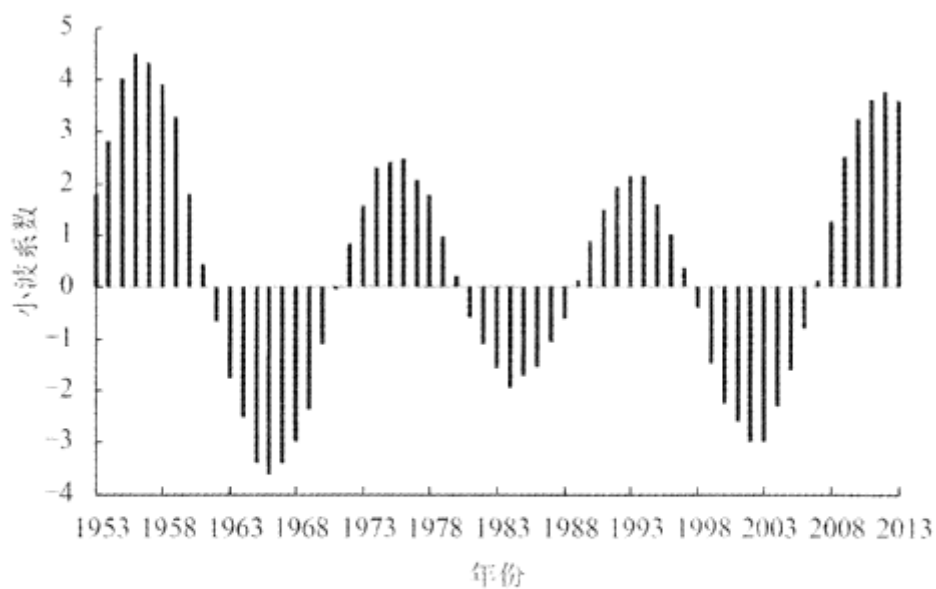


图9 鄱阳湖水位变化的28 a特征时间尺度小波实部过程线

Fig.9 Real Part Process of 28 Year Characteristic Time Scales of Poyang Lake

(1) 年内变化鄱阳湖水位在年内具有高动态的变化特征, 且越靠近鄱阳湖入长江口水位年内的变化幅度越大, 多年平均月最高最低水位差达到 6.95m。

(2) 年际变化鄱阳湖水位从上世纪 50 年代至今, 水位整体呈现微弱的下降趋势, 但是自从 1990 以后, 水位的下降趋势明显加快, 特别是 2003 年以后, 番口阳湖连续多年出现极端枯水情况。

(3) 极值变化鄱阳湖多尺度极端水位分析结果表明, 湖区日、月、年最高水位出现在 1954 年和 1998 年(棠荫和吴城站没有 1954 年的水位观测资料);6 站最低水位出现时机则不一致, 但都主要集中在 2003 年之后(湖口站日、月最低水位出现在 1963 年)。

(4) 突变特性鄱阳湖的水位存在 2 个比较明显的突变点, 即 1967 年附近和 2006 年附近。以湖口站为例, 湖口站 1969 年之前的平均水位为 12.79m, 1969-2005 年的平均水位为 13.02m, 平均水位升高 0.23m;2006-2013 年的平均水位为 12.06m, 平均水位降低 0.96m。

(5) 周期性受多种因素的共同影响, 鄱阳湖水位多年变化的周期特性已经被扰乱, 仅存在一个相对明显的周期(约为 18a), 20 世纪 50 年代至今大约经历了 3,5 个丰一枯变化期。

鄱阳湖水文节律的变化(退水时间提前、枯水才间延长、出现极低枯水情况、极端枯水事件频发等)给湖区防洪、供水和生态系统造成了重大影响。目前已经有专家学者应用长系列水文气象观测资料通过数值分析计算和物理模型试验对鄱阳湖水位变化的影响因素做了分析。鄱阳湖年内年际水位变化规律与鄱阳湖流域内五河入湖水量具有较大的相关性[20]。但是三峡水库运行后, 长江中下游河床地貌、悬沙分布和水沙过程都发生了重大变化, 这些变化导致鄱阳湖和长江之间江湖水量交换关系发生重大变化, 长江干流水位对鄱阳湖水位的控制作用愈发明显, 特别是在鄱阳湖退水阶段(10-11 月)[5, 21]。鄱阳湖多年平均年入湖沙量为 1862 万 t, 而湖口站多年平均年出湖沙量为 998 万 t, 表现为淤积状态, 年平均泥沙淤积量为 862 万 t。但是 2001 年以后, 鄱阳湖年出湖沙量明显超过入湖沙量, 表现为净冲刷状态, 年净冲刷量约为 700 万 t[6, 22]。鄱阳湖泥沙冲淤变化、大规模的采砂活动和湖区围垦改变了湖泊的形态[23], 使得鄱阳湖在枯水期的出流能力增加到原来的 1.5-2.0 倍[24]。除此之外, 鄱阳湖环湖区经济社会用水增加、湖岸线变化以及湖区蒸散发条件也会对湖泊水位产生一定的影响。

由于鄱阳湖水位变化影响因素众多, 在多因素的综合作用下年内和年际间都表现出不稳定性, 在分析其演变特性的基础上对单因子及多因子耦合作用下鄱阳湖水位的变化趋势及其作用机制将是未来的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 叶春, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MODIS 的都阳湖湿地植被变化及其对水位的响应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 705-712.
- [2] 罗蔚, 张翔, 邓志民, 等. 近 50 年都阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 845-856.
- [3] 欧阳千林, 刘卫林. 近 50 年都阳湖水位变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1545-1550.
- [4] 汪迎春, 赖锡军, 姜加虎, 等. 三峡水库调节典型时段对鄱阳湖湿地水情特征的影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23(2): 191-195.
- [5] DAIX, WAN RR, YANG G. Non-stationary water level fluctuation in China's Poyang Lake and its interactions with Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(3): 274-288.
- [6] 刘志刚, 倪兆奎. 鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1265-1273.

- 
- [ 7 ] CAI XB , FENGL , WANG YX , et al . Influence of the three gorges proj ect on the water resource components of Poyang Lake watershed : observations from TRMM and GRACE [ J ] . *Advances in Meteorology* , 20 15 , 20 15 : 148913 .
- [ 8 ] 谢冬明, 郑鹏, 邓红兵, 等. 潘阳湖湿地水位变化的景观响应田. *生态学报*, 20 11 , 31 ( 5 ) : 1 269 — 1276 .
- [ 9 ] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 等. 潘阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究 [ J ] . *长江流域资源与环境*, 2010 , 19 ( 6 ) : 597 — 605 .
- [ 10 ] 刘旭颖, 关燕宁, 郭杉, 等. 基于时间序列谐波分析的都阳湖湿地植被分布与水位变化响应 [ J ] . *湖泊科学*, 2016 , 28 ( 1 ) : 195 — 206 .
- [ 11 ] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mami — Kendall 法的径流丰枯变化过程划分 [ J ] . *水资源与水工程学报*, 20 13 , 24 ( 1 ) : 60 — 63 .
- [ 12 ] 张晓, 李净, 姚晓军, 等. 近 45 年青海省降水时空变化特征及突变分析 [ J ] . *干旱区资源与环境*, 2012 , 26 ( 5 ) : 6 — 12 .
- [ 13 ] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann — Kendan 法的水文序列趋势成分比重研究 [ J ] . *自然资源学报*, 2011 , 26 ( 9 ) : 1585 — 1591 .
- [ 14 ] YUES , PILONP , CAVADIAS G . Power of the Mann — Kendall and Spearman , 5 rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [ J ] . *Journal of Hydrology* , 2002 , 259 ( 1 / 4 ) : 254 — 271 .
- [ 15 ] HAMED K H . Trend detection in hydrologic data : the Mann — Kendall trend test under the scaling hypothesis [ J ] . *Journal of Hydrology* , 2008 . 349 ( 3 / 4 ) : 350 — 363 .
- [ 16 ] 邹春霞, 申向东, 李夏子, 等. 小波分析法在内蒙古寒旱区降水量特征研究中的应用 [ J ] . *干旱区资源与环境*, 2012 , 26 ( 4 ) : 113 — 116 .
- [ 17 ] 王文圣, 丁 晶, 向红莲, 等. 小波分析在水文学中的应用研究及展望 [ J ] . *水科学进展*, 2002 , 13 ( 4 ) : 5 15 — 520 .
- [ 18 ] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望 [ J ] . *地理科学进展*, 20 13 , 9 ( 9 ) : 1413 — 1422 .
- [ 19 ] 王楠, 李栋梁, 张杰. 黄河中上游流域夏季异常降水的变化特征及环流分析 [ J ] . *干旱区地理*, 2012 , 35 ( 5 ) : 754 — 763 .
- [ 20 ] 赵军凯. 长江中下游江湖水交换规律研究 [ D ] . 上海: 华东师范大学博士学位论文, 2011 .
- [ 21 ] ZHANGQ , YE XC , WERNER AD , et al . An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake : comparison of Yangtze river and local catchment impacts [ J ] . *Journal of Hydrology* , 20 14 , 5 17 : 425 — 434 .
- [ 22 ] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 (2003 — 2014 年) [ M ] . 北京: 中国水利水电出版社, 2004 — 2015 .

---

[ 23 ] ZHANG SY , LIU YX , YANG YH , et al . Erosion and deposition w ithin Poyang Lake : evidence from a decade of satellite data ( J ) Journal of Great Lakes Research , 20 16 , 42 ( 2 ) : 364 — 374 .

[ 24 ] LAI XJ , SHANKMAND , HUBERC , et al . Sand mining and increasing Poyang Lake ' 5 discharge ability : a reassessment of causes for lake decline in China [ J ] . Journal of Hydrology , 2014 , 519 1 698 — 1 706 .