

# 基于 Morlet 小波分析的长江大通站径流 年际变化周期研究

纪小敏<sup>1</sup>, 刘炜伟<sup>2</sup>, 聂 青<sup>1</sup>, 程建敏<sup>2</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029;

2. 江苏省水文水资源勘测局连云港分局, 江苏 连云港 222004)

**摘要:** 为研究长江入海径流量的变化规律, 采用 Morlet 小波分析方法对长江大通水文站 1950 ~ 2012 年的年最大流量、年最小流量、年平均流量时间序列进行了分析, 得到大通站的流量年际变化规律及变化周期。结果表明: 大通站年最大流量增加了 5.43%, 年最小流量增加了 39.4%, 年平均流量减少了 1.39%。

**关键词:** 大通水文站; 径流量; Morlet 小波分析; 变化趋势; 变化周期

**中图分类号:** TV121      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-7839 (2016) 06-0026-04

## Research on runoff annual variation cycle at Datong hydrological station in Yangtze River based on Morlet wavelet analysis

Ji Xiaomin<sup>1</sup>, Liu Weiwei<sup>2</sup>, Nie Qing<sup>1</sup>, Cheng Jianmin<sup>2</sup>

( 1. Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu;

2. Lianyungang Hydrology and Water Resource Investigation Bureau of Jiangsu Province,  
Lianyungang 222004, Jiangsu )

**Abstract:** The Morlet wavelet method is used for researching the discharge variation regularity of Yangtze River. Annual average discharge, annual maximum discharge and annual minimum discharge time series of Datong hydrological station from 1950 to 2012 are analyzed. Variation regularity and variation period of Datong hydrological station is obtained. The results show that the annual maximum discharge has increased by 5.43%, the minimum discharge has increased by 39.4%, the annual average discharge has reduced by 1.39%.

**Key words:** Datong hydrological station; discharge; Morlet wavelet analysis; variation trend; variation period

## 0 引言

长江是我国第一大河, 其丰富的水资源和水能资源为流域内社会经济、生态环境的可持续发展提供了必要条件。受社会经济的迅速发展、水利工程的建设和运行、气候变化等因素的影响, 长江的径流特征在一定程度上会发生变化, 为明确

这种变化, 需要对长江径流序列的周期性和变化趋势进行分析。

由于水文水资源系统是一个具有多时间尺度演变特征的复杂系统, 其时间序列是一个非平稳的、复杂的系统过程, 具有尺度特征和混沌特征, 且不同时间尺度下具有不同的变化规律和变化趋势<sup>[1]</sup>。在分析时间序列变化趋势的方法中, Fourier、

收稿日期: 2015-12-28

作者简介: 纪小敏 (1981-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水文水资源。

Mann-Kendll、滤波等都是基于单一时间尺度,不能客观反映水文水资源系统多时间尺度的特征,而 Morlet 小波分析能够揭示隐藏在时间序列里的多种变化周期,反映系统在不同时间尺度的变化趋势,并能对系统未来发展趋势进行定性估计<sup>[2]</sup>。因此,本文选用 Morlet 小波分析对大通站水位变化周期及变化规律进行分析。

## 1 研究区概况

长江大通水文站是长江口外潮汐影响上边界,大通站以上,长江水位与流量之间具有良好相关性,大通站以下为感潮河段,水文特征复杂,河道流量受上游来水和下游潮汐的共同影响。大通站以上干流区间入江流量占长江总径流量的 97%,能够代表长江入海径流情况<sup>[3]</sup>,并且具有 1950 年以来连续完整的实测资料序列,故选用大通水文站作为本次研究的站点。

## 2 资料及方法

### 2.1 资料来源

本文选取了长江大通站 1950 ~ 2012 年的年最大、年最小、年平均流量资料,数据来自长江流域水文年鉴及相关参考文献。利用 MATLAB 7.0 软件,采用 Morlet 小波分析<sup>[4-8]</sup>对大通站水位变换时间序列进行多时间尺度分析。

### 2.2 小波分析

#### 2.2.1 小波函数

小波函数  $\psi(t)$  是具有震荡性、能迅速衰减到零的一种函数,需满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

$\psi(t)$  通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一族函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a \neq 0) \quad (2)$$

式中:

$\psi_{a,b}(t)$  —子小波;

$a$  —尺度因子,反映小波的周期长度;

$b$  —时间因子,反应时间上的平移。

小波函数的选取是小波分析的关键, Morlet 小波是复数形式的小波,在应用中比实数形式的小波更具优势,其实部与虚部相位相差  $\pi/2$ ,可以消除实数形式小波在变换过程中系数模带来的振荡,而且从其小波系数中可以分离出模和位相,本

文采用的 Morlet 小波的形式为:

$$\psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (c = 6.2) \quad (3)$$

#### 2.2.2 小波变换

对于基小波函数  $\psi(t)$ , 水文时间序列  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中:

$a$  —尺度因子,反映小波的周期长度;

$b$  —时间因子,反映时间上的平移;

$W_f(a, b)$  —小波变换系数。

实际工作中,时间序列常常是离散的,如  $f(k\Delta t)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $\Delta t$  为取样时间间隔), 则式 (4) 的离散形式为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (5)$$

#### 2.2.3 小波方差

将小波系数的平方值在  $b$  域上积分, 即得小波方差:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (6)$$

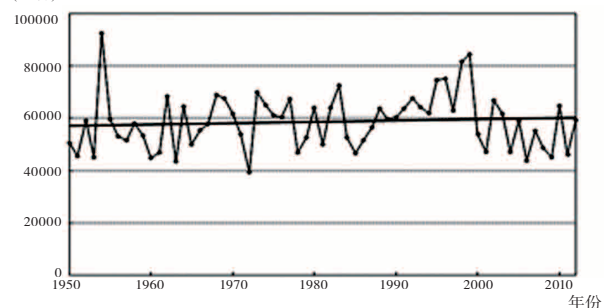
小波方差随尺度  $a$  的变化过程称为小波方差图, 它能反映波动的能量随尺度的分布。因此, 小波方差图可用来确定一个水文序列中存在的主要时间尺度, 即水文序列的主周期。

## 3 大通站流量变化特征

### 3.1 流量变化趋势分析

根据大通站 1950 ~ 2012 年的年最大、年最小、年平均流量的变化 (图 1) 可以看出, 大通站年最大流量总体增加 5.43%, 有上升趋势, 但上升趋势不大; 年最小流量总体增加率为 39.4%, 上升趋势明显, 说明长江流域枯水期降水量增加, 水利工程调度对枯水期流量影响较大; 年平均流量总体变化率为 -1.39%, 来水量略有减少, 但变化不大, 基本维持稳定。

年最大流量  
( $m^3/s$ )



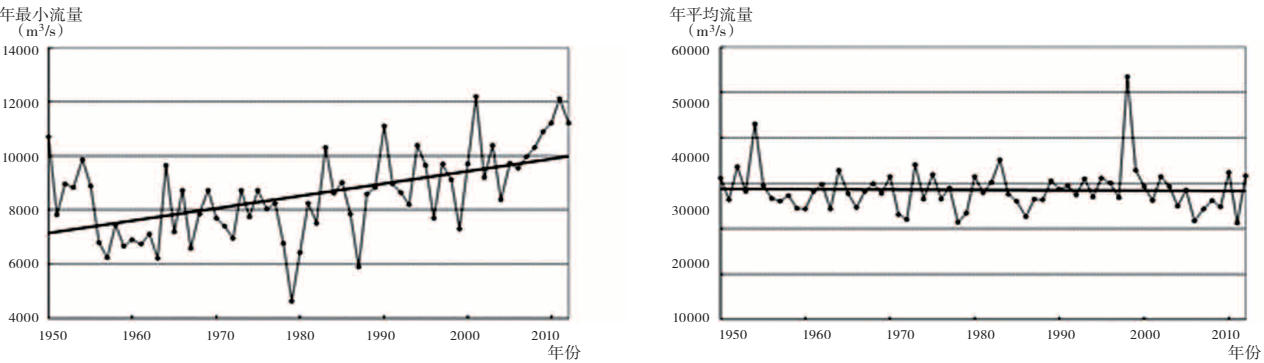


图 1 大通站 1950 ~ 2012 年的年最大、年最小、年平均流量变化趋势图

由图 1 可知, 2002 年三峡大坝蓄水以后, 大通站年最大、年最小、年平均流量的变化趋势较之前存在一定的不同, 故对长江三峡大坝蓄水前后大通站流量进行对比分析(表 1)。

表 1 大通站不同时段平均流量分析成果表

| 系列            | 年最大流量       |             | 年最小流量       |             | 年平均流量       |             |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 时段            | 1950 ~ 2002 | 2003 ~ 2012 | 1950 ~ 2002 | 2003 ~ 2012 | 1950 ~ 2002 | 2003 ~ 2012 |
| 平均流量 ( m³/s ) | 59600       | 53100       | 8230        | 10400       | 28900       | 26500       |

由表 1 可知, 三峡大坝蓄水后, 比蓄水前的年最大流量均值减少 10.9%, 年最小流量均值增加 26.4%, 年均流量均值减少 8.3%。由此可见, 长江大通以上区域产汇流变化主要对大通站低水位调控作用明显, 而对洪峰的调控作用相对较小。

3.2 峰量关系变化分析

人类活动带来的工情变化会导致大通峰量关系变化, 以年最大日平均流量和同年最大 120 d 日平均流量计算大通站峰量比 K 值。1950 年以来大通站多年平均峰量比值为 1.309, 最大值为 1.587 (1994 年), 最小值为 1.094 (1950 年), 峰量比总的变化率为 9.07% (图 2)。

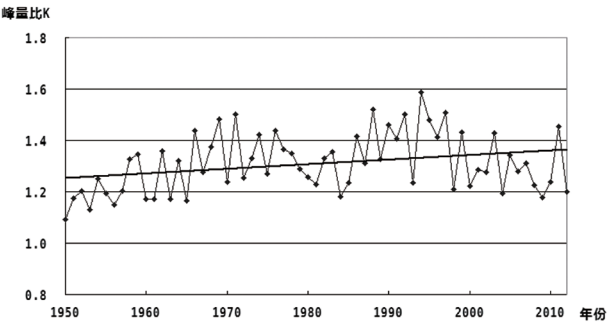


图 2 大通站 1950 ~ 2012 年峰量比变化趋势图

1950 年以来, 大通站最大 1 d 日平均流量变化率为 5.28% (图 3), 最大 120 d 日平均流量变化

率为 -2.92% (图 4)。

通过对大通站不同时段峰量比的计算可知(表 2), 不同时段峰量比均值存在不同, 20 世纪 50 年代峰量比均值最小, 为 1.207; 20 世纪 90 年代

峰量比均值最大, 达到 1.423。长江三峡大坝蓄水后, 大通站峰量比均值明显减小。

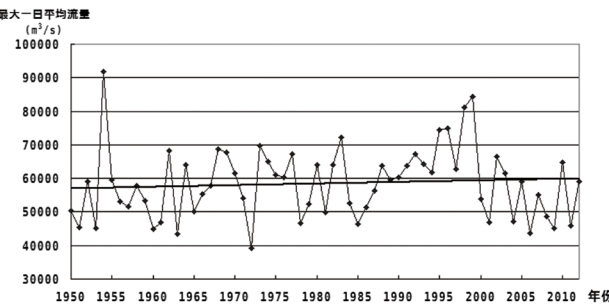


图 3 大通站 1950 ~ 2012 年最大 1 d 日平均流量变化趋势图

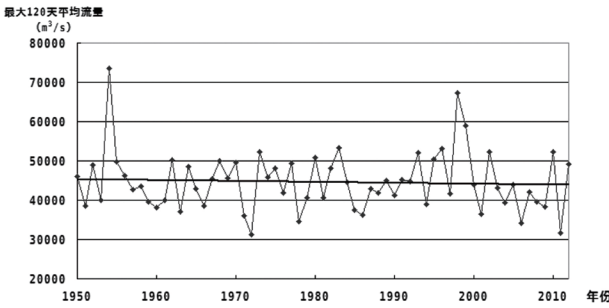


图 4 大通站 1950 ~ 2012 年最大 120 d 日平均流量变化趋势图

3.3 流量变化规律分析

表 2 大通站不同时段峰量比计算成果表

| 时段          | 峰量比均值 | 时段          | 峰量比均值 |
|-------------|-------|-------------|-------|
| 1950 ~ 1959 | 1.207 | 1950 ~ 1962 | 1.214 |
| 1960 ~ 1969 | 1.293 | 1963 ~ 1972 | 1.322 |
| 1970 ~ 1979 | 1.346 | 1973 ~ 1982 | 1.328 |
| 1980 ~ 1989 | 1.316 | 1983 ~ 1992 | 1.372 |
| 1990 ~ 1999 | 1.423 | 1993 ~ 2002 | 1.365 |
| 2000 ~ 2012 | 1.280 | 2003 ~ 2012 | 1.285 |

采用小波分析中的 Morlet 小波函数,对长江大通站历年的年最大、年最小、年平均流量进行小波分析(图 5)。由图 5 可知,大通站年最大流量系列小波方差图存在两个明显波峰,对应的时间尺度为 19a 和 6a,19a 时间尺度对应的峰值最大,说明 19a 左右的周期震荡最强,为大通站年最大流量系列的主要周期,6a 为第二周期;大通站年最小流量系列方差图存在两个波峰,对应的时间尺度为 16a 和 7a,16a 为主周期;大通站年平均流量系列方差图存在两个波峰,对应的时间尺度为 18a 和 13a,18a 为主周期。

4 结论

- (1) 大通站 1950 ~ 2012 年的年最大流量有上升趋势,变化率为 5.43%;年最小流量上升趋势明显,变化率为 39.4%;年平均流量基本维持稳定,变化率为 -1.39%。三峡大坝蓄水后,年最大流量均值减少 10.9%,年最小流量均值增加 26.4%,年平均流量减少 8.3%,说明长江大通以上区域产汇流变化主要对大通站低水位调控作用明显,而对洪峰的调控作用相对较小。
- (2) 大通站最大 1 d 日流量变化率为 5.28%,最大 120 d 日平均流量变化率为 -2.92%,峰量比变化率为 9.07%。根据不同时段峰量比计算结果显示,20 世纪 50 年代峰量比均值最小为 1.207,20 世纪 90 年代峰量比均值最大为 1.423,三峡大坝蓄水后,大通峰量比均值明显减小。
- (3) 流量变化小波分析结果表明,大通站年

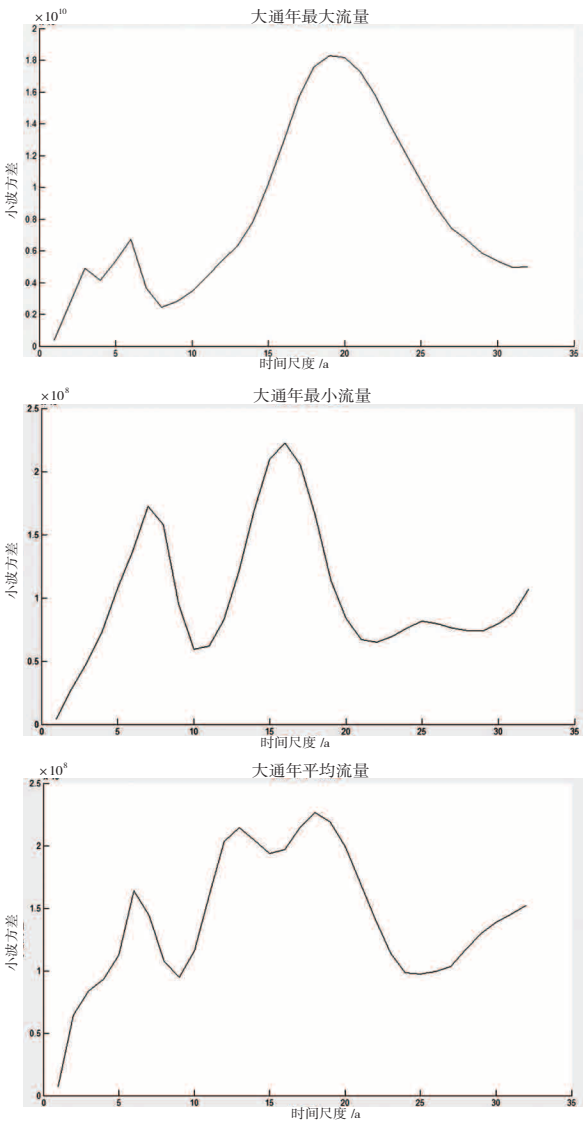


图 5 大通站年最大、年最小、年平均流量系列小波方差图  
(下转第 34 页)

最大流量系列存在 19a 和 6a 时间尺度的周期变化规律, 其中 19a 时间尺度对应的峰值最大, 说明 19a 左右的周期震荡最强, 表明大通站年最大流量存在 19a 的主周期, 6a 为次周期。

[1] 姜翔程. 水文时间序列的混沌特性及预测方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.

[2] 周通延, 凡炳文. 1956 ~ 2013 年大夏河流域降水的多时间尺度特征分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2014, 50(12): 7-10.

[3] 张二凤, 陈西庆. 长江大通河口段枯季的径流量变化

- [4] 李森, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011.
- [5] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] 邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近 50 年来气候变化多时间尺度分析[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 81-93.
- [8] 蔺秋生, 范北林, 黄莉. 宜昌水文站年径流量演变多时间尺度分析[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(4): 1-3.

(责任编辑:徐丽娜)