

长江中游荆南三口河系径流演变特征及趋势预测^{*1}

李景保¹ 吴文嘉^{1, 2*} 徐志¹ 于丹丹¹

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南长沙 410081;

2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北武汉 430079)

【摘要】:以荆南三口五站 1951~2015 年实测径流数据,利用 Mark-Kendall 趋势突变检验法、累计距平、Morlet 复小波等方法分析三口河系径流演变特征;选用 ARIMA 模型和时间序列模型预测荆南三口河系径流演变趋势。结果表明:(1)荆南三口径流年际变化较大,径流年内分配不均匀,5~10 月为丰水期,11 月~次年 4 月为枯水期,呈现出明显季节差异;(2)三口径流总体上呈下降趋势,其中以 1959~1980 年径流下降趋势最为明显,其趋势幅度 p 的绝对值达到了 698.313,2003~2015 年径流下降趋势较为缓慢,无明显趋势,但其 p 的绝对值仍达到了 166.524;(3)运用 Mark-Kendall 突变检验及累计距平法共同检验,三口径流突变年份为 1970 年、1985 年;(4)1951~2015 年间三口径流变化过程主要存在 48~58a、20~28a、10~18a 3 个尺度的周期变化,以 55a、24a、14a 为周期中心,其小波方差显示三口径流序列第一、第二、第三主周期分别为 55a、24a、14a;(5)三口径流在 2016~2030 年呈现出先减小后增大的趋势,即 2016~2018 年为波动增减期,2019~2026 年前后为枯水期,2026~2030 年为丰水期。

【关键词】:荆南三口径流; Mark-Kendall 趋势检验; ARIMA 模型; 变化趋势预测

【中图分类号】:P333 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)09-1456-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201709018

目前国内学者关于河系的径流变化特征和预测都有较多的研究。如李计生等^[1]采用加法复合模型对河西走廊疏勒河流域出山径流进行趋势预测分析,揭示了出山径流的变化趋势,牛最荣等^[2]分析了白龙江干流代表站的径流变化特征,并预测了径流未来变化趋势;还有许多学者阐述了关于径流中长期研究方法 & 预测模型原理与应用^[3~7];最近李景保、胡光伟等学者对荆南三口河系年径流变化特征进行了检测和归因分析^[8,9]。在自然因素和水库群(三峡水库等)相继运行的综合作用下,长江干流来水量发生较大变化,从而导致荆南三口分流量减少,河系断流天数呈明显增加趋势,水资源安全问题日愈突出^[10]。鉴于此,运用年际变化比率 K 和变差系数 C_v 、Mark-Kendall、累计距平法以及 Morlet 复小波变换分析近 65a 来三口径流演变特征,利用时间序列模型和 ARIMA 模型来共同模拟荆南三口径流变化趋势,揭示多时间尺度下径流演变特征及未来变化趋势,为荆南三口河系地区水资源管理和制定水资源配置工程建设规划提供理论依据。

¹ 收稿日期:2016-12-29; 修回日期:2017-03-22

基金项目:Project supported by National Natural Science Foundation of China(41571100); 湖南省重点学科地理学建设项目(Supported by the Construct Program of the Key Discipline in Hunan Province, China)

作者简介:李景保(1951~),男,教授,主要从事水文水资源与自然灾害教学与研究. E-mail:lijingbao1951@126.com

***通讯作者** E-mail:18374860326@163.com

1 基础数据来源及研究方法

1.1 基础数据来源

荆南三口河系为长江荆江段南岸的三条支流，分别为松滋河(松滋口)、虎渡河(太平口)、藕池河(藕池口)，习称荆南三口河系。主要水文站控制断面有新江口、沙道观、弥陀寺、康家港、管家铺(图1)。于是选取该河系5站1951~2015年实测径流量为统计原始数据。数据取自于湖南省水资源勘测局，荆江水文网、长江水文网、湖北省水文网、湖南省水利厅网站水情日报网、中国气象水文数据共享服务网。同时对部分缺失的逐日径流量数据，采用ArcGISMAP10.0克里格插值法进行差值补充，使各水文控制站点的径流时间尺度保持一致。

1.2 研究方法

1.2.1 径流量年际变化方法

本文选用年际变化绝对比率K和变差系数Cv，分析径流年际变化特征。K值越大则年际变化幅度越大。Cv越大，则离散程度越大，年际变化越剧烈。

1.2.2 Mark-Kendall 趋势检验方法

Mark-Kendall 趋势检验法是目前较为常用的水文过程趋势检验方法，它是一种非参数统计法，即所取样本不需要服从一定的分布，也不受少量特殊异常值的影响，更适合用于顺序变量的趋势检验^[11]。本文采用Mark-Kendall法来检验荆南三口河系1951~2015年以来年径流量的趋势变化及突变点。

1.2.3 Sen' s 斜率估计方法

为揭示趋势变化的强度，采用Sen' s 斜率估计法^[12]，计算序列的斜率β。斜率β表示序列平均变化率以及时间序列的趋势。

对于时间序列 $x_i=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，Sen' s 斜率的计算公式为：

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall_j > i$$

式中:Median 为取中值函数。

1.2.4 累计距平法

累计距平法是计算时间序列与均值的累计差值，用以分析时间序列的趋势，其优点是能够从曲线图上比较直观的展现出具体的突变年份。当累计距平值曲线呈上升趋势，则说明在上升时段距平一直为正，当累计距平呈下降趋势时，则表明此时段的距平开始为负。

1.2.5 Morlet 复小波变换

小波变换是一种信号的时间—频率分析法，它具有自适应的时频窗口：即低频时小波变换时间分辨率较低，而频率分辨率较高；在高频时小波变换时间分辨率较高，而频率分辨率较低。这种窗口特性，很适合于具有丰枯变换的水文序列分析。

1.2.6 ARIMA 模型

ARIMA 模型又称自回归滑动平均模型，常表示为 ARIMA(p, q, d)，其中 p 指自回归的阶次数，q 表示移动平均的阶次数，d 表示数据差分的阶数(本文统一选用一阶差分)。这种模型通过对噪音概率分布的分析，可以预测在任意一种概率下出现的偏差大小，能很好地处理随机干扰问题^[4~6]。ARIMA 模型表达式描述为：假定一组平稳时间序列 $\{y_t | t=1, 2, 3, \dots\}$ ，则有：

$$\begin{aligned} y_t &= \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \varphi_3 y_{t-3} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \\ \varepsilon_t &= \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \end{aligned}$$

式中： φ_i 表示自回归系数； θ_i 为移动平均系数； ε_t 为方差为 σ_{ε}^2 的白噪声序列。

1.2.7 时间序列模型

时间序列模型又称简单加法模型，是一种常用的中长期径流预测模型^[5]。考虑本文用于分析的时间序列最小单位为年，故不存在季节成分。于是综合考虑三口径流所含的成分因素，建立一种最为适合的模型，它与传统加法模型相比所选取的成分较少，但精度较高。一般来说，该法选取的成分为趋势成分 T_t 、周期成分 S_t 以及随机成分 I_t 。其表达式为：

$$Y_t = T_t + S_t + I_t$$

式中 3 个成分彼此独立，即每次计算其中的一个成分，第二次计算的成分则为已经去除第一个成分的残余项，依此类推，最后剩下的为随机项。同时还要检验随机项是否为一列平稳序列，如若不然，还要进一步计算，直至最后得到一列平稳序列，以期达到最接近的拟合效果和预测效果。

2 荆南三口河系径流演变特征

2.1 径流年际变化

根据年际变化绝对比率 K 和变差系数 C_v ，计算 1951~2015 年荆南三口河系径流年际变化特征值如表 1。表中反映了各站多年来的平均径流量实测最大、最小值以及对应的年份、年际变化比率 K 和变差系数 C_v 。通过分析三口河系径流年际变化特征值表明：①松滋河多年平均径流量为 $401 \times 10^8 \text{m}^3$ ，实测最大年份为 1954 年，实测最小年份为 2006 年。松滋河右支流(沙道观)K 值、 C_v 值都比左支流(新江口)要大，这意味着松滋河右支流径流的年际变化与离散程度较大；②虎渡河多年平均径流量为 $154 \times 10^8 \text{m}^3$ ，实测最大、最小年份分别为 1954 年、2006 年，年际变化幅度较大；③藕池河多年平均径流量为 $326 \times 10^8 \text{m}^3$ ，从管家铺与康家岗两站的径流年际特征值来看，藕池河右支流(管家铺)和左支流(康家岗)，其 K 值与 C_v 值相差较大，管家铺径流年际变化比率远大于康家岗，但康家岗站径流总体离散程度较大，其具体原因，一方面是康家岗站多年平均断流天数要比管家铺多 95d(2003~2014 年均值)；另一方面两站断流天数呈逐期增加趋势，且康家岗站断流天数增加幅度为三口五站之首；④以各河流的多年平均径流而言，由大到小依次为松滋河、藕池河、虎渡河，年际变化率由大到小依次为藕池河、松滋河、虎渡河；其径流最大年份都出现在 1954 年，径流最小年份除藕池河的管家铺站为 2013 年之外，其余两条河流均为 2006 年；⑤荆南三口河系多年平均径流量为 $881 \times 10^8 \text{m}^3$ ，实测径流最大年份为 1954 年，最小年份为 2006 年。实测值最大年份正处于调弦口堵口之前的基准期，人类

活动干预程度相对较小，此时正处于丰水期。而最小年份却出现在 2006 年，该年为长江中下游特枯年，这与三峡水库蓄水和当年降水量偏小有关。总体来说三口河系径流年际变化幅度较大，离散程度也较大。其原因除受降水量波动影响外，主要还是长江中上游各时期水利工程联合运行的叠加作用影响所致，如 1958 年荆江南岸华容河调弦口堵口建闸，1967~1972 年下荆江系统截弯取直工程，1981 年葛洲坝枢纽和 2003 年三峡水库等水利工程相继运行，使枝城站来水量减少，引起荆南三口河段季节性断流，且断流天数呈逐期增加趋势^[8]，进而导致河道内径流量进一步减少，如 2001~2011 年藕池河左支康家岗站流量均低于 $10 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

表 1 荆南三口主要站点径流年际变化特征值

地点	多年平均径流量 (10^8m^3)	实测最大		实测最小		K	C_v
		径流量 (10^8m^3)	年份	径流量 (10^8m^3)	年份		
新江口	295	460.0	1954	108.8	2006	4.23	0.22
沙道观	106	290.0	1954	10.4	2006	27.93	0.52
弥陀寺	154	270.1	1954	34.3	2006	7.87	0.35
管家铺	297	996.7	1954	1.8	2013	553.72	0.78
康家岗	29	151.3	1954	0.5	2006	302.61	1.15
荆南三口	881	2 168.1	1954	155.8	2006	13.92	0.46

2.2 径流年内变化

依据荆南三口河系历年实测月平均径流量，统计多年月平均径流量，并用百分比来表示各月的分配比例(表 2)。荆南三口地区属亚热带季风区，冬季雨量较少，导致河流水流动缓慢，径流量小，夏季雨量丰富，河流流动湍急；另一方面受长江中上游水库群对径流调控的影响，三口河系径流年内分配呈现出明显的季节性，即年内 5~10 月份平均径流所占全年百分比为 94.63%，接近年平均径流量，故把 5~10 月定为三口河系的汛期；11 月~次年 4 月径流所占全年百分比为 5.37%，不足年平均径流量的 10%，11 月~次年 4 月即为对应的枯水期。三口河系最大径流量出现在 7 月份，平均最小径流量出现在 1 月，由此表明，荆南三口河系年内径流高度集中在汛期，这就是导致枯期河道断流时间长的症结所在。

表 2 1951 ~ 2015 年荆南三口径流年内分配比重

月份	多年月平均径流量 (10^8m^3)	各月所占百分比 (%)
1	0.870	0.10
2	1.306	0.15
3	8.447	0.97
4	7.054	0.81
5	38.057	4.37

6	98.756	11.34
7	240.357	27.60
8	210.051	24.12
9	167.118	19.19
10	69.756	8.01
11	22.904	2.63
12	6.183	0.71

2.3 径流趋势变化与突变点

2.3.1 径流趋势变化

由荆南三口河系 1951~2015 年逐年径流变化过程线(图 2)显示, 尽管年径流在长时间序列上呈波动性增减变化, 但总体上呈显著下降趋势。为便于检验逐年径流在变化过程中的趋势性, 首先根据图 2 将 1951~2015 年序列划分为 4 个时段即: 1951~1958 年(基准期, 人类活动干扰少)、1959~1980 年(调弦口堵口、下荆江 3 处裁弯后)、1981~2002 年(葛洲坝运行后)、2003~2015 年(三峡水库运行后)。其二是利用 Mark-Kendall 趋势检验法分别计算出三口河系径流四个时段的 Z 值。通过比较显著性水平 $Z_{\alpha/2}$ 可知, 1951~1958 年、1959~1980 年、1981~2002 年三口径流分别通过了 95%、99%、90%的可信度, 表明这 3 个时段的径流显现出明显的下降趋势, 而 2003~2015 年间其 Z 值小于最低可信度, 这意味着此时段的径流量无明显趋势, 径流变化过程相对较为平稳(表 3)。那么径流趋势变化的强度有多大呢? 本文利用 Sen' s 斜率估计法, 按前述的 4 个时段分别进行一元线性拟合, 依次得出三口河系 4 个时段径流的平均斜率 k 均为负值, 表明径流变化过程均呈下降趋势(图 3)。因为径流量在基准期较大, 导致斜率 k 与趋势幅度 p 均较大。在径流斜率均为负的情况下, 以 1959~1980 年径流平均斜率 k 与 p 的绝对值最大, 即分别达到了 33.253 和 698.313; 1981~2002 年径流平均斜率 k 与 p 的绝对值也较大, 分别达到了 11.951 和 250.971, 表明这两个时段径流下降趋势明显; 2003~2015 年其 p 的绝对值最小, 说明该时段径流下降趋势不是很明显。这里值得指出的是尽管利用 Mark-Kendall 法在 2003~2015 年检验出三口河系径流无明显趋势, 但径流趋势变化幅度 k 和 p 的绝对值却分别达到了 13.877 和 166.524(表 4), 这意味着该河系径流在该时段内还是有下降趋势, 只不过是径流变化速度相对较为平缓。由以上对比分析表明, 利用 Sen' s 斜率估计法与 Mark-Kendall 趋势检验法检出的结果基本一致, 即均反映出荆南三口河系 1951~1958 年、1959~1980 年、1981~2002 年 3 个时段径流下降趋势显著, 而 2003~2015 年径流却呈缓慢下降趋势, 其主要原因是自 2003 年以来, 三峡水库按优化调度方案运行, 使大坝下泄水量在时间分配上较水库运行前均衡, 从而使该河系径流递减幅度趋于平缓。

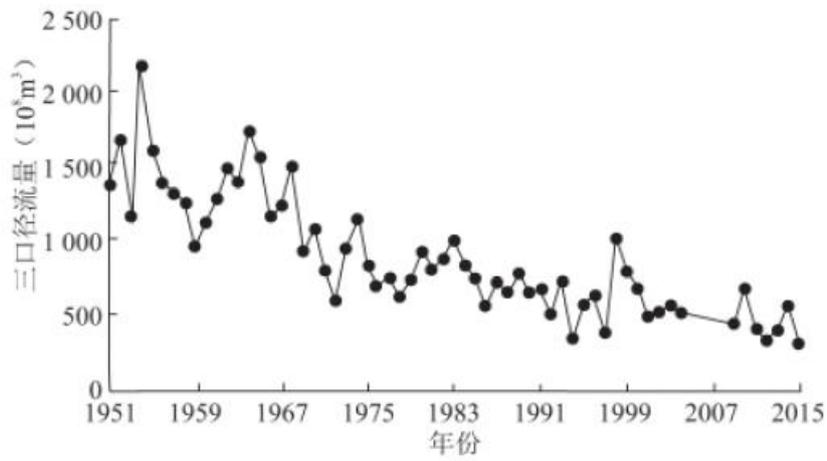


图2 1951~2015年荆南三口逐年径流变化过程
 Fig. 2 Annual Runoff Variation Process of the Three Outlets of Southern Jingjiang River in 1951-2015

表3 荆南三口径流 Mark-kendall 趋势检验特征值

时段(年)	Z	$Z_{\alpha/2}$	趋势
1951-1958	-2.28	1.64	95%可信度下显著下降趋势
1959-1980	-4.11	2.32	99%可信度下显著下降趋势
1981-2002	-1.53	1.28	90%可信度下显著下降趋势
2003-2015	-0.07	1.28	无明显趋势

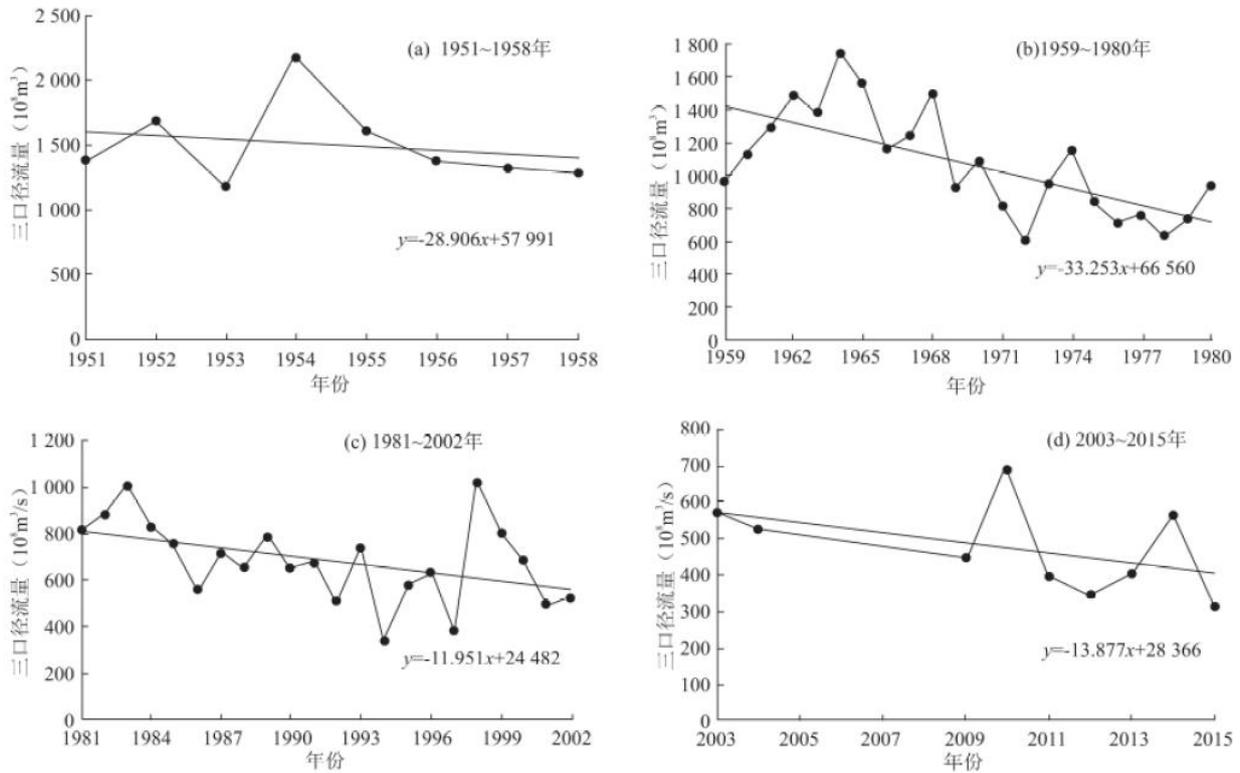


图3 1951~2015年三口径流分段一元线性拟合曲线

Fig. 3 Linear Fitting Curve of Runoff in the Three Outlets of Southern Jingjiang River in 1951-2015

2.3.2 径流突变年份检验

(1) Mark-kendall 突变年份检验

为判断1951~2015年荆南三口河系径流变化过程中的突变年份,在原Mark-Kendall趋势检验的基础上,运用Mark-Kendall突变检验计算得出 $UB(k)$ 和 $UF(k)$ 的值,在图上绘出其曲线交点年份为1975年(图4)。 $UB(k)$ 和 $UF(k)$ 的值绝大部分位于0以下,说明年径流量呈明显下降趋势。其中 $UB(k)$ 和 $UF(k)$ 曲线的交点1975年对应的统计值为-4.5,表明不在最低可信度区间范围内,故不能判定为突变年份,还需进一步详细划分。于是基于前述的4个时段即:1951~1958年、1959~1980年、1981~2002年、2003~2015年(图5),经Mark-kendall突变检验分解后,可以看出在置信水平 $\alpha=0.05$ 的基础上,满足条件的交点年份分别为1958年、1970年、1985年、2006年、2011年和2014年。其中2003~2015年段交点较多,经之前分段趋势检验显示该时段趋势性不明显,且其 $|UF(k)| < U\alpha$,无明显趋势变化,故将2006年、2011年和2014年视为无效值,则经分段检验三口河系径流突变年份确定为1958年、1970年和1985年。

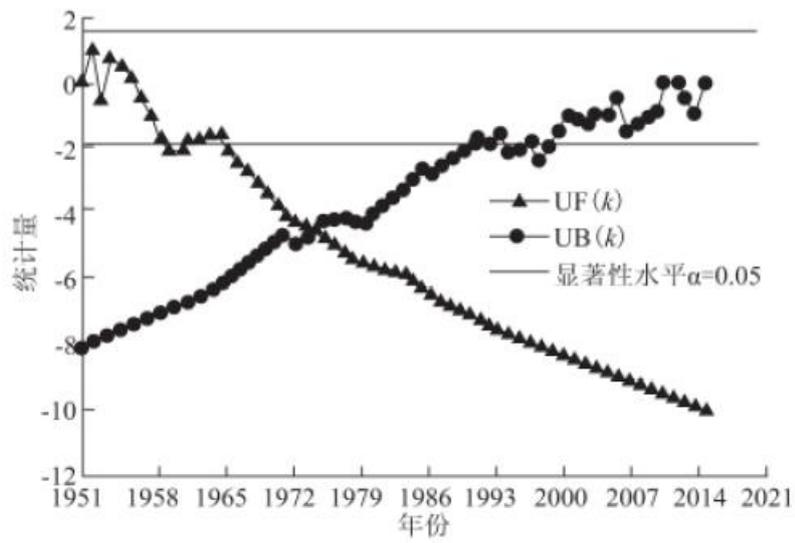


图 4 1951~2015 年荆南三口径流量

Mark-Kendall 趋势突变检验

Fig. 4 Mark-Kendall Trend Test Of Runoff in the Three Outlets of Southern Jingjiang River in 1951-2015

表 4 1951~2015 年三口径流 Sen' s 斜率估计结果分析

时段 (年)	一元线性回归方程	斜率 A	趋势幅度 P	趋势
1951~1958	$y = -28.906x + 57991$	-28.906	-202.342	下降
1959~1980	$y = -33.253x + 66560$	-33.253	-698.313	下降
1981~2002	$y = -11.951x + 24482$	-11.951	-250.971	下降
2003~2015	$y = -13.877x + 28366$	-13.877	-166.524	下降

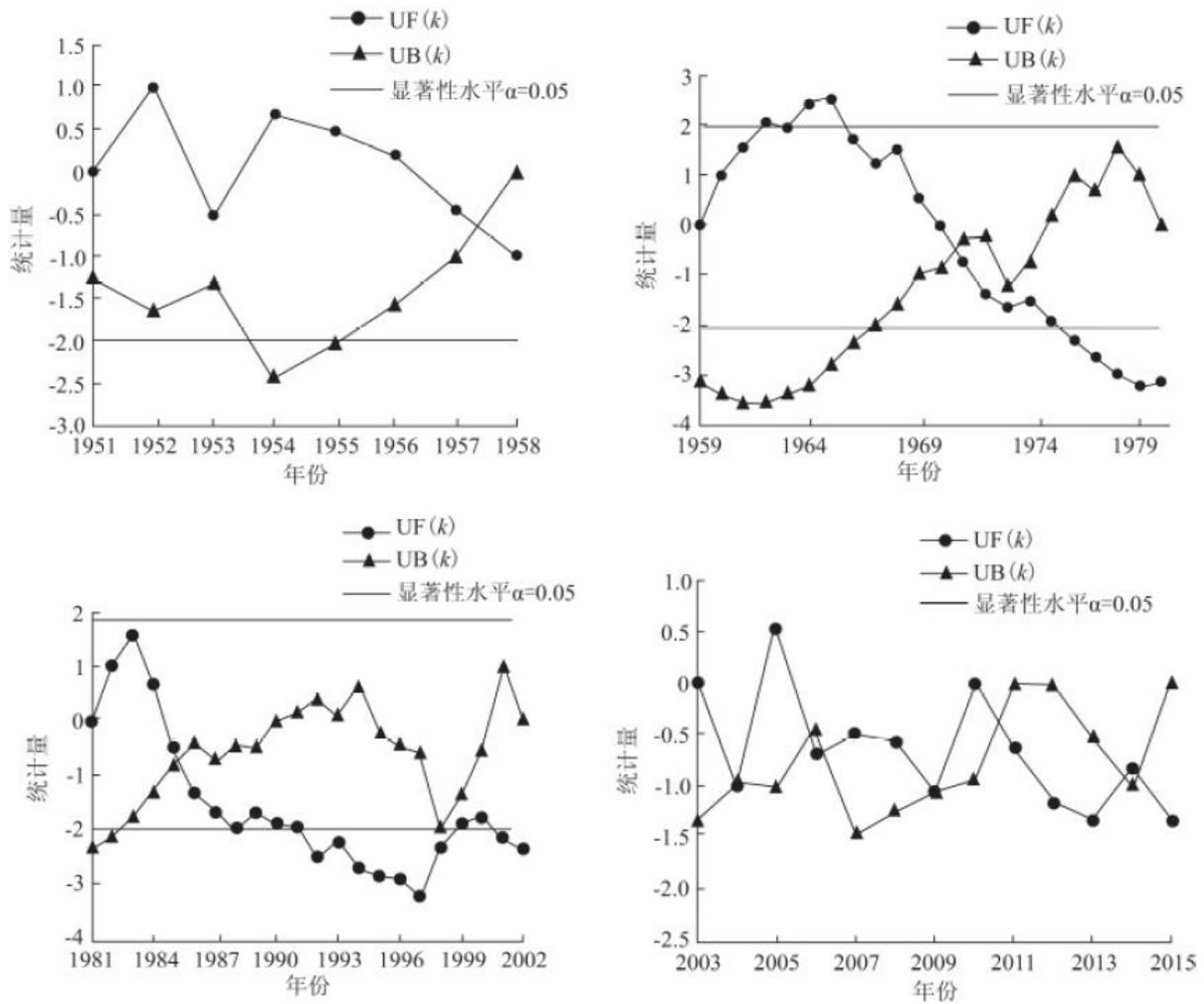


图5 1951~2015年荆南三口径流 Mark-Kendall 趋势突变检验

Fig.5 Mark-Kendall Trend Test Of Runoff in the Three Outlets of Southern Jingjiang River in 1951-2015

(2) 累计距平法检验突变年份

荆南三口河系多年径流累计距平显示出先增大后减小的趋势变化(图6)。径流对应的突变点为1970年和1985年。以这两年为节点,丰水期为1951~1970年,此时段处于弔弦堵口和下荆江裁弯交替期,距平曲线呈上升趋势,距平值一直为正;枯水期为1985~2015年,该时段处于葛洲坝和三峡水库运行期,距平曲线呈下降趋势,距平值一直为负。1970~1985年径流相对平稳,该时段正处于下荆江裁弯中以及葛洲坝运行初期,径流还需要一定的适应过程和自我调节过程,故该时段相应的突变年份判断为1970年和1985年。

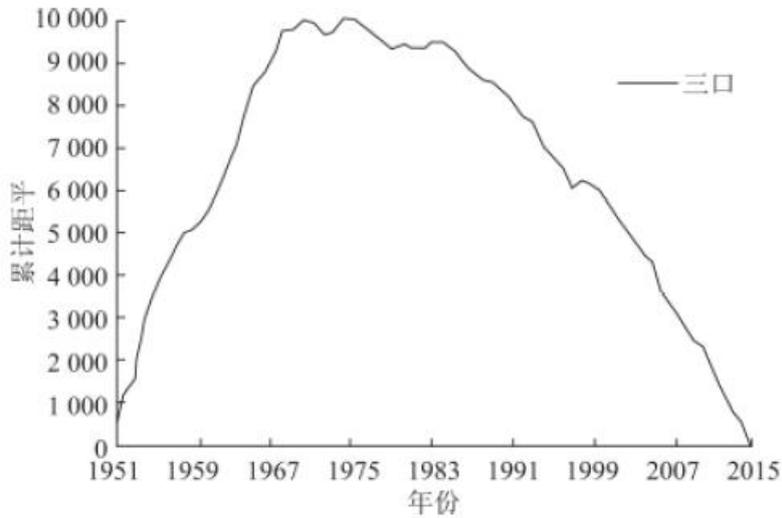


图 6 1951~2015 年三口径流累计距平

Fig. 6 Cumulative Anomaly Method of Runoff in the Three Outlets of Southern Jingjiang River in 1951-2015

通过对比累计距平法检验结果与 Mark-kendall 趋势突变检验的结果发现, 用累计距平法除 1958 年未检测出外, 1970 年、1985 年与 Mark-Kendall 检验结果一致。综合两种方法的检验结果, 最后确定荆南三口河系径流变化表现较为明显的突变年份为 1970 年、1985 年。

2.4 荆南三口河系径流变化周期性

2.4.1 三口河系径流周期分析

基于小波分析方法得到荆南三口河系径流小波系数实部等值线(图 7), 图中颜色越深, 表明小波系数实部值越小, 则意味着径流偏枯, 颜色越浅则径流偏丰。由此推断, 在 1951~2015 年间该河系径流变化过程主要存在 48~58a、20~28a、10~18a 3 个尺度的周期变化, 该 3 个时间尺度分别以 55a、24a、14a 为周期中心, 其中在 48~58a 时间尺度上存在 5 个丰枯交替变化周期, 即:1951~1955 年偏枯, 1956~1974 年偏丰, 1975~1993 年偏枯, 1994~2009 年偏丰, 2010~2015 年偏枯。在 20~28 年周期尺度上存在 9 个丰枯交替周期, 分别为:1951~1954 年偏丰, 1955~1963 年偏枯, 1964~1970 年偏丰, 1971~1979 年偏枯, 1980~1987 年偏丰, 1988~1995 年偏枯、1996~2003 年偏丰, 2004~2010 年偏枯, 2011~2015 年偏丰。在 10~18a 周期尺度上存在 14 个丰枯交替周期, 且连续性较强, 平均分布在整个时间序列中, 表明在该时间尺度下三口河系径流的周期性很强。总体而言, 从 3 个时间尺度的丰枯交替变化周期来看, 时间尺度越大, 其包含的丰枯变化周期越少, 丰水期和枯水期的集中性越强, 表明径流具有较强的稳定性。而在 10~18a 尺度甚至更小的时间尺度下, 包含的丰枯交替变化周期更多, 甚至还含有嵌套型的丰枯期, 由于尺度历时较短, 无法显现出明显的丰枯变化周期, 因而其结果可能具有较大的局限性。但无论从哪个时间尺度来看, 在整个时间序列中均反映出明显的丰枯交替变化, 且丰、枯期历时平均, 各时间尺度下各个丰枯周期大致相同。由此认为, 荆南三口河系径流演变过程具有明显的多尺度周期性规律。

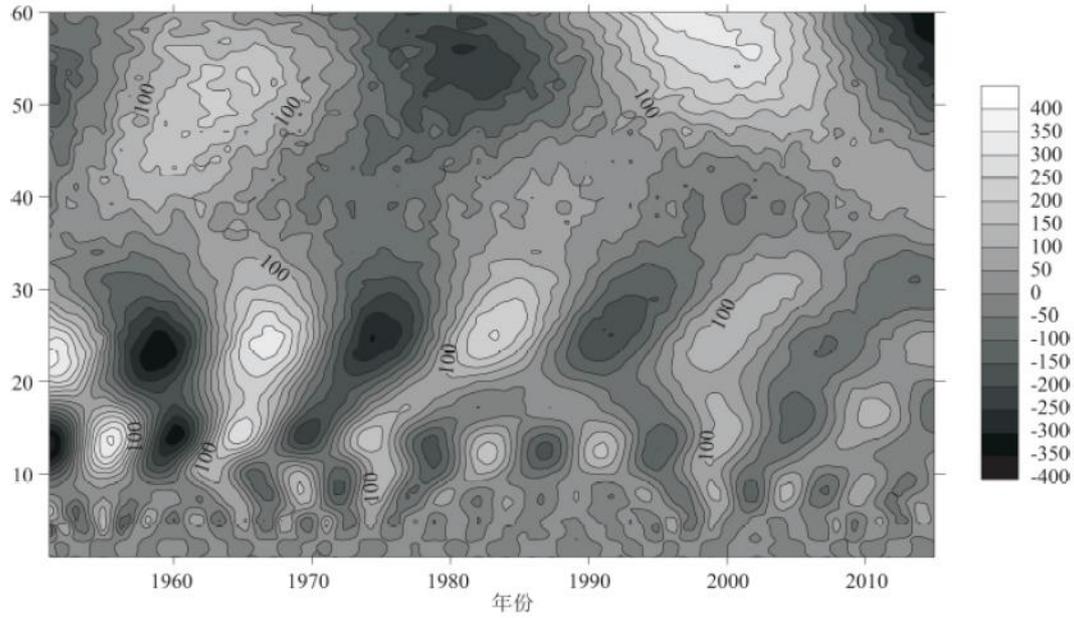


图 7 三口径流小波系数实部等值线图

Fig. 7 Real Part of the Wavelet Coefficient Isoline Runoff Map in the Three Outlets of Southern Jingjiang River

2. 4. 2 三口河系径流演变主周期检验

通过利用小波方差检验荆南三口河系径流演变过程中的主周期表明, 在 1951~2015 年间径流出现 3 个明显的峰值即为 14a、24a、55a(图 8)。同时与上述径流小波系数实部等值线图得出的周期尺度进行比较, 发现这 3 个峰值均在 3 个不同尺度的小波周期内, 其中最大峰值处于 55a 的周期尺度上, 这意味着 55a 左右的周期性最强, 则为第一主周期; 依此类推, 24a、14a 分别为第二和第三主周期。

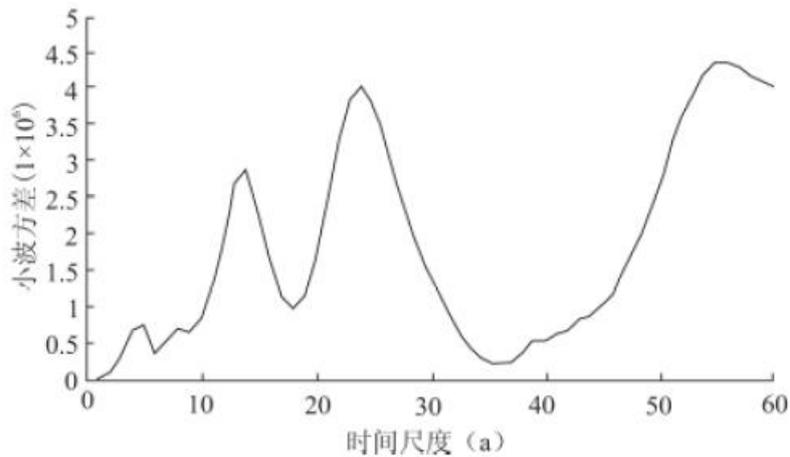


图 8 三口径流小波方差图

Fig. 8 Wavelet Variance Diagram in the Three Outlets of Southern Jingjiang River

3 三口河系未来径流变化趋势预测及检验

为达到最佳拟合预测效果，用 ARIMA 模型和时间序列模型分别预测 2016~2030 年荆南三口河系径流变化趋势，然后经过综合分析得出该河系未来径流的变化趋势。

3.1 ARIMA 模型预测结果

为预测三口河系未来径流变化趋势，将实测年径流进行一阶差分，在已知 $d=1$ 的基础上，利用 SPSS 软件中的专家建模器建立相应的模型，并对 ARIMA(p, q) 中的 p 值和 q 值进行反复取值。在设置信度为 95% 的条件下，将其预测年份以 5a 为一时段，也即是把三口河系径流时间序列中的 2016~2020 年，2021~2025 年、2026~2030 年 3 个时段作为基本单位。然后把通过拟合出与实测曲线最为接近的预测曲线，来估计预测径流值，于是得到荆南三口河系预测径流特征值(表 5)。由表 5 可知，近期 2016~2020 年为波动增减期，径流先增加后减小，整体径流偏丰；中期 2021~2025 年为枯水期，一阶差分径流值曲线波动增减，但总体径流偏枯；远期 2026~2030 年为丰水期，一阶差分径流值一直大于 0。以整体而言，该河系 2016~2018 年为偏丰期，2019~2025 年为偏枯期，2016~2030 年整体径流偏丰(图 9)。2023~2030 年径流拟合精度整体较高，平稳 R 方达到 0.733。

表 5 荆南三口径流预测特征值

预测特征值	2016~2020 年	2021~2025 年	2026~2030 年
累积一阶差分 (10^8m^3)	332	-261	515
趋势	先增加后减小	波动增减	增加
突变年份	2019 年	无	无

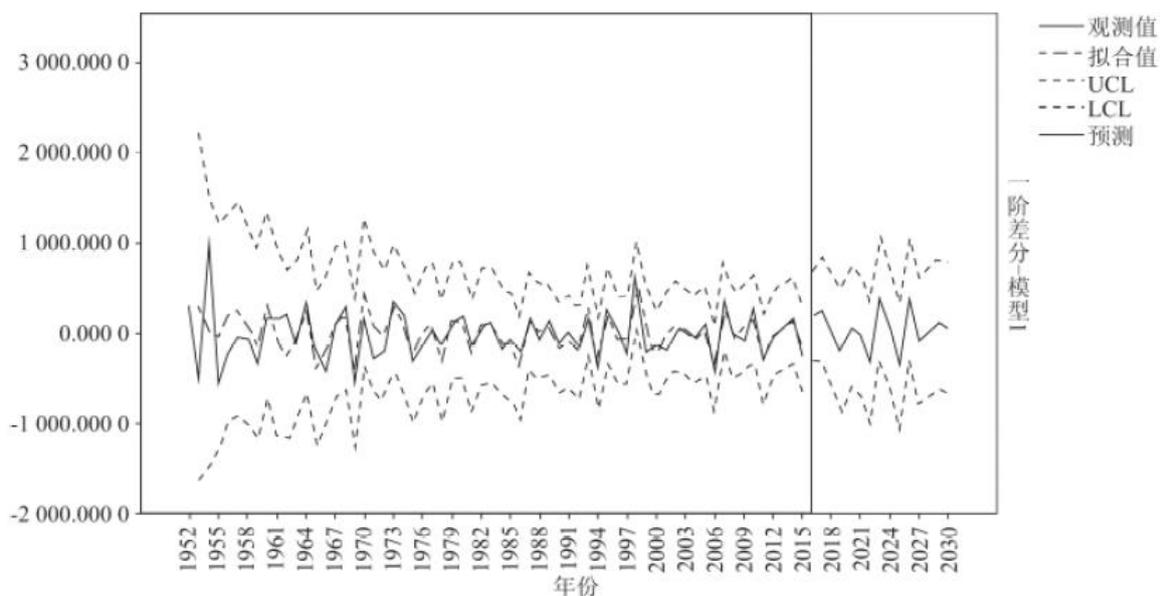


图 9 三口径流一阶差分预测

Fig. 9 First Order Difference Prediction of Runoff in the Three Outlets of Southern Jingjiang River

3.2 时间序列预测模型预测结果

时间序列预测模型采用复合模型，用 SPSS 软件对三口河系多年实测径流量进行回归分析，并确定其趋势方程，接着去除趋势成分，剩余项用小波分析来确定其主周期，最后得出随机项，从而模拟出该河系未来径流的变化趋势，即多年实测径流序列呈现明显递减趋势。去除趋势项后径流周期性明显，其随机项为稳定序列，得出该河系径流在未来 15a 中，2016~2027 年为整体的枯水期，其中包含各级别径流波动年份，总体影响不大，2027 年后进入丰水期。

3.3 趋势成分与周期成分的检验

将荆南三口河系多年径流量经过 SPSS 软件做逐步回归处理，在信度为 95% 的基础上，以年份作为自变量 x ，径流量作为因变量 y ，得到趋势方程为 $y = -18.140x + 36842.9$ ，其斜率 k 为 -18.14 ，表明该河系径流在信度区间之内，且具有较为明显的下降趋势。检验其精度，统计量 F 为 153.195，大于显著性水平为 0.05 的 F 检验值，径流的 R^2 值达到了 0.709，表明线性趋势拟合度较好。利用趋势线方程对原始径流量进行处理，将原始径流量值依次去除趋势项，把得到的剩余项再进一步做周期成分检验。于是利用 Matlab 软件将剩余项经过两端延伸处理后进行小波分析，从以上 2.4.2 节中已经得出三口河系径流的第一主周期为 55a，绘制第一主周期的小波系数图，得出在 55a 特征时间尺度上，径流变化的平均周期为 36a 左右，大约经历了 4 个丰一枯转换期(图 10)。然后再将小波系数图与原实测径流量作对比分析可知，1955~1972 年以及 1991~2009 年小波系数反映为丰水期，其对应的实测径流量显现出这两时段中径流较上一年增加的年份多，偏离趋势线程度较高，其实测径流总和高于平均径流总和；1973~1990 年和 2010~2015 年小波系数显示为枯水期，实测径流较上一年减少的年份较多，且偏离趋势线程度较低，两个时段实测径流总和小于平均径流总和。

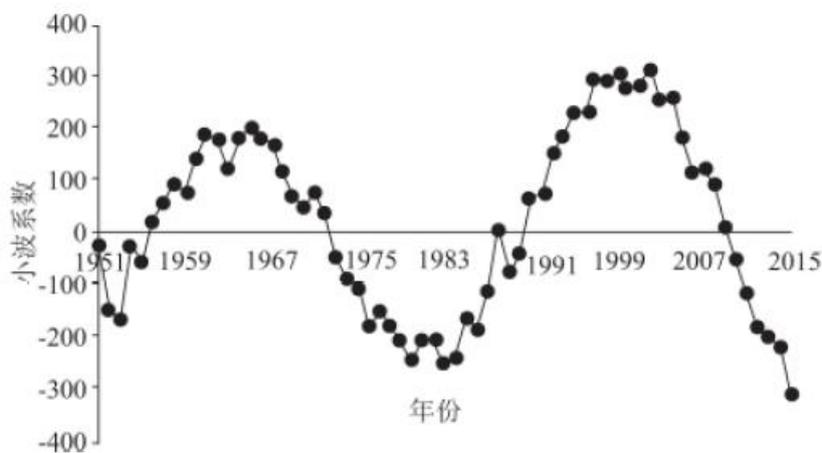


图 10 荆南三口第一主周期小波系数图

Fig. 10 First Principal Period Wavelet Coefficient Chart
in the Three Outlets of Southern Jingjiang River

这意味着实测径流量与小波系数所反映的丰枯期基本一致，且这表明检验精度较高。最后再去除剩余项中的周期成分，得到一组较为稳定的随机序列，以此证明其检验结果的有效性。由综合分析趋势项与周期项可得出该河系径流量在 2016~2030 年间呈现先减小后增加的趋势，2016~2027 年呈现枯水期，其中 2016~2018 年为径流显著减少期，2018~2027 年径流减少速度逐渐减慢，但总体仍处于偏枯期，自 2027 年后开始进入丰水期。

3.4 综合预测结果

通过 ARIMA 模型与时间序列模型的共同检验, 所得出的结果大致相似, 但三口河系径流突变年份并不完全相同, 有一定的误差。利用 ARIMA 模型检验得出该河系 2016~2018 年为波动增减期, 径流整体上偏丰, 2019~2025 年为枯水期, 2026~2030 年为丰水期; 时间序列模型检验出 2016~2027 为枯水期, 2027 年后为丰水期。综合两个模型预测的结果, 排除 2016~2018 年(排除因预测前期模型不稳定而使得两者得出不同结论的因素), 荆南三口河系 2016~2030 年径流总体变化趋势是先减小后增大, 其中 2016~2018 年为波动增减期, 2019~2026 年前后为枯水期, 2026~2030 年为丰水期。

4 结论

(1) 荆南三口河系径流年内分配极不均匀, 径流高度集中丰水期, 即 5~10 月所占全年百分比为 94.63%; 而 11 月~次年 4 月所占百分比仅为 5.37%。实测最大年份为 1954 年, 最小年份为 2006 年, 径流 K 值和 Cv 值均较大。这充分反映了季节性河流的水文特性。

(2) 荆南三口径流量总体呈现下降趋势, 其中以 1959~1980 年径流下降趋势最为明显, 其趋势幅度 p 的绝对值达到了 698.313, 2003~2015 年径流序列, 运用 Mark-Kendall 检验出该时段径流无明显趋势, 但其 p 的绝对值仍达到了 166.524。运用 Mark-Kendall 突变检验及累计距平法共同检验, 其径流突变年份为 1970 年、1985 年。

(3) Morlet 复小波周期检验出 1951~2015 年三口河系径流变化过程主要存在 48~58a、20~28a、10~18a3 个尺度的周期变化, 以 50a、24a、12a 为周期中心。其小波方差显示径流第一、第二、第三主周期分别为 55a、24a、12a。

(4) 利用 ARIMA 模型与时间序列模型联合预测 2016~2030 年荆南三口河系径流的变化趋势为: 2016~2030 年径流的总体变化趋势是先减小后增大, 2016~2018 年为波动增减期, 2019~2026 年前后为枯水期, 2026~2030 年为丰水期。

参考文献:

[1] 李计生, 胡兴林, 黄维东, 等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(3) : 803-810.

【LI J H, HU X L, HUANG W D, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River basin, Hexi Corridor [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3) : 803-810.】

[2] 牛最荣, 陈学林, 王学良. 白龙江干流代表站径流变化特征及未来趋势预测 [J]. 水文, 2015, 35(5) : 91-96.

【NIU Z R, CHEN X L, WANG X L. Runoff variation characteristics of representative stations on mainstream of Bailongjiang River and trend prediction [J]. JOURNAL OF CHINA HYDROLOGY, 2015, 35(5) : 91-96.】

[3] 卢理. 时间序列加法模型的分解预测研究 [D]. 西南交通大学, 2007: 10-72.

【LU L. Research of Time Series addition model decomposition forecasting [D]. Southwest Jiaotong University, 2007: 10-72.】

[4] 刘星根, 李昌彦, 吴敦银. 近 60 a 赣江水沙变化特征及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11) : 1920

【LIU X G, LI C Y, WU D Y. Changing characteristic and its impact factory analysis of streamflow and sediment of Gangjiang River basin during past 60 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 (11) : 1920—1928. 】

[5] 孙惠子. 中长期径流的多种组合预测方法及其比较 [D]. 西北农林科技大学, 2012.

【SUN H Z. A Variety of Combination Forecasting method and comparing of medium and long-term stream-flow [D]. Northwest A&F University, 2012. 】

[6] 傅新忠, 冯利华, 陈闻晨. ARIMA 与 ANN 组合预报模型在中长期径流预报中的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5) : 105—109.

【FU X Z, FENG L H, CHEN W C. Application of ARIMAANN model in the prediction of medium and long-term runoff [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(5) : 105—109. 】

[7] 刘琳, 徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(10) : 1792—1801.

【LIU L, XU Z X. Drought /flood characteristics and trend prediction in Southwest China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(10) : 1792—1801. 】

[8] 帅红, 李景保, 何霞, 等. 环境变化下长江荆南三口径流变化特征检测与归因分析 [J]. 水土保持学报, 2016(1) : 83—88.

【SHUAI H, LI J B, HE X, et al. Feature detection and attribution analysis of runoff variation in the three outlets of Southern JingJiang River under environmental changes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016(1) : 83—88. 】

[9] 胡光伟, 毛德华, 李正最, 等. 荆江三口 60 a 来入湖水沙变化规律及其驱动力分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(1) : 129—142.

【HU G W, MAO D H, LI Z Z, et al. Characteristics and driving factors of runoff and sediment changes fluxes into the Dongting Lake from three outlets in Jingjiang River during past 60 Years [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29 (1) :129—142. 】

[10] 李景保, 钟一苇, 周永强, 等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(9) : 1583—1593.

【LI J B, ZHONG Y W, ZHOU Y Q, et al. Impacts of the operation of three Gorges Reservoir on the development and utilization of water resources of Northern Dongting Lake area [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28 (9) : 1583—1593. 】

[11] 王慧琴. 小波分析与应用 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011: 20-21.

【WANG H Q. Wavelet analysis and Application [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2011: 20-21. 】

[12] 汪攀, 刘毅敏. Sen' s 斜率估计与 Mann-Kendall 法在设备运行趋势分析中的应用 [J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(6) : 454-457.

【WANG P, LIU Y M. Application of Sen' s slope estimation and Mann-Kendall method in the trend analysis of equipment operation [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(6) : 454-457. 】