

文章编号:1007-2284(2021)07-0035-08

三峡水库运用对水库下游水文分期的影响研究

郭 率¹,陈 立¹,许全喜²,何小花³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072; 2. 长江水利委员会水文局,武汉 430010;

3. 湖北省水利水电规划勘测设计院,武汉 430064)

摘 要:长江三峡等水库的建设运行,改变了下游径流过程及径流量的年内分配,也改变了长江中下游水文分期规律。为了分析三峡水库运用对长江中下游汛期和枯期分期的影响,本文采用基于长江中下游7个水文站的月径流重构序列进行变异分析和模糊统计两种水文分期方法,统计各站的汛枯期起止时间变化规律,结果表明:1961-1980年阶段长江中下游流域汛期为5-10月;1981-2002年阶段,宜昌至城陵矶河段汛期起止时间为6-10月,城陵矶至大通河段为5-10月;2003-2016年阶段,变异分析方法认为三峡蓄水后长江中下游流域汛期为5-9月,模糊统计法结果表明该时段汛期与天然径流规律一致为5-10月;若排除三峡水库蓄水的影响,则两种方法结果与1981-2002年阶段水文分期规律相同;进一步分析发现长江中下游5、10月径流量受三峡水库调度影响较大,且上游河段受影响程度明显大于下游,三峡水库的运用是水库下游汛枯期起止时间变化的主要原因。

关键词:水文分期;变点分析;模糊统计;长江中下游;三峡水库**中图分类号:**TV121⁺.2 **文献标识码:**A

郭 率,陈 立,许全喜,等.三峡水库运用对水库下游水文分期的影响研究[J].中国农村水利水电,2021(7):35-42.

GUO S, CHEN L, XU Q X, et al. Research on the influence of three gorges reservoir operation on the hydrological staging of the lower reaches of the reservoir[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7):35-42.

Research on the Influence of Three Gorges Reservoir Operation on the Hydrological Staging of the Lower Reaches of the Reservoir

GUO Shuai¹, CHEN Li¹, XU Quan-xi², HE Xiao-hua³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

3. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: The construction and operation of the Three Gorges Dam and other reservoirs in the Yangtze River have changed downstream runoff process and annual distribution, and also changed the hydrological staging law of the middle and lower reaches of the Yangtze River. In order to analyze the influence of the Three Gorges Reservoir operation on the flood seasons and dry seasons staging of the middle and lower reaches of the Yangtze River, two hydrological staging methods based on the monthly runoff reconstruction sequence of seven hydrological stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River are used to calculate the beginning and ending time of the flood and dry seasons of each station. Results show that flood seasons in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 1980 ranged from May to October; during 1981 to 2002, the flood seasons from Yichang to Chenglingji was from June to October, while it is May to October from Chenglingji to Datong; during 2003 to 2016, the variation analysis method shows that flood seasons in the middle and lower reaches of the Yangtze River after impoundment of Three Gorges Dam is from May to September, but fuzzy statistical method shows that flood seasons during this period is consistent with the natural runoff law from May to October. If the impact of the Three Gorges Reservoir's water storage are

收稿日期:2020-08-24**基金项目:**国家重点研发计划项目(2016YFC0402101)。**作者简介:**郭 率(1995-),男,硕士研究生,主要从事水力学及河

流动力学研究。E-mail: guoshuaiwhu@163.com。

通讯作者:陈 立(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: chenliwuhee@whu.edu.cn。

removed, results of this two methods are the same as hydrological staging from 1981 to 2002. Further analysis reveals that in the middle and lower reaches of the Yangtze River, runoff during May and October is most greatly affected by Three Gorges Dam's operation, and the upper reaches are more significantly affected than lower reaches. The operation of the Three Gorges Reservoir is the main reason for the change of the starting and ending time of the flood season in the lower reaches of the reservoir.

Key words: hydrological staging; changing point analysis; fuzzy statistics; middle and lower reaches of the Yangtze River; Three Gorges Dam

0 引言

近期,世界各地洪涝和干旱灾害出现的频率呈明显的上升趋势^[1-4],其原因与全球变暖的不断加剧,人类对河流等水资源的干涉影响有关,包括河流上大规模梯级水库的修建、水文变化、沉积物开采等,对河流的汛期和枯期进行较精确的分期,对洪涝干旱灾害的防治、水库水资源调度,生态环境保护 and 人类自身安全保障等具有极其重要的作用^[5-7]。

天然条件下长江流域汛期和枯期的划分与大气循环和气候变化有直接联系,三峡水库蓄水前普遍认为长江中下游汛期为5-10月。20世纪80年代开始,长江中下游水沙受到人类活动的重大影响,干支流梯级水库的建设等改变了河流天然特性,尤其是三峡水库的修建运行,大大影响了坝下游的径流过程,水库“削峰补枯”使坝下游河段径流过程坦化,中枯水历时增加,改变了长江中下游河道天然径流的时空分配^[8,9],上游向家坝、溪洛渡等梯级水库的建成运用对长江流域径流过程及径流均匀程度的影响进一步加剧^[10]。显然上游水库的“洪蓄枯泄”运行模式,改变了下游水文过程,对流域汛、枯期规律也有一定影响。许多专家学者围绕水库运用对下游河道水文情势的影响进行了较多研究^[11-13],且主要分析了三峡水库运用后下游河道月均径流量变化情况,但进一步分析三峡水库运用后月均径流量的变化对长江中下游流域汛、枯期分期规律影响的研究较少。本文采用雷旭等^[14]提出的月径流序列重构方法,对长江中下游干流7个水文站点的月径流进行重新构造形成重构水文序列,然后运用谢平等^[15]提出的变异诊断系统检验重构月径流序列进行水文分期,并采用模糊统计法进行对比分析,从而得到长江中下游流域汛、枯期变化结果。对三峡水库蓄水后长江中下游进行汛期枯期划分不仅有利于该区域防洪,了解水文情势变化情况,同时可以在满足防洪设计标准的条件下,优化三峡水库运行,协调水库防洪与兴利之间的矛盾,提高防洪、发电、航运等综合效益^[16]。

1 研究区域

长江干流建设有葛洲坝、三峡、向家坝、溪洛渡等骨干水利枢纽,汉江流域有丹江口水利枢纽等。其中三峡水利枢纽是长江流域综合利用的骨干工程,其主要任务是防洪、发电、航运等^[17]。汛期6-9月,水库一般在汛限水位145 m运行,超过电站过流能力的水量,通过泄洪坝下泄。仅当入库流量大于5.5万 m^3/s ,超出下游荆江河道安全泄量(100年一遇以下洪水,控制枝城站泄量不超过5.67万 m^3/s ,100年一遇以上至1000年一遇洪水,控制枝城站流量不超过8万 m^3/s)时,水库拦洪蓄水,库水位

抬高。洪峰过后,库水位仍降至145 m运行。2009年后在三峡水库的实际调度过程中,适时进行了中小洪水调度的实践。《三峡(正常运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》(2019年修订版)^[18]规定三峡水库汛期运行水位浮动上限由146.5 m提高至148 m,兼顾城陵矶地区防洪补偿控制水位由155 m提高至158 m,汛末库水位进一步优化,8月下旬允许上浮至150 m,9月10日水位允许由150 m提高至150~155 m。逐步优化后的调度方式必然会对长江中下游水文情势和江湖关系产生影响^[19,20]。

本文采用1961-2016年(部分年份水文资料缺失,其中枝城站缺1962年资料,沙市站缺1970年资料,监利站为1981-2016年资料)长江中下游流域宜昌-大通7个水文站点的实测月均径流量数据,依据葛洲坝工程开始运行(1981年)和三峡工程开始运行(2003年)两个时间节点将其分为3个时段,即1961-1980年天然径流阶段、1981-2002年葛洲坝工程运行后、三峡工程运用前阶段和2003-2016年三峡工程运用后阶段,计算每个站点3个时段的汛期枯期数值,并采用三峡水库入库出库流量资料(图1),还原无三峡水库条件下2003-2016年的月均径流量数据,并计算汛期枯期数值。通过统计水库蓄水前后各水文站汛枯期变化规律,进一步明晰三峡水库运行对下游汛枯期的影响。

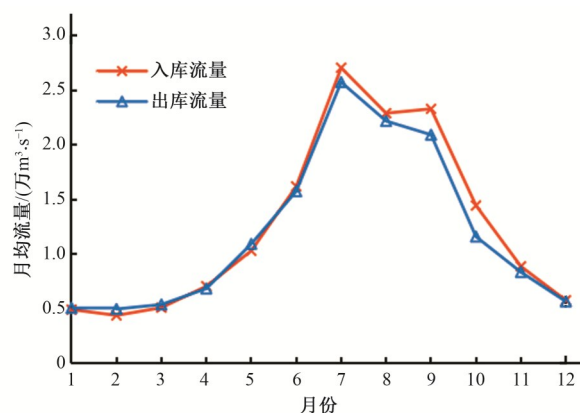


图1 三峡水库入库出库月均径流

Fig.1 Average monthly runoff in and out of Three Gorges Reservoir

2 水文分期变化分析

水文序列受到气象气候条件、下垫面因素及人类活动等因素的影响,而水文资料的变化又反映了受到这些因素的影响程度^[15]。大量的实测资料表明,流域的水文序列是受到确定因素和随机因素的综合作用的复杂过程,表现出非线性特征,因此河川径流序列也包含了表现为水文现象的趋势变化和周期性变化的确定成分,以及表现为水文现象的相依性和纯随机变

化,只能用随机序列理论来研究的随机成分,其过程是一种复杂的水文现象^[21-23]。

一般对于某个具体流域,汛期是多年来降雨量较大、洪水发生比较集中、径流流量比较大的时段。汛枯期的划分是某流域分期设计洪水的重要问题,对水库调度、洪旱灾害防治及生态环境保护具有显著意义。目前不少学者对于水文分期方法进行了较为系统的研究,许士国等^[24]认为某一地区或流域的汛期和非汛期是一种模糊现象,提出了采用模糊统计法进行水文分期,刘攀等^[25]采用变点分析方法研究了三峡水库的汛期分期方式,侯玉等^[26]提出了应用分形理论进行水文分期的方法。但是目前对于三峡水库运用后水库下游汛枯期变化规律的研究较少。

2.1 基于变点分析法的水文分期

针对传统方法确定汛期和枯期分界点检验样本容量少,误差大等缺点,雷旭等提出了月径流重构方法克服检验序列容量不足的问题。该方法具体步骤为:根据研究所分时段,将每个时段各月径流依次逐年排列,得到重构序列:

$$RF=[R_{1,1} R_{2,1} \cdots R_{i,1} \cdots R_{n,1} R_{1,2} \cdots R_{i,2} \cdots R_{n,2} \cdots R_{i,j} \cdots R_{1,12} \cdots R_{i,12} \cdots R_{n,12}]^T$$
 (1)

式中: $R_{i,j}$ 表示第*i*年第*j*月径流值,其中*i*=1,2,3,⋯,*n*,*j*=1,2,3,⋯,12,*n*为每个时段水文年长度。

并采用变异诊断方法检验重构序列*RF*,得到第一个变异点,提取该变异点后形成新的重构序列(残差序列)再一次进行检验得到第二个变异点,根据变异点所在序列的位置判断是汛期的起点还是终点。若变异点在序列的前半部分,且变异点在所对应月份样本的前半部分则所对应月份为汛期的起点,反之变异点在所对应月份样本的后半部分则所对应月份的下一个

月为汛期的起点;若变异点在序列的后半部分,且变异点在所对应月份样本的前半部分则所对应的月份的上一个月为汛期的终点,反之变异点在所对应月份样本的后半部分则所对应的月份为汛期的终点。

对于重构月径流序列变异点的检验方法,目前已有较多研究。本文采用谢平(2009)提出的水文变异诊断系统^[15]检验月径流重构序列,该方法考虑了趋势和跳跃两种变异形式,采用多种检验指标,分为初步诊断、详细诊断和综合诊断三步,克服了采用单一方法时检验结果可信度底,多种方法检验时结果又不一致的问题。初步诊断通过3种方法(过程线法、滑动平均法和Hurst系数法)判断所检验水文序列是否存在变异;若初步诊断存在变异,则进行详细诊断,详细诊断采用了15种方法从不同角度分析序列是否存在跳跃变异和趋势变异;最后对跳跃和趋势变异进行综合诊断,并根据公式计算两者的效率系数判断变异形式。

应用上述方法对长江中下游干流宜昌-大通7个水文站的月径流重构序列进行变异分析,显著性水平取 $\alpha=0.05$ 、 $\beta=0.01$,得到各站每个时段两个变异点,并计算出所对应的月份。以离三峡水库最近的宜昌站为例,通过变异诊断得到月径流重构序列变异诊断结果如表1、表2所示。根据表1可以看出,1961-1980年阶段宜昌站径流重构序列在第82个数据处发生向上跳跃强变异,将该数据提取后对剩下的残差序列再次进行变异分析,发现在第200个数据处仍然存在向下跳跃强变异;根据得到的两个变异点计算出所对应的月份为5、10月,根据两个变异点将序列划分为两个时段,并计算出每个时段的平均径流量,以序号82-200之间的阶段为汛期[图2(a)]。同理其余阶段也采

表1 三峡水库运行前宜昌站年径流序列变异诊断结果表

Tab.1 The annual runoff sequence variation diagnostic results of Yichang Station before the operation of The Three Gorges Reservoir

水文要素		1961-1980年		1981-2002年	
		重构序列	残差序列	重构序列	残差序列
初步诊断	HURST系数	0.97	0.90	0.96	0.91
	整体变异程度	有变异	有变异	有变异	有变异
	相对跳跃变异程度	跳跃强变异	跳跃强变异	跳跃强变异	跳跃强变异
跳跃诊断	1.滑动 <i>F</i> 检验法	20(+)	20(+)	11(+)	11(+)
	2.滑动 <i>T</i> 检验法	82(+)	200(+)	109(+)	219(+)
	3.里海哈林法	82(0)	200(0)	109(0)	219(0)
	4.有序聚类法	82(0)	200(0)	109(0)	219(0)
	5.RS检验法	11(0)	11(0)	65(0)	12(0)
	6.Brown-Forsythe法	60(+)	220(+)	68(+)	242(+)
	7.滑动游程检验法	60(+)	220(+)	65(+)	241(+)
	8.滑动秩和检验法	80(+)	200(+)	88(+)	219(+)
	9.最优信息二分割法	81(0)	207(0)	214(0)	94(0)
	10.Mann-kendall法	64(+)	225(+)	61(+)	244(+)
	11.BAYES方法	82(+)	200(+)	109(+)	219(+)
	12.PETTIT方法	82(+)	195(+)	96(+)	197(+)
	跳跃点	82	200	109	219
	跳跃综合权重	0.51	0.53	0.41	0.53
	跳跃综合显著性	3(+)	3(+)	2(+)	3(+)

续表 1 三峡水库运行前宜昌站年径流序列变异诊断结果表

水文要素		1961–1980年		1981–2002年	
		重构序列	残差序列	重构序列	残差序列
趋势诊断	相对趋势变异程度	趋势中变异	趋势中变异	趋势中变异	趋势中变异
	1.相关系数检验	+	+	+	+
	2.Spearman法	+	+	+	+
	3.Kendall法	+	+	+	+
	趋势综合显著性	3(+)	3(+)	3(+)	3(+)
综合诊断	跳跃效率系数/%	44.54	40.89	40.79	43.78
	趋势效率系数/%	16.90	3.39	13.38	5.40
	诊断结论	82↑	200↓	109↑	219↓

注：“+”表示跳跃/趋势显著，“-”表示跳跃/趋势不显著，“0”表示不能进行显著性检验；“↑”和“↓”分别表示跳跃/趋势上升和下降，下同。

表 2 三峡水库运行后宜昌站年径流序列变异诊断结果

Tab.2 The annual runoff sequence variation diagnostic results of Yichang Station after the operation of The Three Gorges Reservoir

水文要素		2003–2016年		2003–2016年(去除水库影响)	
		重构序列	残差序列	重构序列	残差序列
初步诊断	HURST系数	0.95	0.89	0.95	0.90
	整体变异程度	有变异	有变异	有变异	有变异
跳跃诊断	相对跳跃变异程度	跳跃中变异	跳跃强变异	跳跃强变异	跳跃强变异
	1.滑动 F 检验法	132(+)	37(+)	132(+)	26(+)
	2.滑动 T 检验法	54(+)	111(+)	57(+)	120(+)
	3.里海哈林法	54(0)	111(0)	57(0)	120(0)
	4.有序聚类法	54(0)	111(0)	57(0)	120(0)
	5.RS检验法	37(0)	132(0)	36(0)	36(0)
	6.Brown–Forsythe法	41(+)	132(+)	37(+)	132(+)
	7.滑动游程检验法	40(+)	132(+)	37(+)	132(+)
	8.滑动秩和检验法	47(+)	111(+)	47(+)	111(+)
	9.最优信息二分法	91(0)	115(0)	79(0)	18(0)
	10.Mann–kendall法	24(+)	130(+)	34(+)	131(+)
	11.BAYES方法	54(+)	111(+)	57(+)	120(+)
	12.PETTIT方法	47(+)	108(+)	47(+)	108(+)
	跳跃点	54	111	57	120
	跳跃综合权重	0.41	0.53	0.41	0.41
	跳跃综合显著性	2(+)	3(+)	2(+)	2(+)
趋势诊断	相对趋势变异程度	趋势中变异	趋势中变异	趋势中变异	趋势中变异
	1.相关系数检验	+	+	+	+
	2.Spearman法	+	+	+	+
	3.Kendall法	+	+	+	-
	趋势综合显著性	3(+)	3(+)	3(+)	1(+)
综合诊断	跳跃效率系数/%	33.66	42.05	37.45	40.08
	趋势效率系数/%	8.78	5.45	11.86	4.84
诊断结论		54↑	111↓	57↑	120↓

用同样的方法得到汛枯期分界点,1981–2002年阶段两个变异点为109(↑)、219(↓),其对应的月份为6月、10月,即汛期为6–10月[图2(b)]。2003–2016年阶段的两个变异点为54(↑)、111(↓),其对应的月份为5月、9月,即汛期为5–9月[图2(c)]。去掉三峡水库调度的影响后,两个变异点为57(↑)、120(↓),其对应的月份为6月、10月,即汛期为6–10月[图2(d)]。

2.2 基于模糊统计法的水文分期

本文采用模糊统计法进行对比分析。汛期枯期的划分本

就是一个模糊现象的划分,通过把汛期枯期认为是时间论域上的模糊集合,利用其模糊集的隶属函数描述汛期的隶属度,统计汛期的变化规律。本文取汛期流量标准 QF 等于所分阶段各站年均流量,并以 QF 为标准统计所分阶段得到汛期样本区间,根据样本区间统计并计算各月被覆盖的次数和隶属度。根据计算得到各站点每个月份各阶段的隶属度结果见表3和表4。

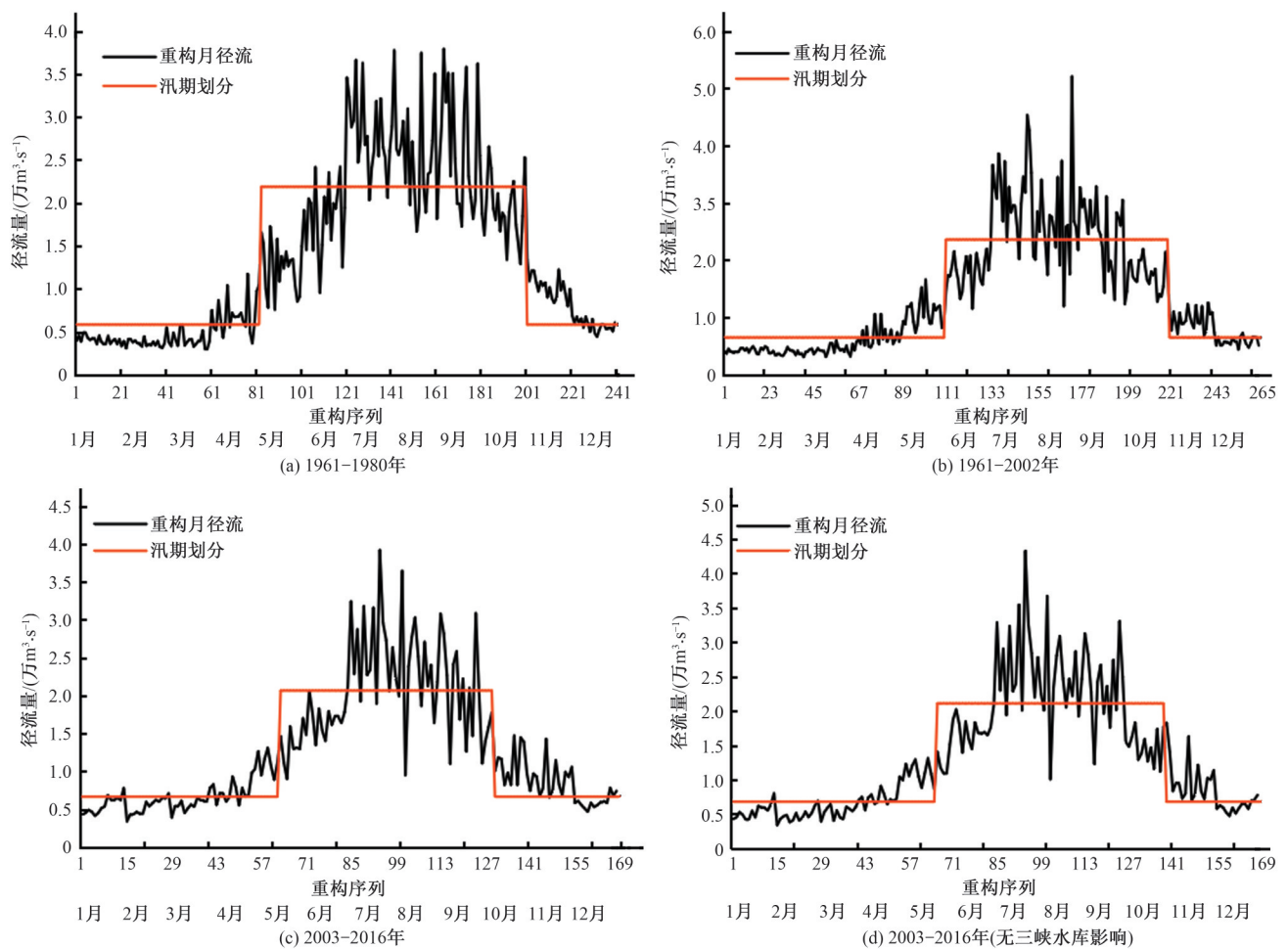


图2 宜昌站汛枯期划分

Fig.2 Division of flood and dry seasons of Yichang station from

表3 三峡水库运行前各水文站不同月份汛期隶属度

Tab.3 The membership degree of different months in hydrological stations before the operation of The Three Gorges Reservoir

月份	1961-1980年						1981-2002年						
	宜昌	枝城	沙市	螺山	汉口	大通	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0.25	0.15	0.25	0	0	0	0	0.14	0.09	0.18
5	0.35	0.42	0.26	0.75	0.75	0.80	0.23	0.09	0.14	0.18	0.45	0.36	0.64
6	0.90	0.89	0.84	0.95	0.95	0.95	0.91	0.86	0.91	0.91	0.95	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.90	0.91	0.91	0.91	0.95	0.91	0.91	0.91
10	0.90	0.89	0.95	0.90	0.90	0.80	0.86	0.82	0.91	0.95	0.68	0.73	0.73
11	0	0	0.05	0.05	0.10	0.20	0	0	0	0.09	0	0.05	0.09
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

本文选取隶属度小于0.2、小于0.3的月份为枯期,其余月份则为汛期。对长江中下游干流7个水文站各阶段每个月份的隶属度进行统计分析得到汛期起止月份。通过变异分析方法和模糊统计法得到的汛期起止月份如表5所示。

2.3 统计结果对比分析

根据表5,三峡工程蓄水前阶段两种方法计算结果差别较

小,1961-1980年阶段,变异方法结果表明各站汛期为5-10月,模糊方法取隶属度 <0.2 时,除螺山和大通水文站外,其余各站也认为汛期为5-10月,取隶属度 <0.3 时,除沙市站外的其余各站汛期为5-10月。1981-2002年阶段,两种方法均表明宜昌至大通段上下游汛期起止月份不一样,变异方法和模糊方法(隶属度 <0.3)认为宜昌、枝城、沙市和监利4个站汛期为6-10月,而

表4 三峡水库运行后各水文站不同月份汛期隶属度

Tab.4 The membership degree of different months in hydrological stations before the after the operation of The Three Gorges Reservoir

月份	2003-2016年						2003-2016年(去除三峡水库影响)							
	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0.07	0	0.07	0.07	0.14	0	0	0	0	0.07	0.07	0.14
5	0.50	0.43	0.57	0.50	0.71	0.79	0.79	0.50	0.21	0.07	0.14	0.64	0.71	0.79
6	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	0.93	0.93	0.93	1.00	0.93	0.93	1.00	0.93	0.93	1.00	1.00	1.00	0.93
9	0.79	0.86	0.86	0.86	0.79	0.79	0.79	0.79	0.93	0.93	1.00	0.79	0.93	0.93
10	0.43	0.43	0.43	0.57	0.43	0.43	0.50	0.43	0.79	0.71	0.93	0.57	0.57	0.64
11	0	0.07	0	0.07	0	0.07	0.07	0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表5 两种方法汛期起止月份统计结果对比表

Tab.5 Comparison of statistical results of two methods on the start and end of flood season

水文站	1961-1980年			1981-2002年			2003-2016年			2003-2016年 (无三峡水库影响)		
	变异方法	模糊方法(隶属度)		变异方法	模糊方法(隶属度)		变异方法	模糊方法(隶属度)		变异方法	模糊方法(隶属度)	
		0.2	0.3		0.2	0.3		0.2	0.3		0.2	0.3
宜昌	5-10	5-10	5-10	6-10	5-10	6-10	5-9	5-10	5-10	6-10	5-10	5-10
枝城	5-10	5-10	5-10	6-10	6-10	6-10	6-9	5-10	5-10	6-10	5-10	6-10
沙市	5-10	5-10	6-10	6-10	6-10	6-10	5-9	5-10	5-10	6-10	6-10	6-10
监利	-	-	-	6-10	6-10	6-10	5-9	5-10	5-10	6-10	6-10	6-10
螺山	5-10	4-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-9	5-10	5-10	5-9	5-10	5-10
汉口	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-9	5-10	5-10	5-9	5-10	5-10
大通	5-10	4-11	5-10	5-10	5-10	5-10	5-9	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10

螺山、汉口和大通站汛期为5-10月,存在下游汛期比上游提前一个月的规律;模糊方法(隶属度<0.2)除宜昌站外,其余各站也表现出同样的规律。

此外,两种方法得出的结果也存在一定差异性,主要表现在三峡工程建设完成后的时段7个水文站结果均有差异,模糊统计法在两种隶属度下各站汛期均为5-10月,变异方法显示除枝城外的其余水文站汛期为5-9月,表现出比模糊方法得到的汛期终止月份均滞后一个月的特点,而枝城站表现出汛期起始月份滞后1个月,终止月份提前1个月的情况。但是在去除由于三峡水库削峰补枯调度而影响水库下游径流过程后,变异方法除螺山、汉口水文站没有明显变化外,其余水文站得到的汛期与1981-2002年阶段的结果一致;而模糊方法也表现出与1981-2002年时段相似的规律,取隶属度<0.2时,枝城站汛期起始月份比该时段提前一个月,取隶属度<0.3时,宜昌站汛期起始月份比该时段提前一个月,其余水文站的结果均与1981-2002年相同。

根据以上分析,三峡水库蓄水前,两种方法得到的汛枯期分期时间基本一致,当模糊统计法隶属度<0.3时,两种方法所得结果相似度为92%,隶属度<0.2时,相似度也达到了77%。说明了变异分析方法的可行性,但是模糊统计法存在主观性,根

据隶属度取值的不同统计结果也会存在差异。三峡水库蓄水后,两种方法结果不一致,但是在排除因水库削峰补枯的影响后,两种方法结果差异性较小。

综合两种方法可以确定在1961-1980年阶段长江中下游干流7个水文站汛期为5-10月;1981-2002年阶段,宜昌、枝城、沙市和监利站的汛期为6-10月,而螺山、汉口和大通站的汛期为5-10月;三峡水库蓄水后,变异分析方法结果认为各水文站汛期为5-9月,而模糊统计方法结果为5-10月。根据水文分期结果,统计蓄水前后5月(消落期)和10月(蓄水期)径流变化情况,进一步分析三峡水库运用对下游河段汛枯期变化的影响。

以宜昌站为例,宜昌站5月径流量系列基本在多年平均径流量11 832 m³/s上下波动,并无明显减小或增大趋势(图3),三峡水库蓄水后5月径流量增加了671 m³/s,而三峡水库5月(消落期)增加的下泄流量为858 m³/s,其对流量变化的贡献率为82.14%(表6),说明5月流量的增加主要是受三峡水库的影响。三峡水库运用后宜昌站10月径流量系列明显减小(图3),本文所研究的其他水文站也均为减小趋势,且减小幅度超过了24%,而10月径流量的减少会对长江中下游及通江湖泊造成显著影响,使河流提前进入枯水期。三峡蓄水后宜昌站10月径流量比1961-2002年阶段10月平均径流量减少了6 136 m³/s,减小

幅度达到了33.66%,三峡水库10月蓄水影响的贡献率为47.67%(表6),宜昌站、枝城站径流量的减少会直接影响荆江三口分流,减小洞庭湖来水量,影响湖泊生态环境。大通站10月

径流量减少了8 037 m³/s,减小幅度的24.14%,同时在天文大潮的影响下使大通站以下河段盐水入侵现象严重,对河口河段生产生活取水等造成显著影响。

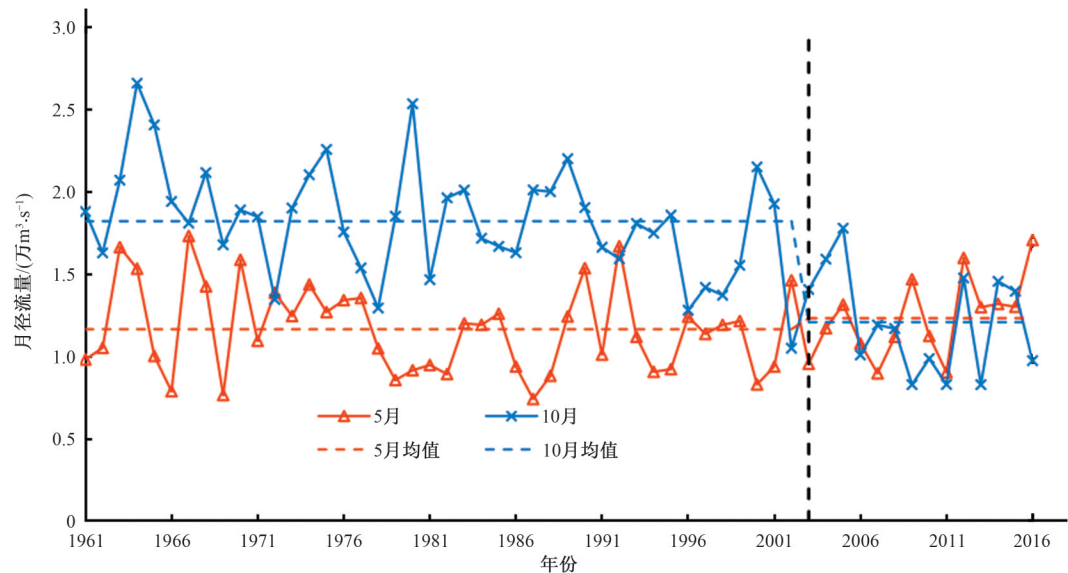


图3 宜昌站5月和10月径流量变化

Fig.3 Runoff variation of Yichang station in May and October

表6 蓄水前后各站5月和10月月均径流变化

m³/s

Tab.6 Monthly average runoff change of each station in May and October before and after impoundment

月份	时段	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
5	蓄水前(1961–2002年)	11 664	11 992	10 960	10 513	22 650	24 682	33 413
	蓄水后(2003–2016年)	+671	+649	+1014	+933	–330	–549	–1272
	三峡水库影响量	+858	+858	+858	+858	+858	+858	+858
	三峡水库贡献率/%	82.14	80.42	84.55	91.91	41.97	37.89	28.75
10	1961–2002年	18 232	18 718	16 515	15 618	24 317	27 561	33 299
	2003–2016年	–6 136	–6 399	–4 853	–3 865	–7 667	–7 999	–8 037
	三峡水库影响量	–2 925	–2 925	–2 925	–2 925	–2 925	–2 925	–2 925
	三峡水库贡献率/%	47.67	45.71	60.28	75.69	38.15	36.57	36.40

注:“+”表示三峡水库“增加”下泄流量,“–”表示“减小”下泄流量。

有研究^[23]预测,到2030年所有规划大坝建成后,宜昌站10月径流量将比1990年以前减少56.5%。10月径流量减小幅度远大于9月(图4),到三峡蓄水后平均径流量比5月还少239 m³/s,所以变异分析法认为三峡蓄水后汛期为5–9月,但是10月径流总量相比于1月、2月仍然较大,模糊统计法将10月还是隶属于汛期。

三峡(正常运行)–葛洲坝水利枢纽梯级调度规程(2019年修订版)规定^[15]5月底为汛前消落期,蓄水后阶段5月平均增泄流量为858 m³/s,有效抑制了近年来上游来水减小对水库下游的影响;汛末蓄水期不早于9月10日,蓄水后阶段因三峡水库蓄水而减小的平均下泄流量为2 925 m³/s,这是10月径流量减小的主要原因,其次与蓄水后长江上游来水量趋于减小也有关。实际上长江中下游径流减小并不只有10月,如宜昌站的8–9月月均径流量减小也非常显著,这与三峡水库实行中小洪水调度和近年来没有发生特大洪水有关。

根据统计的蓄水前后7个水文站5、10月流量变化和三峡

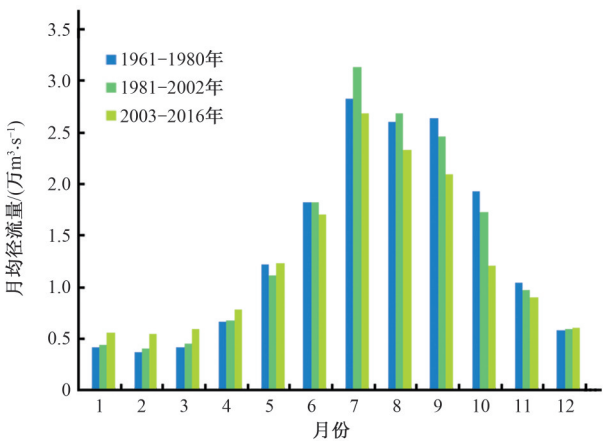


图4 不同时段宜昌站各月径流量变化

Fig.4 Monthly runoff variation of Yichang station in different periods

水库消落期增泄流量、蓄水期拦截部分流量对流量变化的贡献率结果,发现三峡水库对宜昌至城陵矶河段流量变化的贡献率

大于城陵矶至大通河段,主要是下游河段除了受三峡水库调度的影响外,还受到通江湖泊分汇流和支流入汇的影响。

3 结 论

(1)天然径流情况下(1961–1980年),变点分析方法和模糊统计法结果均表明长江中下游干流7个水文站汛期起止时间为5–10月。1981–2002年阶段,宜昌至城陵矶河段汛期起止时间为6–10月,城陵矶至大通河段为5–10月,差异性表现在下游河段汛期起始月份比上游河段提前一个月。

(2)三峡水库蓄水后,受水库调度的影响,两种方法结果存在较大差异,变点分析方法表明宜昌至大通汛期期为5–9月,模糊统计方法为5–10月,在去除三峡水库入库出库流量差异后,两种方法结果显示与1981–2002年阶段汛期起止时间相同,即宜昌至城陵矶河段汛期起止时间为6–10月,城陵矶至大通河段为5–10月。

(3)三峡水库的运用是水库下游汛枯期起止时间变化的主要原因。三峡水库的运用对水库下游5、10月径流量变化的影响较大,进而影响汛、枯期分期规律,且对宜昌至城陵矶河段流量变化的贡献率大于城陵矶至大通河段。 □

参考文献:

- [1] BEST J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 7–21.
- [2] NOAH S D, SINGH D, MANKIN J S, et al. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(5): 4 881–4 886.
- [3] AHN J M, KWON H G, YANG D S, et al. Assessing environmental flows of coordinated operation of dams and weirs in the Geum River Basin under climate change scenarios [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 643(12): 912–925.
- [4] 李析男,谢 平,李彬彬,等. 变化环境下不同等级干旱事件发生概率的计算方法:以无定河流域为例[J]. *水利学报*, 2014, 45(5): 585–594.
- [5] 魏山忠. 新时期长江防洪减灾方略[J]. *人民长江*, 2017, 48(4): 1–7.
- [6] 余玉聪,李雯晴,刘 招,等. 金沙江下游梯级水库汛期分期及汛限水位合理确定研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(7): 1–7.
- [7] 孔 波,樊晶晶,黄 强. 北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析[J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 52–57.
- [8] 杨云平,张明进,孙昭华,等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(5): 776–789.
- [9] 朱玲玲. 长江中下游航道整治数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [10] 叶 琰,马光文,龙训建,等. 金沙江下游及三峡梯级径流均匀度及突变性分析[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(2): 41–44.
- [11] 许继军,陈 进,常福宣,等. 控制性水利工程对长江中下游水资源影响与对策[J]. *人民长江*, 2014, 45(7): 11–17, 76.
- [12] 黄 悦,姚仕明,卢金友. 三峡水库运用对坝下游干流河道水文情势的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(7): 76–81.
- [13] 韩博闻,李 娜,曾春芬,等. 大型水利工程对长江中下游水沙变化特征的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(2): 139–144.
- [14] 雷 旭,谢 平,顾海挺. 基于月径流重构序列变异分析的水文分期方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(2): 211–220.
- [15] 谢 平,陈广才,雷红富,等. 水文变异诊断系统[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(1): 85–91.
- [16] 郭 倩,刘 攀,徐高洪,等. 基于汛期平均流量评价李庄洪水汛期分期研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 39–43.
- [17] 刘丹雅,纪国强. 三峡工程防洪规划与综合利用调度技术研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(6): 19–25.
- [18] 中华人民共和国水利部. 三峡(正常运行)–葛洲坝水利枢纽梯级调度规程(2019年修订版)[R]. 北京: 2019.
- [19] 张冬冬,戴明龙,徐高洪,等. 三峡水库蓄水期洞庭湖出湖水量变化[J]. *水科学进展*, 2019, 30(5): 613–622.
- [20] 王 俊,郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 473–480.
- [21] 李彦彬,尤 凤,黄 强,等. 河川径流混沌特征分析[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(3): 11–17, 30.
- [22] 丁 晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
- [23] 周建军,张 曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1 471–1 488.
- [24] 许士国,陈守煜. 水文分期描述的模糊统计方法[J]. *大连理工大学学报*, 1990, 30(5): 585–590, 598.
- [25] 刘 攀,郭生练,王才君,等. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究[J]. *水文*, 2005, 25(1): 18–23.
- [26] 侯 玉,吴伯贤,郑国权. 分形理论用于洪水分期的初步探讨[J]. *水科学进展*, 1999, 10(2): 41–44.

(上接第34页)

- [10] 沙金霞,刘 彬,谢新民,等. 基于粒子群算法的水资源优化配置研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(9): 33–35, 69.
- [11] 曾 萌,王 丰,张永鹏,等. 基于鱼群算法的广东省水资源优化配置研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(5): 733–741.
- [12] 潘 俊,王灏瀚. 基于遗传算法的多目标水资源优化配置:以沈阳地区为例[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2016, 32(5): 945–952.
- [13] 刘玘玘,汪 妮,解建仓,等. 基于蚁群算法的水资源优化配置博弈分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(8): 205–211, 220.
- [14] 崔东文. 鲸鱼优化算法在水库优化调度中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 72–76, 94.
- [15] HOF P R, GUCHT E V D. Structure of the cerebral cortex of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae* (Cetacea, Mysticeti, Balaeopteridae) [J]. *The Anatomical Record Part A Discoveries in Molecular Cellular and Evolutionary Biology*, 2006, 290(1).
- [16] MIRJALILI S, LEWIS A. The Whale Optimization Algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51–67.
- [17] 曾发琛. 西安市水资源供需平衡分析及优化配置研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.