

张洪波, 曹巍, 张双虎, 等. 人类活动对洞庭湖区荆南三河径流变化的定量影响[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(1): 91-100.
ZHANG Hong-bo, CAO Wei, ZHANG Shuang-hu, et al. Quantitative Evaluation of Human-introduced Runoff Change of Three Streams in the Southern Jingjiang River of Dongting Lake Area, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(1): 91-100.

人类活动对洞庭湖区荆南三河 径流变化的定量影响

张洪波^{1,2}, 曹巍¹, 张双虎³, 张艳平³

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部
重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 20世纪50年代以来, 为治理长江水患, 洞庭湖区和长江荆江河段发生了大规模、高频次的人类活动, 导致荆南三河(松滋河、虎渡河和藕池河)径流序列发生显著变化, 严重影响了洞庭湖区的江湖水量交换与水安全情势。为了量化荆南三河径流序列的变异特征, 引入 STARS 法和 ICSS 法分别用于识别径流序列的均值与方差变化, 确定其变异位置与变异水平; 同时, 通过梳理同期发生的重大人类活动, 从物理机制层面探索荆南三河径流变异的驱动成因。结果表明: 荆南三河新江口站、沙道观站、弥陀寺站、康家岗站和管家铺站径流序列均发生了均值跳跃变异(变异幅度 24%~78%), 径流量严重减少, 康家岗站还发生了振幅缩减的方差变异(变异幅度 74%); 径流变异的主要原因是 1969~1971 年的荆南三河河道裁弯和 2001~2006 年的三峡水库蓄水; 河道裁弯主要影响荆南三河的沙道观站、弥陀寺站、康家岗站、管家铺站, 减少流入洞庭湖水量约 $614 \times 10^8 \text{ m}^3$, 三峡水库蓄水影响新江口站、沙道观站、弥陀寺站, 减少流入洞庭湖水量约 $174 \times 10^8 \text{ m}^3$; 从受双重影响的沙道观站和弥陀寺站来看, 河道裁弯和三峡水库蓄水所引起的径流变异幅度基本相当, 但在绝对量值上, 河道裁弯引起的影响更大。

关键词: 水文学; 径流序列; STARS 法; ICSS 法; 人类活动; 河道裁弯; 三峡水库; 洞庭湖

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2018)01-0091-10

Quantitative Evaluation of Human-introduced Runoff Change of Three Streams in the Southern Jingjiang River of Dongting Lake Area, China

ZHANG Hong-bo^{1,2}, CAO Wei¹, ZHANG Shuang-hu³, ZHANG Yan-ping³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Department of Water Resources, China Institute
of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming to deal with the water disaster in Yangtze River, the large-scale and high-frequency human activities are carried out in Jingjiang River and Dongting Lake area since 1950s, which lead to the river runoff series change obviously of three streams (Songzi River, Hudu River and Ouchi River) in the southern Jingjiang River, and the water exchange and water security in

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-01-14 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379014); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2017035)

作者简介: 张洪波(1979-), 男, 辽宁康平人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: hbzhang@chd.edu.cn.

Dongting Lake area are seriously influenced. In order to quantify the variation characteristics of runoff series of three streams in the southern Jingjiang River, the STARS and ICSS methods were employed to identify the mean and variance variation, and the variation position and variation level of runoff series; meanwhile, some significant human activities during the variation periods were analyzed to explore the causes of hydrological variation through the physical mechanism. The results show that the runoff series of Xinjiangkou, Shadaoguan, Mituosi, Kangjiagang and Guanjiapu stations of three streams in the southern Jingjiang River have change points in mean with the decrease range of 24%-78%, and the runoff is severely reduced, moreover, the runoff series of Kangjiagang station has a change point in variance with 74% decrease; these variations mainly result from the river cutoff of three streams in the southern Jingjiang River from 1969 to 1971 and Three Gorges Dam impoundment from 2001 to 2006; the river cutoff has significant influence on the runoff at Shadaoguan, Mituosi, Kangjiagang and Guanjiapu stations and causes 614×10^8 water not entering Dongting Lake; the Three Gorges Dam impoundment has noticeable effect on the runoff at Xinjiangkou, Shadaoguan and Mituosi stations and results in a decreasing lake inflow with 174×10^8 water; through analyzing the runoff series at Shadaoguan and Mituosi stations effected by two types of human activities, the variation levels caused by river cutoff and Three Gorges Dam impoundment are equivalent, but river cutoff has more significant influences than Three Gorges Dam impoundment on change in absolute value.

Key words: hydrology; runoff series; STARS method; ICSS method; human activity; river cutoff; Three Gorges Dam; Dongting Lake

0 引言

近年来,受气候变化和人类活动双重影响,部分地区的河流水文过程发生了显著变异^[1-2],一系列的非一致性特征对传统水文学的应用假设提出了严峻的挑战^[3]。传统水文学认为,水文序列是将具有同一统计指标的水文参数值按其发生的时间先后顺序排列而成的数列,依据其时间序列特性,可基于已有历史数据对未来的水文变化进行预测;当非一致性问题出现时,水文序列的统计特征参数发生变化,由历史数据推估未来水文走向的假设也将不复存在^[4]。从成因角度来看,水文序列主要受确定性因素影响,同时许多随机和不确定性因素也在扰动径流过程。因此,水文时间序列常被划分为确定性成分和随机性成分。随机性成分为由随机和不确定性因素综合作用引起的不规则震荡,往往很难从物理机制角度加以解释或描述;而确定性成分则基于一定的物理机制形成,如地球公转和自转使水文序列包含确定性的(年、月)周期成分,以及气候变化导致的水文序列在一定时间内表现出明显的趋势变化等。水文序列的非一致性变化也主要集中在确定性成分上,如气候的趋势性变化、下垫面条件的非逆转改变等都会影响流域产汇流过程,进而形成差异性的水文序列;此外,人类大

规模的涉水活动也会改变河道内原有的水流情势,使水文序列发生变异。由于水文序列系多因素综合驱动的结果,故不同因素导致的变异成分在时域上存在叠加问题,很难被肉眼直接观察到,因此,多需要通过统计学检验方法来识别与诊断^[3]。

目前,水文变异识别方法众多,其中大量的统计学方法被引入到了水文序列均值变异诊断领域,如累积距平法,(滑动)t检验,(滑动)F检验,线性回归法,STARS法^[5],CUSUM、Pettitt、Mann-Whitney U检验,Wilcoxon秩和检验,Mann-Kendall等非参数检验法和Bayesian变异分析法等。趋势变异虽被频繁提及,但因受到统计时段的影响,全局性趋势和局部性趋势较难界定,故并未有公认的检验方法。而水文序列的方差变异虽渐受重视,但识别方法较少,常见的仅有Rodionov法^[6]和迭代累积平方和(Iterative Cumulative Sums of Squares,ICSS)法^[7]。从以上分析不难发现,尽管学术界对不同水文统计参数的变异特征均有研究,但对从多参数进行水文序列综合变异分析极为有限,亟待开展研究。

荆南三河位于洞庭湖口门河系中,长江水通过其分流分沙进入洞庭湖,经湖泊调蓄后从城陵矶重汇长江,是连接长江与洞庭湖的纽带。长江与洞庭湖相互作用、相互影响,形成了独特的江湖关

系^[8-16]。江湖关系的变化影响着区域洪涝灾害防治、水资源开发利用和湿地生态环境保护等问题,是长江中游和通江湖泊治理的核心问题之一^[17]。20 世纪 50 年代以来,在洞庭湖区和荆江上下河段发生了大规模、高频次的人类活动,例如拦河建坝、疏河建闸、河道裁弯、修堤筑岸、围湖造田等,对荆南三河的径流过程和江湖水沙交换造成了深刻影响^[18-21]。本文拟采用 STARS 法和 ICSS 法从均值和方差两个角度识别荆南三河水文变异的类型和时间,并通过梳理与水文变异同期发生的重大人类活动,揭示引起荆南三河水文变异的物理成因,探求人类活动对江湖演变关系的定量影响。

1 研究区概况

1.1 流域水系

荆南三河水系最早被称为四口河系,其是洞庭湖

区的一部分,范围包括荆江南岸,洞庭湖北面松滋、太平、藕池、调弦四口及其分流到洞庭湖的河道(松滋河、虎渡河、藕池河、华容河,也称荆南四河)所组成的复杂河网。四口河系庞大,总面积约 9 812 km²,约占洞庭湖区总面积的 51%。四口河系地区是典型的平原水网区,夹有低山丘陵分布,大致形成北高南低、西高东低的趋势,地势上由较高的松滋河、虎渡河、藕池河渐次向最低的华容河出口过渡,受洪水冲决、泥沙淤积、水流冲刷切割的影响,河流总体由北向南流动,并受地形影响相互串流、相互交织。20 世纪 50 年代以来,为了治理长江水患,四口河系及周边开展了大规模的涉水活动,如中子洲裁弯、上车湾裁弯、沙滩子裁弯、三峡水库建设与运行等,一系列的水事活动,使得区域径流量不断衰减,河流特征渐弱,平原特征发育明显^[22-24]。图 1 显示了洞庭湖区河系范围及重要水事活动。四口河系之所以现在



图 1 洞庭湖区河流水系及水文站点分布

Fig. 1 Locations of River Networks and Hydrological Gauges in Dongting Lake Area

称为荆南三河,主要是因为 1958 年为控制江水入湖、扩大湖区耕地面积,在调弦口修建调弦口闸,同时在湖南境内的旗杆嘴兴建了六门闸,将其与洞庭湖分离。至此,原洞庭湖荆南四口分流演变为荆南三口分流,荆南四河演变为荆南三河,包括松滋河、虎渡河和藕池河。

1.2 水文站点分布及数据来源

新江口站是荆南三口分流松滋河(西支)的基本控制站,测验断面距松滋口 42 km,距松滋河东、西支分流处 12.5 km;沙道观站是松滋河(东支)的基本控制站,测验断面距松滋口 47 km,距松滋河东、西支分流处 17.5 km;弥陀寺站是虎渡河基本控制站,测验断面距太平口 4.9 km;康家岗站是藕池河(西支)的基本控制站,测验断面距藕池口 13.9 km,距藕池河东、西支分流处 3 km;管家铺站是藕池河(东支)的基本控制站,测验断面距藕池口 12.5 km,距藕池河东、西分流处 2.6 km;康家岗站和管家铺站相距甚近,直线距离不足 1 km。5 个水文站基本覆盖了荆南三河所有干支流,且均为国家级水文站。本次主要收集了荆南三河五站(新江口站、沙道观站、弥陀寺站、管家铺站和康家岗站)1959~2014 年的年径流数据,数据来源于湖南水文水资源勘测局和湖南省水利水电勘测设计研究总院。通过对径流序列的变异检验,本文将重点探讨其均值与方差变异特征,并透过归因分析,定量识别人类活动对荆南三河径流变化的影响。

2 分析方法

2.1 均值变异检验方法——STARS 法

STARS 法是 Rodionov 在 2004 年提出的一种连续数据过程技术^[5-6]。该方法可在连续分析中采用类似滑窗的方法对序列进行均值跳跃变点的检验。STARS 法的特点是能在最短的延迟期限内估计跳跃变异发生时间,克服了其他方法在时间序列末尾检验效能下降的缺点,并能准确判别零假设(假设跳跃变异是存在的)的有效性。

根据 t 检验确定具有统计意义的两个相邻跳跃变异序列均值之间的差异(D_{diff})。其表达式为

$$D_{\text{diff}} = t \sqrt{2\sigma_l^2/l} \quad (1)$$

式中: l 为检测序列发生跳跃变异的截断长度; t 为在给定的概率水平 p 下,自由度为 $2l-2$ 的服从 t 分布的随机变量取值; σ_l^2 为时间序列的 l 年滑动区间的平均方差。

采用类似滑窗的连续过程技术,计算序列中

每个变量与其之前 l 个变量均值的差值,若差值的绝对值大于 D_{diff} ,则该点成为可能的跳跃变异点,记其位置为 j ;进一步计算其后 $l-1$ 个变量与该均值的差值,若所有差值的符号保持一致,则说明位于位置 j 的变异点是显著的,若差值的符号不一致,则说明位于位置 j 的变异点并不显著,即该点不是变异点,滑窗向前滑动一步,重复上述步骤,直到序列结束。

需要说明的是,无论时间序列是高斯、红噪声过程,还是由不同统计特性的真实序列片段组成,统计检测并不能区分 STARS 法和其他方法孰优孰劣。对该方法取得结果的正确解释,需要理解截断长度 l 对变异识别结果的影响。截断长度 l 决定片段的最小长度,也正是基于截断长度 l ,变异的量级才能保持完整性。对所有发生一个标准差量级或少于一个标准差量级的跳跃变异,如果持续时间小于 l ,则其会被过滤出去;但对于具有两个标准差量级及以上的跳跃变异,持续时间少于 l 的片段也能通过检测^[6]。

2.2 方差变异检验方法——ICSS 法

ICSS 法是一种中心化的累积平方和法^[7],配合迭代算法可实现多方差变异点的识别。

随机变量序列 $\{x_t\}$ 的均值为 0,方差为 σ_t^2 ,其中 $t=1,2,\dots,T$, T 为序列长度;累积平方和 $C_k = \sum_{t=1}^k x_t^2$, $k=1,2,\dots,T$;中心化累积平方和 $D_k = \frac{C_k}{C_T} - \frac{k}{T}$, $k=1,2,\dots,T$,且 $D_0 = D_T = 0$ 。其中, C_T 、 D_T 分别表示 $k=T$ 时的累积平方和和中心化累积平方和。对于方差恒定的序列, $D_k - k$ 曲线将围绕零轴上下震荡。当序列方差发生突变, D_k 曲线将会越过置信边界。根据 Inclan 等的证明,在恒定方差的条件下, $\sqrt{T/2} D_k$ 渐进地近似为布朗桥过程^[7]。由这种渐进分布,可通过 $|D_k|$ 的最大值来确定方差变异点。让 k^* 等于 D_k 最大处的 k 值,如果这个最大值 $|D_k|$ 越过事先确定的边界,则可以得出结论:序列在 k^* 附近发生变异,并把 k^* 作为对变异点的估计^[4]。

对于只存在一个变异点的情况, D_k 曲线能提供一个满意的结果;而当存在一个以上变异点时,在大多数情况下, D_k 曲线只显示出了两个变异点中更显著的一个。也就是说,当 D_k 函数被用于有两个及以上方差变异点的序列时,仅有较显著的那个很可能被找到,其他点可能被忽略,即发生掩蔽效应。针对多个方差变异点的情况, Inclan 等进一步优化

了 ICSS 法^[7]。其基本思想是对序列片段连续使用 D_k 函数的迭代方法:对整个序列用 D_k 函数进行检验,如果检测出一个可能的变异点,则把整个序列以变异点为界分为前后两个序列片段,然后对两个序列片段分别用 D_k 函数进行检验,如此下去直到所有的序列片段没有显著的变异点为止。为了确定变异点的显著性,将所有可能变异点按升序排列,构成变异点序列,计算每个变异点前后相邻两个变异点之间序列的 D_k 函数,若其最大值越过事先给定的置信边界,则该最大值位置处的点为新的可能变异点,否则说明该变异点并不显著,对新的变异点序列重复该操作直至变异点个数不再发生变化为止,即认为其收敛,此时的变异点序列即为最终的变异点序列。

3 结果分析与讨论

3.1 变异检验结果

将洞庭湖区荆南三河五站的径流数据分别代入 STARS 法和 ICSS 法进行变异检验。由于 ICSS 法要求序列均值平稳,故在计算方差变异前,需应用 STARS 法的均值识别结果将序列进行均值平稳化处理。本文中均值变异检验和方差变异检验的显著性水平均取 0.05,相关计算结果见图 2、3。在均值变异上,新江口站、沙道观站、弥陀寺站、康家岗站和管家铺站年径流序列都检测到了向下的

均值跳跃,即径流在变异点后有所缩减;新江口站于 2006 年发生了均值跳跃;沙道观站分别于 1969 年和 2001 年发生了两次均值跳跃;弥陀寺站于 1969 年和 2001 年发生两次均值跳跃;康家岗站于 1969 年发生了均值跳跃;管家铺站于 1966 年和 1971 年发生了向下的均值跳跃,且两次变异仅相距 4 年,变化较其他站点更为频繁、剧烈。方差变异主要发生于康家岗站,1966 年该站实测径流发生方差跳跃变异,其后振动幅度明显减小,是 5 个站点中唯一的方差变异站。

从荆南三河五站的均值变异检验与方差变异检验结果不难发现,荆南三河在时域上变化较大,不仅河流水量有显著缩减,其年际特征上也存在一定变化,这种变化可能对洞庭湖区的江湖水量交换与水资源安全形势存在潜在影响,应当引起相关水管理部门的充分重视。

3.2 变异归因分析

由以上分析可知,荆南三河五站年径流序列均发生了不同类型和不同程度的水文变异,且以向下均值跳跃变异为主。这种现象的发生并非偶然,而是与长江上游及荆南三河地区发生的强人类活动密切相关^[25-28]。虽然长江上游的降水量在时域上也存在一定的趋势变化,但其主要集中在 1958 年之前和 2010 年之后^[29],故对本文的分析序列并无大的影响,遂可认为研究时域内的径流变异归因还是以相

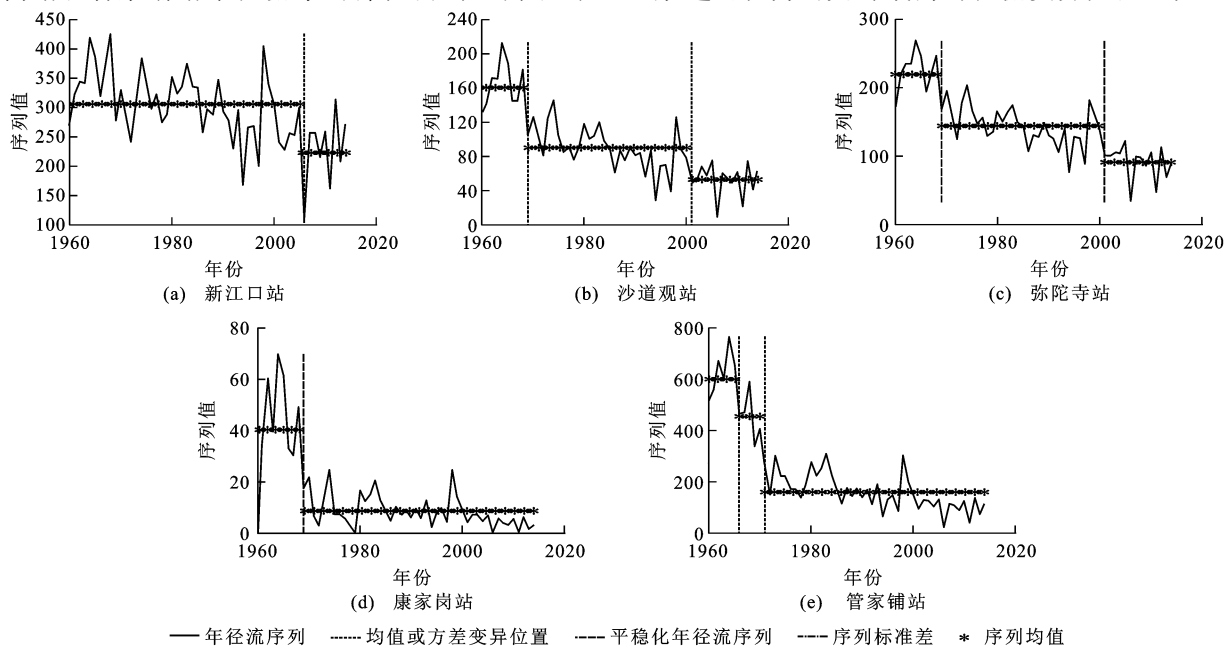


图 2 荆南三河五站年径流序列均值变异检验

Fig. 2 Mean Variation Test Results of Annual Measured Runoff Series at Five Stations of Three Streams in the Southern Jingjiang River

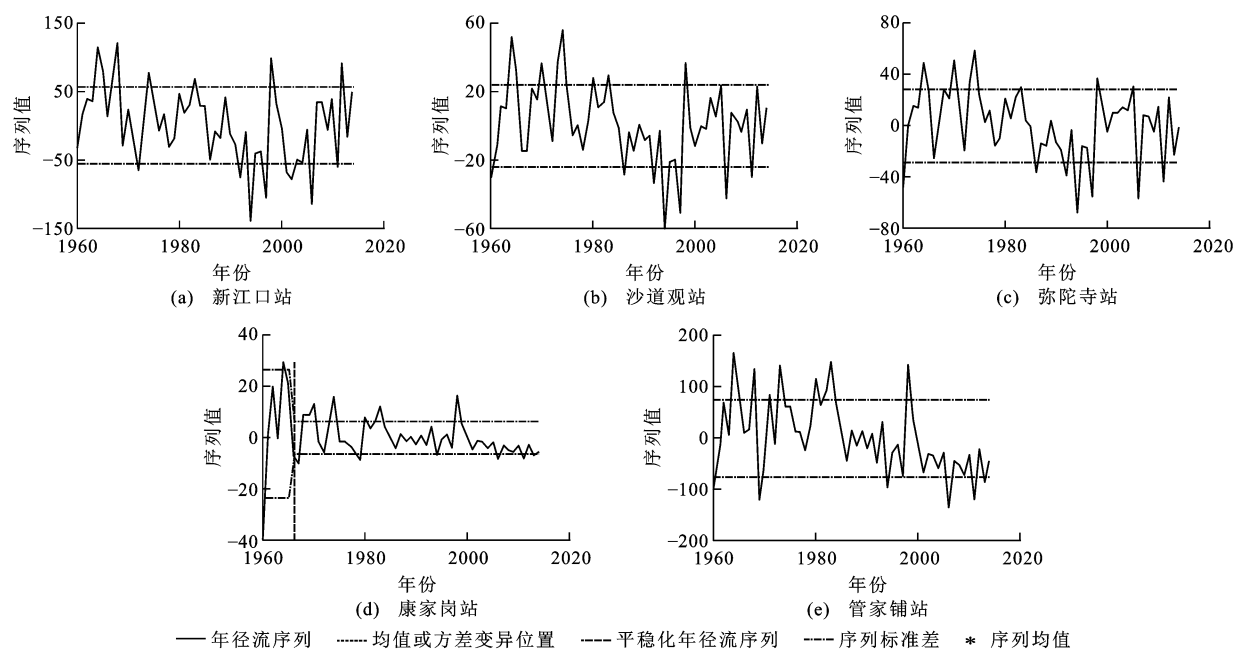


图 3 荆南三河五站年径流序列方差变异检验

Fig. 3 Variance Variation Test Results of Annual Measured Runoff Series at Five Stations of Three Streams in the Southern Jingjiang River

关人类活动为主。为了分析引起荆南三河径流变异的物理成因,将与变异同期发生的强人类活动统计于表 1 中(葛洲坝水电站为径流式电站,其运行期不改变年际径流过程,故水电站运行不列入重大人类的物理成因,将与变异同期发生的强人类活动统计于表 1 中(葛洲坝水电站为径流式电站,其运行期不上为上荆江,以下为下荆江)裁弯处的距离见图 4。

表 1 与变异同期发生的重大人类活动

Tab. 1 Significant Human Activities During Hydrological Variation Period

| 水文站点 | 均值变异年份及同期人类活动 | | 方差变异年份及同期人类活动 | |
|------|---------------|---|---------------|---|
| | 均值变异年份 | 同期人类活动 | 方差变异年份 | 同期人类活动 |
| 新江口站 | 2006 年 | 2006 年 5 月三峡大坝全线建成,汛后蓄水至 156 m | — | |
| 沙道观站 | 1969 年 | 1968 年 12 月至 1969 年 6 月,上车湾人工裁弯缩短河长 29.2 km | — | |
| | 2001 年 | 2001 年 9 月三峡水库开始蓄水 | | |
| 弥陀寺站 | 1969 年 | 1968 年 12 月至 1969 年 6 月,上车湾人工裁弯缩短河长 29.2 km | — | |
| | 2001 年 | 2001 年 9 月三峡水库开始蓄水 | | |
| 康家岗站 | 1969 年 | 1968 年 12 月至 1969 年 6 月,上车湾人工裁弯缩短河长 29.2 km | 1966 年 | 1966 年 10 月至 1967 年 5 月,中子洲人工裁弯缩短河长 32.4 km |
| 管家铺站 | 1966 年 | 1966 年 10 月至 1967 年 5 月,中子洲人工裁弯缩短河长 32.4 km | — | |
| | 1971 年 | 1971 年葛洲坝水电站工程开工兴建;上车湾人工裁弯后于该年 5 月形成主航道 | | |

注:“—”表示未发生变异。

由表 1 可以看出,变异点主要集中在两个时段,即 1969~1971 年和 2001~2006 年。在 1969~1971 年,荆南三河地区大规模的人类活动主要有 3 次,即中子洲裁弯、上车湾裁弯和沙滩子裁弯。上车湾裁弯对荆南三河的径流过程造成极大的影响,引起了松

滋河东支(沙道观站)、虎渡河(弥陀寺站)和藕池河西支(康家岗站)3 条河流发生水文变异,致使 3 条河流的水量急剧减少,这也是对荆南三河的径流过程影响最为显著的人类活动。中子洲裁弯影响有限,仅导致管家铺站径流序列发生均值跳跃变异。

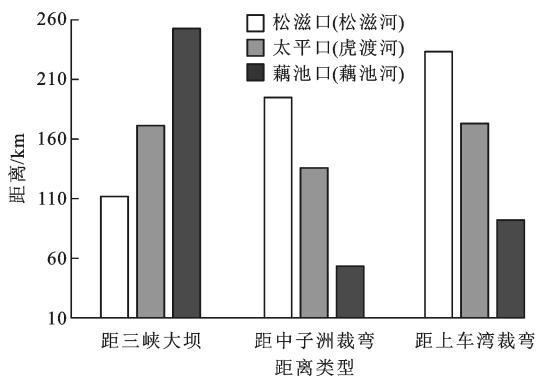


图 4 各分流口门距三峡大坝和下荆江裁弯的距离

Fig. 4 Distances Between the Diversion Ports and Three Gorges Dam, River Cutoff on the Lower Jingjiang River

康家岗站径流序列因受到中子洲裁弯和上车湾裁弯两次裁弯的叠加影响,于 1966 年发生了方差变异,其后振幅减小明显。此外,管家铺站在 1966 年第一次均值变异的 4 年后,再次发生均值变异。结合上游几个站点的变异情况,综合考虑认为管家铺站 1971 年的变异是受上车湾裁弯后形成主航道的影响,而葛洲坝电站的建设非其主要影响因素。从空间来看,管家铺站和康家岗站均靠近藕池口,是距离下荆江裁弯最近的站点(图 4),故其受下荆江裁弯的影响也最大^[30-32],不仅造成管家铺站、康家岗站的均值跳跃变异,还造成康家岗站的方差跳跃变异,导致藕池河中支和东支的水量大量减少,分流能力持续减弱。而上游站点与这两站相比,变异幅度明显次之(图 2、3)。

2001~2006 年,影响荆南三河径流变化的因素主要是上游三峡水库蓄水运行。由表 1 可知,2001 年三峡水库开始蓄水,导致沙道观站和弥陀寺站年径

流序列发生向下的均值跳跃变异,使得松滋河东支和虎渡河的水量在 1969 年发生大幅减少后,又在 2001 年进一步加剧,分流能力进一步减弱。2006 年,随着三峡水库全面建成并蓄水至 156 m,新江口站年径流序列发生向下的跳跃变异,松滋河西支的分流能力也被削弱。从空间位置来看,新江口站、沙道观站和弥陀寺站都位于上荆江水系,靠近上游的三峡水库,这 3 站在 2001~2006 年均发生一定程度的变异,但受分流影响,不同站点的变化略有不同。

综合以上分析可知,荆南三河的河道裁弯和上游三峡水库蓄水是其径流发生变异的主要原因。从空间规律来看,靠近三峡水库的上荆江水系新江口站、沙道观站和弥陀寺站都在 2001~2006 年发生了均值变异,康家岗站和管家铺站因距离三峡水库较远,2001~2006 年基本无变异。而靠近下荆江裁弯处较近的管家铺站、康家岗站、沙道观站和弥陀寺站受中子洲裁弯和上车湾裁弯取直影响,均在 1969~1971 年发生均值变异,康家岗站还伴有方差变异。距离裁弯处较远的新江口站则主要响应了三峡水库的蓄变影响,基本未受下荆江裁弯的影响。

3.3 定量影响评估

为了定量识别各站径流序列对两大归因的响应,将各站均值和方差的变化幅度统计于表 2 中。受上车湾裁弯影响的站点包括沙道观站、弥陀寺站和康家岗站,但裁弯对这 3 站径流序列的影响程度却不尽相同。上车湾裁弯对康家岗站径流序列的影响最为显著,均值减小了 78.12%,对沙道观站径流序列的影响居中,均值减小了 43.64%,对弥陀寺站径流序列的影响最弱,均值减小了 34.05%。从变化程度和空间分布看,愈靠近裁弯处,其影响愈剧烈。

表 2 变异前后序列均值和方差统计结果

Tab. 2 Statistical Results of the Mean and Variance of the Series Before and After Variation

| 水文站点 | 均值变异 | | | | 方差变异 | | | | 多年平均 水量/ 10^8 m^3 |
|------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|
| | 均值变异 年份 | 变异前 均值 | 变异后 均值 | 均值变化 幅度 | 方差变异 年份 | 变异前标 准差 | 变异后 标准差 | 方差变化 幅度 | |
| 新江口站 | 2006 年 | 306.16 | 222.59 | -27.30% | — | | | | 293.63 |
| 沙道观站 | 1969 年 | 160.09 | 90.23 | -43.64% | — | | | | 93.51 |
| | 2001 年 | 90.23 | 52.62 | -41.68% | | | | | |
| 弥陀寺站 | 1969 年 | 219.20 | 144.55 | -34.05% | — | | | | 144.68 |
| | 2001 年 | 144.55 | 91.76 | -36.52% | | | | | |
| 康家岗站 | 1969 年 | 40.39 | 8.84 | -78.12% | 1966 年 | 24.99 | 6.44 | -74.23% | 14.37 |
| 管家铺站 | 1966 年 | 601.51 | 456.24 | -24.15% | — | | | | 243.75 |
| | 1971 年 | 456.24 | 163.65 | -64.13% | | | | | |

注:“—”表示未发生变异。

中子洲裁弯主要影响管家铺站和康家岗站的径流序列,其中管家铺站径流均值减小了 24.15%,而康家岗站径流序列的方差减小了 74.23%,导致康家岗站径流序列的年际波动幅度大幅减小,藕池河西支水量的年际分配更趋于平坦化。统计数据显示,管家铺站径流序列均值在 1966 年和 1971 年两次向下跳跃变异后,径流量减小了近 73%,仅次于所有站点中变化最为剧烈的康家岗站。同时,由图 1 可知,康家岗站和管家铺站同属藕池河水系,两站直线距离不足 1 km,下荆江裁弯导致整个藕池河的径流量相比 1966 年之前减少了 $469.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,严重影响洞庭湖区入湖水量,威胁洞庭湖水安全。

三峡水库蓄水的影响主要涉及与其距离较近的新江口站、沙道观站和弥陀寺站。统计结果显示,沙道观站和弥陀寺站的径流序列均值在 2001 年前后分别减小了 41.68% 和 36.52%,而新江口站径流序列则在 2006 年三峡大坝全线建成后发生变异,均值减小了 27.30%。对比这 3 站的总体变异特点,发现荆南三河地区的河道裁弯和上游三峡水库蓄水对沙道观站和弥陀寺站径流序列所造成的变异幅度基本相当,但在绝对量值上,无疑荆南三河地区的河道裁弯的影响更大。而新江口站因距离裁弯处较远,径流序列只受三峡水库蓄水影响,虽然其变异程度只有 27.30%,但其绝对量值却是这 3 站中最大的,应引起足够的重视。

综合以上分析,荆南三河地区的河道裁弯影响水系中的沙道观站、弥陀寺站、康家岗站和管家铺站,减少流入洞庭湖水量约 $614 \times 10^8 \text{ m}^3$,而上游三峡水库蓄水影响荆南三河水系新江口站、沙道观站和弥陀寺站,减少流入洞庭湖水量约 $174 \times 10^8 \text{ m}^3$,两者合计影响近 $788 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的流入洞庭湖水量,占 1966 年之前荆南三河入湖水量的 59.37%。

4 结 语

(1)洞庭湖区荆南三河水系新江口站、沙道观站、弥陀寺站、康家岗站和管家铺站均发生了径流均值跳跃变异,且变异点主要集中在 1969~1971 年和 2001~2006 年两个时段。此外,只有康家岗站径流序列于 1966 年发生了方差变异。

(2)荆南三河地区的河道裁弯和上游三峡水库蓄水是引发其径流发生变异的主要原因。河道裁弯驱动了 1969~1971 年沙道观站、弥陀寺站、康家岗站和管家铺站的均值跳跃变异和方差变异;三峡水库蓄水驱动了 2001~2006 年新江口站、沙道观站和

弥陀寺站的均值跳跃变异。从空间分布来看,人类活动对径流序列的影响具有空间规律性,即人类活动只能影响到距其较近的河流,且随距离增加,影响趋小,而距其较远的河流基本不受影响,但受分流口条件影响,各站点径流变异略有差异。

(3)上车湾裁弯影响站点包括沙道观站、弥陀寺站和康家岗站,影响程度(径流均值变化幅度减少量)分别为 43.64%、34.05% 和 78.12%;中子洲裁弯主要影响管家铺站和康家岗站,其中管家铺站径流均值减小 24.15%,康家岗站径流序列方差减小 74.23%;管家铺站径流序列经 1966 年和 1971 年两次跳跃变异后,径流量减小了近 73%;三峡水库蓄水的影响主要涉及新江口站、沙道观站和弥陀寺站,影响程度分别为 27.30%、41.68% 和 36.52%。

(4)对比沙道观站和弥陀寺站的径流变异特点,发现荆南三河地区的河道裁弯和上游三峡水库蓄水对这两站径流序列所造成的变异幅度基本相当,但在绝对量值上,荆南三河地区河道裁弯的影响更大。

(5)荆南三河地区的河道裁弯影响沙道观站、弥陀寺站、康家岗站和管家铺站,减少流入洞庭湖水量约 $614 \times 10^8 \text{ m}^3$,而上游三峡水库蓄水影响荆南三河新江口站、沙道观站和弥陀寺站,减少流入洞庭湖水量约 $174 \times 10^8 \text{ m}^3$,两者合计约 $788 \times 10^8 \text{ m}^3$,占 1966 年之前荆南三河流入湖水量的 59.37%。

参 考 文 献 :

References :

- [1] MILLY P C D, BETANCOURT J L, FALKENMARK M, et al. On Critiques of "Stationarity Is Dead: Whither Water Management?" [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7785-7789.
- [2] ZHANG H B, HUANG Q, ZHANG Q, et al. Changes in the Long-term Hydrological Regimes and the Impacts of Human Activities in the Main Wei River, China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(6): 1054-1068.
- [3] 张洪波, 余荧皓, 南政年, 等. 基于 TFPW-BS-Pettitt 法的水文序列多点均值跳跃变异识别 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(7): 14-22.
ZHANG Hong-bo, YU Ying-hao, NAN Zheng-nian, et al. TFPW-BS-Pettitt Method for Detection of Multiple Change-points in the Mean of Hydrological Series [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(7): 14-22.
- [4] 张洪波, 张姝琪, 李吉程, 等. 基于 TFPW-DT-ICSS 法的渭河水文序列方差变异识别与诊断 [J]. *华北水利*

- 水电大学学报:自然科学版,2017,38(4):47-53.
- ZHANG Hong-bo, ZHANG Shu-qi, LI Ji-cheng, et al. Detection and Diagnosis of the Change Points in Variance of Hydrological Time Series in the Weihe River Basin Based on TFPW-DT-ICSS Method[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2017, 38(4): 47-53.
- [5] RODIONOV S N. A Sequential Algorithm for Testing Climate Regime Shifts[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): 111-142.
- [6] RODIONOV S N. A Sequential Method for Detecting Regime Shifts in the Mean and Variance[C]// VELIKOVA V, CHIPEV N. Large-scale Disturbances (Regime Shifts) and Recovery in Aquatic Ecosystems: Challenges for Management Toward Sustainability. Varna: UNESCO-ROSTE/BAS, 2005: 68-72.
- [7] INCLAN C, TIAO G C. Use of Cumulative Sums of Squares for Retrospective Detection of Changes of Variance[J]. Journal of the American Statistical Association, 1994, 89: 913-923.
- [8] 仲志余, 胡维忠. 试论江湖关系[J]. 人民长江, 2008, 39(1): 20-22.
- ZHONG Zhi-yu, HU Wei-zhong. On Relation of River and Lake[J]. Yangtze River, 2008, 39(1): 20-22.
- [9] 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 1-8.
- WAN Rong-rong, YANG Gui-shan, WANG Xiao-long, et al. Progress of Research on the Relationship Between the Yangtze River and Its Connected Lakes in the Middle Reaches[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1): 1-8.
- [10] 韩其为. 江湖关系变化的内在机理[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 104-112.
- HAN Qi-wei. Variation Mechanism of the Relation Between Jingjiang River and Dongting Lake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(6): 104-112.
- [11] 刘晓群, 戴斌祥. 三峡水库运行以来洞庭湖水文条件变化与对策[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 25-31.
- LIU Xiao-qun, DAI Bin-xiang. Variation of Hydrological Conditions of Dongting Lake and Corresponding Countermeasure Analysis After Operation of the Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 25-31.
- [12] 程俊翔, 徐力刚, 王青, 等. 洞庭湖近30 a水位时空演变特征及驱动因素分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 974-983.
- CHENG Jun-xiang, XU Li-gang, WANG Qing, et al. Temporal and Spatial Variations of Water Level and Its Driving Forces in Lake Dongting over the Last Three Decades[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 974-983.
- [13] 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎, 等. 洞庭湖流域径流量对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2146-2153.
- CHENG Jun-xiang, XU Li-gang, JIANG Jia-hu, et al. The Research of Runoff Responses to Climate Change and Human Activities in the Dongting Lake Catchment[J]. Journal of Agro-environment Science, 2016, 35(11): 2146-2153.
- [14] 谢平, 孙思瑞, 赵江艳, 等. 变化环境下洞庭湖洪水变异规律及防洪安全评价研究展望[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版, 2017, 38(3): 1-8.
- XIE Ping, SUN Si-rui, ZHAO Jiang-yan, et al. Perspective of Research on the Alteration Regulations and Security Evaluation of Floods Control Under Changing Environments in the Dongting Lake Region[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2017, 38(3): 1-8.
- [15] 孙昭华, 李奇, 严鑫, 等. 洞庭湖区与城陵矶水位关联性的临界特征分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 496-506.
- SUN Zhao-hua, LI Qi, YAN Xin, et al. Analysis of the Critical Relationship Between the Water Levels of Dongting Lake and Chenglingji Station[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 496-506.
- [16] 周蕾, 李景保, 汤祥明, 等. 近60 a来洞庭湖水位演变特征及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 660-671.
- ZHOU Lei, LI Jing-bao, TANG Xiang-ming, et al. Dynamics of Water Level of Lake Dongting During the Past 60 Years and the Associated Driving Factor[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 660-671.
- [17] 杨桂山. 长江水问题基本态势及其形成原因与防控策略[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(7): 821-830.
- YANG Gui-shan. Water Issues in the Yangtze River and Its Formation Causes and Controlling Strategies[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(7): 821-830.
- [18] 王程, 徐刚, 向友国. 长江葛洲坝水利枢纽下游河势调整工程[J]. 湖北水力发电, 2006(3): 36-39.
- WANG Cheng, XU Gang, XIANG You-guo. River Regime Regulating Works at Lower Reach of Gezhouba

- Hydroproject[J]. Hubei Water Power, 2006(3):36-39.
- [19] 蔡文君,殷峻暹,王浩. 三峡水库运行对长江中下游水文情势的影响[J]. 人民长江, 2012, 43(5):22-25.
CAI Wen-jun, YIN Jun-xian, WANG Hao. Influence of Operation of Three Gorges Reservoir on Flow Regime in Mid-lower Reaches of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2012, 43(5):22-25.
- [20] 钮新强. 洞庭湖综合治理方案探讨[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1):1-7.
NIU Xin-qiang. Integrated Management Strategies for Dongting Lake[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1):1-7.
- [21] 李景保,周永强,欧朝敏,等. 洞庭湖与长江水体交换能力演变及对三峡水库运行的响应[J]. 地理学报, 2013, 68(1):108-117.
LI Jing-bao, ZHOU Yong-qiang, OU Chao-min, et al. Evolution of Water Exchange Ability Between Dongting Lake and Yangtze River and Its Response to the Operation of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1):108-117.
- [22] 许全喜,胡功宇,袁晶. 近50年来荆江三口分流分沙变化研究[J]. 泥沙研究, 2009(5):1-8.
XU Quan-xi, HU Gong-yu, YUAN Jing. Research on the Flow and Sediment Diversion in the Three Outlets Along Jingjiang River in Recent 50 Years[J]. Journal of Sediment Research, 2009(5):1-8.
- [23] 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, 30(1):83-88.
SHUAI Hong, LI Jing-bao, HE Xia, 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, 30(1):83-88.
- [24] 方春明,曹文洪,鲁文,等. 荆江裁弯造成藕池河急剧淤积与分流分沙减少分析[J]. 泥沙研究, 2002(2):40-45.
FANG Chun-ming, CAO Wen-hong, LU Wen, et al. The Analysis of Ouchi River's Heavy Deposit and Rapid Reduction of Discharge and Sediment Caused by Jingjiang Truncation[J]. Journal of Sediment Research, 2002(2):40-45.
- [25] 郭小虎,朱勇辉,渠庚. 三峡水库蓄水后江湖关系的研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(12):33-35, 132.
GUO Xiao-hu, ZHU Yong-hui, QU Geng. Research Progress on Relationship Between the Yangtze River and Dongting Lake After the Three Gorges Reservoir Regulating[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(12):33-35, 132.
- [26] 唐日长. 下荆江裁弯对荆江洞庭湖影响分析[J]. 人民长江, 1999, 30(4):20-23, 48.
TANG Ri-chang. Impact of River Bend Cut off of Lower Jingjiang River on the River and Dongting Lake[J]. Yangtze River, 1999, 30(4):20-23, 48.
- [27] 陈启慧,郝振纯,夏自强,等. 葛洲坝对长江径流过程的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(4):522-526.
CHEN Qi-hui, HAO Zhen-chun, XIA Zi-qiang, et al. Effects of Gezhou Dam on the Hydrologic Regimes in Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(4):522-526.
- [28] 师哲,龙超平. 葛洲坝枢纽下游河段河床演变分析[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(1):13-16.
SHI Zhe, LONG Chao-ping. Analysis on Fluvial Process of Downstream Reaches of Gezhouba Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(1):13-16.
- [29] 李春龙,张方伟,訾丽,等. 长江流域降水多年变化特征分析[J]. 人民长江, 2013, 44(15):11-13, 18.
LI Chun-long, ZHANG Fang-wei, ZI Li, et al. Analysis on Variation Features of Multi-years Precipitation in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2013, 44(15):11-13, 18.
- [30] 卢金友. 荆江三口分流分沙变化规律研究[J]. 泥沙研究, 1996(4):54-61.
LU Jin-you. Study on Laws of Runoff and Sediment Diverted from Three Outfalls on the Jingjiang Reach of the Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 1996(4):54-61.
- [31] 熊明. 洞庭湖四口分流河道尾间泄洪能力变化分析[J]. 人民长江, 2004, 35(1):4-6.
XIONG Ming. Analysis of the Discharge Capacity Variation of Lower Reaches of Four River-inlets Distributary Channel from Yangtze River to Dongting Lake[J]. Yangtze River, 2004, 35(1):4-6.
- [32] 姚仕明,张玉琴,王兴奎. 荆南河网衰退机理研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4):54-59.
YAO Shi-ming, ZHANG Yu-qin, WANG Xing-kui. Research on the Decline Mechanism of River Networks on South Bank of Jingjiang River Reach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4):54-59.