

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220517001

文章编号: 1672-9331(2023)02-0055-15

引用格式: 隆院男, 吕倩, 闫世雄, 等. 洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 55-69.

Citation: LONG Yuannan, LYU Qian, YAN Shixiong, et al. Analyses of evolution characteristics and driving factors of water and sediment in Dongting Lake at different stages[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(2): 55-69.

# 洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析

隆院男<sup>1,2</sup>, 吕倩<sup>1,2</sup>, 闫世雄<sup>1,2</sup>, 刘易庄<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】通过分析洞庭湖三口年断流天数及同流量水位变化情况, 研究其与径流量及输沙量之间的相互关系; 结合水利工程建设情况, 探究人类活动对洞庭湖水沙变化的影响。【方法】基于洞庭湖出入湖主要控制站 1961—2017 年实测水沙数据, 采用 Mann-Kendall 检验法及 Pettitt 突变检验法分时段分析洞庭湖出入湖水沙演变特征。【结果】1) 三口年均径流量持续减少, 三口年径流量及汛期径流量在 1985 年左右发生显著突变。三口五站同流量水位抬高明显, 三口输沙量随分流量的减少而减少, 藕池口的输沙量下降幅度最大, 三口总入湖输沙量在 1990 年发生显著突变; 2) 四水径流量未发生明显变化, 但年输沙量和汛期输沙量均在 1985 年以后呈显著减少趋势; 3) 洞庭湖出入湖总径流量呈减少趋势, 出入湖年输沙量呈显著减少趋势, 出湖年输沙量的减少速度相对较慢, 尤其是在 2008 年以后, 出湖输沙量比入湖的多。【结论】下荆江裁弯、葛洲坝枢纽、三峡工程以及四水控制性工程的建设是造成洞庭湖水沙过程发生变化的主要原因。其中, 三峡水库的运行使得三口分沙及太平口、藕池口非汛期分流量减少幅度达 90.0% 以上。四水水沙变化受湖南省大中型水库建设的影响较大。

**关键词:** 洞庭湖; 径流量; 输沙量; 演变特征; 水利工程

**中图分类号:** TV213.4

**文献标志码:** A

## 0 前言

洞庭湖是我国第二大淡水湖, 其南纳湘、资、沅、澧四水, 北接松滋、太平、藕池三口来水, 东由城陵矶注入长江, 是长江黄金水道最主要的水源保障之一<sup>[1-4]</sup>, 在气候、环境、生态等方面发挥着不可替代的作用<sup>[5]</sup>。洞庭湖作为长江中游重要的吞吐型湖泊, 其水沙变化对其自身演变的影响巨大<sup>[6]</sup>。洞庭湖水沙演变一直是学者们的研究热点。近年来, 相关研究主要从出入洞庭湖的角度对湖南四水、荆江三口入湖水沙量进行了分析, 包括出入湖水沙总量<sup>[7-8]</sup>及趋势分析、突变点分析及周期分析等<sup>[9-12]</sup>; 此外, 结合湖盆冲淤量<sup>[13]</sup>、湖区泥

沙含量及粒径<sup>[14-15]</sup>, 分析洞庭湖水沙演变的主要驱动力及水沙变化对湖区演变的影响<sup>[16-17]</sup>。

尽管学者们针对洞庭湖水沙变化特征及驱动力已开展了相关研究并取得了一定成果, 但缺少针对各个流域主要控制站水沙序列的具体分析, 同时鲜有学者将不同时段三口、四水水沙变化趋势与洞庭湖区水旱灾害频发的根本驱动力联系起来。本研究以 1961—2017 年洞庭湖径流、泥沙长序列实测资料为依据, 系统地分析洞庭湖四水及荆江三口入湖年径流量、年输沙量的演变特征, 将三口、四水控制站的单站分析结果与城陵矶出口的水沙数据相结合, 分析洞庭湖水沙吞吐量, 结合年断流天数及同流量水位变化规律, 直观反映洞庭湖区水旱灾害对水沙变化的响应, 同时, 更为深

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-06-01; 接受日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079010); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-45); 湖南省重点研发计划项目(2020SK2130); 长沙市自然科学基金资助项目(kq2014103)

通信作者: 闫世雄(1994—)(ORCID: 0009-0000-0813-2276), 男, 在读博士研究生, 主要从事水文及水资源方面的研究。E-mail: 1041747087@qq.com

入地分析大型水利工程对水沙变化的影响,以期对洞庭湖流域的综合治理、水利工程调度方案的优化和荆江三口的河系管理提供科学依据<sup>[18-19]</sup>。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本研究收集了长江干流枝城站、四水水文站(湘潭站、桃江站、桃源站、石门站)、三口水文站(新江口站、沙道观站、弥陀寺站、康家岗站、管家铺站)1961—2017年实测水沙数据,并采用1985—2014年《湖南省水利志》及《中国水利年鉴》中的数据资料分析长江—洞庭湖的水沙演变趋势,实测水沙数据来源于湖南省水文水资源勘测中心。水文站点分布情况如图1所示。

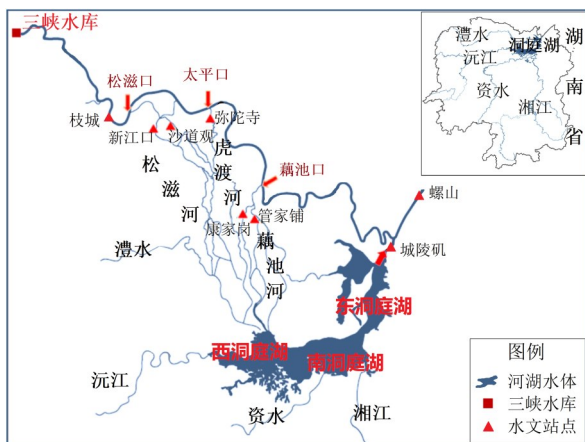


图1 洞庭湖概况图

Fig. 1 A schematic map of Dongting Lake

### 1.2 研究方法

本研究主要采用 Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 法)及 Pettitt 突变检验法(简称 Pettitt 法)对洞庭湖入湖和出湖的水沙变化规律进行分析。

1) M-K 法属于非参数秩次相关检验方法,不仅可检测出序列是否存在突变点并指出突变发生的时间,还可以判断出该序列的变化趋势。M-K 法不受少数异常值的干扰,已广泛应用于水文时间序列的分析中<sup>[20]</sup>。

对于时间序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,构造一个秩序列 $d_k$ :

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i, k = 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: $n$ 为序列长度。秩序列 $d_k$ 统计了 $i$ 时刻数值大于 $j$ 时刻数值的个数,即当 $x_i > x_j$ 时, $m_i$ 取值为1,

否则取值为0。

定义 $d_k$ 的均值 $E(d_k)$ 与方差 $D(d_k)$ 分别为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}, 1 < k \leq n \quad (2)$$

$$D(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, 1 < k \leq n \quad (3)$$

在时间序列随机独立的假定下,设定统计量:

$$U_F = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{D(d_k)}} \quad (4)$$

令显著性水平的临界值为 $t_0$ ,当 $U_F > t_0$ 时,说明序列有明显的增加或减少趋势。令 $U_B = -U_F$ ,则曲线 $U_F$ 和曲线 $U_B$ 的交点有可能是突变点。

2) Pettitt 法能判断突变点的位置及数量,也能判断突变点是否达到显著性水平,已广泛应用于气象、水文时间序列的分析中。若序列长度为 $n$ ,变化点为 $t$ ,把假设序列划分为前后两段,即两个样本 $(x_1, x_2, \dots, x_t)$ 和 $(x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n)$ ,定义统计量 $U_{t,n}$ 为:

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & x_i - x_j > 0 \\ 0, & x_i - x_j = 0 \\ -1, & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $x_i$ 和 $x_j$ 为时序数据。

统计量 $K_{t,n}$ 和相关概率的显著性检验公式为:

$$K_{t,n} = \max |U_{t,n}|, 1 \leq t \leq n \quad (7)$$

$$P = 1 - \exp\left(\frac{-6K_{t,n}^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (8)$$

式中: $K_{t,n}$ 为两个样本累计分布函数的最大值; $P$ 为统计量 $K_{t,n}$ 发生的概率。对于给定的显著性水平 $\alpha$ ,若 $P > P_\alpha$ ,则 $t$ 点为显著的突变点。

## 2 结果分析

### 2.1 三口入湖水沙变化规律及驱动力分析

为进行三口入湖水沙量变化规律及驱动力分析,考虑到人类活动的影响(如下荆江裁弯、长江干流葛洲坝和三峡水库等工程的建设等),本研究分以下6个阶段对三口分流分沙情况进行分析:①下荆江裁弯前(1961—1966年);②下荆江中洲子、上车湾、沙滩子裁弯期(1967—1972年);③葛洲坝截流前(1973—1980年);④三峡水库蓄水前(1981—2002年);⑤三峡水库蓄水试运行后

(2003—2008年);⑥ 三峡水库试验性蓄水运行后(2009—2017年)。

### 2.1.1 三口年径流量变化趋势

对长江干流枝城站、三口水文站(新江口站、沙道观站、弥陀寺站、康家岗站、管家铺站)的水文资料进行统计分析,结果为:1961—2017年长江干流的多年平均径流量为4 355亿 $\text{m}^3$ ,松滋口(新江口站、沙道观站)、太平口(弥陀寺站)以及藕池口(康家岗站、管家铺站)的多年平均径流量分别为379、139和243亿 $\text{m}^3$ 。图2所示为三口年径流量随时间的变化过程。从图2可以看出,三口年径流量随着时间的推移逐渐减少,松滋口年径流量的变化稍平缓,太平口和藕池口的年径流量均呈现出比较显著的减少趋势。

三口多年平均径流量及分流比见表1。分析表1可知,1961—2017年长江干流枝城站多年平均径流量无明显的变化趋势,但三口多年平均径流量由1961—1966年的1 425亿 $\text{m}^3$ 减少到了2009—2017年的463亿 $\text{m}^3$ ,减少了962亿 $\text{m}^3$ ;分流比由31.79%降低到了11.07%。其中,藕池口多年平均径流量减少最多,由1961—1966年的670亿 $\text{m}^3$ 减少到了2009—2017年的102亿 $\text{m}^3$ ,减少了568亿 $\text{m}^3$ 。

采用M-K法和Pettitt法对三口年径流量的演

变趋势进行分析。图3所示为三口年径流量突变检验过程线。从图3可以看出,在1969年以前, $U_F$ 曲线略微呈现波动上升趋势,表明三口年径流量有升高的趋势;在1969年之后, $U_F$ 曲线呈现明显下降趋势,表明三口年径流量有降低的趋势;三口及三口总入湖年径流量的 $U_F$ 和 $U_B$ 线相交于1985年左右,并突破了95%的置信水平(图中上下虚线之间的区域为0.05置信区间),表明三口年径流量在1985年左右发生了显著突变。表2为三口年、汛期及非汛期径流量的Pettitt法检验结果。分析表2可知,三口年径流量均在1985年发生显著突变,这与M-K法的检验结果基本一致。

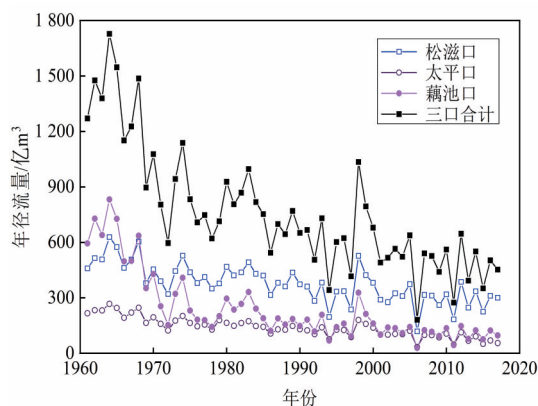


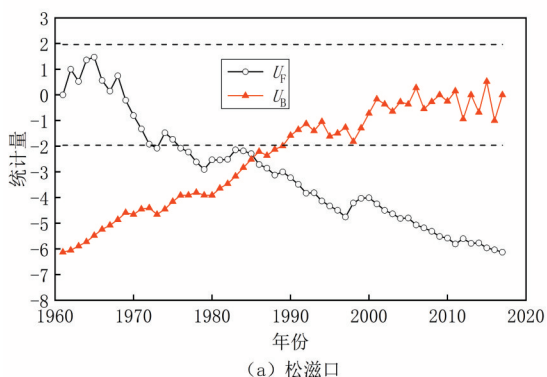
图2 三口年径流量变化过程

Fig. 2 The annual runoff changes at the three tributaries

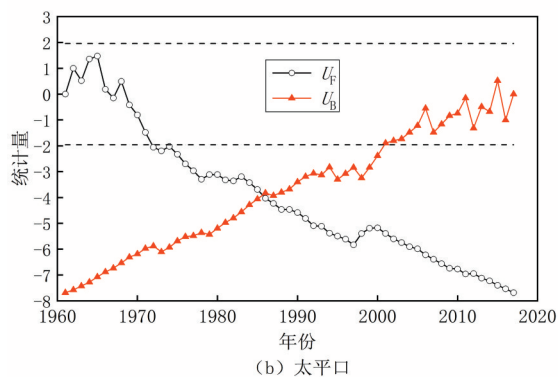
表1 三口多年平均径流量及分流比

Table 1 Multi-year average runoff and diverted flow ratio at the three tributaries

起止年份	枝城站/亿 $\text{m}^3$	松滋口/亿 $\text{m}^3$	太平口/亿 $\text{m}^3$	藕池口/亿 $\text{m}^3$	三口合计/亿 $\text{m}^3$	分流比/%
1961—1966	4 482	524	231	670	1 425	31.79
1967—1972	4 217	442	185	387	1 014	24.05
1973—1980	4 358	425	165	245	835	19.16
1981—2002	4 404	368	131	181	680	15.44
2003—2008	4 077	292	94	110	496	12.17
2009—2017	4 184	285	76	102	463	11.07



(a) 松滋口



(b) 太平口

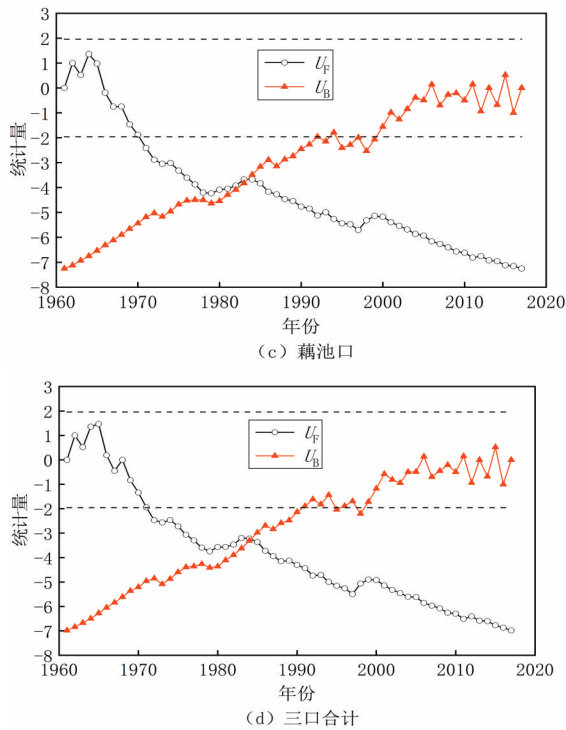


图3 三口年径流量突变检验过程线

Fig. 3 Process curves for mutation test of annual runoff at the three tributaries

表3 三口年内不同时段平均径流量

Table 3 Average runoff at different periods of the year at the three tributaries 亿 m<sup>3</sup>

起止年份	4—9月(汛期)				10—3月(非汛期)			
	松滋口	太平口	藕池口	合计	松滋口	太平口	藕池口	合计
1961—1966	412	180	545	1 137	113	51	127	291
1967—1972	357	148	335	840	86	37	53	176
1973—1980	351	134	219	704	75	27	27	129
1981—2002	315	116	168	599	53	15	13	81
2003—2008	257	83	103	443	36	11	7	54
2009—2017	254	72	97	423	32	5	5	42

分析表3可知,1961—2017年三口汛期和非汛期平均径流量均呈减少趋势。与下荆江裁弯前的1961—1966年相比,下荆江裁弯后的1973—1980年松滋口、太平口及藕池口汛期平均径流量分别减少了14.8%、25.6%和59.8%,非汛期的分别减少了33.6%、47.1%和78.7%,非汛期平均径流量的减少幅度比汛期的大得多,三口中藕池口的减少幅度最大;三峡水库175 m试验性蓄水后的2009—2017年,三口分流进一步减少,相比于1961—1966年,松滋口、太平口及藕池口汛期平均径流量分别减少了38.3%、60.0%和82.2%,非汛期的分别减少了71.7%、90.2%和96.1%,除松滋口外,太平口和藕池口的减少幅度都不低于60.0%,特别是在非汛期,太平口和藕池口的来流

表2 三口年、汛期及非汛期径流量的Pettitt法检验结果

Table 2 Results of Pettitt's test for annual, flood-period and non-flood-period runoff at the three tributaries

三口	统计时段	统计量 $K_{r,n}$	突变年份	显著性水平
松滋口	年	656	1985	$2.24 \times 10^{-6}$
	汛期	602	1985	$1.95 \times 10^{-5}$
	非汛期	708	1990	$2.34 \times 10^{-7}$
太平口	年	722	1985	$1.24 \times 10^{-7}$
	汛期	702	1985	$3.07 \times 10^{-7}$
	非汛期	692	1980	$4.78 \times 10^{-7}$
藕池口	年	712	1985	$1.95 \times 10^{-7}$
	汛期	710	1985	$2.14 \times 10^{-7}$
	非汛期	678	1989/ 1990	$8.80 \times 10^{-7}$
合计	年	704	1985	$2.80 \times 10^{-7}$
	汛期	692	1985	$4.78 \times 10^{-7}$
	非汛期	702	1990	$3.07 \times 10^{-7}$

### 2.1.2 三口分时段径流量变化趋势

三口年内不同时段平均径流量见表3。

减少了90.0%以上。采用M-K法和Pettitt法对三口汛期和非汛期径流量的演变趋势进行分析。图4所示为三口汛期和非汛期径流量突变检验过程线。从图4可以看出,在汛期,三口径流量自1970年开始呈显著减小趋势,并在1985年左右发生显著突变;在非汛期,三口径流量在1965年之前存在小幅波动,在1965年之后呈减小趋势, $U_F$ 和 $U_B$ 线相交于1978年左右,并突破了95%的置信水平(图中上下虚线之间的区域为0.05置信区间),这表明三口非汛期径流量在1978年左右发生突变,三口非汛期发生突变的时间早于汛期。根据表2的结果,三口汛期径流量同样在1985年左右发生显著突变,但三口非汛期发生突变的时间与M-K法的检验结果有差别。

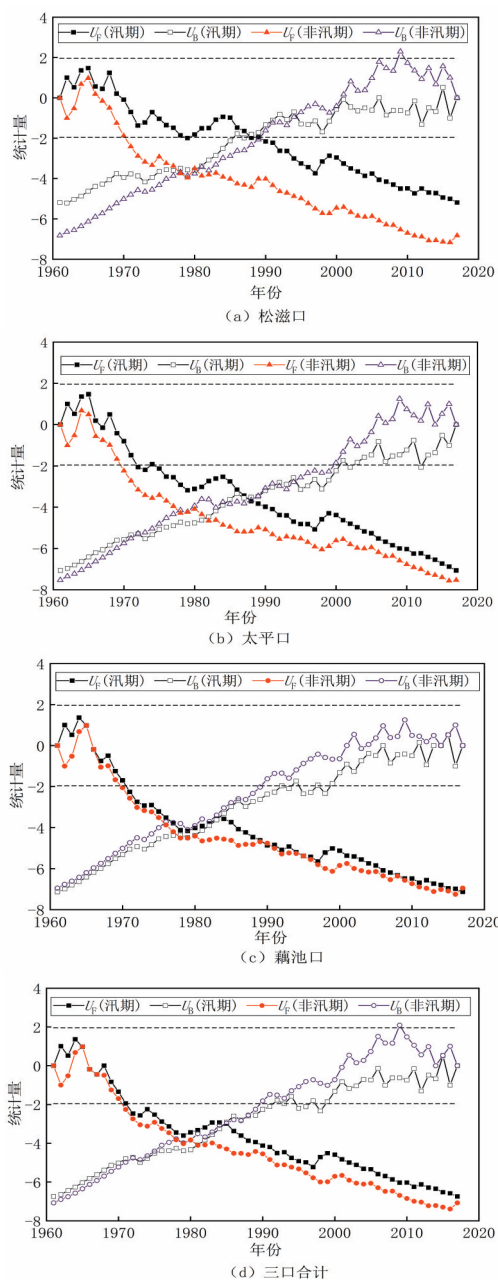


图4 三口汛期和非汛期径流量突变检验过程线

Fig. 4 Process curves for mutation test of runoff at the three tributaries during flood and non-flood periods

表4 三口多年平均输沙量

Table 4 Multi-year average sediment transport at the three tributaries 万 t

起止年份	松滋口		太平口	藕池口		三口合计
	新江口站	沙道观站	弥陀寺站	康家岗站	管家铺站	
1961—1966	3 683	1 956	2 459	986	11 098	20 182
1967—1972	3 306	1 501	2 079	455	6 255	13 596
1973—1980	3 397	1 280	1 922	213	4 185	10 997
1981—2002	3 142	972	1 516	165	2 544	8 339
2003—2008	537	163	190	21	355	1 266
2009—2017	229	67	260	5	243	804

## 2.1.3 三口输沙量变化规律分析

## 1) 三口年输沙量变化趋势。

三口多年平均输沙量见表4。分析表4可知,三口输沙量呈显著减少态势,与1961—1966年相比,2009—2017年三口年均输沙量减少了19 378万t,即减少了96.0%;下荆江裁弯后的1973—1980年,三口年均输沙量减少了9 185万t,即减少了45.5%,其中藕池口的减少较多,藕池口西支康家岗站的减少了78.4%,藕池口东支管家铺站的减少了62.3%;三峡蓄水后的2003—2008年,相比于裁弯后的1973—1980年,松滋口西支新江口站及东支沙道观站、太平口弥陀寺站、藕池口西支康家岗站和东支管家铺站的输沙量分别减少了2 860、1 117、1 732、192和3 830万t,减少幅度分别为84.2%、87.3%、90.1%、90.1%和91.5%,三口五站的输沙量合计减少了9 731万t,即减少了88.5%。

图5所示为三口年输沙量突变检验过程线。从图5可以看出,在1970年以前,三口年输沙量总体上呈上升趋势,但在1970年之后,三口输沙量一直呈下降趋势,这与三口年径流量的变化趋势基本一致,这也说明下荆江裁弯对三口的输沙产生了较大的影响。松滋口年输沙量 $U_F$ 和 $U_B$ 线相交于2002年左右,并突破了95%的置信水平(图中上下虚线之间的区域为0.05置信区间),表明松滋口年输沙量在2002年左右发生了显著突变,而太平口、藕池口和三口总输沙量均在20世纪90年代初发生了显著突变。表5为三口年、汛期及非汛期输沙量的Pettitt法检验结果。分析表5可知,三口合计年输沙量在1990或1991年发生显著突变,这与M-K法的检验结果基本一致。

## 2) 三口分时段输沙量变化趋势。

三口年内不同时段平均输沙量见表6。

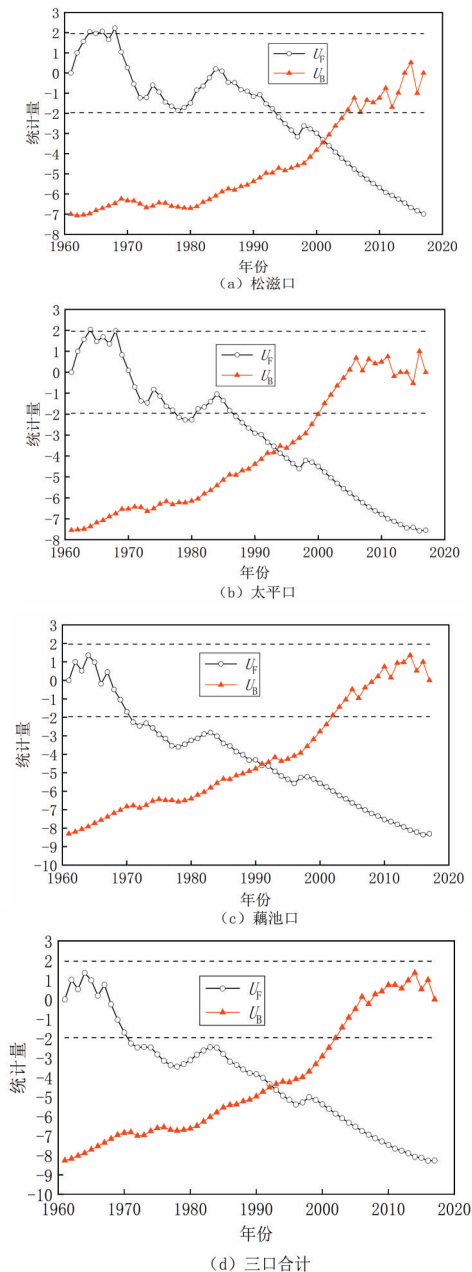


图5 三口年输沙量突变检验过程线

Fig. 5 Process curves for mutation test of annual sediment transport at the three tributaries

表6 三口年内不同时段平均输沙量

Table 6 Average sediment transport at different periods of the year at the three tributaries 万 t

起止年份	4—9月(汛期)				10—3月(非汛期)			
	松滋口	太平口	藕池口	合计	松滋口	太平口	藕池口	合计
1961—1966	5 116	2 198	11 131	18 445	535	267	981	1 783
1967—1972	4 388	1 874	6 228	12 490	430	210	498	1 138
1973—1980	4 309	1 762	4 199	10 270	378	164	211	753
1981—2002	3 878	1 426	2 641	7 945	245	94	76	415
2003—2008	684	185	373	1 242	17	5	5	27
2009—2017	293	249	226	768	4	12	23	39

表5 三口年、汛期及非汛期输沙量的Pettitt法检验结果

Table 5 Results of Pettitt's test for annual, flood-period and non-flood-period sediment transport at the three tributaries

三口	时期	统计量 $K_{t,n}$	突变年份	显著性 水平
松滋口	年	728	1991	$9.39 \times 10^{-8}$
	汛期	718	1991	$1.49 \times 10^{-7}$
	非汛期	736	1991	$6.46 \times 10^{-8}$
太平口	年	746	1991	$4.03 \times 10^{-8}$
	汛期	738	1991	$5.88 \times 10^{-8}$
	非汛期	736	1990	$6.46 \times 10^{-8}$
藕池口	年	748	1990	$3.67 \times 10^{-8}$
	汛期	748	1990	$3.67 \times 10^{-8}$
	非汛期	696	1989	$4.00 \times 10^{-7}$
合计	年	758	1990/1991	$2.27 \times 10^{-8}$
	汛期	748	1991	$3.67 \times 10^{-8}$
	非汛期	776	1990	$9.42 \times 10^{-9}$

分析表6可知,1961—2017年松滋口、太平口、藕池口汛期和非汛期输沙量均呈减少趋势,且在两个主要时段发生了变化:一是相比于下荆江裁弯前的1961—1966年,下荆江裁弯后的1973—1980年松滋口、太平口及藕池口汛期输沙量分别减少了15.8%、19.8%和62.3%,非汛期的分别减少了29.3%、38.6%和78.5%,其中受影响最大的为藕池口,三口输沙量非汛期所受的影响比汛期大;二是相比于1973—1980年,三峡175 m试验性蓄水后的2009—2017年,松滋口、太平口及藕池口汛期输沙量分别减少了93.2%、85.9%和94.6%,非汛期的分别减少了98.9%、92.7%和89.1%,三口汛期和非汛期输沙量的减少幅度均在85.0%以上。

图6所示为三口汛期和非汛期输沙量突变检验过程线。

从图6可以看出,在汛期,三口输沙量的变化趋势和突变年份与年输沙量的变化趋势基本一致;而在非汛期,三口输沙量发生显著突变的年份均早于汛期,松滋口、太平口、藕池口和三口合计输沙量在非汛期发生突变的年份分别为1994、1990、1988和1989年。Pettitt法也检测到三口汛期和非汛期输沙量在1990年左右发生显著突变。

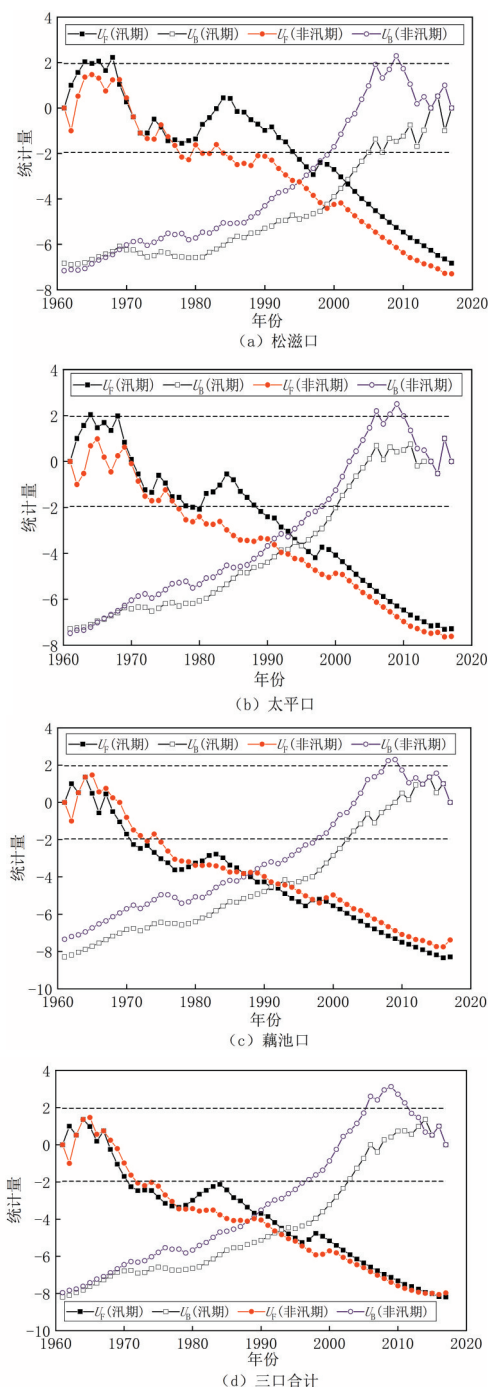


图6 三口汛期和非汛期输沙量突变检验过程线

Fig. 6 Process curves for mutation test of sediment transport in flood and non-flood periods at the three tributaries

## 2.1.4 三口水沙变化的影响及驱动因素分析

### 1) 三口水沙变化的影响。

三口分流量的持续减少导致三口断流期延长。三口控制站年断流天数见表7。分析表7可知,沙道观、弥陀寺、管家铺、康家岗4站连续多年出现断流,且年断流天数逐渐增多。下荆江裁弯前的1961—1966年,沙道观站没发生断流,弥陀寺、管家铺、康家岗3站年断流天数分别为35、17和213 d;而在下荆江裁弯后的1973—1980年,沙道观站年断流天数为71 d,其余3站的分别为70、145和258 d。葛洲坝和三峡枢纽建成运行后,三口年断流天数进一步增加。特别是在2006年,沙道观站和管家铺站断流长达半年,康家岗站断流甚至长达336 d;2011年,沙道观站断流245 d,康家岗站断流长达320 d。这与荆江河段冲刷下切、三口口门段淤积萎缩抬高三口通流水位有关。

表7 三口控制站年断流天数统计

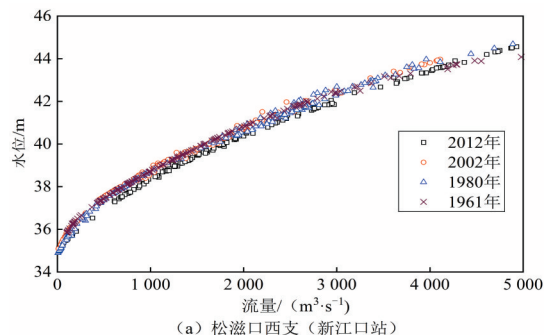
Table 7 Days of runoff cutoff in one year at the control station of the three tributaries d

起止年份	沙道观站	弥陀寺站	管家铺站	康家岗站
1961—1966	0	35	17	213
1967—1972	0	3	80	241
1973—1980	71	70	145	258
1981—2002	171	155	167	248
2003—2008	199	145	186	257
2009—2017	184	132	179	281

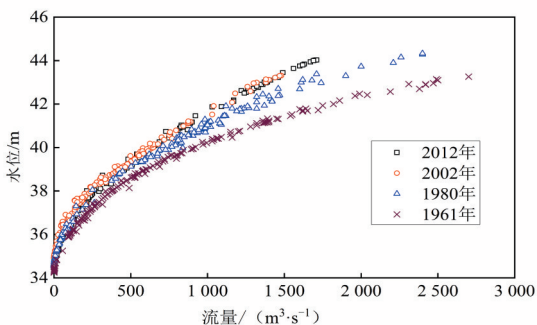
上述研究表明,三口河道来流不断减少,但汛期的洪水威胁并未减弱。图7所示为1961、1980、2002和2012年三口五站的水位-流量关系。从图7可以看出,松滋口西支(新江口站)同流量水位变化不明显;松滋口东支(沙道观站)同流量水位明显上升。当流量为1 500 m<sup>3</sup>/s时,沙道观站1980年水位比1961年的高1.00 m,2002年水位比1980年的高0.90 m,2012年水位与2002年的持平;当流量为2 000 m<sup>3</sup>/s时,太平口(弥陀寺站)1980年水位比1961年的高0.80 m,2002年水位比1980年的高0.90 m,2012年水位与2002年的持平;藕池口西支(康家岗站)同流量水位抬升显著,当流量为200 m<sup>3</sup>/s时,1980年水位比1961年的高0.80 m,2002年水位比1980年的高1.30 m;当流量为3 000 m<sup>3</sup>/s时,相比于1961年,藕池口东支(管家铺站)2012、1980年水位分别抬高了3.00和1.20 m。

三口水系地区其他站点同流量水位的变化也

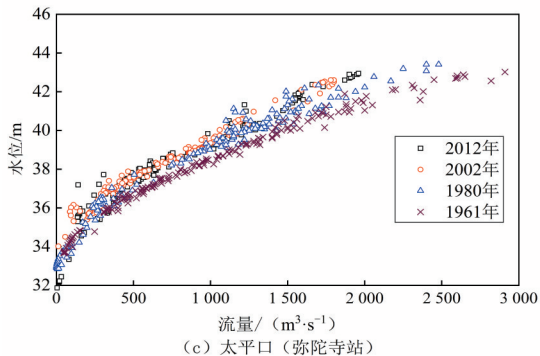
较为明显,下荆江裁弯前与三峡水库运行前相比,松澧洪道石龟山水文站流量 10 000  $\text{m}^3/\text{s}$  对应的水位抬高了 3.35 m;松虎洪道安乡水文站流量 6 000  $\text{m}^3/\text{s}$  对应的水位抬高了 1.45 m。1954—2002 年,松虎洪道安乡水文站的水位超过 1954 年洪峰水位 (35.91 m) 的年份有 11 年,其中,1996 年洪峰水位为 37.53 m,比 1954 年的高 1.62 m;1998 年洪峰水位为 38.25 m,比 1954 年的高 2.34 m;2003 年洪峰水位为 38.00 m,比 1954 年的高 2.09 m。



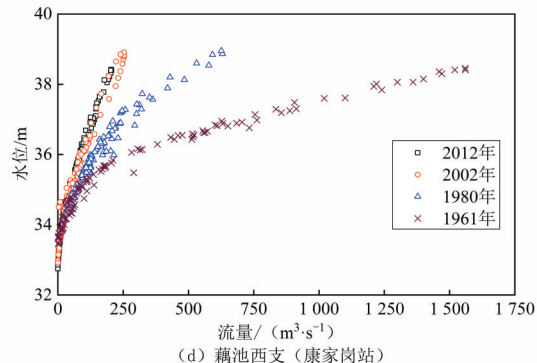
(a) 松滋口西支(新江口站)



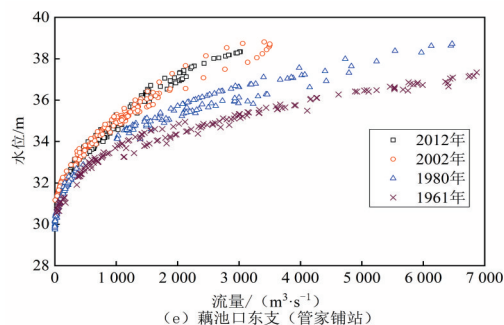
(b) 松滋口东支(沙道观站)



(c) 太平口(弥陀寺站)



(d) 藕池西支(康家岗站)



(e) 藕池口东支(管家铺站)

图7 三口水位-流量关系

Fig. 7 Stage-discharge relationship at the three tributaries

由此可见,分流河道衰退并未减弱洪水威胁。受下荆江裁弯影响,除松滋口西支外,其他河道同流量水位抬升较为明显,这对三口地区的防洪产生了不利影响;而三峡水库蓄水后,三口五站同流量水位变化较小,基本维持在三峡水库蓄水前的水平。

## 2) 驱动因素分析。

基于上述水沙数据分阶段的分析结果可知,下荆江裁弯及三峡水利枢纽工程施工及运行对洞庭湖三口来水来沙的影响较大。下荆江裁弯后的 1973—1980 年松滋口、太平口及藕池口汛期径流量分别减少了 14.8%、25.6% 和 59.8%,非汛期的分别减少了 33.6%、47.1% 和 78.7%;松滋口、太平口及藕池口汛期输沙量分别减少了 15.8%、19.8% 和 62.3%,非汛期的分别减少了 29.3%、38.6% 和 78.5%,可见下荆江裁弯对三口的分流分沙产生了较大的影响。下荆江裁弯工程使得裁弯以上河段产生溯源冲刷,水流行程缩短、流速加快,同流量水位普遍下降了 1.1~1.6 m,这导致三口分流能力降低、分流量减少,三口河道淤积萎缩。与下荆江裁弯前相比,枝城站流量 5 000、10 000、15 000、20 000 和 25 000  $\text{m}^3/\text{s}$  对应的三口径流量分别减少了约 150、900、1 430、2 140 和 2 820  $\text{m}^3/\text{s}$ ,在枝城站来水相差不大的情况下,三口分流量减少了 550 亿  $\text{m}^3$ ,即减少了 37.0%。

葛洲坝水库运用后,水库拦沙、清水下泄、荆江河道冲刷使得同流量水位进一步降低,进而使得三口分流能力进一步减弱,分流量进一步减少。与葛洲坝水库运用后的 1981—1982 年相比,三峡水库运用前的 2001—2002 年,枝城站流量 5 000、10 000、15 000、20 000 和 25 000  $\text{m}^3/\text{s}$  对应的三口径流量分别减少了约 20、130、280、760 和 900  $\text{m}^3/\text{s}$ 。2000 年枝城站径流量与 1980 年的相差不大,三口分流量减少了约 251 亿  $\text{m}^3$ 。

三峡水库蓄水后,除松滋口外,太平口和藕池口来流的减少幅度都不低于60.0%,特别是在非汛期,太平口和藕池口的来流减少了90.0%以上,且三口汛期和非汛期输沙量的减少幅度均在85.0%以上。由此可见,三峡水库的运行大幅减少了三口的分流分沙量,尤其是对非汛期产生了较大影响。三峡水库蓄水运用以来,荆江干流的冲刷总体表现为“滩槽均冲”,但以基本河槽为主,其冲刷量约占平滩河槽的90.0%,且河道冲刷主要发生在宜昌至城陵矶段,荆江干流河槽进一步加深。三口河道整体呈先冲刷、后淤积的趋势,藕池河的冲刷主要发生在2003—2006年,共冲刷了0.310亿 $\text{m}^3$ 泥沙,2006—2011年转为持续淤积,共淤积了0.133亿 $\text{m}^3$ 泥沙,至2011年,松滋河和虎渡河仍保持冲刷态势。松虎洪道2003—2009年为冲,但呈冲刷强度不断减弱趋势,共冲刷了0.133亿 $\text{m}^3$ 泥沙,2009—2011年由冲转淤,共淤积了0.060亿 $\text{m}^3$ 泥沙。

荆江干流冲刷剧烈,三口河道冲刷微弱(甚至不冲),三口河道入湖径流量继续减少;此外,泥沙大量淤积在三峡水库,出库水流的含沙量减小(三峡水库运用后入湖水流的含沙量仅为0.234 $\text{kg}/\text{m}^3$ ,而建库前为0.907 $\text{kg}/\text{m}^3$ ,尤其是2011年入湖水流的含沙量仅为0.053 $\text{kg}/\text{m}^3$ ),因此,入湖泥沙量大幅减少。

## 2.2 四水入湖水沙变化规律及驱动力分析

### 2.2.1 四水径流量变化规律分析

图8所示为湘、资、沅、澧四水控制站及四水总入湖年径流量的变化过程,表8为四水年、汛期及非汛期径流量的Pettitt法检验结果。统计量分析表明,四水总入湖径流量并未发生显著突变,同时,四水流域各自的径流量也未发生显著突变。

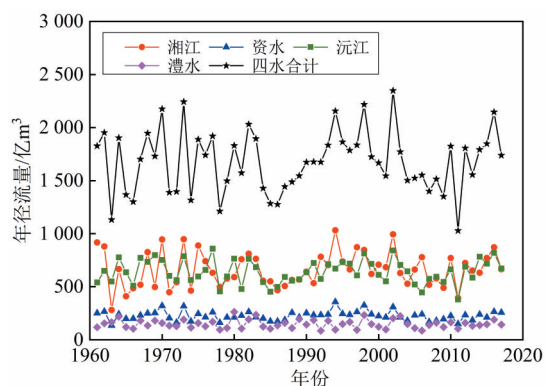


图8 四水年径流量变化过程

Fig. 8 Annual runoff changes of the four major rivers flowing into Dongting Lake

表8 四水年、汛期及非汛期径流量的Pettitt法检验结果

Table 8 Results of Pettitt's test of annual, flood-period and non-flood-period runoff for the four major rivers flowing into Dongting Lake

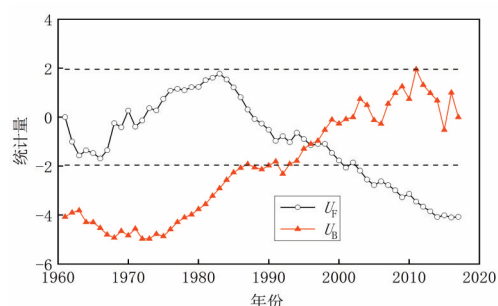
四水	时期	统计量 $K_{t,n}$	突变年份	显著性 水平
湘江	年	232	1991	0.36
	汛期	198	1991	0.57
	非汛期	300	1980	0.11
资水	年	168	2002	0.81
	汛期	162	1977	0.87
	非汛期	248	1980	0.28
沅江	年	134	2013	1.13
	汛期	146	1980	1.01
	非汛期	218	1988	0.44
澧水	年	92	1983	1.53
	汛期	160	2004	0.89
	非汛期	382	1999	0.02
合计	年	138	1992	1.09
	汛期	128	2003	1.19
	非汛期	294	1988/1989	0.13

### 2.2.2 四水输沙量变化规律分析

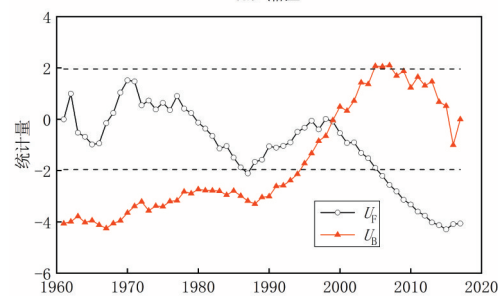
图9~10分别为四水年输沙量突变检验过程线和四水汛期、非汛期输沙量突变检验过程线。从图9可以看出,湘江输沙量在1970年之前呈减少趋势,1970—1985年呈增加趋势,1985年后输沙量呈减少趋势,且 $U_F$ 和 $U_B$ 线交于1997年,并达到95%的置信水平(图中上下虚线之间的区域为0.05置信区间),表明输沙量呈显著减少趋势;资水输沙量的变化趋势与湘江的基本一致,在1998年发生显著突变;沅江输沙量在1961—1980年呈增加趋势,1980年后呈减少趋势, $U_F$ 和 $U_B$ 线交于1994年,并达到95%的置信水平,表明输沙量呈现显著减少趋势;澧水输沙量在1975年之前呈增加趋势,在1975年之后呈减少趋势,并在1995年发生显著突变。四水总入湖输沙量的变化规律和湘江的基本一致,1985年之前输沙量增加,1985年之后输沙量减少,并在1995年发生显著突变。

从图10可以看出,四水汛期输沙量的变化规律和其年输沙量的变化规律基本一致,在非汛期,四水的输沙量变化规律与年输沙量变化规律有一定区别。湘江非汛期输沙量在1970年之前呈减少趋势,1971—2005年呈增加趋势,之后发生突变但

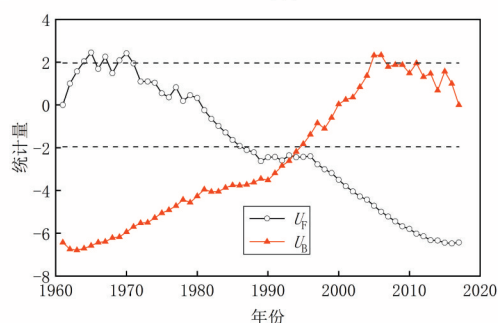
并未突破 95% 的置信水平(图中上下虚线之间的区域为 0.05 置信区间), 突变不显著; 资水非汛期输沙量在 1991 年之前呈减少趋势, 1991—1995 年呈增加趋势, 1996 年之后呈减少趋势, 并突破了 95% 的置信水平, 在 2010 年发生显著突变; 沅江非汛期输沙量一直呈减少趋势, 并在 1995 年发生显著突变; 澧水非汛期输沙量同样呈减少趋势, 并在 1995 年发生显著突变; 四水非汛期总入湖输沙量在 1995 年之前一直波动变化, 在 1995 年之后呈减少趋势, 并在 1998 年发生显著突变。



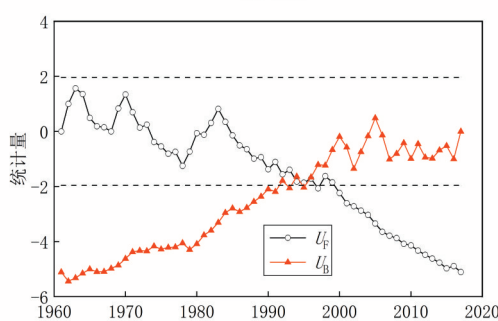
(a) 湘江



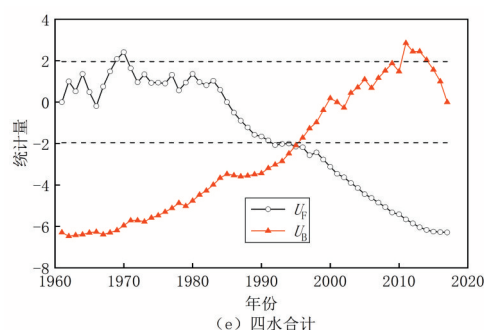
(b) 资水



(c) 沅江



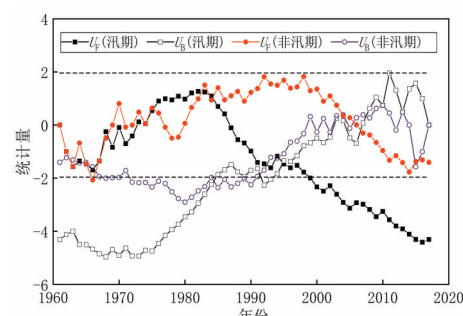
(d) 澧水



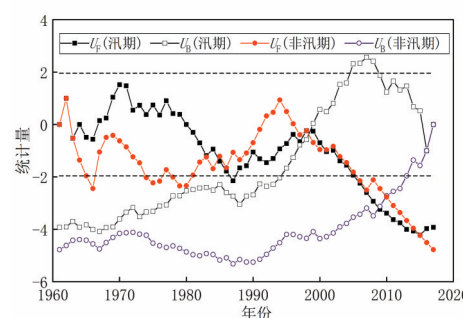
(e) 四水合计

图9 四水年输沙量突变检验过程线

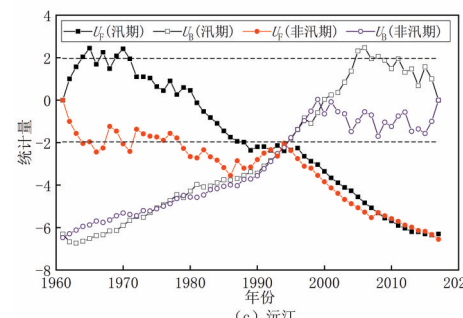
Fig. 9 Process curves for mutation test of annual sediment transport for the four major rivers flowing into Dongting Lake



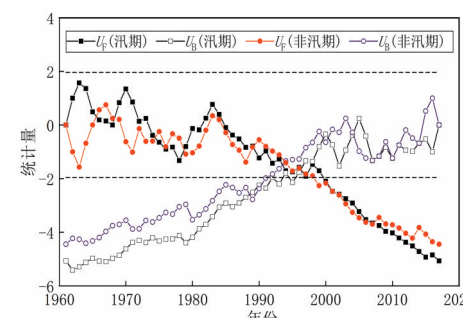
(a) 湘江



(b) 资水



(c) 沅江



(d) 澧水

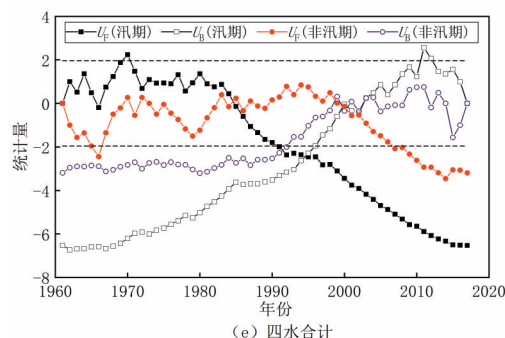


图10 四水汛期、非汛期输沙量突变检验过程线

Fig. 10 Process curves for mutation test of sediment transport in flood-period and non-flood-period for the four major rivers flowing into Dongting Lake

四水年、汛期及非汛期输沙量的Pettitt法突变检验结果见表9。分析表9可知,四水的年、汛期及非汛期输沙量均发生显著突变( $P \leq 0.05$ ),这与M-K法得到的结论基本一致。

表9 四水年、汛期及非汛期输沙量的Pettitt法检验结果

Table 9 Pettitt's test results for annual, flood-period and non-flood-period sediment transport for the four major rivers flowing into Dongting Lake

四水	时期	统计量 $K_{i,n}$	突变年份	显著性水平
湘江	年	516	1985/1986	$4.16 \times 10^{-4}$
	汛期	558	1986	$9.90 \times 10^{-5}$
	非汛期	358	1998	$3.38 \times 10^{-2}$
资水	年	596	1999	$2.45 \times 10^{-5}$
	汛期	564	1999	$7.99 \times 10^{-5}$
	非汛期	598	1994	$2.27 \times 10^{-5}$
沅江	年	730	1996	$8.55 \times 10^{-8}$
	汛期	722	1996	$1.24 \times 10^{-7}$
	非汛期	736	1994	$6.46 \times 10^{-8}$
澧水	年	596	1991	$2.45 \times 10^{-5}$
	汛期	596	1998	$2.45 \times 10^{-5}$
	非汛期	520	1990/1993	$3.65 \times 10^{-4}$
合计	年	714	1984	$1.78 \times 10^{-7}$
	汛期	782	1984	$7.79 \times 10^{-8}$
	非汛期	512	1998	$4.74 \times 10^{-4}$

### 2.2.3 湖南四水输沙量变化驱动力分析

湖南四水输沙量变化的主要影响因素有流域水土保持、水库拦沙、河道采沙和涉河建筑物的过度建设等,其中水库拦沙的影响最明显。由《湖南省水利统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《湖南省水利发展统计公报》等资料可知,20世纪50年代到

80年代,湖南省水库建设处于高速发展时期。在这一时期湖南省共建水库12 702座,含大型水库10座。20世纪80年代后期,湖南省水库建设进入平稳发展阶段,水库数量持续稳步上升。截至2020年底,湖南省已建成水库13 737座,其中大型水库50座,中型水库366座,小型水库13 321座,总库容达545.45亿 $\text{m}^3$ 。因此,四水干、支流上大量水库的密集建设对四水输沙量产生了较大的影响<sup>[21]</sup>。

### 2.3 洞庭湖出入湖水沙总量变化规律

图11所示为洞庭湖出入湖水沙变化过程。从图11(a)可以看出,出入洞庭湖的年径流量基本上呈减少趋势。1961—1966年,洞庭湖总入湖径流量为3 005亿 $\text{m}^3$ ,三口入湖径流量占48.4%;2009—2017年,总入湖径流量为2 140亿 $\text{m}^3$ ,三口入湖径流量的占比降至21.7%。洞庭湖出湖径流量由1961—1966年的3 228亿 $\text{m}^3$ 减至2009—2017年的2 506亿 $\text{m}^3$ 。1961—2017年,出湖径流量与入湖径流量的水量差并未发生明显变化,表明这一时期洞庭湖区自产径流量的变化不大。

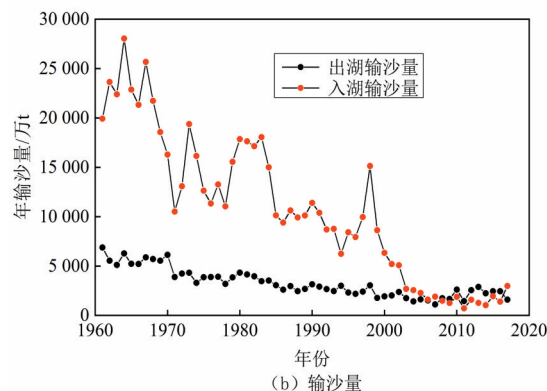
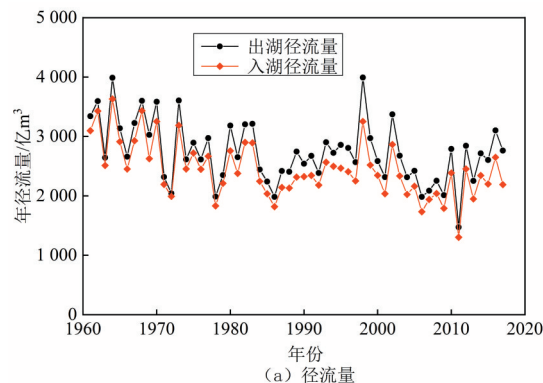


图11 洞庭湖出入湖水沙变化过程

Fig. 11 Changes of water and sediment flowing into and out of Dongting Lake

入洞庭湖的年输沙量呈显著减少趋势,出洞庭湖年输沙量的减少速度相对较慢,每年淤积在湖区的泥沙量呈不断减少态势,特别是在2008年后,出洞庭湖的年输沙量比入洞庭湖的大,表明该时期洞庭湖已开始被冲刷。1961—1966年,入湖年输沙量为23 035万t,其中三口入湖年输沙量占总入湖年输沙量的87.6%;2009—2017年,入湖年输沙量为1 563万t,三口入湖年输沙量占总入湖年输沙量的51.4%。出湖年输沙量由1961—1966年的5 710万t减至2009—2017年的2 214万t。从图11(b)可以看出,在2008年以前,出湖输沙量远小于入湖输沙量,在这一时期洞庭湖处于淤积阶段;而在2008年以后,出湖输沙量大于入湖输沙量,洞庭湖开始被冲刷。

采用M-K法检验出入洞庭湖的水沙变化情况,结果如图12所示。从图12可以看出,出入湖径流量均在1975年左右发生显著突变,并在1970年后一直呈下降趋势。出入洞庭湖水沙Pettitt法检验结果见表10。

分析表10可知,出入湖径流量在1983年发生显著突变。两种检验方法得到的输沙量变化结论基本一致,即入湖输沙量自1970年开始一直呈下降趋势,并在1991年左右发生显著突变;出湖输沙量自1961年开始一直呈下降趋势,并在1985年左右发生显著突变。

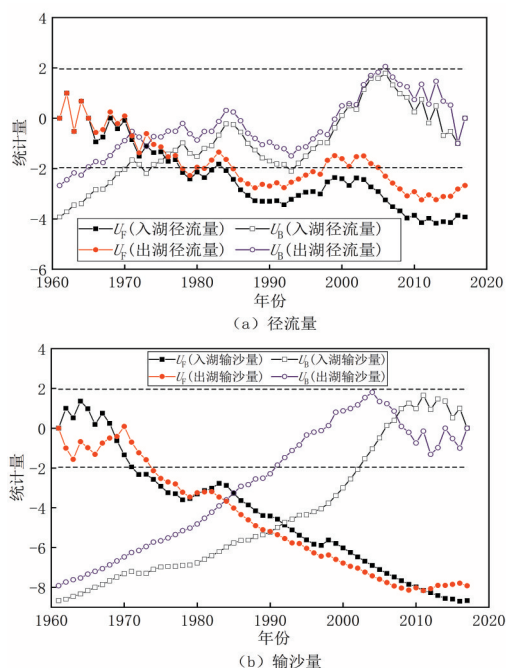


图12 出入洞庭湖水沙突变检验过程线

Fig. 12 Process curves for mutation test of water and sediment flowing into and out of Dongting Lake

表10 出入洞庭湖水沙Pettitt法检验结果

Table 10 Pettitt's test results for water and sand entering and leaving Dongting Lake

输沙方向	径流量			输沙量		
	统计量 $K_{i,n}$	突变 年份	显著性 水平	统计量 $K_{i,n}$	突变 年份	显著性 水平
入湖	436	1983	0.001	774	1991	$1.04 \times 10^{-8}$
出湖	358	1983	0.030	798	1985	$3.13 \times 10^{-9}$

### 3 结论

结合1961—2017年长江枝城站、三口四水部分站点长系列水沙资料,分析出入洞庭湖水沙及洞庭湖冲淤演变规律,并结合人类活动影响分析其产生的原因,得到以下主要结论:

1) 1961—2017年,洞庭湖出入湖径流量呈减少趋势,入湖径流量由1961—1966年的3 005亿 $\text{m}^3$ 减至2009—2017年的2 140亿 $\text{m}^3$ ,且三口入湖径流量所占比重进一步减少;出湖径流量由1961—1966年的3 228亿 $\text{m}^3$ 减至2009—2017年的2 506亿 $\text{m}^3$ 。出入湖径流量均在1975年左右发生显著突变;三口年径流量呈减少趋势,1961—2017年减少了962亿 $\text{m}^3$ ,分流比降低至11.07%,松滋口、太平口及藕池口汛期平均径流量分别减少了38.3%、60.0%和82.2%,非汛期的分别减少了71.7%、90.2%和96.1%。M-K法和Pettitt法的分析结果表明,三口年径流量、汛期径流量均在1985年左右发生显著突变,四水径流量未发生明显变化。三口五站同流量水位抬高明显,特别是当流量为3 000  $\text{m}^3/\text{s}$ 时,与1961年相比,2012年藕池口东支(管家铺站)水位抬高了3.00 m,表明三口地区尽管非汛期缺水严重,分流量减少,但河道汛期的洪水威胁并未减弱。

2) 1961—2017年,每年出入洞庭湖的泥沙量呈显著减少趋势,入湖年输沙量由1961—1966年的23 035万t减少到2009—2017年的1 563万t,且三口入湖年输沙量的比重进一步减小;出湖年输沙量由1961—1966年的5 710万t减至2009—2017年的2 214万t,减少速度相对较慢,淤积在湖区的泥沙也呈不断减少趋势。在2008年以后,出湖年输沙量大于入湖年输沙量,表明该时期洞庭湖已开始被冲刷。三口输沙量显著减少,与1961—1966年相比,2009—2017年三口年均输沙量减少了19 378万t,减少了约96.0%,尤其是在下

荆江裁弯后,松滋口、太平口及藕池口汛期输沙量分别减少了15.8%、19.8%和62.3%,非汛期的分别减少了29.3%、38.6%、78.5%。M-K法分析结果表明,汛期和非汛期三口合计输沙量在1990年左右发生显著突变,四水合计年输沙量和汛期输沙量在1995年左右发生显著突变,且在1985年以后呈显著减少趋势。M-K法所得三口输沙量突变检验结果与Pettitt法结果基本一致,但对于四水输沙量突变检验结果两者有所区别,Pettitt法检验结果表明,四水合计年输沙量和汛期输沙量在1984年发生显著突变。

3) 下荆江裁弯、葛洲坝枢纽、三峡工程以及四水控制性工程的建设是洞庭湖水沙过程发生变化的主要原因。下荆江裁弯后,水流行程缩短、流速加快,荆江同流量水位普遍下降了1.1~1.6 m,导致三口分流能力降低、分流分沙减少;葛洲坝水库运用后,水库拦沙、清水下泄、荆江河道冲刷造成三口分流分沙进一步减少;三峡水库蓄水后,除松滋口外,太平口和藕池口来流的减少幅度都不低于60.0%,特别是在非汛期,太平口和藕池口的来流减少了90.0%以上,输沙量的减少幅度在85.0%以上。三峡水库的运行导致出库含沙量减少、荆江干流冲刷加剧,加之枯水期水库的调蓄作用,三口河道分流量继续减少且年断流天数增加,入湖沙量随之大幅减少。截至2020年,湖南省共修建大型水库50座,中型水库366座,小型水库13 321座,总库容545.45亿 $\text{m}^3$ 。其中,大部分水库多在20世纪90年代前建成,水库拦沙是四水输沙减少的主要原因。

### [参考文献]

- [1] 戴凌全,蔡卓森,刘海波,等.三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):170-175.DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.03.26.  
DAI Lingquan, CAI Zhuosen, LIU Haibo, et al. The effect of Three Gorges Reservoir operation scheme during the dry season on ecological water supplement of Dongting Lake[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(3): 170-175. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2019.03.26.
- [2] 付宏渊,邱祥,曾铃,等.基于多变量时间序列(CAR)模型的洞庭湖区域地下水资源量预测[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,11(3):40-47.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2014.03.007.  
FU Hongyuan, QIU Xiang, ZENG Ling, et al. Groundwater resources prediction based on multivariate time series CAR model in Dongting Lake area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2014, 11(3): 40-47. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2014.03.007.
- [3] 许足怀,刘峰清.洞庭湖区季节性河流浅滩航道整治方法初探:以安乡至茅草街航线七星堆滩整治为例[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2005,2(1):19-24. DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2005.01.004.  
XU Zuhuai, LIU Fengqing. Regulation method of shoal waterway of seasonal navigation in Dongting Lake: illustrated by the regulation of Qixingdui Shoal between Anxiang and Maocaojie [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2005, 2(1): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2005.01.004.
- [4] 程俊翔,徐力刚,姜加虎,等.洞庭湖出口径流变化及对生态系统的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(5):1225-1234.DOI:10.11870/cjlyzyyhj201905022.  
CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu, et al. Changes in streamflow at the outlet of Dongting Lake and their impacts on ecosystems [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1225-1234. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201905022.
- [5] 王丽婧,田泽斌,李莹杰,等.洞庭湖近30年水环境演变态势及影响因素研究[J].环境科学研究,2020,33(5):1140-1149. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.08.  
WANG Lijing, TIAN Zebin, LI Yingjie, et al. Trend and driving factors of water environment change in Dongting Lake in the last 30 years [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1140-1149. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.08.
- [6] 黄韬,张俊宏,邓志民,等.三峡水库蓄水前后洞庭湖区水环境演化过程研究进展[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):61-67. DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.09.  
HUANG Tao, ZHANG Junhong, DENG Zhimin, et al. Research on the water environment changes in the Dongting Lake before and after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(6): 61-67. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.09.
- [7] ZHOU Y Q, MA J R, ZHANG Y L, et al. Influence of the Three Gorges Reservoir on the shrinkage of China's two largest freshwater lakes [J]. Global and Planetary Change, 2019, 177: 45-55. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.03.014.
- [8] 于亚文,戴志军,梅雪菲,等.近60年来洞庭湖出湖泥沙动态变化与影响机制[J].华东师范大学学报(自然科学版),2018(4):159-170. DOI:10.3969/j.issn.1000-

- 5641.2018.04.016.
- YU Yawen, DAI Zhijun, MEI Xuefei, et al. Dynamic characteristics and influencing mechanisms of suspended sediment discharge at the outlet of Dongting Lake [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2018(4): 159-170. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.04.016.
- [9] SUN Z D, HUANG Q, LOTZ T. Evolution of flood regulation capacity for a large shallow retention lake: characterization, mechanism, and impacts [J]. Water, 2020, 12(10): 2853. DOI: 10.3390/w12102853.
- [10] 李彦彦, 杨桂山, 万荣荣, 等. 1968—2018年洞庭湖江湖连通河道松滋口冲淤变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(10): 2239-2249. DOI: 10.11870/cjlyzyhj.202010013.
- LI Yanyan, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Channel erosion and deposition of Songzikou outlet, a river-lake connected channel of Dongting Lake during 1968—2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(10): 2239-2249. DOI: 10.11870/cjlyzyhj.202010013.
- [11] 冉雪嫣, 朱德军, 李丹勋. 三峡水库运行后洞庭湖水沙变化及影响因素[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 30-38. DOI: 10.11660/slfdbx.20210303.
- RAN Xueyan, ZHU Dejun, LI Danxun. Variations in flow and sediment in Dongting Lake and its influencing factors after operation of Three Gorges Dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 30-38. DOI: 10.11660/slfdbx.20210303.
- [12] 杨敏, 毛德华, 刘培亮, 等. 1951—2015年洞庭湖水沙变化特征分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(12): 1050-1062, 1071. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-12-003.
- YANG Min, MAO Dehua, LIU Peiliang, et al. Analysis of characteristics of annual runoff and sediment in Dongting Lake during 1951—2015 [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(12): 1050-1062, 1071. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-12-003.
- [13] 张琳, 马敬旭, 张倩, 等. 近60多年洞庭湖水沙演变特征及其与人类活动的关系[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 14-20. DOI: 10.11988/ckyyb.20200708.
- ZHANG Lin, MA Jingxu, ZHANG Qian, et al. Characteristics of runoff-sediment variation of Dongting Lake in recent six decades and its relationship with human activities [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 14-20. DOI: 10.11988/ckyyb.20200708.
- [14] 刘晓群, 易放辉, 栾震宇, 等. 东洞庭湖近期冲淤演变分析[J]. 泥沙研究, 2019, 44(4): 25-32. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.04.005.
- LIU Xiaoqun, YI Fanghui, LUAN Zhenyu, et al. Processes of East Dongting Lake in recent period [J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(4): 25-32. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.04.005.
- [15] YU Y W, MEI X F, DAI Z J, et al. Hydromorphological processes of Dongting Lake in China between 1951 and 2014 [J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 254-266. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.015.
- [16] HUANG Y Y, YU M H, TIAN H Y, et al. Decomposition and attribution analysis of runoff alteration of the Dongting Lake in China [J]. Water, 2020, 12(10): 2729. DOI: 10.3390/w12102729.
- [17] 杨敏, 毛德华, 刘培亮, 等. 1951—2015年洞庭湖水沙演变及人类活动对径流影响的定量评估[J]. 中国水土保持, 2019(1): 38-43, 69. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2019.0017.
- YANG Min, MAO Dehua, LIU Peiliang, et al. Quantitative assessment on influence of runoff and sediment evolution of Dongting Lake and human activities to the runoff in the period of 1951—2015 [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(1): 38-43, 69. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2019.0017.
- [18] 魏强强, 丛振涛, 朱德军, 等. 基于洞庭湖水沙模型的荆南三河冲淤变化研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(7): 116-128.
- WEI Qiangqiang, CONG Zhentao, ZHU Dejun, et al. Channel evolution of the river system in Dongting Lake after the Three Gorges Project based on a hydraulic sediment model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7): 116-128.
- [19] 张明, 冯小香, 刘哲, 等. 三峡蓄水后洞庭湖水沙环境变化对湖区航道的影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 423-431. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.013.
- ZHANG Ming, FENG Xiaoxiang, LIU Zhe, et al. Impact on Dongting Lake channel caused by the change of flow and sediment environment after Three Gorges Project impoundment [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 423-431. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.013.
- [20] 黄草, 姜万, 冯迪子, 等. 1988—2018年洞庭湖北部地区地表水资源量演变分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 37-43. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.03.06.
- HUANG Cao, JIANG Wan, FENG Dizi, et al. Evolution analysis of surface water resources in the north Dongting Lake area from 1988 to 2018 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 37-43. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.03.06.
- [21] 彭世良, 余德清, 张永忠, 等. 洞庭湖区生态修复现状及应对策略[J]. 国土资源导刊, 2022, 19(2): 1-6.
- PENG Shiliang, YU Deqing, ZHANG Yongzhong, et al. Current situation and countermeasures of ecological restoration in Dongting Lake area [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(2): 1-6.

## Analyses of evolution characteristics and driving factors of water and sediment in Dongting Lake at different stages

LONG Yuannan<sup>1,2</sup>, LYU Qian<sup>1,2</sup>, YAN Shixiong<sup>1,2</sup>, LIU Yizhuang<sup>1,2</sup>

(1.School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2.Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] There are three tributaries connecting the Dongting Lake and the Yangtze River. The water and sediment status were measured at five hydrologic gauge stations along the three tributaries, i. e., the Xinjiangkou, Shadaoguan, Mituosi, Kangjiagang, and Guanjiapu station. This study investigated the days of occurrence of runoff cutoff and change of streamflow and water level at the five hydrologic gauge stations, and their interrelationship with runoff and sediment transport. This study also investigated the impact of human activities on the changes of water and sediment in Dongting Lake in conjunction with the construction of water conservancy projects. [Methods] Based on the measured water and sediment data from 1961 to 2017 at the main control stations at the inlet and outlet of Dongting Lake, the Mann-Kendall test and the Pettitt mutation test were used to analyze the evolution characteristics of water and sediment flowing into and out of Dongting Lake during different periods. [Findings] 1) The average annual diverted flow at five hydrologic gauge stations continued to decrease. The annual total runoff and the runoff during the flooding period at the five hydrologic gauge stations changed abruptly in 1985. The water level at the five hydrologic gauge stations raised significantly, and the amount of sediment at the five hydrologic gauge stations decreased along with the reduction of the diverted flow. The most remarkable decrease of sediment occurred at the Ouchikou, and the total amount of sediment transported into the lake at the five hydrologic gauge stations had a significant abrupt change in 1990. 2) Although the runoff of the four major rivers flowing into the Dongting Lake did not change significantly, both the annual sand sediment transport and the amount of sediment transported during the flooding season decreased significantly after 1985; 3) The total runoff flowing into and out of Dongting Lake exhibited a decrease trend. The annual sediment flowing into and out of the lake exhibited a decrease trend. The decreasing rate of the annual sediment flowing out of Dongting Lake is relatively slow. Specially, the sediment flowing out of Dongting Lake is larger than that flowing into Dongting Lake after 2008. [Conclusions] The lower Jingjiang River meander cut-off Gezhouba hydropower complex, Three Gorges Project and the control project constructed for the four major rivers flowing into the Dongting Lake are the main causes for the change of water and sediment process of the Dongting Lake. Among them, the operation of Three Gorges Reservoir led to 90.0% decrease of the diverted sediment at the five hydrologic gauge stations and the diverted flow at the Mituosi, Kangjiagang, and Guanjiapu station. The changes of water and sediment in the four major rivers flowing into the Dongting Lake were more strongly influenced by the large- and medium-sized reservoirs constructed in Hunan Province.

**Key words:** Dongting Lake; runoff; sediment transport; evolution characteristic; hydraulic engineering

**Manuscript received:** 2022-05-17; **revised:** 2022-06-01; **accepted:** 2022-06-02

**Foundation item:** Project (52079010) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (XSKJ2019081-45) supported by Water Conservancy Technology Project of Hunan Province; Project (2020SK2130) supported by Hunan Province's Key Project of Research and Development Plan; Project (kq2014103) supported by Changsha City Natural Science Foundation

**Corresponding author:** YAN Shixiong (1994—)(ORCID: 0009-0000-0813-2276), male, doctoral candidate, research interest: hydrology and water resources. E-mail: 1041747087@qq.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:黄志勇)