

近 60 年长江荆江三口水沙变化过程及对洞庭湖的影响

代 稳¹, 王金凤¹, 仝双梅¹, 张府柱²

(1. 六盘水师范学院 旅游与历史文化学院, 贵州 六盘水 553004;

2. 六盘水师范学院 数学与信息工程学院, 贵州 六盘水 553004)

摘 要:荆江三口的的水沙变化过程是影响洞庭湖发育的重要环节,对洞庭湖的稳定扮演着重要的角色。通过对荆江三口五站 1951—2014 年的水沙观测数据进行系统分析,着重研究长江荆江三口近 60 年水沙变化过程及影响因素,并探讨水沙变化对洞庭湖的影响。结果表明:近 60 年荆江三口分泄长江径流量、输沙量均呈显著的减少趋势,也导致三口五站中的四站出现功能性断流,且断流天数呈明显增加的趋势;洞庭湖区降水量减少、水利枢纽工程等人类活动是影响三口水沙变异的主要驱动因素;荆江三口水沙变化对湖盆结构及洞庭湖形态起着重要的调控与制约作用,其分泄水沙能力的减小也导致了洞庭湖湖面面积萎缩、容积缩小,不过洞庭湖寿命随着水沙的衰减而增加。正确认识荆江三口水沙变化规律及其对洞庭湖的影响,可为三口地区水资源的开发利用、洞庭湖的综合管理提供理论基础和实践经验。

关键词:荆江三口; 水沙; 人类活动; 影响因素; 洞庭湖

中图分类号:P343.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0255-07

Variation Process of Water and Sediment Along Jingjiang River and Its Effect on the Dongting Lake over the Past Six Decades

DAI Wen¹, WANG Jinfeng¹, TONG Shuangmei¹, ZHANG Fuzhu²

(1. College of Tourism, Historical Culture, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China;

2. College of Mathematics and Information Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China)

Abstract: The process change of water and sediment in Jingjiang River is an important part of the development of Dongting Lake, which plays an important role in the stability of Dongting Lake. Based on water and sediment data of three outlets in five stations in the Jingjiang River in the period 1951—2014, the variation process of water and sediment along Jingjiang River and influencing factors of the Jingjiang of Yangtze River were discussed, and the influence of water and sediment change on Dongting Lake was discussed. The results show that the runoff and sediment along Jingjinag River presented the significantly decreasing trend over the past six decades. The reduction of water and sediment resulted in the functional flow of the four stations in the five stations of the three stations, and the number of days of flow obviously increased. The main driving factors influencing the variation of water and sediment in the three outlets in Jingjiang River were the decreasing precipitation of Dongting Lake and the human activity such as hydro-junction projects. The process change of water and sediment in Jingjiang River plays an important role in regulating and restricting the structure of lake basin and the shape of Dongting River. The reduction of water and sediment resulted in the shrinking of the lake area and the reduction of the volume of Dongting Lake, but the life span of Dongting Lake increased. The correct understanding of the change regularity in the three outlets in Jingjiang River and its influence on Dongting Lake can provide theoretical basis and practical experience for the development and utilization of water resources in three districts and the comprehensive management of Dongting Lake.

Keywords: three outlets in Jingjiang River; water and sediment; human activity; influencing factors; Dongting Lake

水沙赋予河流生命,既是河流系统最基本的物理要素,又是河流系统的动力因子^[1]。水沙变化过程会对河流两岸生态环境、河槽地貌以及附近的湖泊、湿地等沉积环境造成显著的影响,河流水沙变化问题^[2-7]一直备受全球学者们的共同关注。近几十年以来,由于气候变化与人类活动(土地利用/覆被变化、水利工程建设、取用水、水土保持措施、围湖造田等)双重因素的剧烈干扰,使得水沙变化规律发生了新的变化。因此,需要全面系统地开展气候变化与人类活动双重影响下河流水沙的变化规律及新的变化对附近沉积环境造成的影响。

荆江三口既是连接长江干流的重要纽带,又是沟通长江中游与洞庭湖北部地区的水流通道,其长江干流的水文情势发生改变,必然引起荆江三口水文情势发生响应。1980年以前,长江水沙过程变化规律具有水沙同步性的特点,即水多沙多,水少沙少,但近十几年来,由于人类活动的强烈干扰,全流域的水沙过程发生了深远的变化,尤其是输沙量^[8],长江多年来的水沙平衡遭受打破必然会导致荆江三口水沙过程发生根本性的改变,涌现出了众多的生态环境问题,如功能性断流、季节性水资源短缺、湖泊面积萎缩、调蓄能力衰退等。针对前述问题,笔者通过分析径流量、输沙量的变化趋势及影响因素,力图说明荆江三口水沙变化过程及对洞庭湖的影响,旨在为水沙变化规律的深入研究及构建人水和谐的水沙利用模式奠定基础。

1 研究概况与方法

1.1 流域概况与资料来源

荆江(Ching River, Ching Chiang, Jing Jiang)系指长江干流自湖北省宜都市枝城至湖南省岳阳市城陵矶段的总称,全长约为360 km,分为上荆江和下荆江,前者系指枝城至藕池口河段的别称,后者是藕池口至城陵矶河段的别称。荆江南岸分布着松滋口、虎渡口、藕池口、调弦口(1958年冬渡口)俗称荆南三口,分泄长江干流从松滋河、虎渡河和藕池河进入洞庭湖。长江干流水沙变化,必然会引起荆南三口水沙发生改变,进而导致洞庭湖的水文情势发生变化,尤其是三峡水库蓄水运行后(图1)。

本文选取荆南三口五站即松滋口(新江口站和沙道观站),虎渡口(弥陀寺站)和藕池口(管家铺站和康家岗站)1951—2014年的径流量和输沙量数据进行整理、分析,数据来源于湖南省水文水资源勘测网站(<http://www.hnsw.com.cn/Default.aspx>)上的水情日报表和泥沙公报;降水量数据来源于国家气象局气象信息中心,时间序列为1960—2014年。

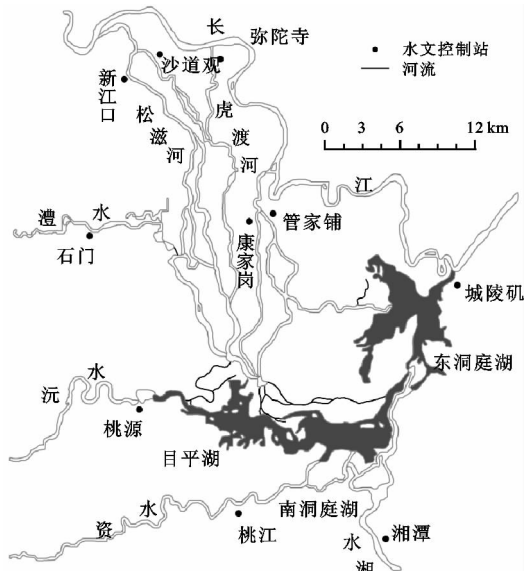


图1 荆江三口水系及主要水文站点分布

1.2 研究方法

为了进一步探讨水沙过程的年际变化剧烈程度及水沙分布特征的对称情况,本文采用变差系数(C_v)与偏差系数(C_s)定量计算法来评判,其计算公式^[9]分别为:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3}{(n-3)C_v^3} \quad (2)$$

式中: n 为时间序列的长度; K_i 表示第 i 年的实际值与多年平均至之间的比值,即 $K_i = \frac{x_i}{\bar{x}}$ 。

为了探讨荆江三口水沙变化对洞庭湖寿命的影响,故将湖泊寿命定义为湖泊未来估计能够存在的时间,采用沙量平衡法来估算洞庭湖的寿命,其计算公式为:

$$T = \frac{V}{(G_r - G'_r)/\rho} \quad (3)$$

式中: T 表示湖泊寿命(a); V 表示湖泊容积(10^8 m^3); G_r 和 G'_r 分别表示入湖沙量和出湖沙量(10^4 t/a); ρ 表示水的密度,取 10^3 kg/m^3 。

2 结果与分析

2.1 荆江三口水沙变化分析

1951—2014年,长江荆江三口分泄长江径流量、输沙量均呈显著的减少趋势(图2),径流量由1951年的1374.50亿 m^3 减少至2014年的563.75亿 m^3 ,减少率约为59%,多年平均径流量为879.61亿 m^3 ,输沙量由1951年的22966.12万t减少至2014年的933.22万t,减少率约为95.94%,多年平均输沙量为11146.53万t。

由于河道自然和人为因素的干扰,使荆江三口水沙发生显著变化,根据调弦口封堵、下荆江裁弯、葛洲坝截流以及三峡水利工程的建设的时间节点,将水沙过程划分为6个阶段:1951—1958年、1959—1966年、1967—1972年、1973—1980年、1981—2002年和2003—2014年。不同阶段其水沙年平均值依次呈减少的趋势,年均径流量分别为1 495.15,1 335.53,1 024.94,836.50,681.81,483.99亿 m^3 ,年均输沙量分别为25 081.24,17 022.25,14 171.75,11 077.10,8 570.60,1 195.84万t。由于1951—1958年荆江三口水沙受人为因素影响较小,故将此时段的水沙视为天然状态下的径流量、输沙量,此后的每个不同阶段的水沙过程均发生变异,输沙量的减少量及减少幅度最大,与天然状态下比较,1959—1966年、1967—1972年、1973—1980年、1981—2002年和2003—2014年的输沙量依次减少了32%,43%,56%,66%,95%。说明三峡水库蓄水运行对荆江三口输沙量减少的影响最大,最为显著。

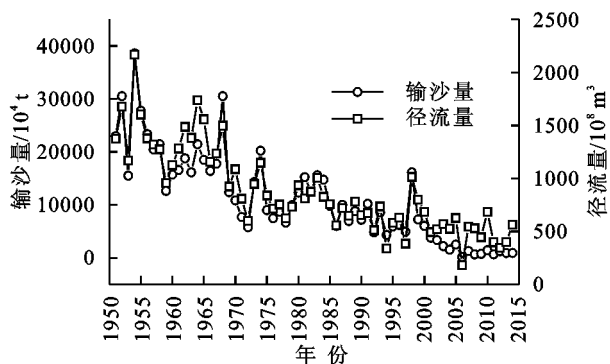


图2 荆江三口水沙量变化趋势

由式(1),(2)计算可知,荆江三口径流量变差系数 C_v 值为0.46,输沙量变差系数 C_v 值为0.76,说明荆江三口水沙均有剧烈的年际变化,且输沙量的年际变化剧烈程度要比径流量大,起伏变化大,近60a水沙量有增有减,但总体趋势呈下降趋势(图2);输沙量偏差系数 C_v 值为0.93,输沙量偏差系数 C_v 值为0.87,这意味着荆江三口径流量、输沙量分布在均值两侧极不对称,且径流量、输沙量大于均值的年份要比小于均值的年份多,说明径流量、输沙量减少的速度快、幅度大,2003—2014年多年平均径流量比1981—2002年减少197.82亿 m^3 ,减少率为29.01%,2003—2014年多年平均输沙量比1981—2002年减少7 374.76万t,减少率达到了85.06%,这必然引起水文情势发生改变,促使河流系统遭受破坏,必然会导致生态效应。

气候变化与人类活动的双重影响促使荆江三口水沙量呈显著减少趋势,也导致三口五站中的四站出现功

能性断流,且断流天数呈明显增加的趋势,三峡水库蓄水运行以来,康家岗的年平均断流天数达到267d(图3)。从三口径流量与断流天数的相互关系上来看,三口年分流量和枯季分流量的多少对断流时间的起止以及长短变化起着决定性的作用^[10]。断流天数的多少在一定程度上反映了其水沙过程变化的趋势。

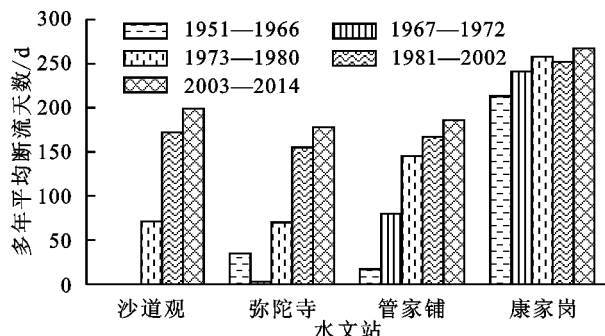


图3 荆江三口四站河段断流情况

2.2 影响水沙变化驱动因素分析

洞庭湖水沙变化的驱动因素主要包括受气候变化控制的自然因素和人类活动两方面。自然因素对水沙变化的影响主要体现在气候(降水、气温的变化)和下垫面两方面,特别是降水量变化的影响最为显著。在人类活动方面主要包括水利工程建设、水土保持措施的实施及取用水等方面,尤其以水利工程建设的影响最为明显。

2.2.1 长江上流气象要素影响 长江上流气象要素变化是影响荆江三口流域径流量减少的主要原因之一。枝城站年径流量呈线性减少的趋势,其变化波动趋势与降水量振荡变化趋势起伏基本一致^[11],1950—2008年造成长江径流量减少的主要原因是该流域降水量减少的缘故^[12]。此外,长江上游气温显著上升(速率为 $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),对其径流量减少起到了重要的作用,尤其在降水量减少的情况下气温对径流量的影响更加突出^[13]。因此,上游气象要素变化必然会对下游径流量产生影响,由此可见,长江上游气温增加、蒸发量增加、降水量减少必导致中游基流量减少,中游基流减少必引起长江三口分流量减少。由三口径流量与输沙量的相关关系可知,三口输沙量必然会受到径流量的影响,随径流量减少而减少,其减少速率 $8.885 \times 10^{-4} \text{ t}/\text{m}^3$ 。

2.2.2 洞庭湖区降水量变化影响 为了分析降水量、径流量、输沙量随时间序列变化特征存在一致性的可能,对三组数据进行归一化曲线^[14]处理,绘制出洞庭湖区降水量、径流量、输沙量归一化曲线(图4)。通过对比3条曲线的变化趋势可知,入洞庭湖径流量(三口径流量+四水径流量)变化趋势与湖区降水量变化趋势基本保持一致,降水量丰的年份其对应径流

量越多,降水偏多偏少阶段与径流丰枯阶段基本保持一致,其相关系数为 0.634;入湖输沙量变化与降水量变化在 1985 年之前具有一致性,但之后变化趋势相差甚远,输沙量处于下降趋势,两者的相关系数仅为 0.231。由此说明,降水量对入湖径流量的影响比降水量对输沙量的影响大,输沙量的变化驱动力因素不是降水量丰缺的问题,但径流量变化对入湖输沙量变化起调控作用,其相关系数为 0.719。

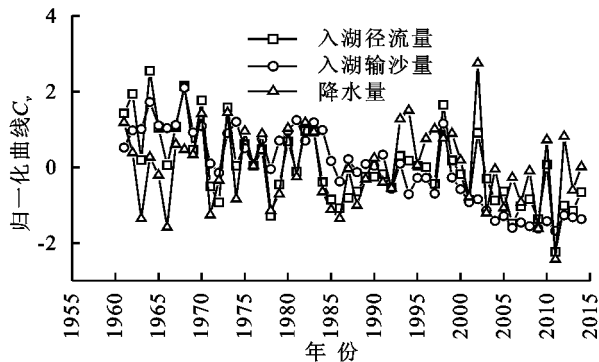


图4 降水量与径流量、输沙量的归一化曲线

2.2.3 取耗水的影响 人口增多,社会发展使水资源的利用量日趋增加,农业灌溉、工业用水、城市与农村生活用水、环境用水等从长江上游、荆江三口、湖南四水及洞庭湖引水量呈增加趋势。据不完全统计,1980—2000 年长江上游修建大、中型水库 1 106 座,引水、提水工程供水量达到 1 336.4 亿 m^3 ^[15],上游水量的大量消耗,若沿程补给不能弥补此消耗,将引起中游径流量减少。2014 年,湖南省消耗洞庭湖水系的总用水量为 277.33 亿 m^3 ,其中湘江 137.47 亿 m^3 ,资水 40.11 亿 m^3 ,沅水 39.77 亿 m^3 ,澧水 44.58 亿 m^3 ,由此引起湖南四水入湖径流量减少,与此同时,必会导致湖南四水入湖输沙量减少。

2.2.4 水利枢纽工程的影响 由前述水沙突变分析、水沙阶段性特征及相关学者的研究成果可知,水利枢纽工程对荆江三口径流量输沙量变化的影响更为显著。根据入湖径流量的阶段划分,分析水利枢纽工程对荆江三口径流量的影响,1951—1971 年荆江三口入湖径流量共减少 566.74 亿 m^3 ,年均减少 28.33 亿 m^3 ,期间 1958 年冬调弦口堵口,1967 年中洲子人工裁弯工程实施,使河长缩短 32.4 km,1969 年上车湾人工裁弯工程实施,使河长缩短 29.2 km,此期间共缩短河长 61.6 km;1972—1977 年荆江三口入湖径流量共减少 153.16 亿 m^3 ,年均减少 60.63 亿 m^3 ,期间 1972 年沙滩子自然裁弯使河长缩短 19 km。每次裁弯都会使河道发生变形,3 次裁弯使河道曲率减少了 0.9,水力坡度增加,下荆江段冲刷作用强烈,抬高了三口分流水位,致使三口分流量迅速减少;

1978—1985 年荆江三口入湖径流量共减少 132.8 亿 m^3 ,年均减少 44.27 亿 m^3 ,期间 1981 年 1 月葛洲坝水利枢纽工程截流,致使三口径流量进一步减少,但截流导致三口径流量下降程度小于裁弯造成的影响;1986—2003 年荆江三口入湖径流量共减少 12.52 亿 m^3 ,年均减少 0.78 亿 m^3 ,期间 2003 年长江三峡水库建设与试运营;2004—2014 年荆江三口入湖径流量共减少 39.08 亿 m^3 ,年均减少 3.9 亿 m^3 ,期间 2006—2010 年三峡水库试验性蓄水与正常蓄水运用,三峡水库建设、调试及正常运用后均对三口径流量产生一定的影响,但对三口分流能力尚未造成明显变化^[16]。

由于大中型水利枢纽工程的控制与调节,荆江三口入湖输沙量与天然情况相比发生了巨大变化。大型水利枢纽工程建设和运行对荆江三口输沙量的改变更为明显,尤其是三峡水库运用初期,水库拦截了很多泥沙并淤积于库区,致使三口下泄水量含沙量显著降低,以此同时,水库的调节改变了径流量在时间上的初始分配,促使洪峰峰值发生转化或推移,洪峰流量降低,汛期输沙能力大幅度减弱,导致输沙量减少。经计算,2003—2014 年荆江三口入湖输沙量共减少 666.23 万 t,年均减少 60.57 万 t;三口的年悬浮泥沙浓度由 1991—2002 年的 1.05 kg/m^3 大幅下降为 2003—2008 年的 0.25 kg/m^3 ,降幅达 76.2%^[17]。

2.2.5 水土保持措施的影响 水土保持措施对控制水土流失起到了重要作用。湖南省水土保持生态环境建设规划报告中指出,截至 2009 年,湖南省洞庭湖区累计治理水土流失面积为 11.84 万 hm^2 ,其中改造基本农田 11.84 万 hm^2 ,营造经果林 1.28 万 hm^2 ,种植水土保持林 1.48 万 hm^2 ,种草 2.3 万 hm^2 ,封山育林治理面积 2.07 万 hm^2 ;修建蓄拦工程 4 986 座,沟(渠)防护工程 135.7 km。不同的水土保持措施均对保水保土产生不同程度的作用,不同的生物林草措施其减水减沙的效益存在差异^[18]。由前人研究成果^[19-24]可知,水土保持措施不是洞庭湖水沙变化的关键影响因子,水土保持措施与入湖径流量输沙量变化的影响有待进一步研究。

2.3 荆江三口水沙变化对洞庭湖的影响

2.3.1 影响洞庭湖形态 洞庭湖形态是指洞庭湖的湖盆结构和几何形态大小,主要由湖盆、水体以及水中物质所组成的自然综合体^[25]。水沙是塑造湖盆形态的直接动力和物质基础,不同的水沙组合形态及水沙过程变化的不确定性对维持湖盆结构形态产生重要的调控和制约作用。洞庭湖水沙来源于荆江三口(松滋、藕池、太平)和湖南四水(湘、资、沅、澧),但水沙变化显著,对洞庭湖影响较明显的水沙来源于荆江

三口。近 60 a 来,长江荆江三口分泄长江径流量、输沙量均呈显著的减少趋势,引起洞庭湖形态结构发生了明显的变化。20 世纪 50 年代,洞庭湖被过水洪道、洲滩分割为 4 个天然湖盆,即目平湖、七里湖、东洞庭湖及南洞庭湖;90 年代,泥沙淤积量的累积效应,使洲滩淤高,加之围垦与筑堤,形成了众多的内湖,也使湖盆大致呈带状分布的格局;21 世纪,洞庭湖大致可分为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖三部分,若荆江三口输沙量按 2000 年 5 351.02 万 t 的输沙能力注入洞庭湖,淤积量约为 4 136 万 t(约为 3 226 万 m³),则湖底淤高 1.15 cm(按 2000 年湖面面积 2 797 km² 计算),使河床抬高,湖盆缩小,湖面面积下降,2000—2014 年,湖底淤高 17.25 cm;而依据 2000—2014 年实测输沙量及湖面面积计算可知,湖底仅淤高 4.7 cm。由此可见,荆江三口水沙变化对湖盆结构及洞庭湖形态起着重要的调控与制约作用。

2.3.2 影响洞庭湖面积及容积 荆江三口河道分泄水沙能力的减小导致洞庭湖湖面面积萎缩、容积缩小(图 5),从我国第一大淡水湖变成了第二大淡水湖。据相关资料分析,洞庭湖湖面面积由 1852 年天然湖面 6 000 km² 减小到 1949 年的 4 350 km²,减少了 1 650 km²,1949—1995 年 46 a 间湖泊面积缩小 38%,容积缩小 40%^[24]。从图 5 可以看出,1825—2002 年这些时段内,洞庭湖湖泊面积一直呈现减少的趋势,最小面积达到了 2 557 km²,1954—1958 年湖泊年缩减率最大,主要是由于大量围湖造田所致;2003 年以后,由于人类活动(退田还湖等)的干扰,湖泊面积呈弱增加趋势^[26]。通过分析湖泊容积及年缩

减率可知,湖泊容积大致呈缩减趋势,1949—1982 年其缩减变化明显,而 1977—2010 年湖泊容积处于 167~177 亿 m³,2003 年湖泊容积出现反弹,主要是由于三峡水库蓄水运行使荆江三口分泄长江清水由淤积转为冲刷。总体来说,水沙量的衰减带来湖泊面积及容积的减小。

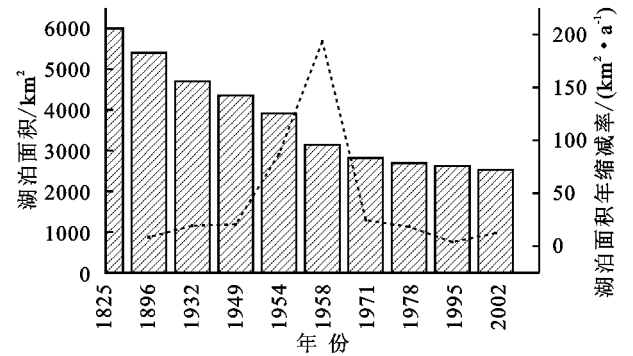


图 5 湖泊面积及年缩减变化趋势

洞庭湖湖泊面积、容积与湖泊蓄水、蓄沙变化量息息相关,其水沙蓄水变化量对湖泊面积、容积大小起决定性作用。洞庭湖水沙来源于荆江三口和湖南四水,由城陵矶注入长江,由前人学者的研究结果可知,荆江三口水沙变化对洞庭湖的影响显著。通过分析荆江三口不同年份径流量、输沙量与湖泊面积、容积之间的关系(图 6),荆江三口水沙变化对洞庭湖面积和容积存在正相关。从图 7 可以看出,荆江三口水沙变化对洞庭湖容积产生一定的影响,但不是唯一影响因素,围湖造田或退田还湖对湖泊面积或容积也产生明显影响。由此可见,荆江三口水沙变化对洞庭湖产生一定的不可忽视的影响。

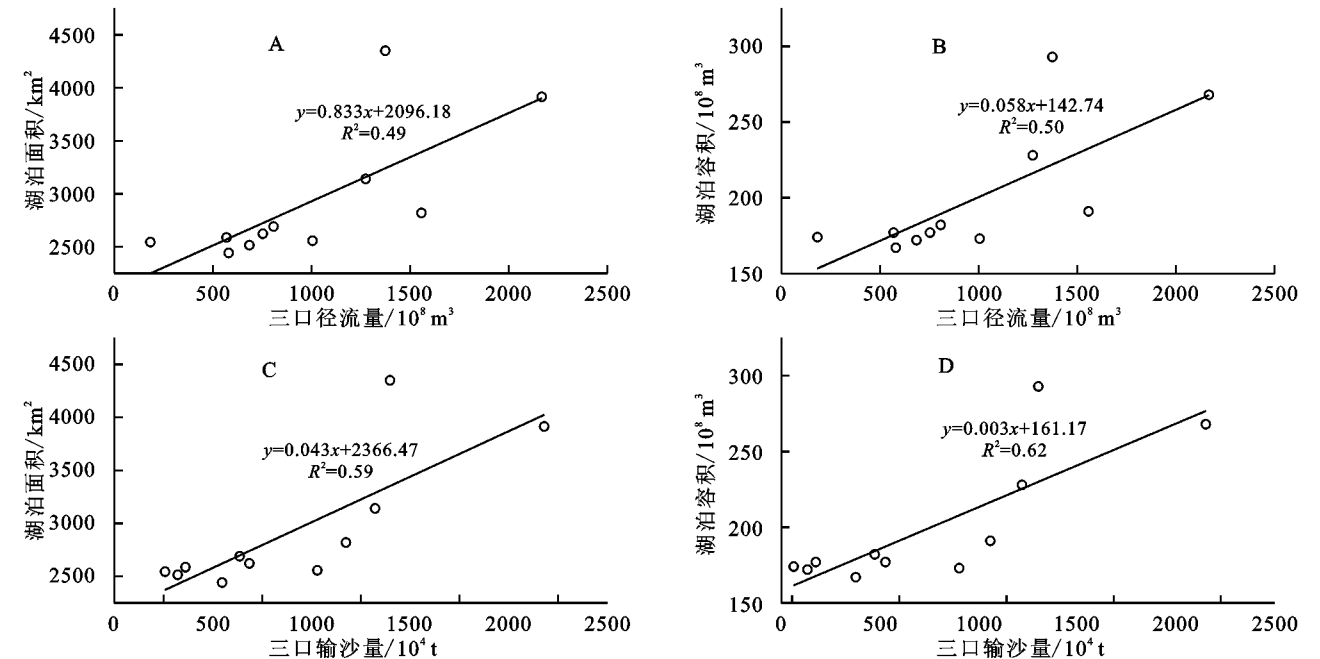


图 6 洞庭湖湖泊面积、容积与三口水沙之间的关系

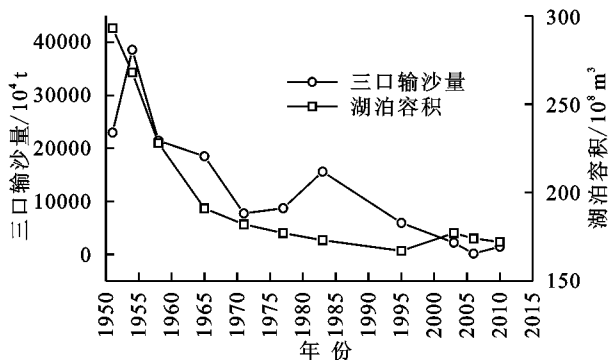
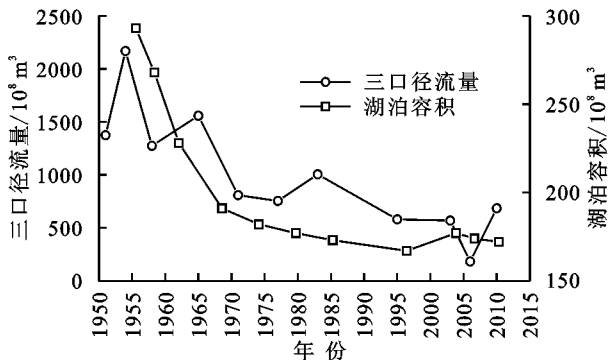


图7 洞庭湖容积与三口水沙变化趋势

2.3.3 影响调蓄能力及湖泊的寿命 洞庭湖属于吞吐调蓄性湖泊,其调蓄容量巨大,在长江干流的防洪方面扮演着重要的角色,多年平均削峰量约为30%,随着剧烈的泥沙淤积及大范围的围湖造田活动,洞庭湖调蓄能力呈下降趋势^[27]。1956—2007年湖区泥沙淤积达到47.37亿t,年均淤积量约为0.91亿t/a,使湖区平均淤积厚度达到1.39m,年均淤积厚度约为2.67cm^[28],导致湖区蓄水量由1949年的293亿m³缩小到2006年的174亿m³,减少119亿m³,年均减少量约2.13亿m³。湖泊寿命是指湖泊从诞生到消亡所经历的时间,它与气候、泥沙、构造、岩性、人类活动等多种因素息息相关^[29]。由于洞庭湖的淤积沙量来源于荆江三口和湖南四水,且荆江三口的输沙量占总淤积沙量的81%,为了研究的需要,忽略湖南四水来沙量的变化。经式(3)初步估算,以1954年附近多年平均淤积量可算出洞庭湖寿命为149a、1971年为334a、1995年为321a、2003年为1089a、2010年为2964a,洞庭湖寿命随着荆江三口水沙的衰减而增加,尤其三峡水库蓄水运行后,使洞庭湖寿命从几百年上升至千年。

3 结论与展望

依据荆江三口五站现有径流量、输沙量等实测资料分析了近60a荆江三口水沙变化过程及影响因素,讨论了三口水沙变化对洞庭湖的影响,得出如下主要结论:(1)1951—2014年,长江荆江三口分泄长江径流量、输沙量均呈显著的减少趋势,均有剧烈的年际变化且分布于均值上部,且输沙量的年际变化剧烈程度要比径流量大,起伏变化大;水沙过程分为1951—1958年、1959—1966年、1967—1972年、1973—1980年、1981—2002年和2003—2014年6个阶段;(2)气候变化是导致荆江三口水沙年际波动的重要驱动力因素,人类活动是导致荆江三口水沙衰减的主要影响因素,水利枢纽工程建设运行导致荆江三口2003—2014年入湖输沙量减少666.23万t,年悬

浮泥沙浓度由1991—2002年的1.05kg/m³大幅下降为2003—2008年的0.25kg/m³;(3)荆江三口水沙变化对洞庭湖产生深远的影响,主要表现在湖泊形态结构的改变、湖面面积和容积的缩小及调蓄能力的下降与湖泊寿命的延长。

荆江三口特殊的地理位置,沟通长江中游与洞庭湖,是江湖关系的重要通道,其水文情势研究是一项长期的系统工程,本文对荆江三口水沙变化过程及对洞庭湖的影响做了初步探索,影响因素分析处于定性化阶段且未对气候变化与人类活动进行贡献率分解,其水沙变化也必然对三口河岸、附近区域及洞庭湖的生态环境造成一定的影响,文中未涉及,以上这些问题也是亟待探索的方面。

参考文献:

- [1] 何用,李义天,吴道喜,等.水沙过程与河流健康[J].水利学报,2006,37(11):1354-1359,1366.
- [2] Rodriguez-Lloveras X, Bussi G, Francés F, et al. Patterns of runoff and sediment production in response to land-use changes in an ungauged Mediterranean catchment[J]. Journal of Hydrology, 2015,531(3):1054-1066.
- [3] Buendia C, Bussi G, Tuset J, et al. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment[J]. Science of The Total Environment, 2016,540(1):144-157.
- [4] 彭俊,陈沈良.近60年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响[J].地理学报,2009,64(11):1353-1362.
- [5] 李景保,王克林,秦建新,等.洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因[J].地理学报,2005,60(3):503-510.
- [6] 李景保,代勇,欧朝敏,等.长江三峡水库蓄水运用对洞庭湖水沙特性的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):215-219.
- [7] 覃红燕,谢永宏,邹冬生.湖南四水入洞庭湖水沙演变及成因分析[J].地理科学,2012,32(5):609-615.
- [8] 陈进,黄薇.梯级水库对长江水沙过程影响初探[J].长江流域资源与环境,2005,14(6):114-119.
- [9] 管华.水文学[M].北京:科学出版社,2015:143-144.
- [10] 李景保,何霞,杨波,等.长江中游荆南三口断流时间演

- 变特征及其影响机制[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10):1713-1725.
- [11] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 488-497.
- [12] Wang Y, Ding Y J, Ye B S, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(8):1398-1412.
- [13] 李林, 王振宇, 秦宁生, 等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 694-700.
- [14] 莫莉, 穆兴民, 王勇, 等. 近50多年来北洛河水沙变化特征及原因分析[J]. 泥沙研究, 2009(6):30-36.
- [15] 柳林云, 纪国强, 李书飞. 长江流域近20年来供水工程调查分析[J]. 人民长江, 2011, 42(18):95-98.
- [16] 方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(1):36-41.
- [17] 谢永宏, 李峰, 陈心胜, 等. 荆江三口入洞庭湖水沙演变及成因分析[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(2):203-206.
- [18] 袁希平, 雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2):296-300.
- [19] 李正最, 谢悦波, 徐冬梅. 洞庭湖水沙变化分析及影响初探[J]. 水文, 2011, 31(1):45-53.
- [20] 覃红燕, 邹冬生, 李峰. 近50余年荆江三口水沙变化特征及驱动力分析[J]. 泥沙研究, 2013, (3):27-33.
- [21] 李晖, 尹辉, 白旻, 等. 近60年洞庭湖区水沙演变特征及趋势预测[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3):139-142.
- [22] 胡光伟, 毛德华, 李正最, 等. 三峡工程运行以来洞庭湖水沙过程变异及其影响分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5):170-175.
- [23] 郭彦, 侯素珍, 林秀芝. 近51年西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10):176-183.
- [24] 任惠茹, 李国胜, 崔林林, 等. 近60年来黄河入海水沙通量变化的阶段性与多尺度特征[J]. 地理学报, 2014, 69(5):619-631.
- [25] 尹辉, 杨波, 蒋忠诚, 等. 近60年洞庭湖泊形态与水沙过程的互动响应[J]. 地理研究, 2012, 31(3):471-483.
- [26] 吴作平, 杨国录, 甘明辉. 荆江—洞庭湖水沙关系及调整[J]. 武汉大学学报:工学版, 2002, 35(3):5-8, 16.
- [27] 徐伟平, 康文星, 何介南. 洞庭湖蓄水能力的时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):62-67, 324.
- [28] Ou C, Li J, Zhou Y, et al. Evolution characters of water exchange abilities between Dongting Lake and Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4):731-745.
- [29] 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.

~~~~~  
(上接第254页)

- [9] 赵伟, 张宇, 张智红. 1981—2010年重庆地区季节性干旱时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 192-198.
- [10] 刘鹏, 杨涛, 师鹏飞, 等. 塔里木河流域干旱态势时空变化规律分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5):5-8.
- [11] 朱珠, 陶福祿, 类运生, 等. 1981—2009年江苏省气候变化趋势及其对水稻产量的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4):567-572.
- [12] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4):691-719.
- [13] Zhan W, Jin F F, Turner A. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(11):4020-4026.
- [14] Ji Y, Zhou G, Wang S, et al. Increase in flood and drought disasters during 1500—2000 in Southwest China [J]. Nat Hazards, 2015, 77(3):1853-1861.
- [15] 包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等. 基于CI指数的江苏省近50年干旱的时空分布规律[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 599-608.
- [16] 王连喜, 顾嘉熠, 李琪, 等. 江苏省冬小麦适宜度时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1):67-75.
- [17] 谭孟祥, 景元书, 曹海宁. 江苏省一季稻生长季气候适宜度及其变化趋势分析[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1):349-353.
- [18] 沈陈华. 气象因子对江苏省水稻单产的影响[J]. 生态学报, 2015, (12):4155-4167.
- [19] Tao F, Yokozawa M, Liu J, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends[J]. Climate Research, 2008, 38(1):83-94.
- [20] Tao F, Zhang Z, Shi W, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981—2009 in China, and late rice was just opposite [J]. Global Change Biology, 2013, 19(10):3200-3209.