

文章编号:0559-9350(2018)01-0036-11

## 水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制

卢金友, 姚仕明

(长江科学院 水利部江湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 长江干支流水库群的总库容约占长江入海年均径流量的37.6%, 水库群的联合作用改变了进入长江中下游江湖系统的水沙条件, 引起江湖系统水沙输移、冲淤演变及江湖关系等发生新的变化, 呈现新的特点。本文在综述近年来长江中下游江湖系统水沙输移与冲淤演变特性及江湖关系变化等研究成果的基础上, 重点阐述水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制, 形成的主要认识有: 水库群联合作用下中下游江湖系统的径流量及比例组成没有明显变化, 但输沙量及比例组成发生显著变化, 干流宜昌站变化最为明显; 中下游河道由自然条件下的中沙河流变为少沙河流, 江湖系统由自然条件下的累积性淤积转为持续冲刷, 并在较长时期内进行重新塑造与调整; 水库群的联合作用对江湖水沙交换与湖区冲淤产生影响, 两湖枯水期有所提前, 湖区泥沙沉积率显著下降, 江湖关系总体趋于向好的方向调整。鉴于长江水沙条件变化的不确定性、人类活动影响的加剧与江湖系统演变的复杂性, 今后仍须加强变化环境下中下游江湖系统响应机理研究。

**关键词:** 水库群; 水沙条件; 江湖关系; 江湖演变

**中图分类号:** TV697.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20170827

## 1 研究背景

长江干流河道长度约6397 km, 流域面积约180万 km<sup>2</sup>。宜昌以上为长江上游, 其长度约4504 km, 流域面积约100万 km<sup>2</sup>; 宜昌以下为长江中下游, 其长度约1893 km, 流域面积约80万 km<sup>2</sup>, 其中湖口以上长江中游流域面积约68万 km<sup>2</sup>, 湖口以下长江下游流域面积约12万 km<sup>2</sup>[1]。长江中下游水系与江湖关系复杂, 除了承接长江上游的来水来沙外, 右岸主要有清江、洞庭湖水系、鄱阳湖水系等入汇, 左岸主要有汉江入汇。1950年代以来, 长江流域修建了大量的水库, 据统计[2], 长江干支流共有水库51643座, 总库容3607亿 m<sup>3</sup>, 约占长江入海年均径流量的37.6%。其中: 大型水库282座, 总库容2880亿 m<sup>3</sup>; 中型水库1543座, 总库容415亿 m<sup>3</sup>; 小型水库49818座, 总库容312亿 m<sup>3</sup>。截至目前, 长江上游干流与主要支流均建有控制性水库, 这些水库的库容大, 调蓄能力强, 约占长江流域水库总库容的60%(图1, 表1)。综上可看出, 长江流域这些水库的调蓄尤其是控制性水库的调蓄会显著改变进入长江中下游江湖系统的水沙条件, 引起长江中下游江湖系统的水沙输移与冲淤演变特性及江湖关系发生新的变化, 进而对长江中下游地区防洪、航运、水沙资源综合利用及水生态环境等产生影响。

2006年以来, 围绕长江中下游江湖演变及其关系变化研究的项目主要有: 国家科技支撑计划项目“三峡工程运用后泥沙与防洪关键技术研究”、“三峡水库和下游河道泥沙模拟与调控技术”、“水沙变异条件下荆江与长江口北支河道治理关键技术”, 国家重点研究发展计划项目“长江中游通江湖泊江湖关系演变及环境生态效应与调控”, 国家自然科学基金重点项目“三峡水库下游河床冲刷与再造过程研究”, 国家重点研发计划项目“长江泥沙调控及干流河道演变与治理技术研究”等。这些项目通

收稿日期: 2017-08-23; 网络出版日期: 2018-01-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180123.1447.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402300); 国家自然科学基金项目(51339001, 51379018)

作者简介: 卢金友(1963-), 男, 浙江仙居人, 教授级高级工程师, 主要从事河流动力学研究。E-mail: luju66@vip.163.com

过采用现场调查、原型观测资料分析、理论分析、数学模型计算、水槽试验与实体模型试验等多种技术手段,运用河流动力学、河床演变学、河流地貌学、水文学、河流模拟、河流生态学等多学科交叉,综合研究了长江中下游江湖系统的水沙输移与冲淤演变特性及江湖关系变化,取得了丰富的研究成果<sup>[3-7]</sup>。这些成果为长江流域的综合规划与专项规划修编、三峡水库优化调度、长江中下游江湖治理开发与保护等提供了技术支撑,促进了相关学科的发展。

本文主要在梳理 2006 年以来长江中下游江湖演变及其关系变化对水沙条件变化响应研究成果的基础上,进一步总结提炼长江干支流水库群联合作用下中下游江湖系统水沙变化主要特征、江湖冲淤与演变主要特性,阐明长江中下游江湖关系对水库群联合作用下的响应机制,并提出需要进一步开展的研究课题。

表 1 长江干支流水系控制性水库库容与年均径流量比较(2003—2016 年)

水系	上游干支流	洞庭湖水系	汉江	鄱阳湖水系
站名	宜昌站	城陵矶站	仙桃站	湖口站
水库总库容/亿 m <sup>3</sup>	1 707.33	234.34	330.85	94.86
年均径流量/亿 m <sup>3</sup>	4 024	1 920 <sup>1)</sup>	356	1 507

注: 1)城陵矶站扣除了荆江三口(松滋口、太平口和藕池口)分流量 482 亿 m<sup>3</sup>。

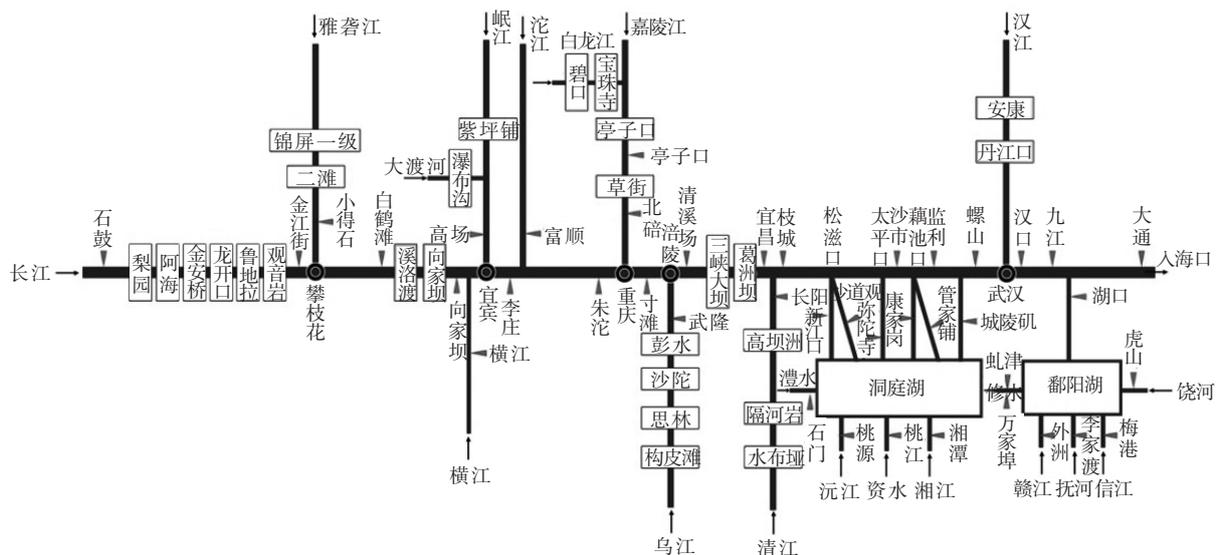


图 1 长江干流与主要支流水系及部分水库分布示意

## 2 中下游江湖系统水沙变化主要特征

长江中下游江湖系统水沙输移与变化关系到江湖演变及其关系变化等一系列问题,目前主要利用原型观测资料与理论分析的手段开展这方面的研究,局部区域与具体河段也有采用数值模拟、实体模型试验等手段进行相关研究。考虑到中下游江湖系统水沙变化受其干支流汇入的水沙条件、江湖系统内部边界条件与人类活动的干扰等影响,江湖系统水沙变化十分复杂,本节在综述以往研究成果基础上,结合最新资料,重点从宏观与趋势上阐述中下游江湖系统水沙变化的主要特征。

长江中下游江湖系统的来水来沙组成复杂,径流量主要来自长江上游、洞庭湖水系、支流汉江、鄱阳湖水系,共计占大通站的 84.5%,中下游其它区间来流占 15.5%。三峡水库蓄水运用前后,长江中下游来水比例组成没有发生明显变化,但来沙组成发生明显变化<sup>[8-9]</sup>,尤其是上游出口控制站宜昌站的来沙量减幅十分显著,三峡水库蓄水运用以来(2003—2016)仅为蓄水前的 7.8%,约 3 816 万 t<sup>[10]</sup>。2012、2013 年金沙江下游向家坝、溪洛渡水电站分别开始蓄水发电,因水库拦沙向家坝水电站下泄的泥沙量大幅减少,三峡水库的入、出库沙量也随之减少,2013—2016 年宜昌站年均输

沙量仅为三峡水库蓄水前的2.6%，约1 290万 t。随着长江上游干支流新一批控制性水库的建设与投入运行、水土保持工程与生态建设工程的逐步实施，进入三峡水库的泥沙量会长期维持在相对较低的水平，从而三峡水库的出库泥沙量也会长期维持在更低的水平，这会对中下游江湖系统的演变产生长期深远的影响，也体现了长江上游干支流水库群联合运用对长江中下游来沙长期大幅度减少的影响。

三峡水库运用前后长江中下游干流主要水文站的径流量和输沙量比较(表2)可看出，三峡水库蓄水运用后宜昌、枝城、螺山、汉口、大通站年均径流量与悬移质输沙量均减少，其中径流量减少幅度不大，为4.8%~7.9%；悬移质输沙量减少幅度很大，为66.7%~92.2%(表2)。由于三峡水库拦蓄作用，水库下泄的沙量大大幅度减少，水流含沙量低，河床沿程冲刷补给，荆江河段年均输沙量由三峡水库运用前沿程减少转为沿程增加；受洞庭湖、汉江、鄱阳湖等水系汇流及床面冲刷补给等影响，城陵矶以下河段在三峡水库运用后螺山、汉口、大通站的年均输沙量也沿程增加，但年平均含沙量沿程变化不大<sup>[11]</sup>。

表2 中下游主要水文站年均径流量和悬移质输沙量统计<sup>[10]</sup>

		宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
径流量/亿 m <sup>3</sup>	2002年前	4 369	4 450	3 942	3 576	6 460	7 111	9 051
	2003—2016年	4 023	4 122	3 776	3 658	6 021	6 766	8 582
输沙量/万 t	2002年前	49 200	50 000	43 400	35 800	40 900	39 800	42 086
	2003—2016年	3 816	4 613	5 685	7 225	8 912	10 278	14 000
含沙量/(kg/m <sup>3</sup> )	2002年前	1.13	1.12	1.10	1.00	0.63	0.56	0.46
	2003—2016年	0.09	0.11	0.15	0.20	0.15	0.15	0.16

三峡水库蓄水前，悬移质泥沙的多年平均中值粒径沿程变化不大，宜昌站、枝城站、沙市站、监利站、螺山站、汉口站、大通站分别为0.009、0.009、0.012、0.009、0.012、0.010和0.009 mm，粒径大于0.125 mm的泥沙含量分别为9.0%、6.9%、9.8%、9.6%、13.5%、7.8%、7.8%；三峡水库蓄水后，大量泥沙被拦在库内，下泄的沙量少，粒径细，但因河床冲刷补给、悬沙与床沙交换及两岸支流入汇等影响，2003—2015年宜昌站、枝城站、沙市站、监利站、螺山站、汉口站、大通站分别为0.006、0.009、0.01、0.040、0.014、0.015和0.009 mm，粒径大于0.125 mm的泥沙含量分别为5.6%、15.4%、26.6%、35.1%、23.0%、20.7%、7.7%。不难看出，除宜昌站、大通站外，三峡水库运用以来粒径大于0.125 mm的泥沙含量所占比例较自然条件下增加明显，主要原因是河床中粒径大于0.125 mm的泥沙比例高，冲刷补给量大，因此这部分泥沙在河床冲刷补给时恢复相对较快。但长江中下游沿程各站粒径大于0.125 mm的年均输沙量均小于三峡水库蓄水运用前<sup>[12-13]</sup>。

三峡水库蓄水运用后推移质泥沙基本被拦在库内，近坝段的推移质年均输沙量大大幅度减少，宜昌站卵石推移质年均输沙量由1981—2002年的17.5万 t减少为2003—2016年(2010年以后仅2012年、2014年观测到4.2万 t、0.21万 t)的2.7万 t，沙质推移质年均输沙量由1981—2002年的137万 t减少为2003—2016年的11.0万 t。宜昌站以下的沙质推移质泥沙输移量因河床冲刷而得到相应的补充，2003—2016年枝城、沙市、监利、螺山、汉口和九江站沙质推移质年均推移量分别为242万、249万、313万(2008—2016年)、142万(2009—2016年)、160万(2009—2016年)和30.9万 t(2009—2016年)。

三峡水库蓄水期由于干流水位降低，荆江三口分流分沙能力随之减弱，进入三口水量明显减少，三口断流天数增加<sup>[14-16]</sup>。与1999—2002年相比，2003—2016年三口年均分流量减少144亿 m<sup>3</sup>，分流比从14%减至12%；分沙量从5 670万 t减至916万 t，分沙比从16.4%增至19.9%。当枝城站流量小于25 000 m<sup>3</sup>/s时，荆江三口的分流能力没有明显变化，当枝城站流量大于25 000 m<sup>3</sup>/s时，荆江三口分流比的点据变化比较散乱。三峡水库运用以来荆江三口总体分流能力较蓄水前偏小<sup>[4, 15]</sup>。主要原因是三峡水库运用以来年均径流量有所减小、径流过程发生一定变化，以及干流河道冲刷与三口分流道冲刷程度不同等导致的。

洞庭湖水沙除来自荆江三口外，主要来自湘江、沅江、资水、澧水(简称“四水”)。1951—2009年四水的总径流量多年平均为1 673亿 m<sup>3</sup>，总输沙量多年平均2 591万 t。湘江、沅江、资水、澧水年

均径流量分别为 657 亿、640 亿、229 亿、147 亿  $m^3$ ，年均输沙量分别为 959 万、1 051 万、199 万、382 万 t，以湘江与沅江的来水来沙量为大。多年来洞庭湖“四水”年径流量变化趋势不明显，输沙量则明显减少<sup>[17]</sup>。另据统计<sup>[18]</sup>，“四水”水文控制站湘潭、桃江、桃源、石门多年平均径流量分别为 658.0 亿 (1950—2015)、2 27.7 亿 (1951—2015)、640.0 亿 (1951—2015)、1 46.7 亿  $m^3$  (1950—2015)，平均输沙量分别为 909 万 (1953—2015)、183 万 (1953—2015)、940 万 (1952—2015)、500 万 t (1953—2015)；近 10 年 (2007—2016) 的多年平均径流量分别为 641.0 亿、205.4 亿、636.9 亿、143.5 亿  $m^3$ ，平均输沙量分别为 474 万、41.4 万、99.2 万、120 万 t；近 10 年“四水”年均径流量之和基本没有变化，但年均输沙量之和仅为多年平均的 29.0%。“四水”来沙量的减少主要与其干支流修建水库、流域降雨及植树造林等有关，干支流水库建设运行是来沙量减少的最主要因素。

鄱阳湖水沙主要来自于赣江、信江、抚河、饶河与修水 (简称“五河”)，部分年份长江出现倒灌鄱阳湖的现象。据统计<sup>[18]</sup>，“五河”外洲、李家渡、梅港、虎山、万家埠等 5 个水文控制站的年均径流量分别为 683.4 亿 (1950—2015)、128.0 亿 (1953—2015)、181.7 亿 (1953—2015)、71.76 亿 (1953—2015)、35.42 亿  $m^3$  (1953—2015)，之和为 1 100.28 亿  $m^3$ ，年均输沙量分别为 804 万 (1956—2015)、137 万 (1956—2015)、198 万 (1955—2015)、64.4 万 (1956—2015)、34.8 万 t (1957—2015)，之和为 1 238.2 万 t；近 10 年 (2007—2016)“五河”年均径流量分别为 703.9 亿、128.4 亿、196.1 亿、73.19 亿、35.79 亿  $m^3$ ，之和为 1 137.38 亿  $m^3$ ，年均输沙量分别为 230 万、119 万、116 万、110 万、22.9 万 t，之和为 597.9 万 t；近 10 年的年均径流量变化不大，略有增加，以赣江增加为主，年均输沙量明显减少，约为多年平均值的 48.3%，以赣江减少为主，但饶河来沙明显增加。“五河”入湖径流量和输沙量的年内分配相一致但都不均匀，主要集中在 4—7 月，分别占全年 61.1%、77.1%，输沙量更为集中<sup>[19]</sup>。总体而言，“五河”的年径流量变化趋势不明显，与年降雨量呈显著的正相关，主要受降雨量的影响。“五河”入湖输沙量从 1980 年代中期开始有下降趋势，2000 年以后下降趋势加剧，下降最为显著的是赣江外洲站，主要原因是 1985 年以前“五河”流域水土流失面积增加，输沙量呈增加趋势，但随着水土保持工作的实施生效以及水库的拦沙作用 (尤其是赣江流域的水库拦沙)，1985 年以后输沙量开始逐渐减小。而出湖输沙量 1956—2000 年期间整体呈下降趋势，2001—2012 年呈现上升趋势，出湖输沙量由 1988—2000 年的约 720 万 t 增加到 2001 年后的约 1 500 万 t<sup>[20]</sup>，出湖年均输沙量大于入湖年均来沙量<sup>[21-22]</sup>。显然鄱阳湖湖口入江输沙量的变化与径流量变化不相适应，可能与近年来鄱阳湖区和入江水道的采砂、江湖水体交换过程变化等因素有关。

汉江是长江最大的支流。1968 年丹江口水库蓄水运用后，下泄的水沙条件发生了较大变化，汉江出口控制站仙桃站年均径流量变化不大，略有减少，但年均输沙量明显减少，仅为蓄水前的 23.6% (表 3)。随着丹江口大坝加高工程的实施，干支流其它水库与南水北调中线工程的建设运行，汉江汇入长江的水沙量会进一步减少。

表 3 汉江丹江口建库前后仙桃水文站多年水沙变化

时期	年均流量/ ( $m^3/s$ )	年均径流量/ 亿 $m^3$	年均输沙量/ 万 t	统计年份
建库前	1 380	436	8 310	1955—1959
滞洪期	1 430	452	7 500	1960—1967
蓄水期	1 227	387	1 960	1968—2015

综上可看出，进入长江中下游江湖系统的水沙条件发生了较大变化。尽管进入中下游江湖系统的径流量与比例组成没有发生明显变化，但径流过程因干支流水库群尤其是上游控制性水库群的调蓄有较大变化，主要表现为高

洪水期洪峰流量的削减、枯水期流量增加及中水期时间的延长。进入江湖系统的泥沙总体均呈减少趋势，两湖水系自然条件下来沙量并不大，基本为少沙河流，加之两湖的调蓄，汇入长江干流的含沙量相对较小，如今随着干支流水库建设运行与水土保持工程的不断实施，进入江湖系统的沙量会继续减少；汉江在丹江口水库建设运用前为多沙河流，汇入长江的含沙量大，随着丹江口水库的建设运行及其它水库建设，汇入长江的含沙量大幅度减小；自然条件下长江上游来沙量大，在进入中下游江湖系统中占绝对优势地位，年均输沙量约 5 亿 t，目前这种局面已发生根本性改变，其进入江湖系统的泥沙量在相当长时期内与洞庭湖四水、汉江仙桃站的相当，平均基本在 1 000 万 t 左右的水平，鄱阳湖五河估计在 600 万 t 左右的水平<sup>[8]</sup>。因此，长江上游、两湖水系及汉江累积进入中下游江湖系统的年均输沙量

会长期维持在3 600万 t左右的水平, 仅约为自然条件下宜昌站年均输沙量的7.2 %。

### 3 水沙变化条件下中下游江湖冲淤特性

长江中下游江湖系统冲淤过程主要取决于来水来沙条件与系统边界条件。目前对于中下游长距离、大范围的江湖系统冲淤特性主要依赖原型实测资料分析, 水沙数值模拟因受泥沙运动基本理论、模拟方法与技术等因素的影响, 开展中下游长距离、大范围的江湖系统冲淤变化精准预测仍存在困难, 实体模型试验只能用于局部区域与具体河段的冲淤研究。本节在综述以往研究成果的基础上, 通过大量的原型观测资料分析, 阐明了不同时期中下游江湖冲淤特性与发展趋势。中下游江湖冲淤特性的总体规律为: 自然条件下, 因进入江湖系统的水量、沙量均大, 总体处于淤积态势, 淤积主要发生在湖区, 尤其是洞庭湖区, 年均淤积泥沙约1.28亿 t。然而, 随着长江干支流大量水库建设运行、水土保持工程的实施, 进入中下游江湖系统的年均径流量没有显著变化, 但泥沙量显著减少, 江湖系统整体由淤积状态转为冲刷状态。

**3.1 中下游干流河道冲淤变化** 随着长江上游干支流水库的陆续建设运行, 尤其是三峡水库建成运行后, 中下游干流河道的来沙量显著减少, 出现长距离冲刷调整。同时, 两湖水系与汉江来沙的减少使得中下游干流河道沿程泥沙补给程度减弱, 加剧其下游河道冲刷。表4为三峡水库运用以来宜昌至湖口河段冲淤量<sup>[10]</sup>, 由表可看出, 2002年10月—2016年11月, 宜昌至湖口河段(城陵矶至湖口河段为2001年10月—2016年11月)枯水河槽、基本河槽冲刷量分别为19.15亿、20.07亿 m<sup>3</sup>, 年均冲刷强度分别为14.33万、15.02万 m<sup>3</sup>/(km·a), 冲刷主要集中在枯水河槽, 占基本河槽冲刷量的95.4 %。

冲淤量沿程分布表现为: 宜昌至枝城河段的枯水河槽、基本河槽冲刷量分别为1.50亿、1.55亿 m<sup>3</sup>, 分别占总冲刷量的7.8 %、7.7 %, 年均冲刷强度分别为17.65万、18.17万 m<sup>3</sup>/(km·a); 枝城至城陵矶河段冲刷量分别为8.40亿、8.76亿 m<sup>3</sup>, 分别占总冲刷量的43.9 %、43.6 %, 年均冲刷强度分别为17.28万、18.02万 m<sup>3</sup>/(km·a); 城陵矶至汉口河段冲刷量分别为4.45亿、4.71亿 m<sup>3</sup>, 分别占总冲刷量的23.2 %、23.5 %, 年均冲刷强度分别为12.67万、13.40万 m<sup>3</sup>/(km·a); 汉口至湖口河段冲刷量分别为4.80亿、5.06亿 m<sup>3</sup>, 分别占总冲刷量的25.1 %、25.2 %, 年均冲刷强度分别为11.60万、12.23万 m<sup>3</sup>/(km·a)。根据上述分析, 宜昌至湖口河段年均冲刷强度总体沿程减少, 但宜昌至城陵矶河段和城陵矶至湖口河段相比, 年均冲刷强度差别较大, 但这两个长河段内部的年均冲刷强度差别并不大。

表4 三峡水库运用以来宜昌至湖口河段冲淤量统计

		宜枝河段	荆江	城汉河段	汉湖河段	宜湖河段
河段长度/km		60.8	347.2	251	295.4	954.4
枯水河槽冲淤量/万 m <sup>3</sup>	2002.10—2006.10	-6 770	-23 646	-3 012	-3 967	-37 395
	2006.10—2008.10	-2 417	-5 586	-3 547	256	-11 294
	2008.10—2016.11	-5 839	-54 770	-37 949	-44 257	-142 815
基本河槽冲淤量/万 m <sup>3</sup>	2002.10—2016.11	-15 026	-84 002	-44 508	-47 968	-191 504
	2002.10—2006.10	-7 082	-26 501	-3 963	-12 589	-50 135
	2006.10—2008.10	-2 286	-5 464	-1 966	3 611	-6 105
基本河槽冲淤量/万 m <sup>3</sup>	2008.10—2016.11	-6 096	-55 626	-41 147	-41 610	-144 479
	2002.10—2016.11	-15 464	-87 591	-47 076	-50 588	-200 719

冲淤量沿时分布表现为: 三峡水库2003年6月进入围堰蓄水期, 坝前水位汛期按135 m、枯季139 m运行, 其中蓄水运用前3年(2002年10月—2005年10月)宜昌至湖口河段的枯水河槽、基本河槽冲刷量分别为3.85亿、4.96亿 m<sup>3</sup>, 分别占总冲刷量的20.1 %、24.7 %, 年均冲刷强度分别为13.45万、17.32万 m<sup>3</sup>/(km·a); 2006年为特枯水文年, 三峡水库下游的冲刷强度减弱, 2005年10月—2006年10月枯水河槽淤积0.105亿 m<sup>3</sup>、基本河槽冲刷0.055亿 m<sup>3</sup>。2006年10月—2008年10月为三峡工程初期蓄水期, 坝前水位汛期按144 m、枯季156 m运行, 宜昌至湖口河段枯水河槽、基本河槽冲刷量

分别为 1.13 亿、0.61 亿  $m^3$ ，分别占总冲刷量的 5.9%、3.0%，年均冲刷强度分别为 5.92 万、3.20 万  $m^3/(km \cdot a)$ ；2008 年汛末三峡水库进行 175 m 试验性蓄水以来，宜昌至湖口河段冲刷强度增大，2008 年 10 月—2016 年 11 月，枯水河槽、基本河槽冲刷量分别为 14.28 亿、14.45 亿  $m^3$ ，分别占总冲刷量的 74.6%、72.0%，年均冲刷强度分别为 18.70 万、18.93 万  $m^3/(km \cdot a)$ 。

**3.2 洞庭湖冲淤变化** 洞庭湖不仅承接“四水”的来水来沙，而且还汇聚荆江四口(调弦口 1959 年建闸控制)分泄的水沙量。自然条件下，荆江四口与“四水”的来沙量大，荆江四口的来沙量占绝对优势，然而湖区河网水系复杂、湖面开阔、流速较缓，挟沙能力有限，因此洞庭湖区长期处于淤积状态<sup>[23-24]</sup>。例如，1955—1966 年期间洞庭湖区年均淤积量约 1.65 亿 t，而 1967—1980 年、1981—1990 年湖区年均淤积量分别约为 1.15 亿和 1.01 亿 t；受 1990 年代以来长江上游来沙量减少的影响，由荆江三口进入洞庭湖的泥沙也减少近 4 成，同时四水进入湖区的泥沙也不断减少，导致 1991—2002 年期间洞庭湖区淤积量有所减少，约为 0.60 亿 t。三峡水库蓄水运用以来，由荆江三口进入洞庭湖的泥沙进一步大幅减少，年均输沙量仅 956 万 t，同期四水来沙量减为 816 万 t，这期间年均入湖沙量小于年均出湖沙量，因此洞庭湖区总体表现略有冲刷(表 5)。可以预见，未来洞庭湖区会因荆江三口与四水的来沙量之和与洞庭湖出口输沙量相比，或稍有富余或相当或略有不足，相应洞庭湖区表现为微淤、相对平衡或微冲，总体而言，洞庭湖区呈现微冲的几率会更大。

表 5 不同时段洞庭湖区泥沙淤积量(输沙量法)

时段(年份)	入湖沙量/万 t			出湖沙量/万 t	湖区冲淤/万 t
	三口	四水	入湖总量		
1955—1966	19 593	2 917	22 510	5 961	16 549
1967—1980	12 130	3 844	15 974	4 442	11 532
1981—1990	10 727	2 620	13 347	3 209	10 138
1991—2002	6 842	1 578	8 420	2 427	5 993
2003—2015	956	816	1 772	1 929	-157

注：“-”表示冲刷。

**3.3 鄱阳湖冲淤变化** 鄱阳湖为吞吐型湖泊，除了承接以五河为主的来水来沙外，有时会出现长江水沙倒灌的现象。三峡水库蓄水运用前，五河年均入湖沙量 1 425 万 t，出湖沙量 991 万 t，在不含“五河”控制水文站以下水网区入湖沙量的情况下，湖区年均淤积泥沙 434 万 t。三峡水库蓄水运用后的 2007—2016 年“五河”年均入湖沙量 597.9 万 t，出湖沙量明显增多，达到 1 100 万 t，超过自然条件下的出湖沙量，这可能与湖区及入江水道的采砂<sup>[25]</sup>、江湖水沙交换过程发生变化等有关。未来随着鄱阳湖水系水库工程建设与水土保持工程的进一步实施，进入湖区的沙量还会进一步减少，因此鄱阳湖的泥沙淤积会进一步减轻或转为冲刷。

## 4 水沙变化条件下中下游江湖演变主要特点

长江中下游江湖演变关系到防洪、航运、河势、岸线利用与保护、水生态环境等诸多方面，以往通过原型资料分析、理论分析、实体模型试验与数值模拟等多种手段开展过江湖演变特性研究，取得丰富研究成果。近年来，中下游江湖系统的来水来沙条件、河道边界条件、人类活动干扰强度等均发生较大变化，江湖演变呈现新特点，需要在以往研究成果的基础上，结合最新资料，深入对水沙变化条件下中下游江湖演变规律的认识。

### 4.1 干流河道演变特点

**4.1.1 长距离不平衡输沙特性** 三峡入库泥沙大幅度减少，同时三峡水库的拦沙作用显著，使水库下泄的水流含沙量很低，下游河道将面临严重不饱和含沙水流的长期持续冲刷，沿程沙量会得到一定程度的补给，但因受到中下游河道形态的复杂性、河床组成的差异性、悬移质泥沙级配的不同、

沿程支流水系的入汇等因素的影响,沿程泥沙冲刷补给较为复杂。已有资料分析与研究表明,水库下游河床冲刷、沙量恢复过程中,各粒径组输沙量均不会超出建库前水平<sup>[26]</sup>;水库下游发生长距离冲刷的主要原因是床沙补给不足,尤其是细沙补给严重不足<sup>[27]</sup>;三峡水库下游低流量级与高流量级含沙量恢复速度较快,而中水流量级含沙量恢复速度较慢<sup>[28]</sup>。

三峡水库运用后下泄的不同粒径组沙量均大幅度减少,但由于水库下游河床组成中不同粒径沙量的不同,悬移质不同粒径组沙量恢复速率与距离均截然不同,水库下游河道 $d>0.125\text{ mm}$ 粒径沙量在监利站附近基本接近恢复饱和,而水库下游发生长距离冲刷的主要原因是 $d<0.125\text{ mm}$ 的泥沙补给不足。考虑到长江上游干支流水库的陆续建设与运行,三峡水库入库与下泄的沙量均在相当长的时期内保持较低水平,水库下游河道会因此而出现长时期、长距离的冲刷,水库下游水流输沙量因河床冲刷补给而增加,其中悬移质中粗颗粒部分因河床中大量存在,补给的距离短、恢复程度高,但细颗粒因河床中所占比例低,补给的距离长、恢复程度相对较低。

4.1.2 河道演变特点 60多年来,长江中下游河道实施了大量的护岸工程与河(航)道整治工程,增强了河道边界的稳定性与抗冲性,限制了河道横向变形范围与幅度,有效控制了河道的总体河势,但受长江干支流水库建设运行、水土保持工程的实施、降雨分布等因素影响,进入中下游的水沙条件发生了较大变化,河道演变呈现新的特点<sup>[1, 29-30]</sup>。

三峡水库单独运行下数学模型计算预测表明,中下游河道将在相当长的时期内会维持总体冲刷状态,而且冲刷随时间会自上向下发展,最终达到相对平衡状态,总体冲淤规律为“冲刷-回淤-相对平衡”(图2)<sup>[31]</sup>。三峡水库运用以来,中下游干流河道由总体冲淤基本平衡转为总体持续冲刷,而且呈现冲刷强度大、发展速度快、冲刷距离长等特点。2002—2016年,宜昌至湖口河段基本河槽累计冲刷量为 $20.07\text{ 亿 m}^3$ ,尤其是2012年以来,城陵矶至湖口的冲刷强度与冲刷量均明显增大,这主要与三峡水库下泄沙量的进一步减少、河道冲刷自上向下发展、区间来水过程及来水量大小等有关。考虑到长江干支流水库群的建设运行、水土保持工程的逐步实施,人类活动的影响程度会持续增强,进入中下游江湖系统的泥沙量会在长时间维持在较低水平。因此,在相当长时间内中下游河道会出现持续冲刷,冲刷发展过程与中下游江湖系统来水过程与组成、沿程泥沙补给条件、河道形态及河床组成等有关。

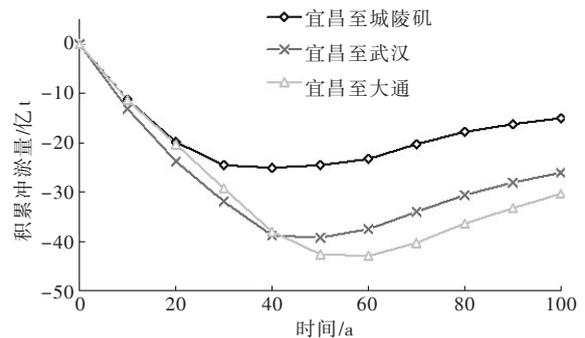


图2 三峡水库下游河道冲淤计算预测结果

宜昌至枝城近坝段受三峡水库蓄水影响时间最早,其砂卵石河床冲刷粗化速度快,伴随河床冲刷,床沙粗化明显,床沙 $d_{50}$ 由2003年11月的 $0.638\text{ mm}$ 增大到2012年10月的 $23.59\text{ mm}$ ,根据泥沙起动公式计算,在水深为 $3\sim 20\text{ m}$ 范围内,其起动流速由 $0.61\sim 0.84\text{ m/s}$ 增加为 $1.32\sim 1.81\text{ m/s}$ ,由此可看出本河段河床的抗冲性随床面粗化而明显增强,河道的冲刷幅度会随河床的进一步冲刷粗化而逐渐减小,渐趋于冲淤相对平衡的状态。

三峡水库运用后,中下游河道尽管总体持续冲刷发展,但受河势控制工程、河(航)道整治工程及护岸工程边界条件的制约,总体河势基本稳定可控,但局部河段河势仍出现较大调整,部分河段因河势调整或近岸岸坡冲刷变陡而发生崩岸,弯道凸岸边滩与单一河段的高程较低的边滩因低含沙水流的长期作用而出现累积性冲刷,断面形态向偏“U型”或“U型”或“W型”方向调整(图3);七弓岭等过度弯曲的弯道,凸岸河床冲刷过程中发生切滩撇弯(图4)。

三峡水库下泄水流含沙量大幅度减小,有利于分汊河道总体冲刷,但具体到不同亚类的分汊河道影响会不同。分汊河道演变对来沙减少的响应主要表现为滩槽演变幅度总体会有所减小,分流区在遵循“洪淤枯冲”规律的基础上总体偏向冲刷,短汊因阻力小发展占优,距离大坝越近的分汊河道受其影响越大。城陵矶以下分汊河道主汊基本比支汊短,三峡水库运用10余年来主要汊道段的冲淤也表现出短(主)汊发展占优的演变规律。

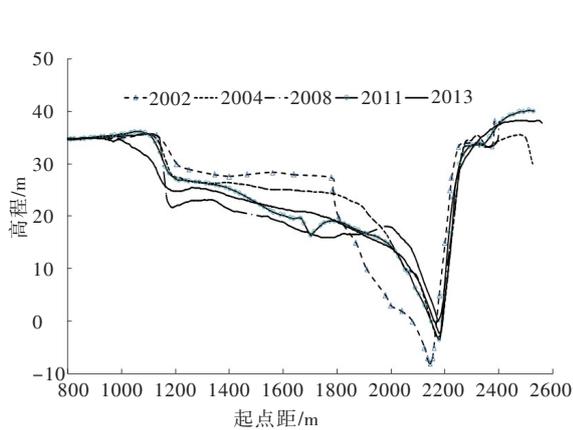


图3 下荆江调关弯道段典型横断面冲淤变化

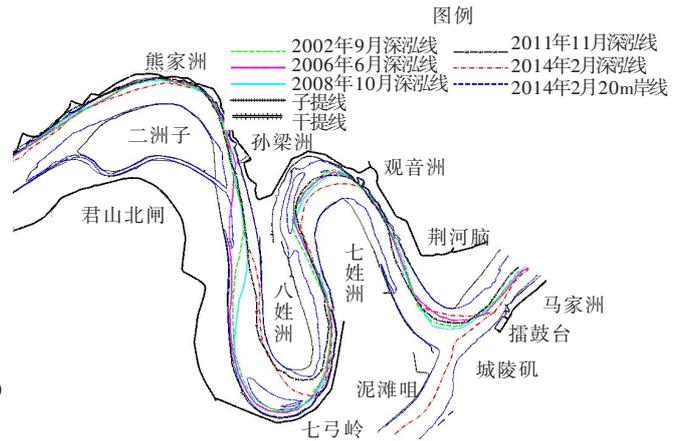


图4 熊家洲至城陵矶段深泓线平面变化

**4.2 洞庭湖与鄱阳湖主要演变特点** 自然条件下，洞庭湖区的来沙量大，泥沙淤积较为严重，1955—1990年期间，湖区年均淤积泥沙量约1.28亿t，累积淤积46.14亿t。湖区泥沙绝大多数淤积在东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖这三块水域较宽的部位，约占总淤积量的90%以上，其中，东洞庭湖淤积总量约占50%以上<sup>[32]</sup>。三峡水库运用以来，进入中下游河道的沙量大幅减少，尤其是2013年以来，宜昌站的来沙量减为自然条件下的2.6%，通过荆江三口分流进入湖区的泥沙也大幅减少，加之四水的来沙也逐渐减少并维持在较低水平，因此洞庭湖区在未来相当长时间内进、出沙量可基本保持相对平衡或出现微冲。近期冲刷主要是因为长江上游水库蓄水引起湖区出口水位快速下降而导致湖区出口段的比降加大、流速增加而引起湖区出口段的冲刷，未来冲刷有可能溯源向湖区发展。

三峡水库蓄水运用前，荆江三口洪道处于淤积状态，其淤积速率与荆江三口分沙量有关，分沙量越大，淤积越严重。1952—2003年三口洪道共淤积泥沙6.52亿m<sup>3</sup>(年均淤积泥沙0.13亿m<sup>3</sup>)，其中：松滋河淤积1.71亿m<sup>3</sup>，占淤积总量的26.2%；虎渡河淤积0.86亿m<sup>3</sup>，占淤积总量的13.2%；松虎洪道淤积0.43亿m<sup>3</sup>，占淤积总量的6.6%；藕池河淤积3.51亿m<sup>3</sup>，占淤积总量的53.9%。三峡水库蓄水运用后，三口洪道河床出现了一定的冲刷。2003—2011年三口洪道洪水河槽总冲刷量为0.75亿m<sup>3</sup>。其中：松滋河总冲刷量为0.35亿m<sup>3</sup>，占三口洪道总冲刷量47%；虎渡河冲刷量为0.15亿m<sup>3</sup>，占总量的20%；松虎洪道冲刷量为0.074亿m<sup>3</sup>，占总量的10%；藕池河总冲刷量为0.18亿m<sup>3</sup>，占总量的23%。考虑到宜昌站的来沙量在相当长时期内会维持在很低水平，三口分洪道也会在一定时期内维持冲刷状态，但冲刷幅度会小于干流河道。

鄱阳湖五河来沙量相对较少，自然条件下年均淤积量不大。来沙主要淤积在水网区的分支口、扩散段、弯曲段凸岸和湖盆区的东南部、南部、西南部的各河入湖扩散区。在水网区河道的淤积表现为中洲(心滩)、浅滩、拦门沙等形态，在湖盆表现为扇形三角洲、“自然湖堤”等形态。从年内冲淤规律来看，鄱阳湖4月之前为河相，比降较大，流速相对较快，且五河处于涨水阶段，入湖流量增加，流域来沙能顺利通过鄱阳湖进入长江，主要冲刷主航道附近的淤积泥沙，出湖沙量大于入湖沙量；4月开始，五河进入汛期，流域入湖的水、沙骤增，湖水位升高，洲滩逐渐淹没，鄱阳湖呈湖相景观，比降减小，流速减缓，泥沙落淤，出湖沙量小于入湖沙量；7月之前长江水位不高，五河流量大，虽然湖内大量淤沙，但出湖沙量的比重仍较大；7—9月为长江干流汛期，湖水受顶托或发生江水倒灌，入湖泥沙大部分淤积在湖内，江沙倒灌则更增加泥沙淤积幅度；10月以后，湖水随长江洪水退落而泄量增加，洲滩逐渐显露，鄱阳湖再成河相，湖区泥沙开始冲刷。可见，鄱阳湖泥沙年内冲淤变化规律一般为低水冲、高水淤。三峡水库蓄水运用以来，主要是蓄水期减少下泄流量，湖口水位会相应降低，会提前并加速湖区水体外泄，有利于湖区及入江水道的输沙与冲刷。

**4.3 江湖关系变化** 三峡工程运用以来，入洞庭湖悬移质沙量多年平均(2003—2015)仅为1772万t，经由城陵矶输出沙量为1929万t，年均冲刷量为157万t，洞庭湖区出现自然条件下的累积性大量淤积转变为三峡水库运用以来的轻微淤积或冲刷。随着人类活动的继续作用及自然因素的影响，洞庭

湖四水入湖水量不会明显变化，入湖沙量将进一步减少，在相当长时期内，荆江三口入湖的水沙量将持续减少并维持在较低水平，江湖关系会随着江湖水沙交换过程的变化而持续发生调整，荆江三口洪道会因冲刷而维持高水的分流能力，洞庭湖会因来沙减少而维持湖容，这些对洞庭湖调蓄能力的保持和防洪大为有利。

通过采用数学模型的还原计算表明，三峡工程蓄水运用以来，2006—2009年洞庭湖出口七里山站在汛前水库预泄期水位平均抬高0.31~0.65 m，最大抬高0.40~1.12 m；汛后水库蓄水期水位平均下降0.69~1.28 m，最大下降1.26~2.64 m，水位降低影响时间为50~78 d。湖区其它各站，越往上游水位影响越小<sup>[33]</sup>。

三峡水库运用以来，受水库蓄水和自然因素的双重影响，鄱阳湖区枯水位出现新的变化，不仅枯水出现时间大幅提前，枯水持续时间显著延长，而且湖区控制站普遍出现历史最低水位(表6)。受长江干流水位降低引起溯源冲刷及采砂影响，鄱阳湖入江水道河床下切明显，15 m水位以下断面面积明显增大。2012年与2002年相比，当湖口站水位分别为6、8和10 m时，星子站水位分别降低1.05、0.54和0.20 m。考虑到长江上游水库的调度运行方式，对鄱阳湖出口湖口站水位的影响会是常态，湖口站水位的快速退落会加大鄱阳湖入江水道的比降，增加入江水道的流速，可能会引起入江水道的冲刷，并溯源向湖区发展，有利于维持鄱阳湖的湖容，这对鄱阳湖调蓄能力的保持和防洪大为有利。

根据数学模型的还原计算，三峡工程蓄水运用以来，2006—2009年鄱阳湖出口湖口站在三峡水库汛前预泄期水位平均抬高0.14~0.31m，最大抬高0.18~0.61 m；水库蓄水期水位平均下降0.38~0.74 m，最大下降0.74~1.78 m，水位降低影响天数为49~76 d，湖区其它各站，越往上游水位影响越小<sup>[33]</sup>。

表6 鄱阳湖各站9月至次年3月月平均水位变化<sup>[34]</sup>

测站	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
湖口	-0.80	-2.20	-1.60	-0.54	0.25	0.38	0.67
星子	-0.80	-2.17	-1.64	-0.77	-0.40	-0.55	-0.22
都昌	-0.81	-2.14	-1.67	-1.12	-1.03	-1.06	-0.60
棠荫	-0.77	-1.81	-1.05	-0.64	-0.63	-0.38	-0.05
康山	-0.52	-1.27	-0.58	-0.29	-0.32	-0.29	-0.08

注：表中数值为2003—2012年系列月平均值减去1956—2002年系列月平均值。

## 5 需要进一步研究的课题

随着经济社会的快速发展，人类活动对长江水沙、江河湖库演变的影响越来越强烈，且持续时间长，长江流域江、湖、库、河口等系统进入剧烈调整的时期，必将对河流功能的充分发挥产生影响。因此，需要借助新的理论、方法与技术手段从整体与局部、近期与远期、宏观与微观、理论与实践等多角度动态开展长江流域水沙变化趋势、江河湖库的演化和平衡状态及其影响与调控策略等重大问题的深入研究。一是长江流域水沙变化趋势研究，重点研究来水来沙的主要影响因素及其权重、干支流来水来沙变化趋势；二是自然变化与人类活动影响双重因素驱动下江河湖库的演化和平衡状态及其影响研究，重点研究新水沙条件下江河湖库的演变机理与趋势、江湖关系变化趋势及长江口演变机理与趋势，以及对长江防洪、航运、岸滩利用、水环境与水生态等影响；三是长江泥沙调控研究<sup>[35]</sup>，重点研究满足河流多功能需求的干支流水库群泥沙调控理论、技术和方案，长江河道和航道整治工程适应性与整治新技术，江湖复杂水系闸控工程联合调控技术与方案，泥沙资源化配置理论、方法与技术，长江口综合整治技术与方案等。

## 6 结论

受自然因素变化与人类活动不断增强的双重影响，特别是长江干支流水库的建设运行，长江的

径流与输沙过程发生了一系列变化,进入长江中下游江湖系统的水沙条件也随之变化,尤其是来沙条件发生了显著变化,引起江湖系统水沙输移、冲淤演变及江湖关系等发生新的变化,呈现新的特点。主要认识如下:(1)在长江干支流水库群的联合作用下,长江中下游江湖系统的径流量及比例组成没有明显变化,但径流过程因水库的调蓄发生一定的变化,输沙量及比例组成发生显著变化,长江干流宜昌站的来沙量剧减,中下游主要支流水系的来沙量虽然也有所减少,但减幅相对要小,占比增加。(2)长江中下游河道由自然条件下的中沙河流变为少沙河流,江湖系统由自然条件下的累积性淤积转为持续冲刷,江湖系统会在较长时间内进行重新塑造与调整。三峡水库运用以来宜昌至湖口河段累计冲刷约20亿 $m^3$ ,中下游干流河道的总体河势基本稳定可控,但局部河段河势调整仍较为剧烈,近岸河床冲刷会增加崩岸风险。(3)水库群的联合作用对江湖水沙交换与湖区冲淤产生影响,主要表现为,荆江三口分流入湖的径流量与输沙量均有所较少,长江与两湖汇流区域水沙交换过程发生新的变化并将常态化,两湖枯水期有所提前,湖区泥沙沉积率显著下降,甚至有可能出现微冲,江湖关系总体趋于向好的方向调整。(4)鉴于水沙条件的不确定性,人类活动影响的加剧与江湖系统演变的复杂性,仍须加强变化环境下长江流域水沙变化趋势、自然变化与人类活动影响双重因素驱动下江河湖库的演化和平衡状态及其影响与泥沙调控研究。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 余文畴,卢金友.长江河道演变与治理[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [ 2 ] 长江勘测规划设计研究有限责任公司.长江流域第一次全国水利普查水利工程普查成果报告[R].2013.
- [ 3 ] 卢金友.三峡工程运用初期坝下游江湖响应过程[M].北京:科学出版社,2012.
- [ 4 ] 曹广晶.长江三峡工程水文泥沙观测与研究[M].北京:科学出版社,2015.
- [ 5 ] 胡春宏.三峡工程泥沙运动规律与模拟技术[M].北京:科学出版社,2017.
- [ 6 ] 李义天.长江中下游河道演变与航道整治[M].北京:科学出版社,2012.
- [ 7 ] 仲志余.三峡工程运用后泥沙与防洪关键技术研究[M].武汉:长江出版社,2012.
- [ 8 ] 姚仕明,卢金友.三峡水库蓄水运用前后坝下游水沙输移特性研究[J].水力发电学报,2011,30(3): 117-123.
- [ 9 ] 王延贵,刘茜,史红玲.长江中下游水沙态势变异及主要影响因素[J].泥沙研究,2014(5): 38-47.
- [ 10 ] 长江水利委员会水文局.2016年度三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷分析[R].2017.
- [ 11 ] LI Q F, YU M X, LU G B, et al. Impacts of the Gezhouba and Three Gorges reservoirs on the sediment regime in the Yangtze River, China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 403: 224-233.
- [ 12 ] 郭小虎,李义天,渠庚,等.三峡工程蓄水后长江中游泥沙输移规律分析[J].泥沙研究,2014(5): 11-17.
- [ 13 ] ZHANG Wei, YANG Yunping, ZHANG Mingjin, et al. Mechanisms of suspended sediment restoration and bed level compensation in downstream reaches of the Three Gorges Projects(TGP)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4): 463-480.
- [ 14 ] 长江防汛抗旱总指挥部办公室.三峡水库试验蓄水期综合利用调度研究[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [ 15 ] 郭小虎,姚仕明,晏黎明.荆江三口分流分沙及洞庭湖出口水沙输移的变化规律[J].长江科学院院报,2011,28(8): 80-86.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 长江水利委员会.长江泥沙公报(2016)[M].武汉:长江出版社,2017.
- [ 19 ] 彭俊.1950年以来鄱阳湖流域水沙变化规律及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(10): 1751-1761.
- [ 20 ] 刘志刚,倪兆奎.鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响[J].环境科学学报,2015,35(5): 1265-1273.
- [ 21 ] 罗蔚,张翔,邓志民,等.1956-2008年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析[J].水科学进展,2014,25

- (5): 658-667.
- [ 22 ] 李微, 李昌彦, 吴敦银, 等. 1956-2011年鄱阳湖水沙特征及其变化规律分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 832-838.
- [ 23 ] 李景保, 尹辉, 卢承志, 等. 洞庭湖区的泥沙淤积效应[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 487-496.
- [ 24 ] 宋平, 方春明, 黎昔春, 等. 洞庭湖泥沙输移和淤积分布特性研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 130-134.
- [ 25 ] 朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 348-357.
- [ 26 ] 李义天, 孙昭华, 邓金运. 论三峡水库下游的河床冲淤变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3): 283-295.
- [ 27 ] 陈飞, 李义天, 唐金武, 等. 水库下游分组沙冲淤特性分析[J]. 水力发电学报, 2010, 9(1): 164-170.
- [ 28 ] 沈磊, 姚仕明, 卢金友. 三峡水库下游河道水沙输移特性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(5): 75-82.
- [ 29 ] 姚仕明, 卢金友. 长江中下游河道演变规律及冲淤预测[J]. 人民长江, 2013, 44(23): 22-28.
- [ 30 ] 姚仕明, 岳红艳, 何广水, 等. 长江中游河道崩岸机理与综合治理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [ 31 ] 卢金友, 黄悦, 官平. 三峡工程运用后长江中下游冲淤变化[J]. 人民长江, 2006, 37(9): 55-57.
- [ 32 ] 卞鸿翔, 龚循礼. 洞庭湖区围垦问题的初步研究[J]. 地理学报, 1985, 40(2): 131-139.
- [ 33 ] 长江水利委员会长江科学院, 长江水资源保护科学研究所, 等. 三峡工程蓄水运用对长江与洞庭湖、鄱阳湖关系及湖区生态环境影响初步研究总报告[R]. 2010.
- [ 34 ] 徐照明, 胡维忠, 游中琼. 三峡水库运用后鄱阳湖区枯水情势及成因分析[J]. 人民长江, 2014, 45(7): 18-22.
- [ 35 ] 卢金友, 刘兴年, 姚仕明. 长江泥沙调控与干流河床演变及治理中的关键科学技术问题与预期成果展望[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2017, 49(1): 33-40.

## Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups

LU Jinyou, YAO Shiming

(Key Laboratory of River Regulation and Control of Ministry of Water Resources,  
Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The total capacity of group reservoirs along the Yangtze River and its tributaries is about 37.6 % of the annual runoff of the Yangtze River. The combination of the group reservoirs has changed the water and sediment conditions of the rivers and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. This has in turn changed the water flow and sediment transport, erosion and deposition and the relationship between rivers and lakes, which are the focus of this study. The results show that, under the combined effect of group reservoirs, the runoff and the proportion of the middle and lower reaches of the rivers and lakes has no significant change, however, the sedimentation rate and proportion composition has significantly changed, particularly in Yichang station. The middle and lower reaches of the Yangtze River transfer from high sediment concentration under natural conditions to low sediment concentration, while the deposition in rivers and lakes transfers from cumulative under the natural condition to continuous erosion and it will undergo adjustment in a longer period. The combined effect of the group reservoirs on water flow and sediment exchange, scouring and deposition in lakes causes the earlier arrival of the dry season in the Dongting Lake and Poyang Lake, great decrease of the sediment deposition rate in lakes and the overall relationship between the rivers and lakes tending towards to improvement. Due to the uncertainty of the changes of flow and sediment conditions in the Yangtze River, the human activities and the complexity of the evolution of the rivers and lakes system, it is necessary to further investigate the response mechanism of the middle and lower reaches of the rivers and lakes in the future.

**Keywords:** group reservoirs; flow and sediment conditions; the relationship between the river and lakes; the evolution of the river and lakes

(责任编辑: 韩 昆)