

三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响^{*}

许全喜¹, 董炳江^{2**}, 袁晶², 朱玲玲²

(1: 长江水利委员会规划计划局, 武汉 430010)

(2: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

摘要: 三峡及其上游干支流梯级水库建成运用后, 大坝下游“清水下泄”引起了长江中下游河道发生长时间、长距离的冲刷。2001—2021 年期间宜昌至长江口已累计冲刷了 50.3 亿 m³, 需厘清河道冲刷对河势、防洪、航运等方面产生影响。分析表明: 三峡工程运用后, 长江中下游河势总体稳定, 弯道段出现切滩撇弯、汊道段出现塞支强干等现象; 河道槽蓄量的持续增加, 进一步增大了河道调蓄和行洪能力, 但水流顶冲点的变化和近岸河床的冲刷下切, 使得河道崩岸频发, 并影响河势稳定和防洪安全; 在河道冲刷、河势控制与航道工程综合作用下, 长江中下游航道条件总体得到改善, 但河道不均衡冲刷使得坝下游砂卵石河段出现“坡陡流急”, 沙质河段出现洲滩散乱、航槽移位等现象, 影响航道条件; 同流量下枯水位呈下降态势, 逢极枯年份影响长江中下游用水安全; 湖江关系发生新变化, “三口”分流水道由原淤积转为冲刷, 两湖湖区水位不同程度的降低, 枯水位出现时间有所提前, 不利于湖区水资源和生态环境的安全与可持续发展; 三峡工程实施枯水期补水调度和“压咸潮”调度以及长江口北支淤积减缓, 对于遏制长江口咸潮入侵有利, 入海泥沙显著减少引起长江口近岸河床冲刷, 影响沿岸码头的安全运行。

关键词: 三峡工程; 长江中下游; 水沙变化; 河道冲淤; 河势变化; 防洪安全; 湖江关系

Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project^{*}

Xu Quanxi¹, Dong Bingjiang^{2**}, Yuan Jing² & Zhu Lingling²

(1: Planning Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

(2: Hydrology Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: After the construction of cascade reservoirs in the Three Gorges and its upper reaches, the downstream clear water of the dam was discharged, and a long-term and long-distance erosion occurred in the middle and lower reaches of the Yangtze River. From Yichang to the Yangtze Estuary, a total of 5030 million m³ was scoured. Under the background of large-scale erosion in the middle and lower reaches of the Yangtze River, it has a profound impact on river regime, flood control and shipping. The analysis shows that the river regime in the middle and lower reaches of the Yangtze River is generally stable, and the river regime in some parts of the river changes greatly, resulting in the phenomenon of beach cutting and bending, and the phenomenon of strong trunk. The increase of channel storage capacity increases the capacity of river discharge and flood storage, but the change of flow top scour point and the erosion of nearshore riverbed also make the river bank collapse frequently, affecting the stability of river regime and flood control safety. Under the combined action of channel scour, river regime control and channel engineering, channel conditions in the middle and lower reaches of the Yangtze River improved overall. However, due to the unbalanced scouring of the river channel, the sandy pebble river section in the downstream of the dam has a ‘steep slope and rapid flow’, and the sandy river section has phenomena such as scattered beaches and channel displacement, affecting the channel conditions; the continuous erosion of river bed results in the decrease of low water level, which affects the water supply safety of life, production and ecology along the middle and lower reaches of the Yangtze River in extremely dry years. The relationship between rivers and lakes has undergone new

* 2022-10-24 收稿; 2022-11-29 收修改稿。

国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240206)、江苏省水利科技项目(2020001)和三峡水库科学调度关键技术研究项目(0704198)联合资助。

** 通信作者; E-mail: 68090912@qq.com。

changes. The three diversion channels have changed from original siltation to erosion. The water levels in the two lakes have decreased to varying degrees, and the low water level has appeared earlier, which has adversely affected the water resources and ecological environment in the lake area. The regulation of water replenishment and saltwater intrusion in dry season of the Three Gorges Project and the slowing down of siltation in the north branch are beneficial to the control of saltwater intrusion in the Yangtze Estuary. The sediment discharged into the sea from the Yangtze Estuary is significantly reduced and the riverbed near the Yangtze Estuary is scoured strongly. It seriously threatens the safety of the main structure of coastal enterprise wharf.

Keywords: Three Gorges Project; the middle and lower reaches of the Yangtze River; water and sediment changes; river scouring and silting; river regime change; flood control safety; river-lake relation

大型水库建成运行后,坝下游河道的水沙条件将发生显著改变,下游河道相对平衡的状态将被打破,河道将通过河床的冲淤变化来适应新的水沙条件,从而建立新的平衡过程,河道调整将引起河势变化甚至河型转化,对河流功能的发挥产生巨大影响^[1]。

2003年6月三峡工程运用后,其防洪、发电、航运等综合效益开始逐步发挥,其影响深远,意义重大^[2]。受长江上游干支流水利水电工程建设、“长治工程”、“天保工程”和退耕还林工程等逐步实施和降雨变化等影响,长江上游水沙条件发生了显著变化^[3],三峡水库入、出库泥沙均显著减少,2003—2021年年均入库输沙量1.48亿t,较1950—1990年和1991—2002年均值分别减少了69.2%和57.8%,坝下游宜昌站年平均输沙量较蓄水前(1950—2002年)减少了93%(宜昌站年均含沙量由蓄水前的1.13 kg/m³减少至0.08 kg/m³),特别是金沙江下游溪洛渡、向家坝等水电站运用后,三峡年均入库输沙量进一步减少为0.865亿t,年均出库泥沙也仅为0.175亿t。由于三峡入、出库水沙条件与三峡工程论证和初步设计阶段发生了明显变化,河道采砂、河(航)道整治工程增多和三峡水库调度运用方式变化,长江中下游河道冲刷强度、范围和发展速度均大于原论证预测结果^[4-5],三峡水库蓄水运用以来近20年时间,“清水下泄”导致长江中下游长约1893 km的干流河道发生全线冲刷,冲刷范围已发展至长江口河段,且冲刷强度明显增强。随着河床剧烈、频繁的冲淤调整,对长江中下游地区的防洪、河势、航运、生态环境等产生了深刻影响^[6]。众多学者对三峡蓄水以来坝下游冲刷以及某些方面的影响进行了研究,取得了丰富的成果,如胡春宏等^[7]分析研究了坝下游河道冲刷和水位下降对洞庭湖和鄱阳湖的分流分沙的影响;卢金友等^[8]分析了水库群联合作用下的三峡坝下游河道冲刷对长江中下游江湖关系响应机制,指出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;姚仕明等^[9]分析了三峡蓄水后长江中下游干流河道冲淤变化下的河道演变新特点;徐照明等^[10]分析了长江中下游河道冲淤演变、以及河道槽蓄变化对长江防洪的影响,杨云平等^[11]分析坝下游冲刷下的河道悬沙恢复和床沙补给机制。

本文系统收集长江中下游长系列的实测水沙资料和河道地形资料,深入分析三峡工程运用以来长江中下游水沙变化和河道冲淤特征,试图较为全面、深入地研究河槽大幅冲刷背景下对长江中下游河势调整、防洪安全、航道条件、沿江取水、江湖关系、长江河口等诸多方面的影响,研究成果可为大型水库运行对坝下游的影响研究提供参考。

1 研究区域

本文主要研究对象为长江中下游干流河道和洞庭湖、鄱阳湖,长江中下游干流河道上起宜昌、下迄长江河口原50号灯标,全长约1893.0 km(图1)。

从宜昌至湖口为长江中游,长约955.0 km,其中:宜枝河段长约60.8 km,是山区性河流向平原性河流的过渡段,两岸为低山丘陵地貌,抗冲能力强,河床组成较粗;荆江河段长约347.2 km,以藕池口为界,可分为上荆江与下荆江,上荆江长约171.7 km,河道内弯道较多,弯道内有江心洲,属微弯河型,下荆江长约175.5 km,为蜿蜒型河道,河床演变剧烈;城陵矶至湖口段长547.0 km,为宽窄相间的藕节状分汊型河道;上承荆江和洞庭湖来水,下受鄱阳湖顶托,河道两岸分布有疏密不等的节点控制着总体河势。

湖口以下为长江下游,长约938.0 km,为宽窄相间、江心洲发育、汊道众多的藕节状分汊型河道,其中:湖口至大通段长约228.0 km;大通至江阴段长约431.4 km,属感潮河段;江阴至徐六泾即澄通河段,长约96.8 km;徐六泾至河口外原50号灯标为长江河口段,长约181.8 km,河段内徐六泾至连兴港为北支、徐六泾至吴淞口为南支。

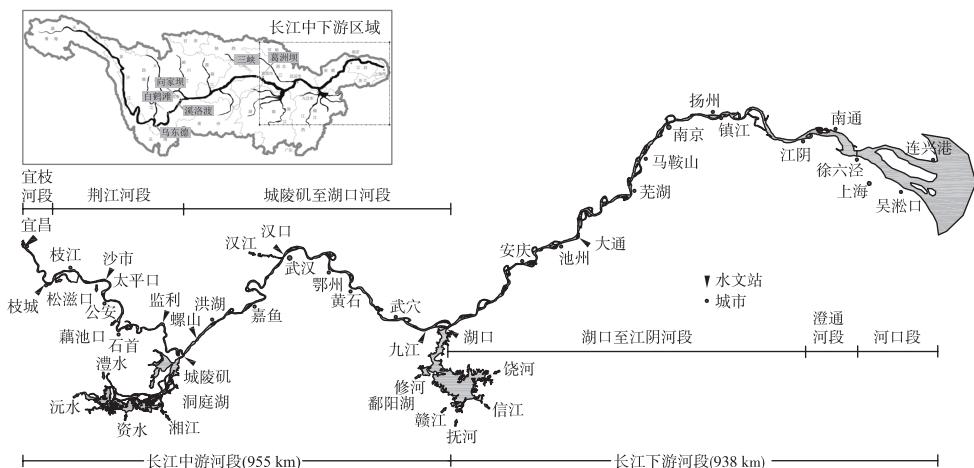


图 1 长江中下游河道示意图

Fig.1 Schematic diagram of middle and lower reaches of Yangtze River

2 长江中下游干流水沙变化

三峡水库蓄水前(1950—2002年),长江游宜昌、沙市、汉口和大通站多年平均径流量分别为4369亿、3942亿、7111亿和9052亿 m^3 ,输沙量分别为4.92亿、4.34亿、3.98亿和4.27亿t。三峡水库蓄水后,2003—2021年长江中下游各站除监利站水量较蓄水前偏丰6%外,其它各站水量偏枯1%~4%。由于长江上游来沙偏少和梯级水库拦沙作用,长江中下游干流各站输沙量大幅减小,减幅沿程递减。三峡工程运用后,2003—2021年宜昌、沙市、汉口和大通站年均输沙量分别为0.337亿、0.504亿、0.950亿和1.32亿t,较蓄水前分别减少93%、88%、76%和69%;三峡水库175m试验性蓄水以来,2009—2021年均输沙量较蓄水前分别减少96%、92%、80%和71%。值得注意的是,金沙江下游溪洛渡、向家坝水电站蓄水运用以来,三峡水库出库沙量进一步减少,2013—2021年宜昌站年均输沙量仅为0.175亿t,较2003—2012年减少了26%。长江中下游主要水文站径流量和输沙量与多年平均对比见表1,径流量、年输沙量历年变化过程见图2。

表 1 长江中下游主要水文站径流量和输沙量与多年平均对比

Tab.1 Comparison of runoff and sediment discharge of main hydrological stations in middle and lower reaches of Yangtze River with annual average

项目	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
径流量/ ($\times 10^8 m^3$)	2002年前*	4369	4450	3942	3576	6460	7111
	2003—2008年	3978	4064	3750	3601	5866	6686
	2009—2021年	4326	4425	4014	3896	6435	7083
	2003—2021年	4216	4311	3931	3803	6255	6958
输沙量/ ($\times 10^4 t$)	2002年前*	49200	50000	43400	35800	40900	39800
	2003—2008年	6090	7460	8570	9770	11000	12500
	2009—2021年	2110	2500	3400	5290	7060	8130
	2003—2021年	3370	4070	5040	6700	8310	9500
含沙量/ (kg/m^3)	2002年前*	1.130	1.120	1.100	1.000	0.633	0.560
	2003—2008年	0.153	0.184	0.229	0.271	0.188	0.187
	2009—2021年	0.0488	0.0565	0.0847	0.136	0.11	0.115
	2003—2021年	0.0799	0.0944	0.128	0.176	0.133	0.137

* 2002年前统计年份:宜昌站为1950—2002年,枝城站为1955—2002年,沙市站为1955—2002年,监利站为1951—2002年,螺山站为1954—2002年,汉口站为1954—2002年,大通站为1950—2002年。

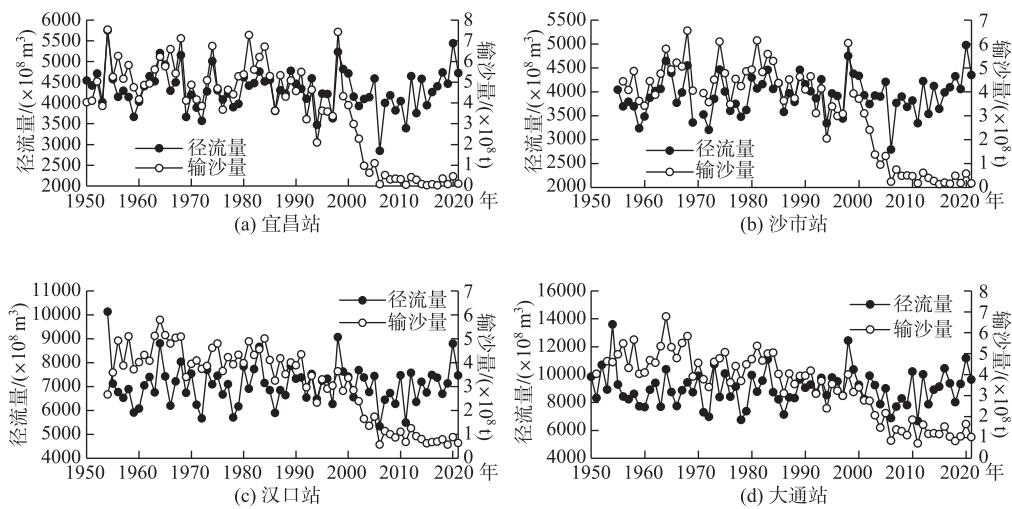


图2 长江中下游主要水文站年径流量、年输沙量历年变化过程

Fig.2 Annual variation process of runoff and sediment discharge of main hydrological stations in middle and lower reaches of Yangtze River

3 长江中下游河道冲淤变化分析

在三峡工程修建前的数十年中,长江中下游河床冲淤变化较为频繁,但河道总体冲淤相对平衡。三峡工程运用前,宜昌至湖口河段(1975—2002年)平滩河槽年均冲刷0.063亿 m^3 ,湖口至江阴河段(1975—2001年)年均淤积0.049亿 m^3 ,澄通河段(1977—2001年)0m以下河槽年均淤积0.001亿 m^3 ,长江口南支(1978—2001年)年均冲刷泥沙0.165亿 m^3 ,长江口北支(1984—2001年)则年均淤积泥沙0.243亿 m^3 。

三峡工程运用以来,大量泥沙拦蓄在库内,出库沙量大幅减少,导致长江中下游河道产生长距离、长历时的河床冲刷调整,累积冲刷量达到了50.3亿 m^3 (包含河道采砂和航道疏浚),年均冲刷2.55亿 m^3 。

3.1 长江中游河段

宜昌至湖口河段不同时期冲淤量对比如表2所示。三峡工程运用后,2002年10月至2021年4月,宜昌至湖口河段平滩河槽总冲刷量为26.2亿 m^3 ,年均冲刷量为1.35亿 m^3 。断面表现为滩槽均冲,冲刷主要集中在枯水河槽,其冲刷量占平滩河槽冲刷量的92%。在三峡工程围堰蓄水期(2002—2006年),河段普遍冲刷,宜枝河段冲刷强度最大;在三峡工程初期运用期(2006—2008年),河床略有冲刷;175m试验性蓄水以来(2008—2021年),坝下游河床冲刷强度明显增大,其年均冲刷泥沙1.67亿 m^3 ,大于围堰蓄水期的1.44亿 m^3 和初期蓄水期的0.045亿 m^3 ,其中以荆江河段冲刷强度最大。

值得注意的是,2014年以来三峡水库坝下游河道出现较强冲刷,宜昌至湖口河段2014—2021年的平滩河槽年均冲刷量达到了1.82亿 m^3 ,相较于2002—2013年的年均冲刷量偏大了41%。在特殊洪水年份,如2014、2016和2018年宜昌至湖口河段冲刷量明显增加^[12],分别达到了3.45亿、4.65亿和2.82亿 m^3 (图3)。

3.1.1 宜枝河段 宜枝河段冲刷主要集中在三峡工程运用后的前6年(2002—2008年),其冲刷量为1.04亿 m^3 ,年均冲刷量为0.173亿 m^3 ;175m试验性蓄水以来,宜枝河段平滩河槽年均冲刷量为0.049亿 m^3 (表2),河床冲刷强度为减弱态势。宜枝河段河床冲淤变化表明:三峡工程运用以来,近坝段表现为强冲刷态势,随着时间的推移,由于床面粗化及河床泥沙补给能力的减弱,河床冲刷强度逐渐降低,强冲刷区域逐渐向下游发展。

3.1.2 荆江河段 2002—2008年期间,荆江河段平滩河槽冲刷量为3.64亿 m^3 ,年均冲刷量为0.061亿 m^3 。三峡水库175m试验性蓄水以来,荆江河段平滩河槽累积冲刷量为12.7亿 m^3 ,年均冲刷量达1.01亿 m^3 ,河床冲刷强度为增加态势,其中上荆江的枝江河段和沙市河段年均冲刷强度分别达到25.8万、37.6万 m^3/km ,

表 2 不同时段宜昌至湖口河段平滩河槽冲淤量对比^{*}

Tab.2 Comparison of sediment scouring-deposition amount of bankfull channel from Yichang to Hukou in different periods

项目	时段 (年-月)	河段				
		宜昌—枝城	荆江	城陵矶—汉口	汉口—湖口	宜昌—湖口
河段长度/km		60.8	347.2	251.0	295.4	954.4
总冲淤量/ ($\times 10^4$ m ³)	1975—2002 年	-14400	-29804	10726	16607	-16871
	2002—10—2006—10	-8138	-32830	-5990	-14679	-61637
	2006—10—2008—10	-2230	-3569	197	4693	-909
	2008—10—2021—4	-6302	-90196	-44406	-58989	-199893
	2002—10—2021—4	-16670	-126595	-50199	-68975	-262439
年均冲淤强度/ ($\times 10^4$ m ³ / (km·a))	1975—2002 年	-8.8	-3.2	1.6	2.1	-0.7
	2002—10—2006—10	-33.5	-23.6	-4.8	-9.9	-15.1
	2006—10—2008—10	-18.3	-5.1	0.4	7.9	-0.5
	2008—10—2021—4	-8.0	-20.0	-13.6	-15.4	-16.1
	2002—10—2021—4	-14.4	-19.2	-10	-11.7	-14.1

* 表中冲淤结果均为地形断面法计算得到, 平滩河槽计算水位为 47.25 m(宜昌)~43.81 m(枝城)~34.47 m(藕池口)~23.55 m(城陵矶)~20.98 m(汉口)~15.47 m(湖口), 85 国家高程基准; 城陵矶至湖口河段 2002 年 10 月地形(断面)资料采用 2001 年 10 月资料; 宜昌至枝城河段 2021 年 4 月地形(断面)资料采用 2021 年 10 月资料。

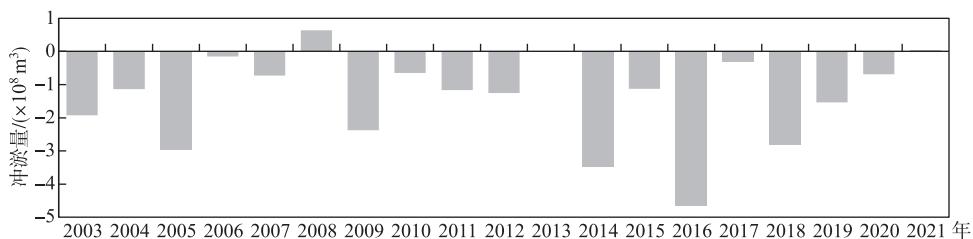


图 3 宜昌至湖口河段平滩河槽年际冲淤量变化过程(负值为冲刷,下同)

Fig.3 The annual variation process of sediment scouring-deposition amount of bankfull channel from Yichang to Hukou (negative value is scour, the same below)

显著高于宜枝河段, 进一步证实河床强冲刷区域已向下游发展。

3.1.3 城陵矶至湖口段 2001—2008 年期间, 城陵矶至湖口段冲刷量为 1.58 亿 m³, 年均冲刷量为 0.225 亿 m³。三峡水库 175 m 试验性蓄水以来, 河床冲刷明显加剧, 2008—2021 年河床累计冲刷量为 10.3 亿 m³, 年均冲刷量为 0.795 亿 m³。值得注意的是, 三峡工程运用后典型大洪水对城陵矶至湖口段河道冲刷明显, 如大水年 2016 年的河床冲刷量为 3.54 亿 m³, 远大于该河段三峡工程运用以来的年均冲刷量。

3.2 长江下游河段

3.2.1 湖口至江阴段 三峡工程运用以来, 湖口至江阴段整体以冲刷为主(表 3)。2001—2021 年期间, 湖口至江阴段平滩河槽累积冲刷泥沙 17.1 亿 m³, 年均冲刷量 0.656 亿 m³, 且冲刷主要集中在枯水河槽(占平滩河槽冲刷量的 86%)。从冲淤量的沿程特征来看, 2001—2021 年期间湖口至大通段、大通至江阴段的冲刷量分别占总冲刷量的 31% 和 69%。该河段冲刷强度有逐渐增加的趋势; 2016—2021 年的河床年均冲刷量是 1.06 亿 m³, 与蓄水初期 2001—2006 年年均冲刷量 0.461 亿 m³ 相比, 河床冲刷强度显著增大(表 3)。2020 年长江流域发生了三峡工程运行以来最大的洪水, 湖口至江阴段冲刷量为 2.64 亿 m³, 显著高于三峡工程运用以来的各时段(图 4)。

3.2.2 澄通河段 三峡工程运用以后, 澄通河段由蓄水前的微淤转为冲刷, 2001—2021 年澄通河段 0 m 高程以下河槽冲刷量为 6.17 亿 m³, 年均冲刷量为 0.309 亿 m³。

表3 不同时段湖口至江阴河段平滩河槽冲淤量对比

Tab.3 Comparison of sediment scouring-deposition amount of bankfull channel from Hukou to Jiangyin in different periods

项目	时段(年-月)	湖口—大通	大通—江阴	湖口—江阴
河段长度/km		228.0	431.4	659.4
总冲淤量 ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	1975—2001 年	17882	-5154	12728
	2001—2006—2006—10	-7986	-15087	-23073
	2006—10—2011—10	-7611	-38150	-45761
	2011—10—2016—10	-21569	-27109	-48678
	2016—10—2021—11	-15054	-38082	-53136
	2001—10—2021—11	-52220	-118428	-170648
年均冲淤强度 ($\times 10^4 \text{ m}^3 / (\text{km} \cdot \text{a})$)	1975—2001 年	3.0	-0.5	0.7
	2001—10—2006—10	-7.0	-7.0	-7.0
	2006—10—2011—10	-6.7	-17.7	-13.9
	2011—10—2016—10	-18.9	-12.6	-14.8
	2016—10—2021—11	-13.2	-17.7	-16.1
	2001—10—2021—11	-11.5	-13.7	-12.9

* 湖口—大通河段计算水位为 15.47 m(湖口)~10.06 m(大通), 大通至江阴河段计算水位为 10.06 m(大通)~2.66 m(江阴)。

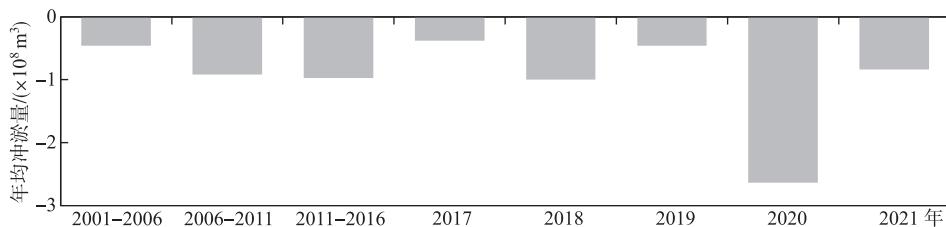


图4 湖口至江阴河段平滩河槽年际冲淤量变化过程

Fig.4 The annual variation process of sediment scouring-deposition amount of bankfull channel from Hukou to Jiangyin

3.2.3 河口段 三峡工程运用以来, 长江口总体延续了蓄水前南支冲刷、北支淤积的趋势, 但南支冲刷有所加强, 北支淤积有所趋缓。2001—2021 年期间, 河口段南支 0 m 高程以下河槽累计冲刷 3.95 亿 m^3 , 年均冲刷量为 0.198 亿 m^3 ; 北支 0 m 高程以下河槽累积淤积 3.14 亿 m^3 , 年均淤积量为 0.157 亿 m^3 。

3.3 与原预测成果对比分析

与原预测成果相比, 三峡工程运用以来第一个 10 年(2002—2012 年), 宜昌至城陵矶河段河道冲刷强度在原预测值范围之内, 而城陵矶以下河段的冲刷强度较原预测成果要略偏大, 发展速度也要略偏快(图 5)。

三峡工程运用第二个 10 年, 三峡水库坝下游河道出现较强冲刷, 宜昌至城陵矶河段 2012—2021 年的年均冲刷量为 0.740 亿 m^3 , 该河段的冲刷量在原预测值范围之内。城陵矶至汉口河段、汉口至九江河段冲刷强度明显偏大, 年均冲刷量分别为 0.418 亿、0.516 亿 m^3 , 城陵矶至汉口河段冲刷预测值偏小较多, 而汉口至九江河段的预测值为淤积。九江至大通河段原预测淤积 0.030 亿~0.161 亿 m^3 , 而 2011—2021 年实测年均冲刷量为 0.313 亿 m^3 。

预测值与实测值存在差异的主要原因:(1) 坝下游冲刷计算的进口水沙条件与实际存在较大差异。初设成果主要采用 1961—1970 年水文系列年进行水库淤积计算后得出的三峡水库下泄水沙条件, “九五”、“十五”成果考虑了长江上游梯级水库拦沙作用和汉江丹江口水库蓄水运用的影响, 但由于长江上游水土保持工程的实施、干支流水电站持续建设、三峡水库调度优化等影响^[13], 坝下游预测水沙条件与实际出现存在

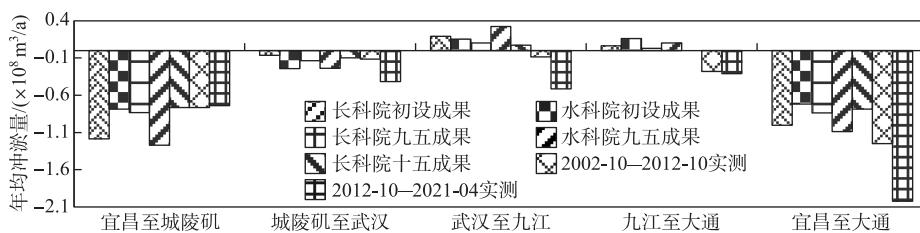


图 5 三峡工程运用以来坝下游河道冲淤量实测值与预测值对比

Fig.5 Comparison of measured and predicted of scouring-deposition of river channel in lower reaches of dam since operation of Three Gorges Project

较大差异。2003—2021 年寸滩、武隆两站年均径流量之和为 3836 亿 m^3 , 较初设计算值减少了 364 亿 m^3 (减幅为 8.7%), 沙量之和为 1.42 亿 t, 较初设计算值减少了 72%, 水库排沙比为 23.6%, 也较初设阶段的约 30% 减少了 6 个多百分点。(2) 实测计算冲淤量未扣河道采砂和航道疏浚量。据统计, 2002—2019 年长江中下游建筑砂料开采和吹填砂料开采总许可采砂 8.56 亿 t(5.35 亿 m^3)^[14], 同时较大的非法采砂量仍无法正确统计和评估。此外, 为了保证航道正常运行, 长江每年都会进行维护性的疏浚措施; 根据航道部门数据统计, 2006—2021 年长江中下游累计疏浚量约为 2.59 亿 m^3 (不包括长江口 12.5 m 深水航道疏浚量)。

4 长江中下游河道冲刷带来的影响

4.1 对河势的影响

三峡工程运用后, 长江中下游河道发生了大幅度冲刷, 同时河床也出现了复杂调整过程。总体来看, 长江中下游河道河势总体稳定, 河型没有发生调整, 但局部河段河势变化较大。主要表现为: 距坝址相对较近的荆江河段断面形态窄深化发展, 上荆江分汊段流程短的支汊冲刷发展, 下荆江调关—菜家铺、熊家洲—城陵矶段的急弯河型存在“切滩撇弯”态势; 城陵矶以下分汊段主汊冲刷强度大于支汊, “主长支消”现象较为明显; 江心洲(滩)体整体冲刷萎缩、洲头冲刷下移。

4.1.1 荆江河床断面形态窄深化发展 长江中游断面窄深化发展是冲刷的必然趋势, 其原因在于一方面河道两岸天然分布有大量的山体、矾头; 另一方面新中国成立以来, 为了保障防洪安全, 修建了大量的人工矾头和系统性的堤防和护岸工程。两者综合作用下, 河道横向展宽基本受到控制, 除河道内河漫滩相对发育的断面以外, 大部分断面河床冲刷以垂向的下切为主要形式, 河宽稳定且深度增加。三峡工程运用后, 河床断面窄深化尤以上荆江河段最为明显。与下荆江相比, 上荆江河床冲刷更为集中在枯水河槽(上荆江、下荆江枯水河槽冲刷量占平滩河槽冲刷量的比例分别为 94% 和 84%), 使得上荆江窄深化发展程度显著大于下荆江。

4.1.2 上荆江分汊段短支汊冲刷发展快 受护岸工程影响, 汉道展宽受到限制, 位于河心的江心洲对两侧河槽的控制作用较弱, 且在三峡工程运用后多数洲滩冲刷萎缩, 支汊的入流条件改善, 支汊水流流程短、水面比降大, 加之支汊河床组成偏细, 导致短支汊冲刷发展相对较快。三峡工程运用后, 上荆江的分汊河段, 大多出现了明显的中枯水短支汊冲刷发展的现象, 支汊分流比增幅均在 9% 以上, 尤以顺直分汊段支汊最为明显, 如芦家河、太平口汊道支汊分流比分别增大 20.5%、18.0%^[15]。

4.1.3 下荆江急弯段“切滩撇弯”现象显现 荆江河段急弯段凸岸边滩较为发育, 深槽贴靠凹岸。三峡水库蓄水前, 受弯道环流作用的影响, 大多数弯道段表现为凸岸滩体淤积、凹岸冲刷的演变特征。在特殊的水文条件下, 特大洪水驱直切割凸岸侧滩体, 但长期中小水年作用后凸岸侧边滩淤积恢复。三峡水库蓄水后, 来水来沙条件发生明显改变, 下荆江急弯段“切滩撇弯”现象显现。如石首北门口以下北碾子湾对岸边滩、调关弯道的边滩、监利河弯右岸边滩、荆江门对岸的反咀边滩、七弓岭对岸边滩、观音洲对岸的七姓洲边滩等, 有的甚至有切割成心滩之势, 特别是下荆江弯曲半径较小的急弯段如调关、菜家铺、尺八口弯道段, 出现了“凸冲凹淤”现象, 对河岸及已建护岸工程的稳定造成了一定的威胁。

4.1.4 城陵矶以下分汊段“主长支消”现象显现 城陵矶以下河段以分汊河型为主,主流摆动频繁、河势变化相对剧烈。三峡工程运用前,分汊型河道主要表现为主支汊周期性交替发展,最为显著的是天兴洲、戴家洲、张家洲等时常出现两汊争流或主支易位的现象。175 m 试验性蓄水后,中枯水持续时间延长、高水出现的频率受到限制有利于中枯水主流所在的汊道进一步冲刷发展,主汊冲刷更为明显、地位更为突出,支汊略有冲刷甚至淤积,主、支汊分流比及滩槽格局均出现一定调整,表现为“主长支消”、“塞支强干”的演变特征,城陵矶至湖口河段除戴家洲河段主支汊发生易位以外,其他河段主、支汊地位均都保持相对稳定。

4.1.5 江心洲冲刷萎缩、洲头下移 水库汛期削减了长江上游的大洪水,中游河道高洪水出现几率下降后,对于年内过流时间长的中低滩来说,其冲淤变形幅度更大一些,总体表现为洲体冲刷萎缩,洲头冲刷下移,部分滩体接近冲失,如太平口心滩、三八滩和金城洲等;对于过流机会较少的高滩,其冲淤变形一般表现为滩缘淘刷和崩退,如调关河段,白沙洲左缘等。其次,中水历时延长,同时含沙量大幅减小,长期淹没过流的自然状态下的中低滩冲刷萎缩具有普遍性,如芦家河河心碛坝、柳条洲头部低滩、江口洲、太平口心滩、三八滩、金城洲、铁板洲、白沙洲、得胜洲、沐鹅洲、人民洲以及一些高滩头部依附的低滩,如突起洲、乌龟洲、南阳洲、南门洲、陆溪口新洲、天兴洲、戴家洲头部低滩等。

4.2 对防洪的影响

三峡及上游干支流控制性水库大洪水期间拦洪削峰,极大减轻了长江中下游地区防洪压力。同时,长江中下游干流河床冲刷,河道过流面积增加,河道槽蓄量有所增加,特别是枯水河槽以下的槽蓄量增加明显。对蓄水前后洪水河槽槽蓄量进行统计,宜昌至沙市河段较蓄水前增大了 25%,沙市至螺山河段较蓄水前增大了 22%,螺山至汉口河段增大了 8%,汉口至湖口河段增大 8%。河道槽蓄量的增加有利于增加河道下泄和调蓄洪水的能力^[16],对减轻中下游防洪压力起到一定的积极作用。

随着河床冲刷,河道深泓下切明显。2002 年 10 月至 2021 年 4 月,宜昌至湖口河段干流河床深泓平均冲刷下切 2~4 m,最大冲刷深度接近 20 m(荆江石首河段的荆 120 断面)。受局部河段河势调整,水流顶冲点的变化和近岸河床的冲刷下切,加之长江中下游处于冲积平原区,大部分河段河岸呈上层黏性土和下层沙土的二元结构,抗冲性较差,导致崩岸塌岸现象时有发生,影响长江中下游防洪安全。此外,三峡工程运用后,汛后水位下降幅度加快也导致河道崩岸易发。2003—2021 年期间,长江中下游干流河道共发生崩岸险情约 1044 处,崩岸长度约 747 km^[17]。如洪湖长江干堤燕窝虾子沟段堤外滩宽仅 40~60 m,2017 年 4 月 19 日发生崩岸险情,崩长 75 m,崩宽 22 m,吊坎高 6 m,距堤脚最近仅 14 m,该年 10 月 27 日再次发生崩岸险情,位于汛前崩岸下游 420 m 处,崩长 105 m,崩宽 17 m,吊坎高约 6 m,险情严重危及洪湖长江干堤安全(图 6)。扬中河段指南村江岸 2017 年 11 月 8 日发生崩岸险情,形成了岸线崩长约 540 m、最大坍进尺度约 190 m 的崩窝,致使 440 m 长江干堤和 9 户民房损失,坍失干堤内外土地约 101 亩(图 7)。湖北咸宁长江肖潘段 2021 年 12 月 20 日突发窝崩险情,崩长约 100 m,崩宽深约 60 m,吊坎高 12 m,距子堤堤脚最近 140 m,距长江干堤(四邑公堤)1 km 左右(图 8)。

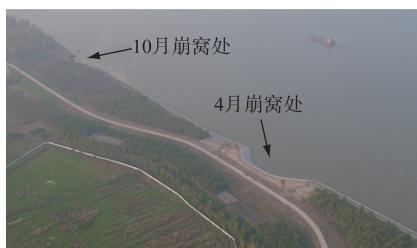


图 6 洪湖虾子沟崩岸现场照片(2017 年)

Fig.6 Photo of bank collapse in Xiaozigou, Honghu (2017)



图 7 扬中市江堤崩岸现场照片(2017 年)

Fig.7 Photo of embankment collapse in Yangzhong (2017)

目前出现崩岸的岸段大部分仍在蓄水运用前的崩岸段和险工段范围内,经及时抢护后未发生重大险



图 8 咸宁长江肖潘段崩岸现场照片 (2021 年)

Fig.8 Photo of bank collapse in Xiaopan section of Yangtze River in Xianning (2021)

船队安全通过葛洲坝枢纽船闸下闸槛和下引航道的关键,由于坝下游河道冲刷,宜昌站同流量下枯水位下降,2021年宜昌站 $6000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量相应水位为39.34m,较2003年下降了0.76m,较1973年设计累积下降2.00m; $5000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量进行外延估算后相应水位为38.78m,较1973年设计线累积下降了1.89m。当前,通过增大枯期下泄流量,尚能满足葛洲坝枢纽下游最低通航水位39.0m(庙咀站吴淞基面,对应宜昌站水位冻结吴淞基面为39.19m)的要求。但随着河床冲刷下切,水库补水流量在逐年加大,2011年汛后满足葛洲坝下游三江航道通航水位39m,需要下泄流量为 $5500\text{ m}^3/\text{s}$,2021年水库所需要最低下泄流量又进一步加大至 $5900\text{ m}^3/\text{s}$ 。虽然下游近坝的宜枝河段冲刷强度逐渐减弱,但短期内的延续性冲刷仍在继续,未来宜昌枯水位仍有可能下降。

4.3.2 下游枯水位溯源传递,芦家河段“坡陡流急”问题加剧 坡下游大埠街以上为砂卵石河段,以下为沙质河床河段。砂卵石河段河床抗冲性强,局部高凸难冲,近年来冲刷强度有所减缓,随着坝下游强烈冲刷部位的下移;下游沙质河段冲刷增大,枯水位下降加剧,上下游枯水位不能同步下降,下游沙质河床水位下降的溯源传递,上游局部航道水浅问题也有可能随之加剧。三峡工程试验性蓄水以来,由于上下游枯水位落差的逐渐加大,芦家河段的“坡陡流急”问题呈现加剧趋势^[19],表面流速持续增加,2017、2018年 $7000\sim8000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,实测最大表面流速均超过 3.2 m/s ,较三峡水库蓄水初期该流量区间的流速增加了约 1 m/s ,同时陡比降发生的枯水流量区间明显扩展,严重影响该河段的航行条件。

4.3.3 下游沙质河段部分水道冲淤调整剧烈,航道条件存在不利发展 三峡工程运用后,下游中水流量持续时间增长,弯道段主流向凸岸侧摆动,部分急弯段甚至发生了切滩撇弯,局部岸线崩塌,航道边界条件不稳定,甚至航道条件趋差。顺直放宽或者宽顺直段的边滩冲刷、局部岸线崩退等现象加剧,致使河道展宽与水流分散;已实施的岸线守护及边滩守护工程,遏制了局部岸线崩退及边滩冲蚀;由于主流摆动,断面形态趋于宽浅的不利趋势,航道条件存在不利发展。因此,航道部门在长江中下游相继实施了南京以下 12.5 m 深水航道整治、荆江航道整治、武汉至安庆段 6 m 水深航道整治等工程,对于稳定航道的滩槽格局、提升通航能力起到了积极的作用。

4.4 对沿江取水的影响

三峡工程运用以来,受枯水河槽冲刷下切的影响,长江中下游河道枯水期同流量下水位有不同程度的降低,以沙市站枯水位累积降低幅度最大。与2003年相比,2021年汛后宜昌、枝城、沙市、螺山、汉口站分别下降了 0.76 m ($6000\text{ m}^3/\text{s}$)、 0.61 m ($7000\text{ m}^3/\text{s}$)、 2.82 m ($7000\text{ m}^3/\text{s}$)、 1.73 m ($10000\text{ m}^3/\text{s}$)、 1.66 m ($10000\text{ m}^3/\text{s}$),大通站则没有发生明显的变化^[20-21]。枯水期三峡及长江上游干支流水库群对长江中下游进行的补水调度作用明显,各站年最小流量总体都呈增大趋势,一定程度上减缓了因河床下切造成的水位下降,枯水位下降趋势有所缓和,其中:沙市以上河段河床冲刷下切幅度相对较小,三峡水库补水调度影响明显,年最低水位有所上升,而沙市至城陵矶河段河床下切的影响显著大于补水影响,沙市站年最小流量由2003年的

情。随着下游河道冲刷的不断累积,下游河道的河势、崩岸塌岸等仍将会发生较大的变化,一些潜在问题将不断暴露,发生更大洪水时的堤防安全仍存在一定的风险。

4.3 对航道条件的影响

三峡工程运用后,一方面增加了长江中下游的枯水流量;另一方面大部分河段枯水河槽冲刷以深切为主,河床沿程起伏有所减小,有的浅滩碍航程度可望削弱,同时支汊发展可能会受到限制,有的浅滩(如分流口门处的浅滩)可能消失,总体上极大改善了长江中下游的航道条件^[18]。但坝下游河道冲刷也存在对航道条件不利的情况,主要如下:

4.3.1 坝下游河段继续冲刷,宜昌枯水位下降影响葛洲坝三江船闸通航 枯水河槽冲刷直接增加了同水位下的过水面积,也使得同流量下的水位降低。宜昌枯水位是保证

船队安全通过葛洲坝枢纽船闸下闸槛和下引航道的关键,由于坝下游河道冲刷,宜昌站同流量下枯水位下降,2021年宜昌站 $6000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量相应水位为39.34m,较2003年下降了0.76m,较1973年设计累积下降2.00m; $5000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量进行外延估算后相应水位为38.78m,较1973年设计线累积下降了1.89m。当前,通过增大枯期下泄流量,尚能满足葛洲坝枢纽下游最低通航水位39.0m(庙咀站吴淞基面,对应宜昌站水位冻结吴淞基面为39.19m)的要求。但随着河床冲刷下切,水库补水流量在逐年加大,2011年汛后满足葛洲坝下游三江航道通航水位39m,需要下泄流量为 $5500\text{ m}^3/\text{s}$,2021年水库所需要最低下泄流量又进一步加大至 $5900\text{ m}^3/\text{s}$ 。虽然下游近坝的宜枝河段冲刷强度逐渐减弱,但短期内的延续性冲刷仍在继续,未来宜昌枯水位仍有可能下降。

4.3.2 下游枯水位溯源传递,芦家河段“坡陡流急”问题加剧 坡下游大埠街以上为砂卵石河段,以下为沙质河床河段。砂卵石河段河床抗冲性强,局部高凸难冲,近年来冲刷强度有所减缓,随着坝下游强烈冲刷部位的下移;下游沙质河段冲刷增大,枯水位下降加剧,上下游枯水位不能同步下降,下游沙质河床水位下降的溯源传递,上游局部航道水浅问题也有可能随之加剧。三峡工程试验性蓄水以来,由于上下游枯水位落差的逐渐加大,芦家河段的“坡陡流急”问题呈现加剧趋势^[19],表面流速持续增加,2017、2018年 $7000\sim8000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,实测最大表面流速均超过 3.2 m/s ,较三峡水库蓄水初期该流量区间的流速增加了约 1 m/s ,同时陡比降发生的枯水流量区间明显扩展,严重影响该河段的航行条件。

4.3.3 下游沙质河段部分水道冲淤调整剧烈,航道条件存在不利发展 三峡工程运用后,下游中水流量持续时间增长,弯道段主流向凸岸侧摆动,部分急弯段甚至发生了切滩撇弯,局部岸线崩塌,航道边界条件不稳定,甚至航道条件趋差。顺直放宽或者宽顺直段的边滩冲刷、局部岸线崩退等现象加剧,致使河道展宽与水流分散;已实施的岸线守护及边滩守护工程,遏制了局部岸线崩退及边滩冲蚀;由于主流摆动,断面形态趋于宽浅的不利趋势,航道条件存在不利发展。因此,航道部门在长江中下游相继实施了南京以下 12.5 m 深水航道整治、荆江航道整治、武汉至安庆段 6 m 水深航道整治等工程,对于稳定航道的滩槽格局、提升通航能力起到了积极的作用。

3260 m^3/s 增加至 2021 年的 6790 m^3/s ,但年最低水位仍由 2003 年的 30.02 m 下降为 2021 年的 29.84 m;城陵矶以下河段多年来年最低水位总体略呈下降趋势。

长江中下游枯水位下降,影响了沿江生活、生产和生态的供水安全^[22-23],特别逢来水偏少年份,如 2019、2020 年汛后,长江流域降雨偏少,长江中下游河段普遍出现历史较低水位,沿江取水均都面临了严峻考验。2022 年,长江流域发生流域性严重枯水,8 月以来中下游干流出现超 100 年一遇枯水,最低水位为有实测记录以来历史同期最低,部分水厂由于河道枯水位已低于工程设计值,取水困难,有的甚至导致取水泵船搁浅(图 9),部分水厂取水口所在河段主支汊易位、低水位下支汊断流(图 10),取水受到严重影响,9 月下旬水位条件下取水受严重影响的水厂主要集中在荆江河段。

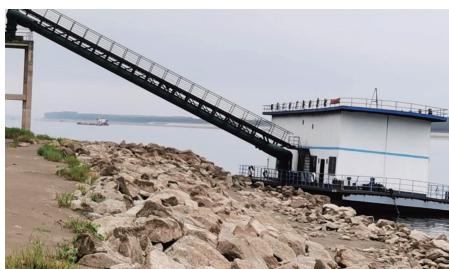


图 9 石首市城区二水厂取水泵船搁浅照片

Fig.9 Photo of Shishou city second waterworks pumping ship stranded



图 10 武穴龙坪水厂所在新洲左汊断流照片

Fig.10 Photo of Wuxue Longping waterworks where the left branch of Xinzhou cut-off

4.5 对江湖关系的影响

4.5.1 洞庭湖 洞庭湖水沙主要来自于荆江“三口”(松滋口、太平口、藕池口)分流和湖南“四水”(湘江、资水、沅江、澧水),经湖区调蓄后由城陵矶注入长江。随着荆江河道河床冲深下切,枯水位降低,而使得“三口”口门相对抬高,导致“三口”分流分沙一直处于衰减之中,“三口”分流水道由原淤积转为冲刷。三峡水库蓄水运用以来 2003—2021 年与 1991—2002 年相比,“三口”年均分流量减少近 123.4 亿 m^3 ,减幅为 20%,年均分沙量由 6790 万 t 减少为 850 万 t,减幅达到了 87%。“三口”分流水道断流天数有所增加,河床也由三峡水库蓄水前的淤积转为冲刷,1952—2003 年“三口”洪道共淤积泥沙 6.52 亿 m^3 (年均淤积泥沙 0.125 亿 m^3),三峡工程运行后(2003—2020 年),“三口”分流水道总冲刷量为 1.90 亿 m^3 (年均冲刷泥沙 0.112 亿 m^3),冲刷主要集中在松滋河,占比为 60%,其次为藕池河,占比为 16%,虎渡河、松虎洪道分别占 8%、6%。

长江干流水位降低,导致洞庭湖出流加大,湖区出流排沙能力得到增强,洞庭湖容积缩小的速度大为减缓。目前,西、南洞庭湖仍有一定淤积,但东洞庭湖一方面受来水含沙量减少的影响,加之汛后三峡水库蓄水、使得湖区有所冲刷,进入湖区的泥沙逐渐由单向沉积转化为沉积再悬浮随水流汇入干流,洞庭湖的泥沙排沙比由 30% 左右增大至 109%。洞庭湖由大量沉积长江干流泥沙的角色转变为向干流补给泥沙,除了荆江“三口”分流的泥沙外,湖区还补给部分泥沙(约占荆江“三口”入湖总沙量的 50%)进入长江干流,这种江湖关系的调整对江、湖防洪均是有利的^[24]。同时,由于洞庭湖出流加快,直接带动湖区水位下降,加之“三口”分流水道减少,使洞庭湖提前约 1 个月进入枯水期,对洞庭湖生态与环境等影响较大。三峡水库汛后蓄水期间,2003—2021 年与 1991—2002 年相比,城陵矶站 9 月和 10 月平均水位分别下降了 0.90 和 1.37 m。

4.5.2 鄱阳湖 鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修水江西“五河”的来水,经调蓄后由湖口注入长江。三峡工程运用对鄱阳湖的影响与对洞庭湖的影响相似,三峡水库汛后蓄水,水库下泄流量减小,加之长江干流河道冲刷后同流量下水位下降,使鄱阳湖出流加快,对出湖段主槽冲刷有带动作用,加之采砂影响,1998—2010 年鄱阳湖通江水道主槽平均下切 2.15~10.57 m 左右^[25],一方面增加了鄱阳湖的泄流能力,但同时也使鄱阳湖通江水道枯水期落差减小,湖区水位有不同程度地降低,枯水位出现时间有所提前^[26]。三峡水库汛后蓄水期间,2003—2021 年与 1991—2002 年相比,湖口站 9 月和 10 月平均水位分别下降了 2.40 m 和 2.08 m,对鄱阳湖水资源和生态环境带来不利影响。此外,三峡水库实行中小洪水调度后,减小了干流洪水的上

涨速度,使鄱阳湖倒灌机会减小,汛期削峰调度使得降水倒灌入湖的频率有所下降,沙量也进一步减少,2009—2021年,年平均倒灌水量只有4.0亿m³,较1951—2008年年均值减少了84%,年平均倒灌沙量为4.80万t,减幅更大,达到97%。

4.6 对长江河口的影响

三峡工程运用后,长江口来沙量大幅度减少,2003—2021年大通站年平均输沙量较2002年前减少了69%,加之受深水航道工程等影响,长江口总体延续了蓄水前南支冲刷、北支淤积的趋势,但南支冲刷有所加强,北支淤积有所趋缓。由于特殊的河口形态和径流、潮流复杂的作用关系,导致长江口咸潮入侵时有发生,严重影响了上海市和江苏省的水源地水质。北支咸潮倒灌是长江口咸潮入侵的主要途径,北支分流量较小,分流比常年在2%以下,但分沙量却占6%左右,水少沙多,北支逐年淤积,同时下泄径流减少,潮流作用相应增强,盐水入侵增强,在枯季大潮期盐水甚至倒灌进入南支^[27]。三峡工程枯水期补水调度和“压咸潮”调度,增加长江口来水量,同时北支淤积减缓,对于遏制长江口咸潮入侵是有利的。

长江口河势总体格局尚未出现显著变化,但南支持续冲刷,白茆沙水道“南强北弱”态势增强,深泓南移,导致太仓段近岸河床冲刷剧烈,水下岸坡趋陡,该段码头密布,由于近岸冲刷码头前沿岸线后退了60~100 m,前沿深槽水下冲刷最深处已至设计床面以下10~20 m,严重威胁沿岸企业码头主体结构的安全,需引起足够的重视。

5 主要结论

三峡工程运用后(2001—2021年),长江中下游各站水量较蓄水前略为偏枯,但输沙量大幅减少,河道发生了长时期、长距离、大幅度的冲刷,宜昌至湖口河段干流河道累计冲刷26.2亿m³,年均冲刷1.35亿m³,湖口至徐六泾河段冲刷23.3亿m³,年均冲刷1.16亿m³,南支河段冲刷3.95亿,年均冲刷0.198亿m³,北支河段累积淤积3.14亿m³,年均淤积0.157亿m³。宜昌至城陵矶河段河道冲刷强度在原预测值范围之内,而城陵矶以下河段的冲刷强度较原预测成果要略偏大,发展速度也要略偏快。目前,长江中下游部分河段河势变化较大,河道崩岸仍时有发生,江湖关系发生新变化,长江入海泥沙显著减少,长江口河床已出现明显冲刷。随着三峡工程运用时间的推移,加之流域水土保持工作的持续加强,三峡入、出库泥沙将在相当长的时期内维持较低水平,坝下游“清水下泄”的现象将长期维持,长江中下游河道冲刷仍将进一步发展,其对河势调整、防洪安全、航道条件、沿江取水、江湖关系、长江河口等将带来更为深刻的影响,下阶段应进一步加强观测和研究工作。

6 参考文献

- [1] Hu CH, Fang CM. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and its operational effects. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(8): 832-844. [胡春宏, 方春明. 三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(8): 832-844.]
- [2] Guo ZY. Research and evaluation of the construction and operation benefits of the Three Gorges Project. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, 3(4): 4-9. [郭振英. 三峡工程建设运行效益的研究及评价. 长江技术经济, 2019, 3(4): 4-9.]
- [3] Xu QX, Tong H. Characteristics of flow and sediment change in Yangtze River in recent 50 years. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(5): 38-47, 76. [许全喜, 童辉. 近50年来长江水沙变化规律研究. 水文, 2012, 32(5): 38-47, 76.]
- [4] Xu QX. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR. *Journal of Hydropower Engineering*, 2013, 32(2): 146-154. [许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究. 水力发电学报, 2013, 32(2): 146-154.]
- [5] Dong BJ, Xu QX, Yuan J et al. Mechanism of serious scour along the downstream of Three Gorges Reservoir in recent years. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 42-47. [董炳江, 许全喜, 袁晶等. 近年来三峡水库坝下游河道强烈冲刷机理分析. 泥沙研究, 2019, 44(5): 42-47.]
- [6] 陈崇德, 樊哲, 胡小梅. 三峡工程对长江中游综合影响的分析与思考. 三峡工程建成后对长江中游的影响——2007中国科协年会分论坛之十论文集. 2007: 77-80.
- [7] Hu CH, Wang YG. Sediment problems and relationship between river and lakes since the operation of Three Gorges Project. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(5): 107-116. [胡春宏, 王延贵. 三峡工程运行后泥沙问题与江湖关系变化. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 107-116.]

- [8] Lu JY, Yao SM. Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(1) : 36-46. [卢金友, 姚仕明. 水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制. 水利学报, 2018, **49**(1) : 36-46.]
- [9] Yao SM, Lu JY. Evolution analysis and scouring-deposition prediction of middle and lower reaches of Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, **44**(23) : 22-28. [姚仕明, 卢金友. 长江中下游河道演变规律及冲淤预测. 人民长江, 2013, **44**(23) : 22-28.]
- [10] Xu ZM, Xu XY, Li AQ et al. Flood control effect of the fluvial process in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(3) : 366-376. [徐照明, 徐兴亚, 李安强等. 长江中下游河道冲淤演变的防洪效应. 水科学进展, 2020, **31**(3) : 366-376.]
- [11] Yang YP, Zhang MJ, Li YT et al. Suspended sediment recovery and bedload compensation mechanism affected by the Three Gorges Project. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(7) : 1241-1254. [杨云平, 张明进, 李义天等. 长江三峡水坝下游河道悬沙恢复和床沙补给机制. 地理学报, 2016, **71**(7) : 1241-1254.]
- [12] Xu QX, Dong BJ, Zhang W. Characteristics and analysis on scouring and silting changes in main stream of middle and lower reaches of Changjiang River in 2020. *Yangtze River*, 2021, **52**(12) : 1-8. [许全喜, 董炳江, 张为. 2020年长江中下游干流河道冲淤变化特点及分析. 人民长江, 2021, **52**(12) : 1-8.]
- [13] Lu JY, Huang Y, Wang J. The analysis on reservoir sediment deposition and downstream river channel scouring after impoundment and operation of TCP. *Engineering Sciences*, 2011, **13**(7) : 129-136. [卢金友, 黄悦, 王军. 三峡工程蓄水运用后水库泥沙淤积及坝下游河道冲刷分析. 中国工程科学, 2011, **13**(7) : 129-136.]
- [14] 长江水利委员会. 长江中下游干流河道采砂管理规划(2021—2025年).
- [15] Zhu LL, Xu QX, Chen ZH. Extraordinary scour of Jingjiang reach downstream from Three Gorges Project. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(1) : 85-97. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.01.008. [朱玲玲, 许全喜, 陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(1) : 85-97.]
- [16] Han QW, He MM. Erosion of river reach downstream three gorge reservoir and its influence on flood prevention. *Journal of Hydropower Engineering*, 1995, **14**(3) : 34-46. [韩其为, 何明民. 三峡水库修建后下游长江冲刷及其对防洪的影响. 水力发电学报, 1995, **14**(3) : 34-46.]
- [17] 长江水利委员会. 长江泥沙公报. 2003—2021.
- [18] Tang JW, You XY, Li YT et al. Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on navigation conditions in middle and Lower Yangtze River. *Journal of Hydropower Engineering*, 2014, **33**(1) : 102-107. [唐金武, 由星莹, 李义天等. 三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析. 水力发电学报, 2014, **33**(1) : 102-107.]
- [19] Li M, Hu CH, Zhou CC et al. Analysis on the Evolution mechanism of the “steep slope and rapid flow” section of Lujia waterway in the middle reaches of the Yangtze River under new conditions of water and sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(2) : 158-168. [李明, 胡春宏, 周成成等. 新水沙条件下长江中游芦家河水道“坡陡流急”段演变机理分析. 水利学报, 2021, **52**(2) : 158-168.]
- [20] Yang CG, Li SX, Dong BJ et al. Study on the mechanism of lower water level in middle and lower reaches of the Yangtze River after impounding of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2021, **46**(5) : 34-40. [杨成刚, 李思璇, 董炳江等. 三峡水库运用后长江中下游枯水位变化成因研究. 泥沙研究, 2021, **46**(5) : 34-40.]
- [21] Yang GL, Xiang H, Yu MH et al. Variations of low water level and river bed in middle and lower reaches of Yangtze River. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, **42**(1) : 64-68. [杨国录, 向浩, 余明辉等. 长江中下游枯水位与河床冲淤变化. 武汉大学学报: 工学版, 2009, **42**(1) : 64-68.]
- [22] Lei J, Huang ZF, Li YP. Study on water supply safety of mid-Lower Yangtze River and operation requirements for reservoirs in upper reaches. *Yangtze River*, 2011, **42**(3) : 46-48. [雷静, 黄站峰, 李亚平. 长江中下游供水安全及其对上游水库调度需求. 人民长江, 2011, **42**(3) : 46-48.]
- [23] Li YT, Xue JL, Sun ZH et al. Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydropower Engineering*, 2021, **40**(4) : 1-13. [李义天, 薛居理, 孙昭华等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化. 水力发电学报, 2021, **40**(4) : 1-13.]
- [24] Han QW. Variation mechanism of the relation between Jingjiang River and Dongting Lake. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, **31**(6) : 104-112. [韩其为. 江湖关系变化的内在机理. 长江科学院院报, 2014, **31**(6) : 104-112.]
- [25] Ouyang QL, Wang J, Si WW et al. Characteristics of scouring and deposit change in waterway of Poyang Lake to Yangtze River. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(6) : 60-64. [欧阳千林, 王婧, 司武卫等. 鄱阳湖入江水道冲淤变化特征. 资源保护, 2018, **34**(6) : 60-64.]
- [26] Xu ZM, Hu WZ, You ZQ. Analysis of low flow situation of Poyang Lake area after operation of Three Gorges Reservoir and its causes. *Yangtze River*, 2014, **45**(7) : 18-22. [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. 人民长江, 2014, **45**(7) : 18-22.]
- [27] Tang JH, Zhao SW, Liu WY et al. Influences of Three Gorges Reservoir on salt water intrusion from the north branch to the south branch of the Yangtze River Estuary. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(4) : 554-560. [唐建华, 赵升伟, 刘玮祎等. 三峡水库对长江河口北支咸潮倒灌影响探讨. 水科学进展, 2011, **22**(4) : 554-560.]