

三峡水库蓄水后上荆江不同河床组成江心洲的演变过程及其机制^{*}

毛 禹, 夏军强^{**}, 周美蓉, 邓珊珊

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要:三峡及上游梯级水库群运用后,大坝下游江心洲以冲刷为主,直接影响分汊河段河势条件及航道边界的稳定性。本文采用卫星遥感影像、实测水沙及固定断面床沙级配等资料,分析上荆江枝江、沙市河段中不同河床组成江心洲的演变过程及其机理。结果表明:①三峡水库蓄水后(2003—2019年),沙市段沙质江心洲较枝江段卵石夹沙质江心洲萎缩更为显著,出露面积的减幅分别达31%和24%。②以关洲和金城洲分别代表卵石夹沙质和沙质江心洲,三峡工程运用后关洲洲头形态较为稳定,受无序采砂的影响其沙质组成的洲尾面积显著减小,而金城洲面积萎缩程度更大。③床沙组成对江心洲冲刷程度差异具有重要影响,关洲洲头较金城洲抗冲性更强,与其床沙在年内达到起动条件的数量更少、时长更短有关;建立了江心洲面积与水流冲刷强度及相对水深的定量关系,该关系能综合考虑水沙变化与床沙组成调整的影响,能更好地反演近期江心洲的面积变化特点。

关键词:江心洲演变;河床组成;上荆江河段;三峡工程

Evolution process and mechanism of mid-channel bars composed of different bed materials in the Upper Jingjiang Reach after the Three Gorges Project operation^{*}

Mao Yu, Xia Junqiang^{**}, Zhou Meirong & Deng Shanshan

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China)

Abstract: After the operation of the Three Gorges cascade reservoirs (TGP), the mid-channel bars (MCBs) downstream of the dam were generally scoured and shrank, which directly affects the river regime in ana-branching reaches and the stability of the navigation channel boundaries. The morphological evolution processes and mechanisms of MCBs in the Zhijiang (ZJ) and Shashi (SS) sub-reaches of the Upper Jingjiang Reach were analyzed, using the remote sensing images, the hydrological data and the measured riverbed compositions. The results indicate that: (i) During the post-TGP period (2003–2019), the sandy MCBs in the SS subreach shrank more significantly than the one in the ZJ subreach. The total exposed area of the former decreased by 31%, while the latter decreased by 24%; (ii) Guanzhou (GZ) and Jinchengzhou (JCZ) were taken as the representative sandy-gravel and sandy MCBs, respectively. During the post-TGP period, the head zone of the GZ MCB was relatively stable, and the reduced area was mainly in the bar-tail zone due to the illegal sand mining, while the JCZ MCB had a more obvious erosion trend; (iii) The bed-material composition had an important influence on the erosion degree of MCBs. The GZ MCB had a stronger anti-erosion capacity than the JCZ MCB, which was related to the less amount and duration of bed material that can reach the incipient condition in a hydrological year. Moreover, different empirical relationships were developed between the exposed area of MCB, fluvial scour intensity, and relative water depth. It is found that comprehensive consideration of the effects of flow-sediment condition and bed-material composition adjustment can better explain the recent variations in the exposed areas of MCBs.

Keywords: Evolution of mid-channel bars; bed-material composition; Upper Jingjiang Reach; Three Gorges Project

* 2022-10-13 收稿; 2022-12-09 收修改稿。

国家自然科学基金项目(51725902, U2040215, 52109098, 52009095)和博士后创新人才支持计划项目(BX2021228)资助。

** 通信作者; E-mail: xiajq@whu.edu.cn。

冲积河流上大型水库的修建改变进入坝下游河道的水沙条件,从而引起新一轮的河床调整^[1-2]。自长江中游三峡水库建成运行以来,坝下游河道自上而下普遍冲深,在宜昌至城陵矶河段,冲刷主要集中在荆江河段(枝城—城陵矶段)^[3];2002—2017年其冲刷量占宜昌至城陵矶段总冲刷量的86%。强烈的冲刷使得荆江段河床形态显著调整,主要包括床面冲深、洲滩演变等^[2,4]。江心洲作为分汊河流中基本的地貌单元,其形态与水沙条件作用关系的调整直接影响河道形态演变及泥沙输运^[5-6]。三峡工程运用后,上荆江段江心洲面积减小、滩缘蚀退的现象显著,不利于分汊河段局部河势条件、通航条件等稳定,因此有必要对三峡水库蓄水后上荆江江心洲的形态演变过程进行深度研究。

分析一定时间段江心洲的形态变化,可以通过遥感影像或实测河道地形资料,计算某一特征水位以上的江心洲面积或体积来表征^[7-10]。目前已有许多学者对坝下游的洲滩演变过程进行了研究。李志威等^[8]采用遥感影像及概念模型分析了三峡水库蓄水前后长江中下游江心洲的面积变化特点,发现大多数江心洲在三峡水库运行后不断冲刷侵蚀;朱玲玲等^[9]基于实测河道地形,探讨了高滩与中低滩的冲刷形式,结果表明中低滩往往以滩轴线为中心整体萎缩,高滩则以中枯水支汊一侧的滩缘崩退为主;Luo等^[10]发现距离三峡水库越下游的江心洲面积变化更小,在顺直、微弯及鹅头型分汊河道中,以鹅头型江心洲的面积变化最为明显。赵维阳等^[11]以沙质河床的沙市段为研究对象,发现洲滩间面积变化存在“此消彼长”的联动演变关系。而对于触发江心洲形态调整的原因,既有普遍的认识,也存在不同的看法。首先,水库蓄水引起的水沙条件改变是洲滩变形的主导因素^[4,8];其次,有研究发现特征流量级持续时间与洲滩面积变化密切相关;而主流线摆动会导致洲滩年内冲淤交替^[12-13];亦有学者认为河道平面形态^[14]、主支汊分流比特征^[9]及分流点移动^[15]等均会影响洲滩演变;同时上下游洲滩、汊道段内边滩与江心洲关联性调整的现象也十分显著^[11]。可见导致洲滩形态变化的影响因素多且复杂,需依研究河段的特征开展针对性的分析工作。但已有的研究中,更多关注了长江中下游沙质江心洲的演变过程及发展趋势,而对于卵石夹沙质与沙质河床江心洲形态演变比较的分析较少。同时,已往关注洲滩变形影响因素的研究重点考虑水动力或特征流量级、来沙量及洲滩演变的关联性等方面^[16-17],较少涉及洲滩河床组成对其演变的影响。

本研究利用遥感影像提取枝江、沙市河段中江心洲的出露面积,分析不同河床组成江心洲的面积演变特点;通过三峡水库蓄水后代表性江心洲冲淤与形态变化的分析,探讨江心洲面积变化与床沙组成调整及水沙条件的联动关系。

1 河段概况与研究方法

1.1 河段概况

长江中游上荆江河段上起枝城,下至藕池口,全长约172 km(荆3—荆82)。本文选取枝城至观音寺的干流河道(荆3—荆52)作为研究河段(荆3—荆52,图1),河道形态以分汊型为主,分布有关洲、董市洲、柳条洲、火箭洲、马羊洲、太平口心滩、三八滩及金城洲等洲滩。河段区间内,自上而下分布有枝城、沙市水文站及马家店、陈家湾水位站,南岸侧存在松滋口、太平口分流进入洞庭湖。以杨家脑为界,研究河段可划分为枝江段(荆3—荆25)和沙市段(荆25—荆52),河长分别为60和54 km。河床底质差异上,枝江段为卵石夹沙质向沙质河床的过渡段,沙市段河床组成主要为细沙。

上荆江段水沙来源于长江上游干流及支流入汇,于汛期(5—10月)集中输沙的特点明显。其中松滋口和太平口枯水期为断流状态,多年平均(1994—2019年)汛期两口分水量(分沙量)占枝城站汛期总水量(总沙量)的12%,分水分沙过程与荆江干流水沙变化基本同步^[18]。采用枝城站的水沙过程可反映整个研究河段的水沙变化规律。三峡水库蓄水前(1994—2002年),枝城站多年平均汛期水量为3375亿m³/a,沙量为3.61亿t/a。蓄水后(2003—2019年),多年平均汛期水量减小至3057亿m³/a,为蓄水前的91%;而汛期来沙量大幅减小至0.41亿t/a,仅为蓄水前的11%。

1.2 资料来源与分析方法

1.2.1 资料来源 本研究采用的资料主要包括:1994—2019年枝城站、沙市站、新江口站及沙道观站的实测水沙数据,枝江与沙市河段1994—2019年的江心洲枯水期出露面积数据,两河段2003—2019年的累计河床冲淤量数据,以及若干年的固定断面床沙级配及荆5、荆47的断面地形资料。其中水沙、床沙、地形与河床

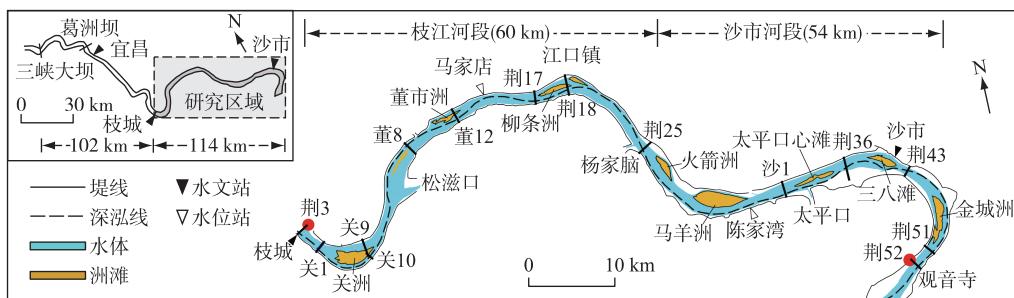


图 1 研究河段示意
Fig.1 Sketch of the study reach

冲淤量数据来源于长江水利委员会水文局与《长江泥沙公报》;江心洲出露面积数据从遥感影像中提取,空间分辨率为 30 m,影像系列为 Landsat,来源于美国地质调查局(USGS)官网(<https://glovis.usgs.gov/>)。

1.2.2 遥感影像选取 利用遥感影像提取江心洲形态是河流地貌单元分析的主要手段,相较于实测数据具有容易获取的特点,且便于时空尺度的比较与分析。由于枯季江心洲低滩出露更明显,故本文以枝城站 35.8 m 水位为参考,下载了涵盖研究区的共 24 幅枯水期的遥感影像,具体信息如表 1。在数据选用时,主要参考以下 2 个原则:一是不同影像间采集日期的水位差异不大,以减少水位波动对江心洲面积提取的影响。根据 Wen 等的分析,水位变化 0.5 m 可能导致江心洲面积变化约 0.1 km²^[5]。二是应尽可能地采用无云遮扰的遥感影像。在数据分析时,采用当年 12 月或次年 1—4 月的影像来提取当年的江心洲,以反映洲滩经过一年水沙作用后的形态特点,故用获取日期为 1995—2020 年的影像提取了研究河段 1994—2019 年的江心洲面积。此外,由于遥感影像有限,为了尽可能地延长时间序列,部分年采用了多幅影像;或者在不影响整体分析结果的基础上,使用了少数局部有云的遥感图,以提取影像中未被云遮盖的江心洲面积,这些数据已在表 1 中予以区分。

1.2.3 影像解译及洲滩提取 影像预处理及洲滩提取全部采用 ArcGIS 完成,改进的归一化差异水体指数(MNDWI)被用于识别水体和陆地^[14],MNDWI 定义为:

$$MNDWI = \frac{\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{swirl}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{swirl}}} \quad (1)$$

式中, ρ_{green} 和 ρ_{swirl} 分别代表绿波段和中红外波段。

具体步骤为:①结合“波段合成”工具,选取遥感影像的近红外、中红外及红波段以合成假彩色图像,可突出水陆边界(图 2a);②利用“栅格计算器”计算 MNDWI 值,得到 MNDWI 结果影像(图 2b);③图像二值化处理获取由 0(非水体)和 1(水体)的像元组成的栅格影像(图 2c);④采用“栅格转面”工具将二值图像转换为矢量图像并删除多余地物,在属性表中可读取选中江心洲的面积(图 2d)。

2 江心洲面积时空变化特点

本研究提取了枝江河段中的关洲、董市洲和柳条洲,以及沙市河段中的火箭洲、马羊洲、太平口心滩、三八滩和金城洲 1994—2019 年的枯水期出露面积数据,部分年份由于没有合适遥感影像而缺测(表 1)。其中枝江段江心洲河床组成以卵石夹沙质为主,沙市段的则均为沙质洲滩,两者抗冲能力具有显著差异,故有必要分不同河段来讨论江心洲的演变特点。

2.1 江心洲出露面积变化

三峡水库蓄水前(1994—2002 年),枝江、沙市段江心洲总出露面积最终均增大,增幅分别为 2% 和 15%。三峡水库蓄水后(2003—2019 年),两河段江心洲均明显萎缩,但沙市段江心洲冲刷更为显著,其中枝江段江心洲总出露面积减幅为 24%,而沙市段减幅达 31%。枝江、沙市段江心洲萎缩程度在三峡工程运用初期(2003—2008 年)尤为严重,两河段江心洲减少的面积分别占 2003—2019 年总减少面积的 60% 和 65%。

表 1 研究河段 Landsat 影像信息及江心洲提取面积

Tab.1 Landsat images information and extracted areas of mid-channel bars (MCBs) in study reach

获取日期	水位/m	江心洲枯水期出露面积/km ²								总出露面积/km ²	
		关洲	董市洲	柳条洲	火箭洲	马羊洲	太平口	三八滩	金城洲	枝江段	沙市段
蓄水前	19950227	36.03	4.68	1.73	2.15	2.69	8.64	1.33	2.56	3.09	8.55 18.31
	19990222	35.44	4.87	1.69	2.11	2.68	8.79	0.92	1.98	3.29	8.67 17.66
	20000201	35.60	4.63	1.85	2.10	2.43	9.24	1.35	2.02	3.72	8.58 18.76
	20010110	36.16	—	—	—	2.25	8.38	0.58	1.11	2.84	— 15.15
	20010218	35.46	4.93	1.36	—	—	—	—	—	—	— 15.15
	20020105	35.77	4.50	1.50	1.89	2.60	8.55	0.67	1.68	3.53	7.90 17.02
	20030329	35.43	4.94	1.70	2.10	2.96	8.94	1.37	2.33	5.45	8.74 21.05
三峡水库蓄水前面积变幅/%		+6	-2	-2	+10	+4	+3	-9	+76	+2	+15
蓄水后	20040408	35.94	4.73	1.60	1.94	2.59	8.75	0.77	2.23	5.01	8.27 19.35
	20050222	35.40	4.93	1.67	2.07	2.58	9.14	1.99	2.12	3.81	8.67 19.64
	20070127	35.49	4.67	1.53	2.00	2.25	9.05	1.97	1.28	4.38	8.20 18.92
	20080215	35.69	4.52	1.23	1.85	2.28	8.63	2.07	0.77	3.47	7.59 17.22
	20090116	35.93	4.18	1.19	1.72	2.19	8.14	2.11	0.55	2.53	7.08 15.51
	20100220	35.83	4.31	1.56	1.88	2.30	8.89	2.58	0.64	2.74	7.74 17.16
	20101205	35.83	4.15	1.46	1.80	2.24	8.43	2.23	1.04	2.45	7.41 16.40
	20131229	35.78	3.23	1.53	1.87	2.13	8.58	1.81	1.38	2.53	6.63 16.43
	20150101	35.93	—	1.52	1.78	2.00	8.33	1.32	1.02	1.80	— 14.45
	20170122	36.04	3.03	1.53	1.89	2.01	8.31	0.90	1.37	1.53	6.44 14.13
	20171224	35.99	3.02	1.52	1.92	2.00	8.16	0.55	1.15	1.95	6.46 13.81
	20200216	36.06	3.05	1.40	1.86	1.93	8.05	0.33	0.69	2.41	6.31 13.39
三峡水库蓄水后面积变幅/%		-36	-12	-4	-26	-8	-58	-69	-52	-24	-31

注：“—”代表数据缺测；虚线框代表一年采用了多幅影像。枝江段江心洲总出露面积为关洲、董市洲及柳条洲面积之和，沙市段的为剩余江心洲面积之和。

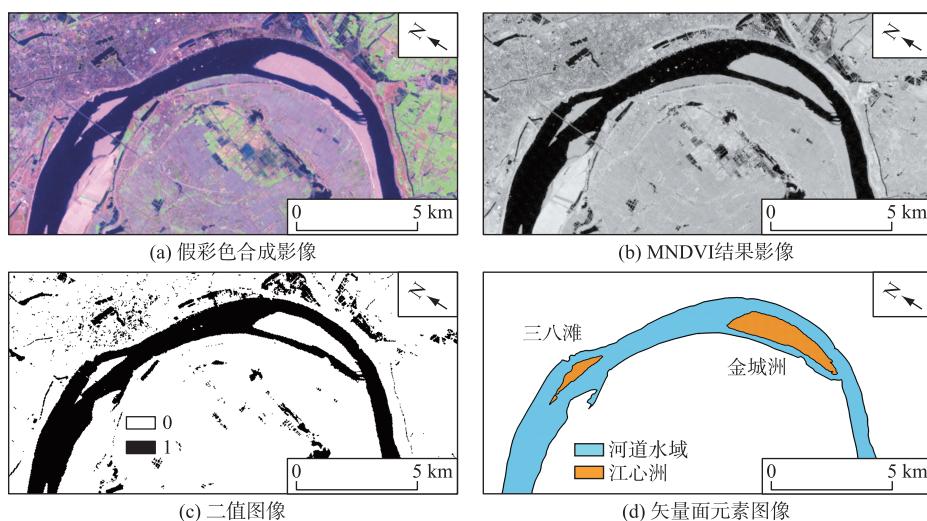


图 2 江心洲提取主要步骤

Fig.2 Main steps for extraction of MCBs

据表1,2013年后枝江段江心洲总出露面积变化不大,沙市段则逐年递减,减幅分别为5%和18%。

三峡工程运用后,沙市河段中各江心洲的萎缩趋势普遍大于枝江河段中的江心洲。如2003—2019年,枝江段关洲、董市洲及柳条洲的面积减幅分别为36%、12%和4%;而沙市段太平口心滩、三八滩及金城洲的面积减幅分别为58%、69%和52%。根据遥感影像观测,不同河段中江心洲的主要冲刷位置也存在差异。多年来枝江段卵石夹沙质江心洲的洲头形态较为稳定,减少的面积通常在洲头以下;而沙市段中的大部分江心洲以洲轴线为中心滩缘发生明显崩退^[9]。

2.2 江心洲演变差异原因分析

三峡水库蓄水前,长江处于天然冲积状态,枝江、沙市段的江心洲总出露面积最终均增加,但研究河段内各江心洲均有出现阶段性的冲蚀或淤积,此时洲滩演变仍处于相对平衡的状态^[19]。而三峡大坝建设后,坝下游江心洲经历严重持续冲刷,较下游沙市段的江心洲冲刷程度明显大于其上游的枝江段。本文分别计算了枝江、沙市段的汛期平均水流冲刷强度(F_f),用以反映两河段水流对河床冲刷能力的差异^[2],其公式为:

$$F_f = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} (Q_j^2 / S_j) / 10^8 \quad (2)$$

式中, N_f 为汛期总天数; Q_j 为汛期日均流量, m^3/s ; S_j 为汛期日均悬移质含沙量, kg/m^3 。根据干支流地理位置关系,计算枝江段 F_f 时考虑了松滋口分流的影响,采用的是枝城站、新江口站及沙道观站的水沙数据。沙市段 F_f 则采用沙市站水沙数据计算。

根据计算结果,三峡水库蓄水前(1994—2002年),枝江、沙市段 F_f 范围分别为4~7和4~6;三峡水库蓄水后(2003—2019年),枝江段 F_f 范围为17~362,沙市段为12~73。可见,三峡水库蓄水前枝江、沙市段水沙条件相近, F_f 年际间变化均不大;而水库蓄水后两河段 F_f 基本均逐年增大,且水流对枝江段河床的冲刷能力更强。但沙市段河床的实际受冲程度更严重,如2003—2019年两河段平滩河槽累计冲刷量分别为2.3亿和2.9亿 m^3 ,沙市段单位河长年均冲刷量为31.2万 $m^3/(a\cdot km)$,大于其上游枝江段的22.5万 $m^3/(a\cdot km)$ 。

以上现象与这两个河段的床沙组成密切相关,故本文收集研究河段2004、2007及2015年汛后固定断面床沙资料,计算了床沙中值粒径(D_{50})的沿程分布。由图3可知,枝江河段床沙组成明显粗于沙市河段。以2015年为例,枝江段荆3至荆25断面 D_{50} 范围为0.2~60.9mm;有洲滩分布的断面如关洲(关01—关10)、董市洲(董8—董12)及柳林洲(荆17—荆18)段的床沙相对较粗,大部分断面 D_{50} 大于10mm。而沙市段各断面床沙中值粒径相对均匀,其荆25至荆51断面 D_{50} 范围为0.2~0.4mm。三峡水库蓄水后,研究河段内床沙均有粗化趋势,2004—2015年枝江段河段平均床沙中值粒径 \bar{D}_{50} 由25.1mm增大至28.3mm,增幅约13%,沙市河段 \bar{D}_{50} 由0.2mm增大至0.3mm,增幅为42%。

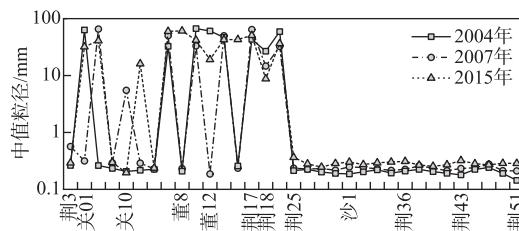


图3 床沙中值粒径 D_{50} 沿程变化情况

Fig.3 Longitudinal variation of median diameter of bed material in different years

在水流冲刷强度 F_f 的比较中,水流对枝江段河床的冲刷能力显著大于沙市河段,但由于枝江段河床组成相对较粗,抗冲性更强,故其河床实际受冲程度较沙市段的更小。对比两河段江心洲的出露面积变化,枝江段江心洲以卵石夹沙质为主,面积减幅相对较小,而沙市段江心洲均为沙质组成,床沙抗冲性弱使得洲体萎缩更为明显。综上分析,本文认为河床组成不同是造成枝江、沙市段江心洲冲刷程度显著差异的重要原因。

3 不同河床组成江心洲形态调整及机理分析

3.1 典型江心洲面积变化

枝江段内的关洲汊道段与沙市段内的金城洲汊道段在河道形态上具有相似性,即江心洲位于河道轴线的一侧,且面积基本接近。同时,关洲汊道的河床底质为卵石夹沙质,金城洲汊道的河床底质为沙质,可以显著比较河床组成差异对江心洲形态演变的影响。

统计关洲、金城洲 1994—2019 年的枯水期出露面积变化(图 4),分析表明:三峡水库蓄水前(1994—2002 年),关洲、金城洲的面积均表现为随时间波动性变化;三峡工程运用后(2003—2019 年),受清水下泄的影响,二者面积均明显减小,但金城洲的萎缩程度更大。在水库蓄水初期(2003—2008 年),江心洲面积减小尤为显著,其中关洲面积减幅为 12%,金城洲减幅高达 50%。2013—2019 年关洲面积减幅变缓直至基本不变;而金城洲在有几年略微淤积后持续冲刷,至 2016 年才得以控制,其面积在 2016—2019 年逐年增加。

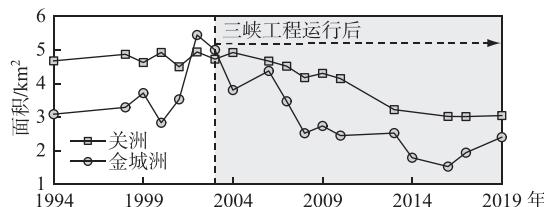


图 4 三峡水库蓄水前、后代表性江心洲出露面积变化

Fig.4 Variations in exposed areas of representative MCBs before and after the TGP operation

比较关洲 2002—2019 年的洲体形状可知,三峡工程运用后,关洲洲头形态较为稳定,冲刷后退幅度较小。而其面积减小主要在于,洲中荆 6 断面以下左缘及洲尾在洪水期主流顶冲的作用下萎缩显著^[20]。这主要与 2010—2014 年在关洲左汊开展的大规模无序采砂活动有关,采砂对江心洲平面形态产生了严重影响^[21]。2002—2013 年,关洲出露面积减小了 1.72 km²,左侧及洲尾减少的面积约 1.34 km²,占总减少面积的 78%,其中洲尾冲刷后退约 1.1 km,左缘崩退了近 0.6 km。2014 年后关洲左汊的非法采砂得到了有效控制,直至 2019 年关洲整体形态、面积变化不大(图 5a)。

与关洲仅洲尾左缘发生明显蚀退不同,金城洲整体萎缩严重。三峡工程运用前,金城洲洲体最宽处约 1.3 km(2002 年);三峡工程运用后,金城洲洲宽明显缩窄,2014 年其最大洲宽仅 0.7 km。此外,金城洲洲头下移、洲尾上移的现象显著。2002—2014 年其洲头冲刷后退超 2.6 km,洲尾上移了约 1.2 km,可见金城洲洲头冲刷幅度大于洲尾。2014—2019 年,受航道整治工程运行的影响(即瓦口子水道航道整治工程),金城洲洲头护滩带区域呈淤积态势,整体的面积表现为增加,而下段工程未控制段仍为冲刷态势^[22](图 5b)。

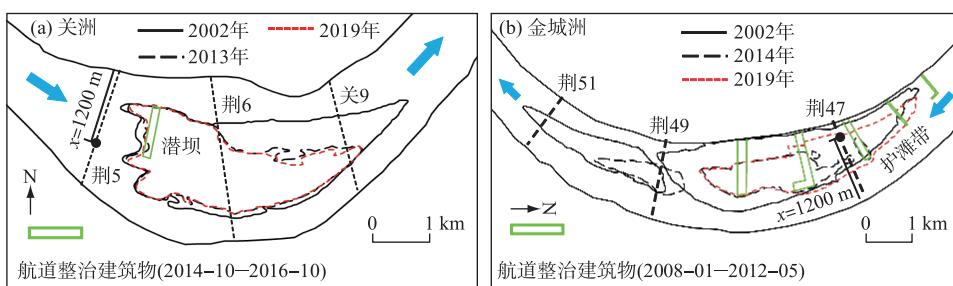


图 5 三峡水库蓄水前后代表性江心洲平面形态变化(注:图中下方括号内为整治建筑物实施的起止年份)

Fig.5 Planform evolutions of representative MCBs before and after the TGP operation

3.2 江心洲冲淤变形影响因素分析

3.2.1 床沙组成的影响 从关洲各断面床沙级配曲线来看,床沙中值粒径 D_{50} 以洲头为最大,洲中次之,洲尾最细(图 6)。2008 年以前,关洲床沙主要为粒径 2 mm 以下的沙粒,较粗卵石被细沙覆盖,床沙抗冲性较弱使得关洲面积在三峡工程蓄水初期(2003—2008 年)呈减少态势。在洲体冲刷过程中较细泥沙随水流冲走,卵石层得以出露,关洲洲头、洲中床沙逐渐粗化,洲头处卵石含量最高。至 2010 年,洲头荆 5 断面床沙级配中大于 16 mm 的卵石占 42%,洲中荆 6 断面卵石含量约 29%。与 2002 年相比,2013 年关洲大小已仅剩原洲头及中部一半的范围(图 5a),洲体卵石占比较高;至 2015 年洲头床沙进一步粗化,且左汊大规模采砂活动的停止,以及航道部门在关洲左汊进口至洲头陆续实施的潜坝与护滩带等航道整治工程^[23],限制了关洲的萎缩趋势。遥感影像资料分析表明,关洲自 2013 年以来面积变化不大。

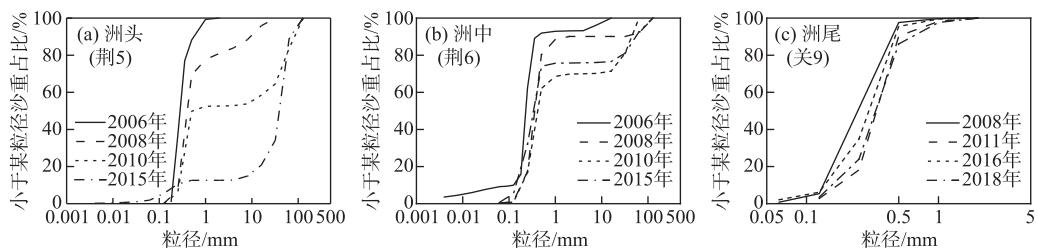


图 6 关洲床沙级配调整
Fig.6 Bed-material adjustments of Guanzhou

从金城洲各断面床沙级配曲线来看,金城洲整体属于沙质洲滩,床沙抗冲性弱,是金城洲面积萎缩显著的前提条件。金城洲洲头荆 47 断面床沙粒径分布均匀,超 98% 的泥沙粒径在 0.5 mm 以下,多年平均中值粒径为 0.25 mm,且无显著的粗化趋势(图 7)。相较于洲头,洲中、洲尾床沙略粗。2007 年以前,洲中荆 49 断面及洲尾荆 51 断面床沙级配与洲头差异较小,但近年来洲头以下床沙朝着粗化、不均匀的方向发展。2004—2016 年,洲中床沙中值粒径由 0.19 mm 增大至 0.33 mm,洲尾则由 0.14 mm 增大至 0.31 mm,增幅分别为 74% 和 112%。

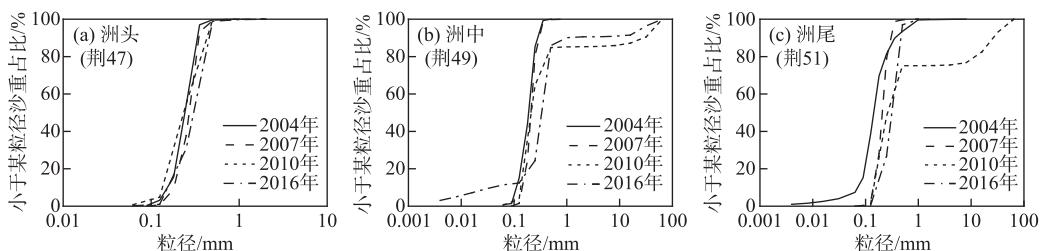


图 7 金城洲床沙级配调整
Fig.7 Bed-material adjustments of Jinchengzhou

泥沙颗粒大小不一,起动沉降特性具有差异。泥沙能否起动常用起动流速来表征,水流速度可反映水动力强弱^[4]。由以上分析可知,关洲与金城洲河床组成差异在洲头处最为明显。据实测资料,2012 年关洲洲头(荆 5)粒径大于 8 mm 的床沙约占 85%(图 6a),之后床沙级配变化不大;金城洲洲头(荆 47)约 98% 的床沙粒径在 0.5 mm 以下,且多年来无明显变化(图 7a)。因此可将 $d_m = 8 \text{ mm}$ 、 $d_m = 0.5 \text{ mm}$ 分别作为关洲及金城洲洲头的床沙优势粒径。通过将水流速度与江心洲洲头床沙起动流速进行对比,由此判断洲头床沙可动性强弱。在荆 5 及荆 47 断面各取了距离左岸 $x = 1200 \text{ m}$,且均位于洲头浅滩上的一点(大致位置已在图 5 中标注);由于研究河段中江心洲洲头浅滩通常较为平缓,高程变化不大^[12],因此该点的床沙起动情况基本可代表整个洲头的情况。该点的水流速度由曼宁公式(式(3))确定,床沙起动流速则采用非粘性沙的沙莫

夫公式(式(4));两式中的水深同样为 $x=1200$ m 处的水深,为水位与该点河床高程之差,前者可由上、下游水位通过距离插值得到。

$$V = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$U_c = 1.14 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} gd} \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

式中, V 为水流速度, U_c 为起动流速, m/s ; n 为糙率, 由于进口水文站(枝城站、沙市站)距离江心洲洲头较近(分别为 4、6 km), 且其间无分汇流, 故可用该处的流量糙率关系确定; h 为水深, m ; J 为水面比降; ρ_s 、 ρ 分别为泥沙和水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; d 为泥沙粒径, m , 此处采用洲头(荆 5/荆 47)床沙中值粒径 D_{50} 及优势粒径 d_m 代入进行计算。

关洲洲头形态较金城洲更稳定,与其床沙在年内丰、枯水季中达到起动条件的数量较少、历时更短有关。如图 8 所示,关洲洲头 8 mm 优势粒径泥沙仅在汛期 7—10 月可达到起动条件;伴随洲头床沙不断粗化, D_{50} 对应泥沙起动流速大于水流速度的时间逐渐增多,至 2012 年前者全年在水流速度之上,关洲洲头床沙已较难起动。而金城洲洲头床沙粗化较不明显,在所有统计年份中,金城洲洲头 1—3 月为出露状态,4—12 月大部分时间其 D_{50} 及 0.5 mm 优势粒径对应泥沙起动流速在水流速度之下,即金城洲洲头有 98% 的床沙在年内 8—9 个月中可达到起动条件,造成洲头床沙大量冲刷,因此金城洲洲头在控导工程发挥效益之前面积萎缩较为显著。

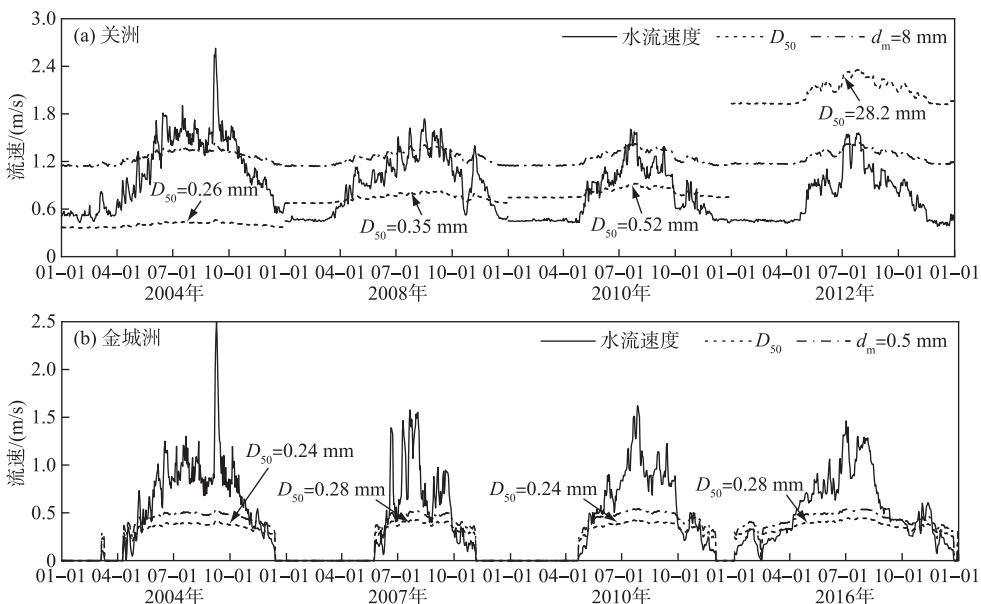


图 8 江心洲洲头($x=1200$ m)特征粒径下的床沙起动流速与水流速度对比

Fig.8 Comparison of sediment incipient velocity of characteristic particle size and flow velocity in the bar head (at $x=1200$ m)

3.2.2 床沙粗化与水沙变化的综合影响 三峡水库蓄水后,水沙条件改变是坝下游江心洲面积变化的主控因素,据上文分析可知,床沙组成同样会对洲滩演变造成显著影响,故本小节将讨论这两者对江心洲面积变化的综合作用。枝江及沙市河段水沙于汛期(5—10 月)集中输移,江心洲面积在汛期水流顶冲作用下萎缩最为明显,可采用汛期水流冲刷强度 F_f (式(2))来表征汛期内水沙综合条件^[24]。此外,洲滩调整对水沙变化有滞后响应,需建立洲滩面积与前 n 年平均汛期水流冲刷强度 \bar{F}_{nt} 的关系。经试算,当 n 值取 5 时两者有良好的相关性。为综合考虑河床组成对江心洲面积变化的影响,采用相对水深的概念来代表河床粗糙程度。

相对水深(R_r)为汛期平均水深 H 与江心洲平均床沙中值粒径 D_{50} 的比值($R_r = H/D_{50}/1000$, H 与 D_{50} 单位均为m),数量级与水流冲刷强度一致^[25]。由于进口文水站距离江心洲较近,故关洲段(荆5-荆7)采用了枝城站(荆3)的汛期平均水深与流量、含沙量数据,金城洲段(荆47-荆51)则采用沙市站(荆42)的汛期平均水深与水沙资料。

为分析多个因素的综合影响,可采用因变量(Y)与 p 个解释变量(X_1, X_2, \dots, X_p)相关联^[26],形式为 $Y = a(X_1)^{\beta_1} + c(X_2)^{\beta_2} + \dots + m(X_p)^{\beta_p}$,故江心洲面积与前5年平均汛期水流冲刷强度 \bar{F}_{sf} 及相对水深 \bar{R}_r 的函数关系可表示为:

$$A = \alpha_1(\bar{F}_{sf})^{\beta_1} + \alpha_2(\bar{R}_r)^{\beta_2} \quad (5)$$

式中, A 为江心洲面积, α_1, α_2 为系数, β_1, β_2 为指数,可利用SPSS软件进行回归分析后确定。

分别采用关洲、金城洲面积数据与计算得到的 \bar{F}_{sf} 和 \bar{R}_r ,对三者经验模型式(5)进行率定。率定结果如图9,可知 α_1, β_2 为负数, α_2, β_1 为正数,说明关洲、金城洲面积与 \bar{F}_{sf} 及 \bar{R}_r 均呈负相关,即水流冲刷强度越大,江心洲面积越小;而床沙 D_{50} 越小,相对水深越大,江心洲面积也愈小。关洲、金城洲面积与 \bar{F}_{sf} 及 \bar{R}_r 综合关系式的决定系数 R^2 分别达0.92和0.89。而仅考虑单一影响因素时,关洲面积与 \bar{F}_{sf} 或 \bar{R}_r 关系式的 R^2 分别为0.89、0.63;金城洲面积与 \bar{F}_{sf} 或 \bar{R}_r 关系式的 R^2 分别为0.86、0.67,可见江心洲面积主要受水沙条件的影响,但综合考虑水沙因素与床沙组成的经验模型,能更好地解释在同时受到水沙变化与床沙组成调整影响下的洲滩面积变化。

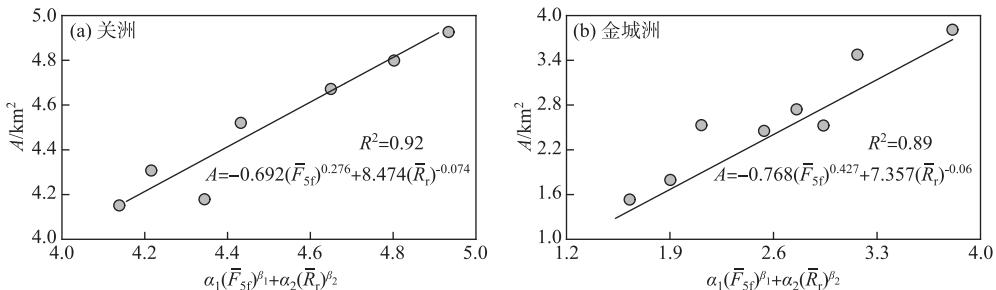


图9 江心洲面积与前5年平均汛期水流冲刷强度及相对水深的关系

Fig.9 Relationship between the exposed bar area and previous five-year average fluvial erosion intensity in flood season and the relative water depth

4 结论

利用枝江、沙市河段实测床沙资料及从遥感影像中提取的江心洲面积数据,分析了三峡工程运用后不同河床组成江心洲的演变特点,探讨了江心洲面积变化与水沙条件及床沙组成调整的关系。得到如下结论:

- 1)三峡工程运用后,枝江、沙市河段中的江心洲均显著冲蚀,但沙市段沙质江心洲的面积萎缩程度明显大于其上游枝江段的卵石夹沙质江心洲。此外,水流冲刷强度 F_r 及河床冲刷强度的计算结果表明,水流对枝江段河床的冲刷能力更强,但沙市段河床组成抗冲性较差,使得其实际受冲程度更严重。
- 2)以关洲及金城洲分别作为卵石夹沙质及沙质江心洲的典型。三峡工程运用后,关洲洲头及洲中床沙粗化明显;受到关洲左汊大规模无序采砂的影响,其沙质洲尾及左侧冲刷退显。至2013年关洲仅剩原洲头及洲中一半的范围,洲体卵石占比高,床沙抗冲性较强。在洲头整治工程及非法采砂得到有效控制的影响下,关洲萎缩趋势减缓。金城洲河床组成整体无明显粗化,其面积减少态势较关洲更严重;三峡工程运用后金城洲洲宽明显缩窄,且洲头下移、洲尾上移的现象显著。
- 3)从泥沙起动因素分析来看,关洲洲头较金城洲抗冲性强的原因与其床沙在年内达到起动条件的数量较少、历时较短有关,且随着洲头床沙不断粗化而愈难起动。三峡工程运用后,坝下游水沙条件急剧变化,

这是洲滩演变的主导因素,而床沙组成同样会对江心洲面积变化造成一定影响,综合考虑水沙改变及床沙组成影响的经验关系能更好地反演近期不同河床组成江心洲的面积变化过程。

5 参考文献

- [1] Williams GP, Wolman M. Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS professional paper, 1985: 1286.
- [2] Xia JQ, Liu X, Deng SS et al. Temporal and spatial distribution of bank retreat in the Jingjiang reach of the Yangtze River after the Three Gorges Project operation and its influence on channel adjustment. *J Lake Sci.*, 2022, 34(1): 296-306. DOI: 10.18307/2022.0124. [夏军强, 刘鑫, 邓珊珊等. 三峡工程运用后荆江河段崩岸时空分布及其对河床调整的影响. 湖泊科学, 2022, 34(1): 296-306.]
- [3] Chang J, Li JB, Lu DQ et al. The hydrological effect between Jingjiang River and Dongting Lake during the initial period of Three Gorges Project operation. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(5): 771-786. DOI: 10.1007/s11442-010-0810-9.
- [4] Yang XH, Xiong HB, Li YT et al. Adjustment mechanism of the typical sandbars in the lower Jingjiang River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci.*, 2021, 33(3): 819-829. DOI: 10.18307/2021.0321. [杨绪海, 熊海滨, 李义天等. 三峡水库蓄水后下荆江河段典型洲滩调整机理. 湖泊科学, 2021, 33(3): 819-829.]
- [5] Wen ZF, Yang H, Zhang C et al. Remotely sensed mid-channel bar dynamics in downstream of the Three Gorges Dam, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 409-429. DOI: 10.3390/rs12030409.
- [6] Wintenberger CL, Rodrigues S, Claude L et al. Dynamics of nonmigrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France). *Geomorphology*, 2015, 248: 185-204. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.032.
- [7] Li DF, Lu XX, Chen L et al. Downstream geomorphic impact of the Three Gorges Dam: With special reference to the channel bars in the Middle Yangtze River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(13): 2660-2670. DOI: 10.1002/esp.4691.
- [8] Li ZW, Wang ZY, Jia YH et al. Evolution analysis of channel bars in the middle and Lower Yangtze River before and after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1): 65-73. DOI: 10.11870/cjlyzyhhj201501009. [李志威, 王兆印, 贾艳红等. 三峡水库蓄水前后长江中下游江心洲的演变及其机理分析. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 65-73.]
- [9] Zhu LL, Ge H, Li YT et al. Branching channels in the middle Yangtze River, China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(2): 246-258. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2015.02.004. [朱玲玲, 葛华, 李义天等. 三峡水库蓄水后长江中游分汊河道演变机理及趋势. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(2): 246-258.]
- [10] Lou YY, Mei XF, Dai ZJ et al. Evolution of the mid-channel bars in the middle and lower reaches of the Changjiang (Yangtze) River from 1989 to 2014 based on the Landsat satellite images: Impact of the Three Gorges Dam. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(10): 1-18. DOI: 10.1007/s12665-018-7576-2.
- [11] Zhao WY, Yang YP, Zhang HQ et al. Adjustment patterns and causes of the morphology of sandy riverbed downstream of the Three Gorges Dam. *Advances in Water Science*, 2020, 31(6): 862-874. [赵维阳, 杨云平, 张华庆等. 三峡大坝下游近坝段沙质河床形态调整及洲滩联动演变关系. 水科学进展, 2020, 31(6): 862-874.]
- [12] Li ZW, Li YF, Wang ZY et al. A conceptual model of deposition and erosion of mid-channel bar head zone in anabranching river. *Advances in Water Science*, 2016, 27(1): 1-10. [李志威, 李艳富, 王兆印等. 分汊河流江心洲洲头冲淤概念模型. 水科学进展, 2016, 27(1): 1-10.]
- [13] Zhao L, Li YT, Sun ZH. Preliminary study of impact of water and sediment transport process on bars in Daorenji-Yanglinyan straight braided reach. *Journal of Sediment Research*, 2013, (4): 26-33. [赵琳, 李义天, 孙昭华. 水沙过程对道人矶-杨林岩顺直分汊河段洲滩演变影响初步研究. 泥沙研究, 2013, (4): 26-33.]
- [14] Wang J, Dai ZJ, Mei XF et al. Immediately downstream effects of Three Gorges Dam on channel sandbars morphodynamics between Yichang-Chenglingji Reach of the Changjiang River, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 629-646. DOI: 10.1007/s11442-018-1495-8.
- [15] Han JQ, Sun ZH, Feng QF. Critical features of flow dynamics at the entrance of multi-branched channels. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 842-848. [韩剑桥, 孙昭华, 冯秋芬. 江心洲头部冲淤动力临界特性. 水科学进展, 2013, 24(6): 842-848.]
- [16] Xue XH, Chang S, Song EP. Evolution of floodplains and bars at the Jingjiang reach of Yangtze River, China in response to Three Gorges Reservoir impoundment. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1714-1727. DOI: 10.11821/dlxh201809008. [薛兴华, 常胜, 宋鄂平. 三峡水库蓄水后荆江洲滩变化特征. 地理学报, 2018, 73(9): 1714-1727.]
- [17] Zhu LL, Zhang W, Ge H. Evolution trend and causes of the typical braided middle Yangtze reach after Three Gorges Reservoir impoundment. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 106-113. [朱玲玲, 张为, 葛华. 三峡水库蓄水后荆江典型分汊河段演变机理及发展趋势研究. 水力发电学报, 2011, 30(5): 106-113.]
- [18] Guo XH, Li YT, Liu Y. Analysis of flow and sediment diversion at three outlets along Jingjiang River. *Journal of Sediment Research*, 2014, (1): 53-60. [郭小虎, 李义天, 刘亚. 近期荆江三口分流分沙比变化特性分析. 泥沙研究, 2014, (1): 53-60.]

- [19] Huang HQ, Deng CY, Nanson GC *et al.* A test of equilibrium theory and a demonstration of its practical application for predicting the morphodynamics of the Yangtze River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, **39**(5) : 669-675. DOI: 10.1002/esp.3522.
- [20] Chen L, Yan X, Zhou YJ *et al.* Erosion and deposition of Guanzhou braided reach during initial impoundment period of Three Gorges Project. *Journal of Sediment Research*, 2012, (1) : 53-57. [陈立, 闫霞, 周银军等. 三峡水库蓄水初期关洲分汊河段的冲淤调整特性分析. 泥沙研究, 2012, (1) : 53-57.]
- [21] Peng YM, Huang LM. Influence of illegal sand mining on river morphology in the Guanzhou branch of Jingjiang in the Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2020, **45**(4) : 27-32. [彭玉明, 黄烈敏. 无序采砂对长江荆江河段关洲汊道形态的影响. 泥沙研究, 2020, **45**(4) : 27-32.]
- [22] Yang YP, Li M, Liu WL *et al.* Study on the relationship between beach trough evolution and navigation obstruction characteristics in Jingjiang reach of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(2) : 240-252. [杨云平, 李明, 刘万利等. 长江荆江河段滩槽演变与航道水深资源提升关系. 水科学进展, 2022, **33**(2) : 240-252.]
- [23] Huang L, Liu SH. Influence of channel adjustment of Guanzhou reach on flow diversion at songzikou after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, **50**(1) : 22-27. DOI: 10.15961/j.jsuese.201700775. [黄莉, 刘士和. 三峡水库蓄水后关洲河段河势调整对松滋口分流影响. 工程科学与技术, 2018, **50**(1) : 22-27.]
- [24] Li YW, Xia JQ, Zhou MR *et al.* Analysis on evolution of mid-channel sandbars in Shashi reach after the Three Gorges Project operation. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, **37**(10) : 76-85. DOI: 10.11660/slfdxb.20181009. [李溢汶, 夏军强, 周美蓉等. 三峡工程运用后沙市段洲滩形态调整特点分析. 水力发电学报, 2018, **37**(10) : 76-85.]
- [25] Liu X, Xia JQ, Zhou MR *et al.* Formula of movable bed roughness for the middle Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(4) : 535-546. [刘鑫, 夏军强, 周美蓉等. 长江中游动床阻力计算. 水科学进展, 2020, **31**(4) : 535-546.]
- [26] Adamowski J, Chan HF, Prasher SO *et al.* Comparison of multiple linear and nonlinear regression, autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and wavelet artificial neural network methods for urban water demand forecasting in Montreal, Canada. *Water Resources Research*, 2012, **48**(1) : 273-279. DOI: 10.1029/2010wr009945.