

三峡水库蓄水后荆江洲滩变化特征

薛兴华^{1,2}, 常 胜^{1,2}, 宋鄂平^{1,2}

(1. 湖北民族学院林学院园艺学院, 恩施 445000; 2. 生物资源保护与利用湖北省重点实验室, 恩施 445000)

摘要: 目前对三峡水库蓄水后荆江河段的洲滩演变还缺乏完整认识。基于三峡水库蓄水前后枯水期遥感影像, 分析了荆江洲滩的冲淤变化与分布及形态演变。结果表明, 蓄水后荆江洲滩总面积持续冲刷减小, 累计冲刷 4.56 km², 大部分发生在蓄水后前 6 年(冲刷速率 0.55 km²/a)。上、下荆江洲滩的冲淤演变存在差异性。上荆江洲滩总面积一直处于冲刷萎缩中, 且其强度明显大于下荆江, 累计冲刷 6.46 km²; 下荆江前期(2002-2009 年)冲刷、后期(2009-2015 年)淤增, 累计淤 1.90 km²。在冲淤分布上, 上荆江凸岸滩持续冲刷萎缩, 凹岸滩前期冲刷、后期略有淤增, 心滩(洲)前期淤积增长而后期冲刷萎缩; 下荆江主要是凸岸滩冲刷, 凹岸滩和心滩(洲)有所发展。根据滩体位置活动和冲淤动态性, 荆江心滩(洲)演变被划分为 8 种典型类型。在形态演变上, 上荆江以凸岸突出滩体和边滩发育的凹岸滩冲刷显著, 形态变化不大。下荆江凸岸滩上游弯侧冲蚀后退、湾顶退缩、下游弯侧淤积伸长, 形态趋向低弯扁平化, 在高弯曲特定河湾平面形态格局下凸岸冲刷—淤积过程延伸到相邻河湾凹岸, 成为下荆江凹岸滩和心滩淤积发展的重要因素, 但淤积一般不越过凹岸湾顶。

关键词: 地貌效应; 洲滩; 冲淤动态; 形态演变; 荆江; 三峡水库

DOI: 10.11821/dlxb201809008

1 引言

大坝下游河道对水沙条件变动的地貌响应是河流地貌研究的重要课题^[1], 不仅影响大坝下游防洪、航运、农业等人类生产活动的进行, 也涉及大坝下游河道演变的一些基本问题, 得到国内外研究者广泛关注。目前, 大坝下游地貌响应的研究, 侧重于平面形态变化^[2-3]、河床的冲刷与河床质粗化^[4-5]、纵坡降变化及横断面形态调整^[2, 4, 6]、河道摆动^[2-3]以及河型转化^[7]等河道演变基本问题。国内研究者针对黄河干流水库^[8-11]、汉江丹江口水库^[12-13]、长江三峡水库^[14-17]等大型水利工程建成后的河床演变问题开展了大量研究。已有研究对洲滩等河床微地貌演变的讨论相对较少^[18-19], 洲滩作为河流地貌结构与格局的重要构成因素, 对河流系统的完整性、复杂性及其生态服务功能具有重要意义^[1-2]。大坝蓄水后河流系统都会迅速调整^[1, 4, 6, 20], 显示深刻的水文效应、地貌效应和生态效应。因此, 人们十分关注大坝下游洲滩对拦蓄作用的响应特征。从平衡输沙理论出发, 依据水沙条件和河道边界性质, 可以区分不同类型的大坝下游地貌响应^[1, 6], 为理解大坝下游河流地貌演变提供了宏观的科学依据。相关的河流边滩冲淤变化实证研究^[1], 以及受调节河流与非调节河流的对比研究^[21]表明, 活动的河漫滩大幅度减少而非活动的显著增加, 且地貌复杂

收稿日期: 2017-09-27; 修订日期: 2018-05-24

基金资助: 国家自然科学基金项目(31460132); 湖北民族学院博士启动基金项目(D2014196) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31460132; PhD Research Startup Foundation of the Hubei University for Nationalities, No.D2014196]

作者简介: 薛兴华(1976-), 男, 湖北宣恩人, 博士, 副教授, 主要从事河流地貌与景观生态研究。

E-mail: xinghua_xue@163.com

度大大减小。大坝的河流地貌效应无论在结构上,还是在功能作用上,都有显著表现。据此,Legleiter^[1]在分析大坝对下游河漫滩系统的影响时,将其区分为被动效应(连接性)和主动效应(过程功能)。从已有的研究中还应注意,大坝下游河流地貌演变不仅受到不同水库运用方式下水沙条件变化的影响,而且也受到不同区域地质背景、河型等边界条件下响应差异性的影响^[2, 6, 22],相应地也有必要开展这些方面针对性的研究。

荆江是长江中游河流地貌过程颇为活跃和动态演变相当敏感的河段,对三峡水库运行后水沙条件变化的响应显著。历史上,荆江河段受到了自然和人工裁弯、葛洲坝等干扰的影响,一般认为,至三峡水库运行前的2002年荆江河段已处于冲淤动态平衡^[23-24],自2003年三峡水库蓄水以来荆江河段又处于快速调整期^[15, 23, 25-26]。目前,对荆江的河床冲刷^[14-15, 27]、断面形态演变^[27]和平面形态变化^[16]等取得了较丰富的认识。研究表明,蓄水后荆江河段冲淤显著变大、加快,且冲淤部位有所变化,由蓄水前的槽冲滩淤转为滩槽均发生冲刷^[23, 25],并出现一些新的演变特征,如下荆江河段凸岸冲刷、凹岸淤积的问题^[25, 27-29]。对于三峡水库蓄水后荆江的洲滩演变,已有的研究,大多是针对小尺度特定河湾洲滩形态变化^[30-31]或是对特定冲淤现象的讨论^[19, 28-29],对全河段河型演变规律及驱动机制有所研究^[32],但缺乏对荆江全河段洲滩演变格局的完整认识。为此,本文以荆江全河段为研究对象,利用遥感影像资料,三峡水库蓄水前后洲滩分布、面积及发育程度的变化情况,定量描述蓄水后洲滩的冲淤变化及其空间分布特性,并揭示洲滩形态的演变特征,以期深化对三峡水库下游地貌效应的认识,为荆江河段的管理提供参考依据。

2 研究区与方法

2.1 研究区简况

长江中游荆江河段自湖北省枝江市(枝江大桥)至湖南省城陵矶(图1),全长约327 km,以藕池口为界分为上、下荆江,上荆江为微弯分叉型河段,江心洲滩发育;下荆江为蜿蜒型河段,边滩发育。江口以上两岸有低山、丘陵,河床为砂卵石质;江口以下是冲积平原,为砂质河段^[15, 33]。在河湾分布上^[16],荆江河段包括23个河湾,上荆江由规模较大、弯曲率较小的6个河湾组成,在本文中为便于分析讨论,自上游而下依次编号为101~106,下荆江由17个弯曲率较大的河湾(编号207~223)组成。

2.2 遥感影像选取及洲滩分布信息提取

三峡水库自2003年蓄水以来已运行10余年,为更好地呈现研究区的洲滩分布,避免洪水淹没对洲滩识别的影响,再者蓄水后荆江枯水河床洲滩冲淤较明显^[24-25],本研究选取了蓄水前后3期枯水期Landsat ETM+影像(获取时间均为1月份)。至2002年荆江已处

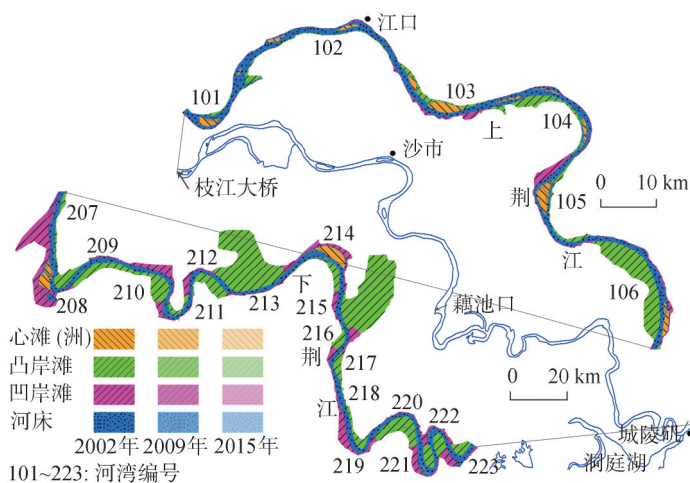


图1 研究区及基于遥感资料提取的2002-2015年洲滩分布
Fig. 1 Distribution of floodplains and bars based on the data extracted from remote sensing images in the study area from 2002 to 2015

于总体冲淤平衡^[23-24], 故以2002年作为蓄水前的参照状态, 以2009年、2015年反映蓄水后6年、12年的洲滩分布状态。遥感影像资料源于美国地质调查局 (<https://glovis.usgs.gov/>), 并通过影像融合技术, 得到15 m多光谱影像。经空间纠正、配准后, 综合采用遥感指数法^[34]和地理相关法, 将洲滩地貌单元分类为凸岸滩、凹岸滩、心滩(洲), 得到研究区不同时期的洲滩分布(图1), 在GIS软件中计算河段、河湾、洲滩单元等尺度上的面积变化与发育度变化, 并制作洲滩形态分布图, 以刻画洲滩形态演变。

荆江是限制性河道, 其横向发展受荆江大堤控制, 因此以荆江大堤为河道边界, 对于上荆江少部分无堤段, 借鉴相关研究普遍采用的方法^[35], 以河岸植被为边界。洲滩演变分析除了采用面积测算外, 为增加不同规模河湾(河段)的可比性, 还构建了洲滩发育度指数(Development Degree of floodplains and Bars, DDB), 即单位河长的洲滩面积(hm^2/km):

$$DDB = S/L \quad (1)$$

式中: S 为洲滩面积(hm^2); L 为河道中心线长度(km)。

3 结果与分析

3.1 荆江河段洲滩基准结构特征

以蓄水前的2002年为基准(图2), 荆江的洲滩发育度高、面积宽广, 总洲滩面积 590.2 km^2 , 洲滩总体发育度为 $180.6 \text{ hm}^2/\text{km}$, 其中凸岸滩最为发育, 其次为凹岸滩, 心滩(洲)的规模和发育度最小。凸岸滩、凹岸滩、心滩(洲)的总面积依次为 387.6 km^2 、 146.7 km^2 、 52.5 km^2 , 其对应的发育程度分别为 $118.6 \text{ hm}^2/\text{km}$ 、 $44.9 \text{ hm}^2/\text{km}$ 、 $16.1 \text{ hm}^2/\text{km}$ 。上、下荆江在洲滩结构上存在差异性(图2), 总体上, 下荆江洲滩发育度较上荆江大得多, 主要是凸、凹岸滩的面积和发育度明显高于上荆江, 而上荆江心滩(洲)发育程度较下荆江大, 这种洲滩结构与上荆江微弯分汊、下荆江高弯曲蜿蜒的平面形态结构^[16]是吻合的。

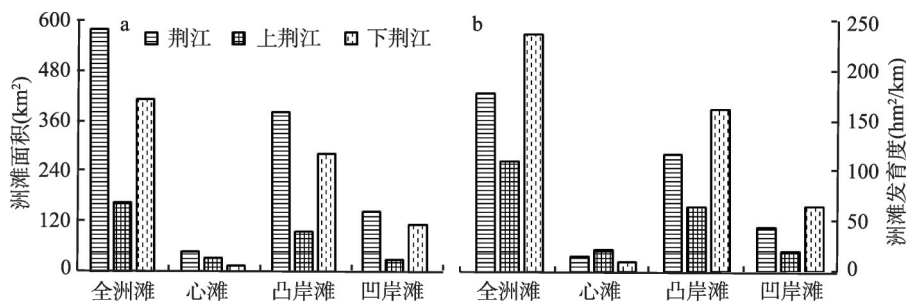


图2 2002年荆江河段洲滩基准组成结构

Fig. 2 Reference geomorphic structure of the Jingjiang reach in Yangtze River before Three Gorges Reservoir impoundment in 2002

3.2 荆江河段洲滩总体变化特征

在洲滩总体变化上, 三峡水库蓄水后, 荆江河段洲滩总面积持续减少, 且大部分发生在蓄水后的前6年(2002-2009年), 约占总冲刷量的83.7%, 期间冲刷速率为 $0.55 \text{ km}^2/\text{a}$, 后期减弱, 与蓄水前的2002年相比, 累计冲刷减少 4.56 km^2 (图3a)。相关研究也认为, 大坝下游的冲刷调整大部分发生在蓄水后约10年甚至几年内^[4, 6]。在冲淤分布上, 总体看具有凸岸滩明显冲刷减小、凹岸滩及心滩(洲)有所淤增的特点(图3c~3h)。相较于

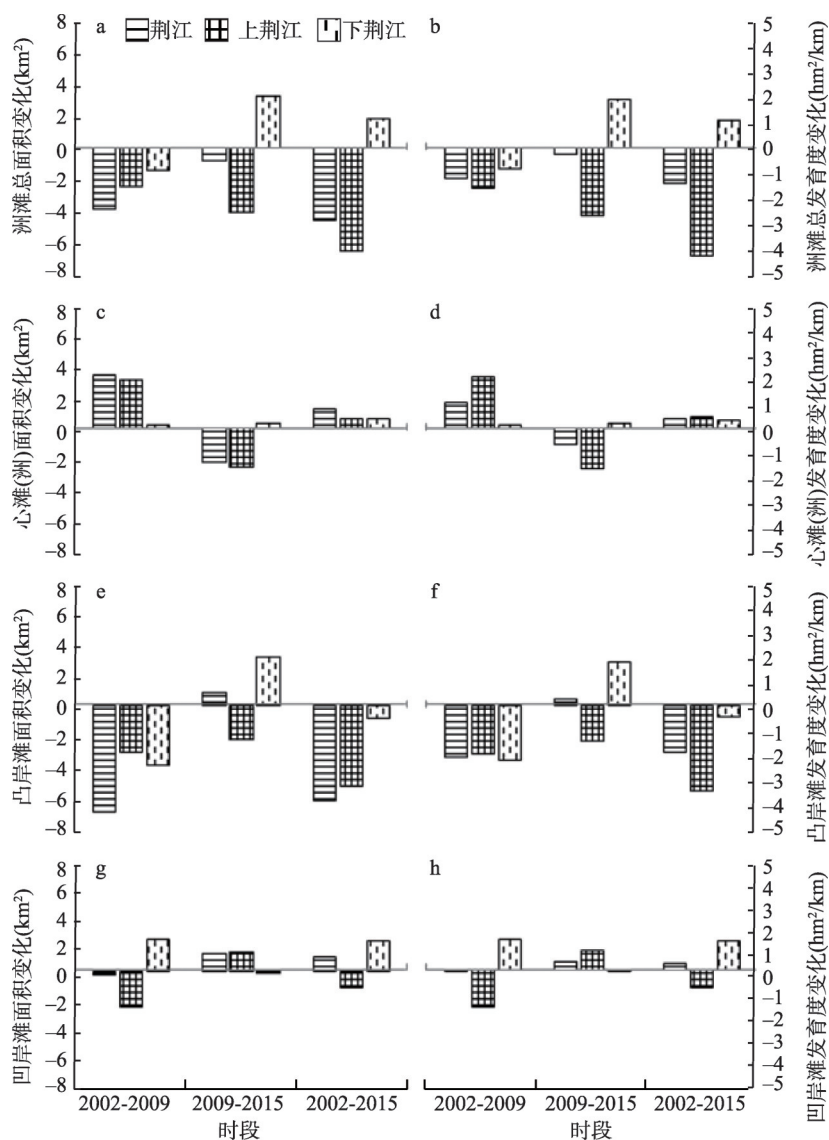


图3 三峡水库蓄水后不同时期内荆江河段的洲滩变化

Fig. 3 Changes in the acreage and development of floodplains and bars at the Jingjiang reach in different periods after Three Gorges Reservoir impoundment

2002年,至2015年荆江河段凸岸滩累计冲刷减少 6.22 km^2 ,前期冲刷强烈(减小 7.03 km^2),后期略有淤增,主要与下荆江少部分河湾的明显淤增有关。

三峡水库蓄水后,上、下荆江洲滩冲淤变化的时空格局存在差异性,显示出对水沙调节的响应复杂性,这种复杂性在其他河流的研究中也可以观察到^[8, 13]。在洲滩总体冲淤变化上,无论是从面积变化还是发育度变化上看,上荆江洲滩的冲刷萎缩都要强于下荆江(图3a、3b)。断面冲淤研究也表明,上荆江冲刷强度较下荆江大^[27]。蓄水后上荆江洲滩一直处于冲刷萎缩中,并有加剧之势,而下荆江表现为前期(2002-2009年)明显冲刷减小、后期(2009-2015年)淤积增长,即存在上荆江洲滩冲刷、泥沙向下游输移、部分在下荆江淤积的特点,这种上游冲刷、泥沙输移至下游方向淤积的冲淤分布特征在河湾

尺度上表现得更为直接、明显。2002-2009年、2009-2015年上荆江洲滩冲刷分别减小2.39 km²、4.07 km²，累计减小6.48 km²，冲刷速率为0.50 km²/a，洲滩发育度较蓄水前的2002年减小4.24 hm²/km。2002-2009年下荆江洲滩冲刷减小1.43 km²，2009-2015年淤增3.33 km²。

在冲淤分布上（图3c~3h），蓄水后的前期阶段（2002-2009年），上荆江凸、凹岸滩冲刷萎缩，心滩（洲）有淤积增长；后期（2009-2015年）凸岸滩和心滩（洲）冲刷萎缩明显，凹岸滩有所淤积增长（与部分河湾心滩并岸有关）。至2015年，上荆江凸、凹岸滩累计分别冲减5.35 km²、1.17 km²，心滩（洲）淤增0.71 km²。心滩（洲）的淤增在成因上可能是，该河段涨淤落冲，枯水河槽冲刷严重、蚀深下切^[27, 33]，乃至枯水位下降^[36]，三峡水库蓄水后退水快、汛后冲刷不足^[26]。下荆江，在前期阶段，凸岸滩冲刷减小、凹岸滩淤积增长，凸岸滩冲刷强度甚至超过上荆江，冲刷速率达0.57 km²/a，凸、凹岸的冲淤对比关系已有报道^[25, 28-29, 31]，其成因可能与后文所述高蜿蜒河湾平面形态下凸、凹岸的互动演变关系有关。后期阶段，下荆江凸岸滩明显淤积增长，凹岸滩变化不大。下荆江心滩（洲）在蓄水后持续淤积发展，累计淤增0.63 km²。

3.3 荆江河段洲滩冲淤分布与形态演变

3.3.1 荆江河段心滩(洲)演变特征 上荆江各河湾均发育有规模较大的心滩（洲），且分布位置大体稳定，其中在跨度较大的河湾102、103和104分别存在4、2、3个心滩（洲）体（图4）。在下荆江除了石首和监利2个河湾（编号208、214）存在分布稳定的心滩（洲）外，其他5个河湾处的心滩（洲）存在明显的时空动态性，其中藕池口分流（河湾编号207）心滩在蓄水后，伴随分流口滩的迅速扩张而并滩，调关、七弓岭、观音洲河湾（编号211、221、222）的心滩则是蓄水后的新生滩。

三峡水库蓄水后的前期阶段（2002-2009年），上荆江心滩（洲）淤增3.23 km²，后期（2009-2015年）冲刷萎缩，减小2.52 km²。前期主要是沙市、公安和郝穴3河湾（编号104、105、106）处心滩（洲）的淤积增长（图4a、4b），尤其是前二者中的太平口心滩（编号104101）和南星洲分别淤增1.73 km²、2.09 km²，其他心滩（洲）冲淤变化不大。后期，除公安河湾处的南星洲继续淤增外，其他河湾的心滩（洲）皆冲刷萎缩。长

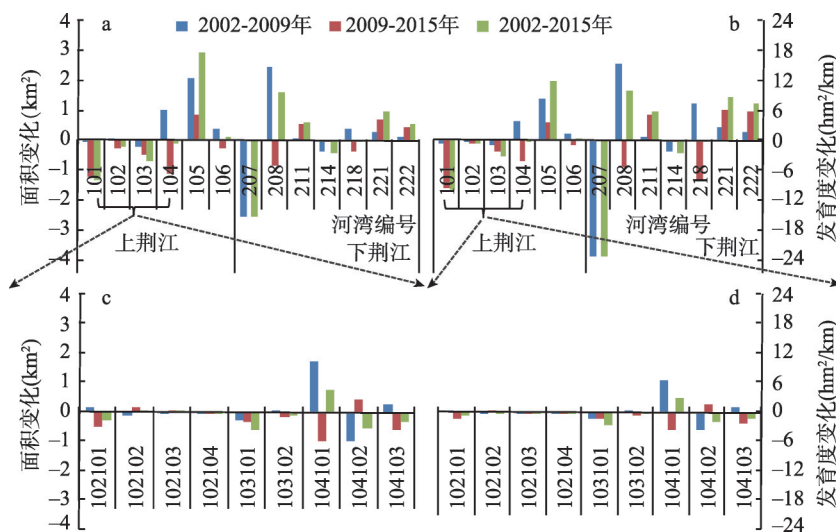


图4 三峡水库蓄水后荆江心滩(洲)的变化分布
Fig. 4 Changes in the acreage and development of mid-channel bars/islands at the Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment

江中游心滩（洲）冲淤的时空变异性在相关研究中有报道^[19]，在成因上，部分河湾及前期的淤增，如前文所述，是河段自身冲淤性质与水文情势调整共同作用的结果^[26-27, 33, 36]，后期的普遍冲刷表明水文情势变化引起的清水下泄、冲刷仍占主导。对于同一河湾内的多个心滩（洲）体，河湾 102、103 和 104 均表现出上游心滩（洲）冲淤动态变化大、下游心滩（洲）动态变化较小的特征（图 4c、4d）。

比较而言，下荆江心滩（洲）在三峡水库蓄水后具有总体淤积增长之势（图 4a、4b），除藕池口分流处（河湾 207）心滩并滩、监利河湾（编号 214）乌龟洲有所冲刷缩小外，其他 5 个河湾的心滩（洲）均具累计淤增的特征，甚至在河湾 211、222 新成心滩。心滩（洲）淤增、新成心滩并不一定意味着河型调整，目前来看，大多认为三峡水库蓄水后荆江河段还不存在河型调整^[16, 37]，其成因可能是，河流泥沙沿程得到恢复^[38]，在高蜿蜒河湾平面形态控制、洞庭湖顶托作用下，上游冲刷泥沙在向下游输移中的暂时性部分淤积。

三峡水库蓄水后，荆江河段心滩（洲）除了面积冲淤增减外，还存在滩体位置活动现象，综合二者可将心滩（洲）演变区分为 8 种类型，如表 1 所示。

表 1 三峡水库蓄水后荆江心滩(洲)演变的类型划分

Tab. 1 Classification of the mid-channel bars/islands evolution at the Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment (according to position movement and erosion/accretion dynamics)

演变类型		演变特征	典型心滩(洲)
位置活动	冲淤情况		
定位型	定位平衡型	位置稳定;冲淤变化不大	水陆洲,柳条洲(图 5a)
	定位冲淤交替型	位置稳定;时冲时淤;冲淤变化较大	芦家河浅滩,金城洲(图 5b),广兴洲心滩
变位型	变位冲淤交替型	位置明显移动;时冲时淤;冲淤变化较大	三八滩(图 5c)
	变位淤扩型	位置明显移动;滩体淤增扩大	倒口窑心滩,七弓岭心滩(图 5d)
后退型		主体位置不变,局部后退;持续冲蚀	关洲(图 5e),火箭洲,马羊洲
前进型	整体前进型	主体位置不变,滩体整体前进;淤积扩大	张家桃园心滩,调关心滩,观音洲心滩(图 5f)
	洲头前进型	主体位置不变,滩头前进;淤积扩大	太平口心滩,南星洲(图 5g),蛟子洲心洲,乌龟洲
合滩型		心滩靠岸并滩	颜家台心滩,茅林口心滩(图 5h),新河口心滩

首先，按滩体位置活动趋向，区分为定位型、变位型、后退型、前进型和合滩型等 5 个第一级类；然后，按滩体冲淤变化情况，区分了 6 个第二级亚类。对于后退型和合滩型，考虑到研究期内冲淤变化方式较简，未细分第二级亚类，即存在 8 种典型心滩（洲）演变类型：① 定位平衡型，如上荆江河湾 102 的水陆洲和柳条洲（图 5a），位置分布稳定，冲淤变化不大；② 定位冲淤交替型，如上荆江河湾 102 的芦家河浅滩、河湾 104 的金城洲（图 5b），下荆江河湾 218 的广兴洲心滩，其位置分布稳定，但时冲时淤，冲淤变化皆较大；③ 变位冲淤交替型，如上荆江的三八滩（图 5c），位置分布明显向凹岸移动，冲减和淤增变化皆较大；④ 变位淤扩型，如下荆江石首（河湾 208）倒口窑心滩、河湾 221 处的七弓岭心滩（图 5d），表现为滩体明显向凹岸移动，并淤增扩大；⑤ 后退型，如上荆江河湾 101 的关洲（图 5e）、河湾 103 的火箭洲和马羊洲，其主体位置不变，局部侵蚀后退；⑥ 整体前进型，如下荆江河湾 222 的观音洲新成心滩（图 5f），表现为滩体主体位置不变，整体淤积前进；⑦ 洲头前进型，如上荆江太平口心滩、公安河湾（编号 105）的南星洲（图 5g）和下荆江的乌龟洲，其主体位置不变，洲（滩）头淤积前进；⑧ 合滩型，如上荆江河湾 106 的颜家台心滩、藕池口分流段（编号 207）的茅林口心滩（图 5h），表现为心滩靠岸并滩。

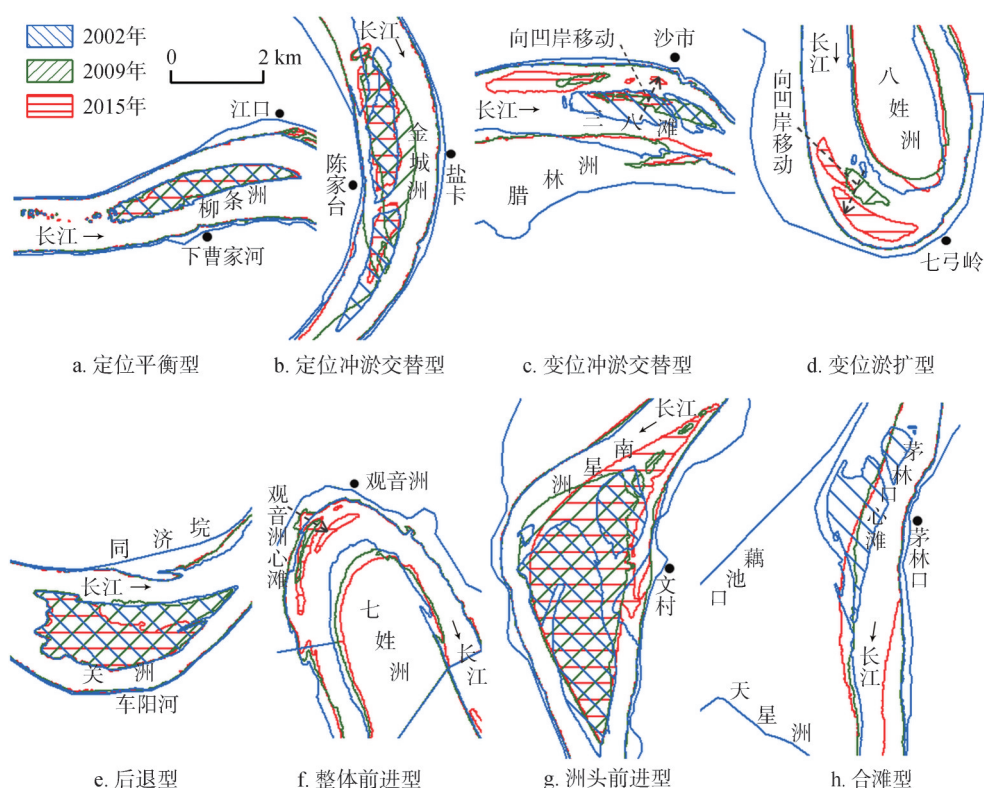


图5 三峡水库蓄水后荆江心滩(洲)演变的8种典型类型

Fig. 5 Eight typical types of mid-channel bars/islands evolution at the Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment

3.3.2 荆江河段凸、凹岸滩演变特征 荆江各河湾的冲淤分布亦表明,凸岸滩的冲淤变化明显大于凹岸滩,下荆江较上荆江具有更复杂的冲淤演变特征。上荆江各河湾凸岸滩都在不同时期内存在不同程度的冲刷萎缩,其中较显著的有河湾101、104、105、106,其凸岸滩面积缩小超过 0.5 km^2 (图6a)。这些河湾凸岸滩较为发育,在三峡水库蓄水前存在明显向河突出的滩体,如河湾101的同济垸边滩 (图7a)、河湾104的腊林洲边滩 (图7b)和陈家台边滩 (图7c)、河湾105的文村边滩 (图7d)和周家台边滩 (图7e)、河湾106的林家台边滩 (图7f),滩体突出部在蓄水后大都被冲蚀。下荆江凸岸滩的冲淤变化并非完全一致 (图6),尽管大多数河湾存在不同程度的冲刷萎缩,但藕池分流口河湾、石首河湾和监利河湾 (编号207、208、214)等明显淤积增长,部分前期 (2002-2009年)冲蚀的河湾在后期 (2009-2015年)淤增 (河湾211、220)。可见,下荆江凸岸滩并非完全是“凸岸冲刷”^[25, 28-29, 31],而是有冲有淤,冲刷为主。

凹岸滩冲淤变化大多不超过 0.5 km^2 ,冲淤较大者有上荆江的河湾102、106和下荆江的河湾208、214、207 (图6)。上荆江凹岸的冲淤分布与形态演变与凸岸滩相似,在沿程冲刷的背景上,凹岸边滩发育处明显冲蚀,岸滩形态复杂性减小,如河湾102凹岸的江口边滩 (图7g)和河湾105凹岸的雷家洲边滩 (图7h),河湾106凹岸滩后期的面积增长则与颜家台心滩的靠岸并滩有关 (图7f)。即,上荆江凸岸突出滩体和凹岸发育的边滩冲刷显著,但形态变化不大,其成因可能与其河岸边界条件有关,该河段江口以上两岸为低山、丘陵控制^[15, 39],江口以下两岸冲积平原,上层粘土层厚^[39],抗冲蚀力强,而蓄水前形成的砂质边滩则易于冲刷。

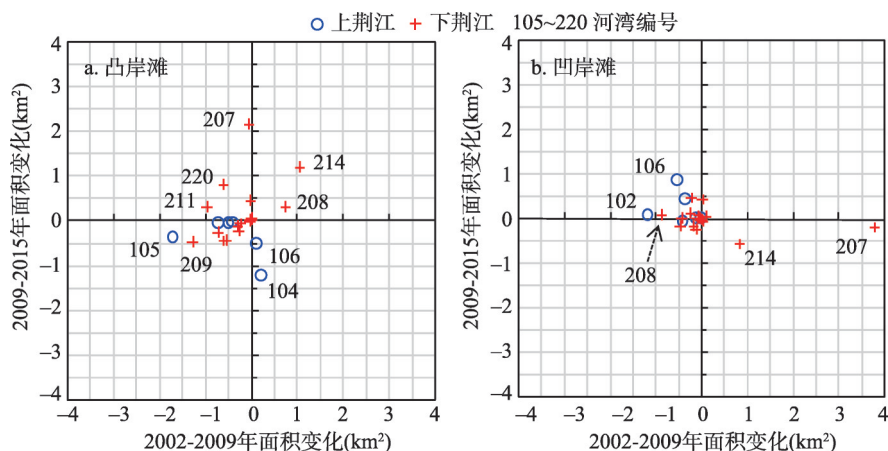


图6 三峡水库蓄水后荆江凸、凹岸滩冲淤面积分布

Fig. 6 Erosion/accretion distribution of floodplains and bars at the convex and concave banks of the Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment

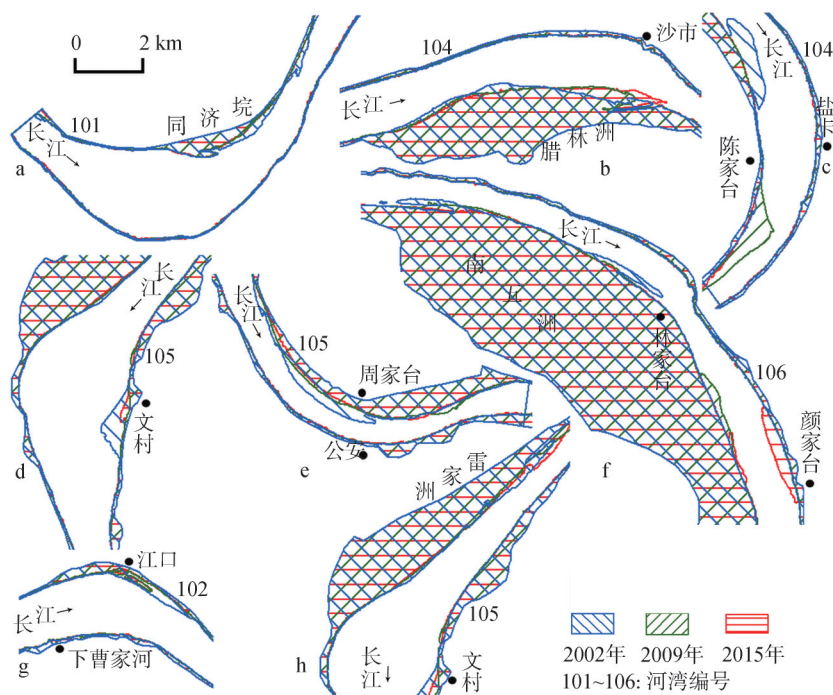


图7 三峡水库蓄水后上荆江凸、凹岸滩冲淤形态演变

Fig. 7 Morphological evolution of floodplains and bars at the convex and concave banks of upper Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment

在冲淤分布与形态演变上, 相较于上荆江, 下荆江凸岸滩和凹岸滩的演变均表现出一定的变异性。下荆江凸岸滩演变的一个重要特点是, 凸岸滩上游弯侧冲蚀后退, 湾顶退缩, 过湾顶后, 下游弯侧淤积伸长, 反映出滩体向下游渐次冲刷输运的特征, 河湾弯曲率减小^[16], 凸岸高弯异化形态存在向正弦化形态^[40]转变的趋势, 典型的如石首河湾的向家洲边滩、碾子湾河湾的南碾子湾边滩 (图8a)。这种冲淤分布与形态演变过程在下荆

江17个河湾中的13个均有表现。下荆江凸岸滩上冲下淤的演变特征,可能是三峡水库蓄水后沿程冲刷,至下荆江河流泥沙恢复达到一定量^[38]并部分淤落的结果,尤其后期下荆江洲滩总体明显淤增即是河流泥沙得到有效恢复的一个重要表现。

另外,下荆江属高蜿蜒河段,相邻河湾过渡段不明显,凸、凹岸紧密相连,如寡妇夹河湾凸岸与调关河湾凹岸,以及后者的凸岸与中洲子河湾的凹岸(图8b),在急弯段甚至出现上游河湾凸岸与下游河湾凹岸共用的情形,如七弓岭河湾的凸岸与观音洲河湾的凹岸(图8d),使得上一河湾凸岸滩的上冲下淤过程,延伸到下一河湾凹岸,引起下游河湾凹岸的淤增,但淤增一般未延伸到凹岸的下半段,下半段一般仍处冲刷后退中。如寡妇夹凸岸边滩的冲淤延伸到调关河湾的凹岸、调关凸岸张智垸边滩的上冲下淤延伸到中洲子河湾凹岸(图8b),河湾215凸岸大马洲冲刷而在河湾216凹岸显著淤增(图8e),城陵矶河湾(编号223)七姓洲凹岸边滩生长发展(图8c)。即,下荆江相邻河湾凸、凹岸滩演变存在纵向互动关系,甚至促使凹岸侧心滩的发展,如图8b中的调关新成心滩,以及图8d中七弓岭心滩向凹岸的移动与增长、观音洲凹岸侧新成心滩,这可能是三峡水库蓄水后下荆江心滩有所发展的原因之一。

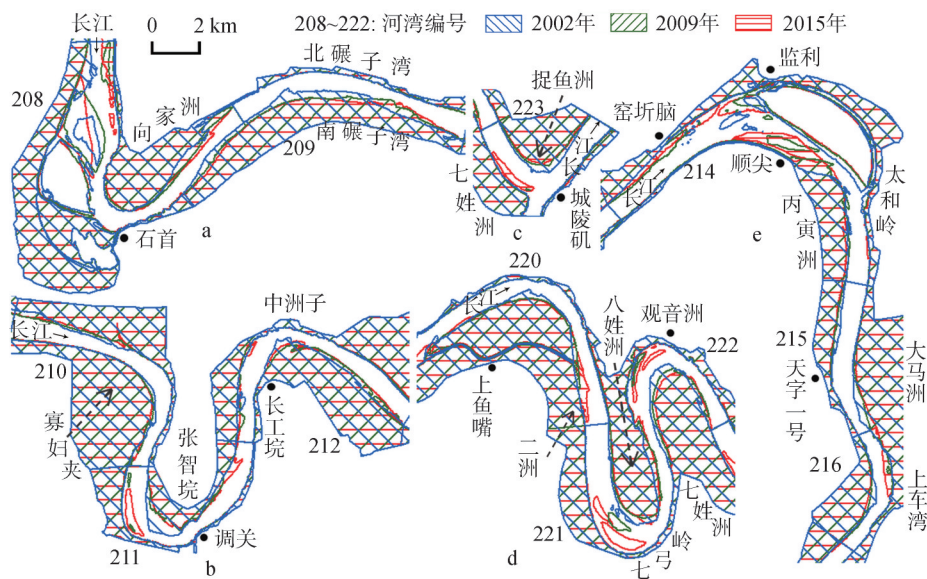


图8 三峡水库蓄水后下荆江凸、凹岸滩冲淤演变

Fig. 8 Morphological evolution of floodplains and bars at the convex and concave banks of lower Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment

当相邻河湾过渡段较明显或同向弯曲时,下游河湾凹岸则处“正常”冲蚀状态。如荆江门河湾(编号219)上游为长顺直过渡段,荆江门河湾与其下游河湾220间亦有顺直段过渡,碾子湾河湾(编号209)和寡妇夹河湾为同向河湾,可以看到寡妇夹河湾凹岸边滩(图8b)、荆江门河湾凹岸滩、河湾220的凹岸滩(图8d)都处于与上荆江凹岸类似的冲刷蚀退过程中。可见,高弯曲度、过渡段不明显乃至上、下游凸、凹岸共用的河湾平面形态格局是下荆江相邻凸凹岸滩的互动演变关系的一个重要条件。

下荆江监利河湾的凸岸演变略显不同,但其凹岸仍然受上游河湾凸岸冲刷—淤积延伸的影响(图8e),窑圪脑边滩淤增延伸至乌龟洲头部一带,甚至乌龟洲头部心滩得到了显著发展,而凹岸下半部至太和岭边滩都处冲蚀后退中。对于监利河湾凸岸,一方面其

上游弯侧受护岸工程保护冲刷较弱,再者顶部由于乌龟洲南部心滩靠岸并滩而呈淤增状态,凸岸下游半段丙寅洲边滩则处于冲蚀中,冲刷一直延伸到下一河湾凹岸顶部的天子一号附近,此时,河湾215凹岸呈“正常”冲蚀状态。另外,石首河湾208(图8a)上游河湾藕池口一直处于迅速向上游方向淤积伸展中,但滩体左侧(与石首河湾凹岸同侧)严重冲刷(图9c),石首河湾凹岸亦处于“正常”冲蚀中。可见,上游河湾凸岸上冲下淤亦应是下荆江河段相邻河湾凸、凹岸演变纵向互动关系的一个重要前提。

综上所述,下荆江洲滩演

变以凸岸冲淤演变为主导,河湾凸岸滩的上游弯侧冲蚀、湾顶退缩、下游弯侧淤增延伸,淤伸过程甚至可达相邻下游河湾凹岸,使得该凹岸上半部边滩淤积发展,乃至促使凹岸侧心滩的发展,但相邻河湾凸、凹岸演变的纵向互动关系一般不越过凹岸湾顶,凹岸下半部一般仍处于“正常”冲蚀状态。相关研究中“凸岸冲刷、凹岸淤积”^[25, 28-29, 31]即是相邻河湾凸、凹岸互动演变关系的一种体现,但下荆江岸滩演变并不严格地凸岸冲刷、凹岸淤积,凸岸滩并非完全是冲刷,而是冲刷为主、有冲有淤,凹岸亦非完全是淤积,而是上半部淤积、下半部冲刷,还存在凹岸“正常”冲刷状态下的河湾。下荆江相邻河湾凸、凹岸滩演变的纵向互动关系,存在于以下3个方面的主要基础:①三峡水库蓄水后清水下泄、沿程冲刷,下荆江河流泥沙得到有效恢复;②凸岸上游侧冲蚀、下游弯侧淤伸;③高蜿蜒河湾平面形态格局,相邻河湾过度段不明显,凸凹岸紧连甚至共用;④还有洞庭湖的顶托作用。

3.3.3 荆江河段分流口洲滩演变 三峡水库蓄水后,三口分流处洲滩演变存在差异性,松滋口分流处两岸边滩强烈冲蚀萎缩,太平口分流处岸滩变化不大而心滩淤增发展,藕池口分流处洲滩迅猛淤积扩大并向上游延伸。松滋河分流口两岸的羊角洲和陈二口边滩都强烈冲刷后退,分流口下游处的心滩处于动态平衡中(图9b)。太平口分流处,分流口两侧岸滩冲淤变化不大,但太平口心滩明显淤积增长(图9a)。藕池河分流口滩体迅猛淤积延伸,至2009年已与分流口心滩白洲连为一体(图9c),分流口淤积严重,枯水期断流。

三分流口所在河段平面形态相似,均为顺直微弯段,三者冲淤演变差异与荆江河段宏观冲淤格局是一致的,在三峡水库蓄水后清水下泄、沿程冲刷的背景下,河流泥沙沿程恢复状况不同,还受到局地洲滩形态的水力作用关系及其物质组成差异性的影响。松滋口位于荆江起始段,处于山区型向平原型河流过度的河段,该河段砂卵石河床抗冲蚀力强^[36],至松滋口沿程泥沙恢复有限,河流冲刷力强,但分流口洲滩为易于冲刷的砂质滩^[41],再加上羊角洲顶冲上游来水,洲滩头部冲刷严重,萎缩后退。太平口位于上荆江

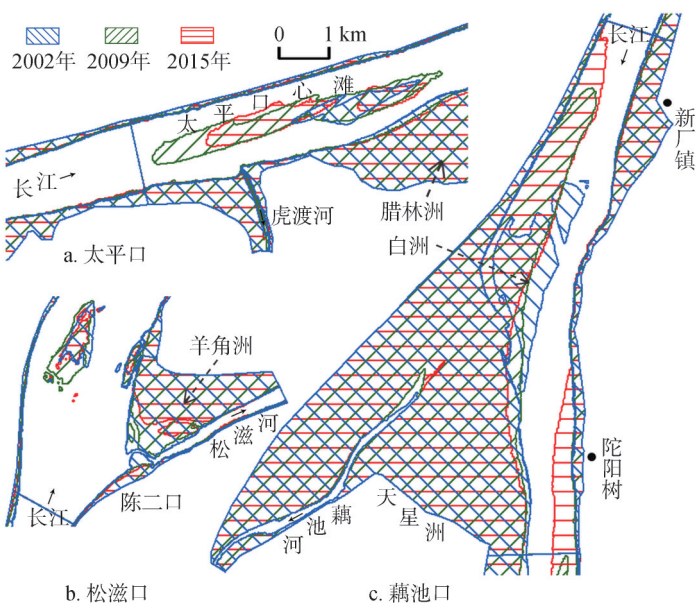


图9 三峡水库蓄水后荆江分流口洲滩演变

Fig. 9 Evolution of the floodplains and bars around the three bifurcations of Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment

中部的沙市河湾,分流处岸滩为粘土/中细沙/卵石层三元结构,上部粘土层较厚^[39],抗冲刷力强,分流口两侧岸滩冲刷较弱;而太平口心滩由于河流泥沙沿程冲刷得到一定恢复,太平口河道顺直放宽,再者该河段洪淤枯冲且枯水河槽强烈冲刷下切^[14],三峡水库蓄水后退水快,汛后心滩体冲刷不足^[28],皆有利于心滩淤积发展。藕池口正处上、下荆江过渡处,三峡水库蓄水后,上荆江河段冲刷量巨大^[14],至下荆江河流泥沙得到较好的恢复^[38],藕池分流口河段的入口和出口窄、中间放宽,中部雍水、分散,天星洲顶托,分流口洲滩淤积扩大,滩体甚至已延伸到该河湾入口。

4 结论

(1) 三峡水库蓄水后至2015年荆江洲滩总面积持续冲刷减小,累计冲减4.56 km²,大部分发生在蓄水后的前6年(冲刷速率0.55 km²/a);洲滩演变以凸岸滩冲刷萎缩占主导,累计冲刷6.22 km²;凹岸滩和心滩(洲)有所淤积,分别淤增0.98 km²、1.33 km²;上、下荆江在冲淤动态、分布和形态演变上存在差异性。

(2) 在冲淤动态上,上荆江洲滩总面积一直处于冲刷萎缩中,且其强度明显大于下荆江,累计冲刷6.46 km²;下荆江前期(2002-2009年)冲刷、后期(2009-2015年)淤增,累计淤1.90 km²。

(3) 在冲淤分布上,上荆江凸岸滩持续冲刷萎缩,凹岸滩前期冲刷明显、后期略有淤增,心滩(洲)前期淤增、后期冲蚀,至2015年凸、凹岸滩累计分别冲减5.35 km²、1.17 km²,心滩(洲)淤增0.71 km²。下荆江冲刷主要发生在凸岸滩,至2015年累计冲刷0.87 km²,凹岸滩和心滩(洲)有所发展,分别累计淤增2.15 km²、0.63 km²。

(4) 根据滩体的位置活动和冲淤动态性,荆江心滩(洲)演变被区分为8种典型类型,包括定位平衡型、定位冲淤交替型、变位冲淤交替型、变位淤扩型、后退型、洲头前进型、整体前进型和合滩型。

(5) 在形态演变上,上荆江凸岸突出滩体和凹岸发育的边滩冲刷显著,凸、凹岸滩形态变化不大。下荆江凸岸滩上游弯侧冲蚀后退、湾顶退缩、下游弯侧淤积伸长,高弯异化形态向正弦化形态转变,形态趋于低弯扁平化;在连续高弯曲、过渡段不明显甚至相邻凸、凹岸共用的河湾平面形态格局下,上游河湾凸岸冲刷—淤积过程延伸到相邻河湾凹岸,成为下荆江凹岸滩和心滩发展的重要因素,但凹岸淤积一般不越过湾顶。

参考文献(References)

- [1] Legleiter C J. Downstream effects of recent reservoir development on the morphodynamics of a meandering channel: Savery Creek, Wyoming, USA. *River Research and Applications*, 2015, 31(10): 1328-1343.
- [2] Osterkamp W R, Scott M L, Auble G T. Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: Regional patterns in the Great Plains. *Wetlands*, 1998, 18(4): 619-633.
- [3] Shields Jr F D, Simon A, Steffen L J. Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation*, 2000, 27(1): 54-66.
- [4] Williams G P, Wolman M G. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Reston (VA): US Geological Survey, Professional Paper, 1984: 1-88.
- [5] Zhou Zhide. River channel erosion below dams. *Journal of Sediment Research*, 2003(5): 28-31. [周志德. 水库下游河床冲刷下切问题的探讨. 泥沙研究, 2003(5): 28-31.]
- [6] Brandt S A. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 2000, 40(4): 375-401.
- [7] Wang Suiji. Analysis of river pattern transformations in the Yellow River Basin. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 10-17. [王随继. 黄河流域河型转化现象初探. 地理科学进展, 2008, 27(2): 10-17.]

- [8] Xu Jiongxin. Complex response in channel adjustment in the lower Yellow River during the period of clear-water scour. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 291-299. [许炯心. 黄河下游游荡河段清水冲刷时期河床调整的复杂响应现象. *水科学进展*, 2001, 12(3): 291-299.]
- [9] Chen Jianguo, Zhou Wenhao, Chen Qiang. Channel re-establishment of the lower Yellow River in ten years operation of Xiaolangdi Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 127-135. [陈建国, 周文浩, 陈强. 小浪底水库运用十年黄河下游河道的再造床. *水利学报*, 2012, 43(2): 127-135.]
- [10] Shi Changxing, Fan Xiaoli, Shao Wenwei, et al. Channel change of the Inner Mongolian reach of the Yellow River and its causes. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 787-796. [师长兴, 范小黎, 邵文伟, 等. 黄河内蒙河段河床冲淤演变特征及原因. *地理研究*, 2013, 32(5): 787-796.]
- [11] Wang Suiji, Li Ling. Lateral shift rate variation of the river banks in the Yinchuan Plain reach of the Yellow River and its causes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 399-408. [王随继, 李玲. 黄河银川平原段河岸摆动速率变化及原因. *地理学报*, 2014, 69(3): 399-408.]
- [12] Gong Guoyuan. Channel changes in the Hanjiang river below the Danjiangkou reservoir. *Geographical Research*, 1982, 1(1): 69-78. [龚国元. 汉江丹江口水库下游河床演变. *地理研究*, 1982, 1(1): 69-78.]
- [13] Xu Jiongxin. Complicated response of downstream channel morphology to Danjiangkou Reservoir on Hanjiang River. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(6): 450-452. [许炯心. 汉江丹江口水库下游河床调整过程中的复杂响应. *科学通报*, 1989, 34(6): 450-452.]
- [14] Zhou Chengcheng, Huang Zhaobiao, Xiong Xiaoyuan, et al. Analysis on changes in the channel erosion/accretion and water level in Jingjiang reach after Three Gorges Reservoir impoundment. *China Water Transport*, 2014(5): 52-53. [周成成, 黄召彪, 熊小元, 等. 三峡水库蓄水后荆江河段河床冲淤及水位变化特点分析. *中国水运*, 2014(5): 52-53.]
- [15] Xia Junqiang, Zong Quanli, Deng Shanshan, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry of Jingjiang reach after operation of Three Gorges Project. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(2): 238-245. [夏军强, 宗全利, 邓珊珊, 等. 三峡工程运用后荆江河段平滩河槽形态调整特点. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(2): 238-245.]
- [16] Xue Xinghua, Chang Sheng. River bend planform evolution in Jingjiang reach of the Yangtze since Three Gorges Reservoir operation. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(6): 12-22. [薛兴华, 常胜. 三峡水库运行后荆江河段河湾平面形态演变特征. *水力发电学报*, 2017, 36(6): 12-22.]
- [17] Li Ming, Hu Chunhong. Study on processes of braided river downstream of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(6): 1-7. [李明, 胡春宏. 三峡工程运用后坝下游分汊型河道演变与调整机理研究. *泥沙研究*, 2017, 42(6): 1-7.]
- [18] Mei Yanguo, Wang Suiji. Variation of mid-channel bars in Linhe braided channel of the Yellow River and its influencing factors. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(3): 157-163, 169. [梅艳国, 王随继. 黄河临河辫状河段心滩变化及其影响因素分析. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 157-163, 169.]
- [19] Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, Jia Yanhong, 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. [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.]
- [20] Ran Lishan, Wang Suiji, Fan Xiaoli. Channel change at Toudaoguai Station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 231-247.
- [21] Graf W L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 336-360.
- [22] Grant G E, Schmidt J C, Lewis S L. A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers// O'Connor J E, Grant G E. *A Peculiar River: Geology, Geomorphology, and Hydrology of the Deschutes River, Oregon*. Washington DC: American Geophysical Union, 2003: 203-219.
- [23] Xu Quanxi, Yuan Jing, Wu Wenjun, et al. Fluvial processes in middle Yangtze River after impoundment of Three Gorges Project. *Journal of Sediment Research*, 2011, 36(2): 38-46. [许全喜, 袁晶, 伍文俊, 等. 三峡工程蓄水运用后长江中游河道演变初步研究. *泥沙研究*, 2011, 36(2): 38-46.]
- [24] Han Jianqiao, Sun Zhaohua, Huang Ying, et al. Features and causes of sediment deposition and erosion in Jingjiang reach after impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 277-285, 295. [韩剑桥, 孙昭华, 黄颖, 等. 三峡水库蓄水后荆江沙质河段冲淤分布特征及成因. *水利学报*, 2014, 45(3): 277-285, 295.]
- [25] He Guangshui, Yao Shiming, Jin Zhongwu. Study of atypical erosion of convex bank of river bend in Jingjiang Reach

- of Yangtze River. *Yangtze River*, 2011, 42(17): 1-3. [何广水, 姚仕明, 金中武. 长江荆江河段弯道凸岸边滩非典型冲刷研究. *人民长江*, 2011, 42(17): 1-3.]
- [26] Xu Quanxi, Zhu Lingling, Yuan Jing. Research on water-sediment variation and deposition-erosion in middle and lower Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(23): 16-21. [许全喜, 朱玲玲, 袁晶. 长江中下游水沙与河床冲淤变化特性研究. *人民长江*, 2013, 44(23): 16-21.]
- [27] Qu Geng, Xu Hui, Tang Wenjian, et al. Morphology variation of different sections in Jingjiang River and its impact on Jingjiang channel condition after TGR operation. *Port & Waterway Engineering*, 2011(12): 117-122. [渠庚, 许辉, 唐文坚, 等. 三峡水库运用后荆江河道断面形态变化及对航道条件的影响. *水运工程*, 2011(12): 117-122.]
- [28] Zhang Weijun, Wei Lipeng, Qu Geng. Channel evolution of different river patterns in Jingjiang after Three Gorges Project operation. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2013, 19(11): 56-59. [张卫军, 魏立鹏, 渠庚. 三峡工程运用后荆江不同河型河道演变分析. *水利科技与经济*, 2013, 19(11): 56-59.]
- [29] Zhu Lingling, Xu Quanxi, Xiong Ming. Fluvial processes of meandering channels in the lower Jingjiang river reach after the impoundment of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 193-202. [朱玲玲, 许全喜, 熊明. 三峡水库蓄水后下荆江急弯河道凸冲凹淤成因. *水科学进展*, 2017, 28(2): 193-202.]
- [30] Duan Guanglei, Peng Yanbo, Xiao Hucheng, et al. Preliminary probe into evolution mechanism of typical shoals at Jingjiang reach of Yangtze River. *Hydro-Science and Engineering*, 2008(2): 10-15. [段光磊, 彭严波, 肖虎程, 等. 长江荆江河段典型洲滩演变机理初探. *水利水运工程学报*, 2008(2): 10-15.]
- [31] Li Ningbo, Zeng Yong, Wu Zhongming. Preliminary study of causes of mainstream bending of Qigongling bend in Jingjiang reach of Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(1): 22-25. [李宁波, 曾勇, 吴忠明. 长江荆江河段七弓岭弯道主流撇弯原因初探. *人民长江*, 2013, 44(1): 22-25.]
- [32] Fan Yongyang, Zhang Wei, Han Jianqiao, et al. The typical meandering river evolution adjustment and its driving mechanism in the downstream reach of TGR. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3): 420-431. [樊咏阳, 张为, 韩剑桥, 等. 三峡水库下游弯曲河型演变规律调整及其驱动机制. *地理学报*, 2017, 72(3): 420-431.]
- [33] Yang Fangli, Huang Wei, Fu Zhongmin, et al. River evolution and waterway regulation of Zhijiang-Jiangkou section at midstream of the Yangtze River. *Port & Waterway Engineering*, 2012(10): 24-29. [杨芳丽, 黄伟, 付中敏, 等. 长江中游枝江—江口河段河床演变与航道整治思路. *水运工程*, 2012(10): 24-29.]
- [34] Xue X H, Yuan L Y. Study on the fluvial landscape patterns of upper Jingjiang segment, Yangtze River, using multi-temporal remote-sensing imageries//2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Washington DC: IEEE Computer Society, 2013.
- [35] Mei Yanguo, Wang Suiji. Variation of channel lateral erosion/accretion and channel shrinkage rate in the Linhe reach of the Yellow River since 1977. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1509-1519. [梅艳国, 王随继. 1977年以来黄河临河段河岸冲淤变化及河道萎缩速率. *地理学报*, 2016, 71(9): 1509-1519.]
- [36] Sun Zhaohua, Li Yitian, Li Ming, et al. Effect of channel degradation on lower level in Yichang-Shashi reach in the Yangtze River. *Hydro-Science and Engineering*, 2007(4): 14-20. [孙昭华, 李义天, 李明, 等. 长江中游宜昌—沙市段河床冲淤与枯水位变化. *水利水运工程学报*, 2007(4): 14-20.]
- [37] Han Qiwei, Yang Kecheng. The tendency of river pattern variation in the lower Jingjiang river after completion of the Three Gorges Project. *Journal of Sediment Research*, 2000(3): 1-11. [韩其为, 杨克诚. 三峡水库建成后下荆江河型变化趋势的研究. *泥沙研究*, 2000(3): 1-11.]
- [38] Yang Yunping, Zhang Mingjin, Li Yitian, et al. Suspended sediment recovery and bed sand 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.]
- [39] Yin Ruilan, Chen Li. Study on the trends of Jingjiang river evolution caused by the downstream scour of the Three Gorges Project. *Journal of Sediment Research*, 2003(6): 1-6. [殷瑞兰, 陈力. 三峡坝下游冲刷荆江河段演变趋势研究. *泥沙研究*, 2003(6): 1-6.]
- [40] Langbein W B, Leopold L B. River meanders and the theory of minimum variance//Dury G H. *Rivers and River Terraces*. London: Palgrave Macmillan UK, 1970: 238-263.
- [41] Han Jianqiao, Sun Zhaohua, Cao Qixin, et al. Features and effects of recent cross-section adjustment in gravel and sand bed reaches of Jingjiang river. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 91-97. [韩剑桥, 孙昭华, 曹绮欣, 等. 近期荆江沙卵石—沙质河床过渡带断面调整特性及影响. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 91-97.]

Evolution of floodplains and bars at the Jingjiang reach of Yangtze River, China in response to Three Gorges Reservoir impoundment

XUE Xinghua^{1,2}, CHANG Sheng^{1,2}, SONG Eping^{1,2}

(1. College of Forestry and Horticulture, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization of Hubei Province, Enshi 445000, Hubei, China)

Abstract: At present, there is a lack of sufficient understanding of the evolution of floodplains and bars (FB) at the Jingjiang reach of Yangtze River after Three Gorges Reservoir impoundment. The erosion/accretion pattern and morphological evolution of FB at the Jingjiang reach were studied using remote sensing images acquired in low water periods before and after Gorges Reservoir impoundment. The results showed that the total area of FB at the Jingjiang reach shrank continually after the reservoir impoundment. By 2015 an area of 4.56 km² had been scoured away, and most of the scour occurred within the first 6 years after the impoundment at an erosion rate of 0.55 km²/a. There were evident differences in erosion/accretion pattern and in morphological evolution between the upper and lower sections of Jingjiang reach. The total area of FB at the upper Jingjiang has continually decreased due to scouring after the impoundment, and the scouring intensity was greater than that in the lower Jingjiang. In contrast, erosion of the lower Jingjiang took place in the early period after the impoundment (2002-2009), but accretion was observed in the later period (2009-2015). In erosion/accretion distribution, the floodplains of upper Jingjiang reach were continually scoured and shrunk while the bars at concave banks were scoured in the early period but were accreted slightly in the later period; the mid-channel bars of upper Jingjiang were accreted in the early period but were scoured in the later period. In contrast, erosion mainly occurred at the floodplains of lower Jingjiang, while the bars at its concave banks and mid-channel bars were accreted. The mid-channel bar evolution at the Jingjiang reach after the reservoir impoundment was classified into eight types according to their position movement and erosion/accretion dynamics. On morphological evolution, the protruding parts of floodplains and the bars at concave banks of the upper Jingjiang were visibly eroded, while the morphology changed little. At the lower Jingjiang, however, the floodplains evolution had a characteristic pattern that the upstream part was eroded back, with a shrinkage of the top, while the downstream part was accreted, resulting in the alteration of convex bank from a highly curved morphology to a flattening-curved morphology. This erosion-accretion process of floodplains at the upstream convex bank even extended to the adjacent downstream concave bank when there was no obvious straight section connecting the neighboring highly curved bends or when the upstream convex bank shared the same bank with the downstream concave bank. Extension of upstream floodplain accretion to the downstream concave bank was an important reason for the development of both the bars at concave banks and the mid-channel bars at the lower Jingjiang. Generally, the accretion at the concave bank did not span to the top of concave bank.

Keywords: geomorphic effects; floodplains and bars; erosion/accretion dynamics; morphological evolution; Jingjiang reach; Three Gorges Reservoir