

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.08.015

三峡库区不同蓄水阶段下江心洲的 时空演变分析

唐青青^{1,2,3}, 赵刚⁴, 余勇⁵, 季永月^{2,3},
严聆云^{2,3}, 温兆飞^{2,3}, 曾思栋², 陈吉龙^{2,3}

1. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 2. 中国科学院 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400717;
3. 中国科学院 水库水环境重点实验室, 重庆 400717; 4. 重庆市水利局, 重庆 401147;
5. 中国石油西南油气田分公司重点地面工程建设项目部, 重庆 401147

摘要: 三峡库区江心洲因库区分阶段蓄水下的巨大水位变化, 在时空上产生了更多的响应, 其动态演变对库区河流水文生态过程与通航具有重要影响. 利用 1989—2019 年的 Landsat 遥感影像识别与提取三峡库区不同蓄水阶段江心洲的时空信息并构建变化序列, 从江心洲的数量、面积、形态、位置分布等 4 个角度分析三峡库区江心洲的时空演变过程. 结果表明: 在不同蓄水阶段的三峡库区内解译发现众多江心洲, 并将其分为小型、中型、大中型、大型 4 种类型, 面积区间分别为: <3 , $[3, 10)$, $[10, 100)$, ≥ 100 hm^2 , 其中库区整体数量与面积的变化趋势分别以小型与大型为主. 随蓄水位不断抬升, 三峡库区江心洲的数量与面积发生显著变化, 其中干流江心洲的数量与面积不断降低, 而支流江心洲在二期蓄水前略有变化, 二期蓄水后开始急剧增加. 库区江心洲整体由“窄长”趋向于相对“短圆”的形态, 原有的形态发育平衡状态被破坏. 三峡库区蓄水导致库区江心洲空间分布上剧烈演变, 使数量分布变得更加均匀, 且面积加权的重心从库尾朝库区中部迁移. 库区江心洲在不同蓄水阶段下呈现的不同响应特征, 为江心洲发育特性探究、航道整治规划、洲滩生态工程建设等提供科学依据.

关键词: 三峡库区; 不同蓄水阶段; 江心洲; 形态特征;

空间分布

中图分类号: TV147

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2022)08-0135-11

Analysis of Spatio-temporal Evolution of Mid-channel Bars during Different Impoundment Stages in the Three Gorges Reservoir Area

TANG Qingqing^{1,2,3}, ZHAO Gang⁴, YU Yong⁵, JI Yongyue^{2,3},
YAN Lingyun^{2,3}, WEN Zhaofei^{2,3}, ZENG Sidong², CHEN Jilong^{2,3}

收稿日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779241); 中国科学院战略先导项目(XDA23040500); 重庆市水利局三峡后续工作科研项目(5000002021BF40001).

作者简介: 唐青青, 硕士研究生, 主要从事生态遥感研究.

通信作者: 陈吉龙, 副研究员.

1. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400717, China;
3. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400717, China;
4. Chongqing Water Resources Bureau, Chongqing 401147, China;
5. Project Department of Key Ground Engineering Construction, Petro China Southwest Oil and Gasfield Branch, Chongqing 401147, China

Abstract: The mid-channel bars (MCBs) in the Three Gorges Reservoir (TGR) had more responses on the spatio-temporal scale due to the huge water level changes under the phased impoundment of the TGR. Its dynamic evolution has an important impact on the hydro-ecological processes and navigation of the river in the TGR. In this paper, Landsat remote sensing images from 1989 to 2019 were used to identify and extract the spatio-temporal information of MCBs, and construct a sequence of changes to analyze the dynamic evolution of MCBs in terms of number, area, shape, and location distribution in different impoundment stages of the TGR. The results showed that many MCBs were found in the TGR area at different impoundment stages, which were classified into four types of small, medium, large-medium and large, the area ranges are: <3 , $[3, 10)$, $[10, 100)$, $\geq 100 \text{ hm}^2$, in which the trends of the change on overall number and area of the MCBs in TGR were dominated by small and large, respectively. As the rising of water level, the number and area of MCBs in the TGR area changed significantly. The number and area of MCBs in the main-stream of the river had been decreasing, while the tributary MCBs changed slightly before the second stage of impoundment, and increased sharply from the second stage of impoundment. The overall shape of MCBs in the TGR changed from “narrow and long” to “short and round”, and the original balance of morphological development had been destroyed. The spatial distribution of MCBs in the TGR evolved drastically due to the impoundment in the TGR, making the quantitative distribution more uniform and the area-weighted center of gravity moved from the tail to the middle of the TGR. The different response characteristics of MCBs in the TGR under different impoundment stages provided the scientific basis for the exploration of the development characteristics of MCBs, waterway regulation planning and beach ecological engineering, etc.

Key words: Three Gorges Reservoir; different impoundment stages; mid-channel bars; morphological characteristics; spatial distribution

江心洲是基于有利的河道水势,由水下心滩逐渐发育成型的淤积体长期出露水面形成的稳定洲体,它的发育受泥沙等外源物质的输入、流水的搬运能力、夹沙能力等的影响^[1],是受到筑坝及库区调节影响的重要河流地貌之一^[2-4]。随着三峡库区分阶段蓄水,水位的不断抬升必然对江心洲的发育产生显著的影响^[5]。一方面原有长江天然河道的部分江心洲被淹没,同时,一些边滩也可能随着水位的抬升并经过长期的切割形成新的江心洲^[6-7];另一方面,“蓄清排浑”的运行方式也使部分江心洲随着水位的反季节变化而出露和淹没。在这种巨大的水位变化及库区调节运行的影响下,库区江心洲形态在时间及空间上都将发生明显的变化,对河道维稳、航道通行、水陆交错、生物栖息等方面都将产生重要的影响^[8-10]。

近一个世纪以来,国内外学者借助实地观测、遥感影像、理论概化模型、数学模型等手段探讨了分叉河道江心洲的形成与演变规律^[11-13]。大量学者通过实验和短期的观测研究了江心洲形态演变过程^[14-16]。但大多数实验都基于恒定流量、河道宽度、坡度以及均质泥沙等稳定环境和理想条件,很多影响江心洲演变的环境因素未能考虑^[17-18]。近年来,随着数值模拟技术的发展,尤其是遥感和 GIS 的快速发展,为多时相、多尺度的江心洲的监测与模拟提供了技术手段^[19],对江心洲演变与模拟有了更深入的研究。Schuurman 等^[11]基于物理模型生成江心洲和分叉河段的水深、流量和泥沙输运数据集,并结合遥感数据建立了江心洲、分叉、河道之间的概念网络模型。刘晓芳等^[20]采用水动力的分析方法,探究了江

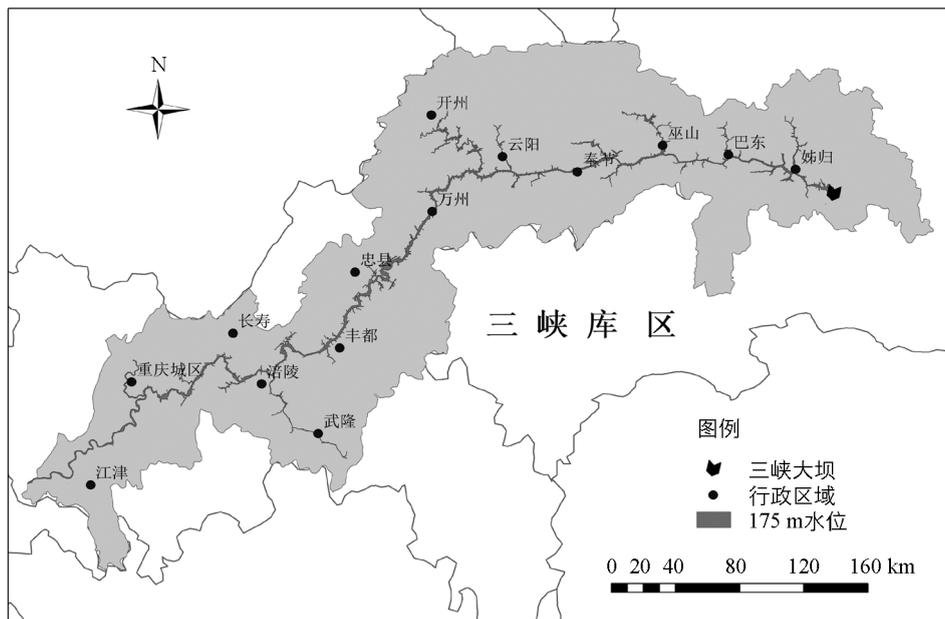
心洲达到平衡稳定形态时所对应的河流分沙及分流比例. Rasbold 等^[21]以沉积学为基础, 确定了古环境中沙洲演变过程的标志. Adami 等^[18]选取波长、迁移率和高度等参数, 探究了阿尔卑斯莱茵河的江心洲近 30 年形态动力学的时空变化特征. 长江作为我国第一大河, 在推动长江经济带高质量发展中具有重要战略地位, 其江心洲形态演变对维持河道稳定、提升黄金水道功能具有重要的意义. 然而在过去的 30 年内, 三峡大坝的修建导致坝下水沙情势发生了明显的变化^[22], 改变了自然状态下江心洲发育的水文条件. 已有众多学者基于长期的水文观测数据、多时相的遥感数据并结合模型模拟, 对大坝运行前后长江中下游的江心洲也开展大量工作, 并已经观测到江心洲产生的一系列显著的变化^[4, 23], 揭示了水沙情势变化背景下坝下江心洲的演变过程^[22]及响应机制^[23]. 而三峡库区在巨大的水位变化及反季节水位波动背景下, 江心洲形态演变过程及对水沙情势的响应与坝下不同^[24]. 目前由于相关研究的缺乏, 对三峡库区不同蓄水阶段江心洲形态的变化特征及过程仍不明确.

因此, 本研究利用多时相的 Landsat 遥感数据源, 通过遥感反演和 GIS 空间分析, 提取了三峡库区不同蓄水阶段的江心洲数据, 构建时空变化序列; 分析了不同蓄水阶段江心洲数量、面积、形态、位置的时空变化特征. 为进一步揭示三峡库区蓄水及反季节水位变化对库区江心洲发育的影响机制提供支撑, 也为库区江心洲整治规划、洲滩生态修复等提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与阶段划分

三峡库区位于长江上游, 东起湖北宜昌市, 西至重庆江津区(图 1). 库区的地形以山地与丘陵为主, 气候属于亚热带季风气候, 多年平均气温在 17~19 °C, 年降水量 1 000~1 800 mm. 三峡库区正式运行蓄水后, 形成从湖北宜昌至重庆江津的长约 760 多 km, 总库容约 393 亿 m³, 面积达 1 084 km² 的狭谷型库区. 其地理位置介于东经 106°16′—111°28′, 北纬 28°56′—31°44′, 涉及湖北和重庆的 25 个区县. 三峡大坝修建之前, 库区干流多急流险滩, 水位落差大; 随着库区的分期蓄水, 急流险滩已趋于平缓, 库区正式蓄水后更是呈现高峡平湖的壮丽景观.



审图号: GS(2019)3333 号

图 1 研究区地理位置图

三峡工程 1997 年成功实现大江截流, 坝前水位大约提高至 84 m; 2003 年 6 月三峡库区完成一期蓄水目标, 坝前水位达到 139 m; 2006 年 10 月三峡库区完成二期蓄水, 成功蓄至 156 m; 2008 年 9 月三峡库区开始试验性蓄水, 11 月实现 172 m 目标; 2009 年 9 月完成第二次试验性蓄水 175 m 后, 于 2010 年正式运

行^[24]。因此,根据三峡工程建设时间节点和库区水位变化特征,将三峡库区蓄水划分为 5 个阶段(表 1),并选择不同蓄水阶段枯水期的长江干支流江心洲为研究对象,揭示江心洲的演变过程。

表 1 三峡库区不同蓄水阶段划分

蓄水阶段	时间范围	坝前水位/m	回水末端
自然阶段	1997 年以前	66	#
围堰蓄水阶段	1997 年—2003 年 5 月	84	奉节
一期蓄水阶段	2003 年 6 月—2006 年 10 月初	139	涪陵李家渡
二期蓄水阶段	2006 年 10 月底—2008 年 9 月	156	长寿
正常运行阶段	2008 年 10 月至今	175	江津

1.2 数据获取与预处理

1.2.1 Landsat 数据

本研究利用多时相的 Landsat 遥感影像提取江心洲的地物信息,由于三峡库区从大江截流至今正常运行跨越 20 余年,为保证不同阶段数据的一致性、数据的时空分辨率以及江心洲的提取精度,首先,数据应尽量选择云雾遮盖少的时间段^[4, 19]。其次,为减少因影像时相差异带来的影响,不同阶段之间数据时间尽可能保持相对一致。最后,在 Landsat 卫星 16 天重访周期的影响下,难以获取不同条带水位完全一致的影像,所以尽可能选取水位在相近高度的影像。因此根据三峡库区水位变化的特性,水位在建坝前冬低夏高,建坝后冬高夏低,选用冬季范围在 11 月至次年 3 月的影像。

基于以上原则,从地理空间数据云数据平台选取并下载了 30m 空间分辨率的影像共计 36 景,跨越 Landsat 卫星第 39 至 42 条带。并在 ENVI 软件中对影像进行单波段提取、假彩色合成、几何校正、辐射定标等一系列预处理,为江心洲的遥感反演做好数据准备。

1.2.2 水沙数据

三峡库区的水位、输沙量、淤积量等数据来自长江水文网(<http://www.cjw.gov.cn/zwzc/bmgb/>)每年发布的长江泥沙公报及长江三峡集团官网(<https://www.ctg.com./sxjt/sqqk/index.html>)更新的水情情况。

1.3 研究方法

1.3.1 江心洲的遥感提取

采用自动提取并辅以人工目视解译的方法来实现江心洲形态特征的遥感反演。利用归一化差异水体指数(MNDWI)^[25]初步实现江心洲的自动提取。MNDWI 源于归一化水指数(NDWI),通过绿光波段和中红外波段的归一化差值处理,凸显影像中的水体信息^[26]。但 NDWI 只考虑了植被,存在一定的局限性,徐涵秋^[25]对 NDWI 进行修正并构建了 MNDWI,该指数已被证明是进行江心洲遥感提取的有效手段^[4, 19],其计算方法如下:

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR}} \quad (1)$$

式中: ρ_{Green} 为绿光波段的地表反射率; ρ_{MIR} 为中红外波段的地表反射率^[25]。在 ArcGIS 软件中实现自动提取,得到江心洲分布矢量文件。由于不同时相的遥感影像自动提取结果存在一定的差异,加上三峡库区水面运行着大量船只,自动提取很容易将其判别为江心洲。因此,自动提取完成后需辅以人工目视解译,并结合水位观测等水文数据与不同时相的遥感影像,剔除误判信息,优化修正自动提取的结果,尽量提高江心洲提取的精度。

1.3.2 江心洲的属性测度

1) 面积和形状指数

单个江心洲的面积与周长从 ArcGIS 中计算可得。江心洲通常呈竹叶、椭圆形等形状^[27],其长度和宽度的变化可直接反映横向及纵向形态的调整,长宽比(LWR)是斑块长度与宽度的比值,可以作为衡量江心洲的形态变化特征的一个综合指标^[4, 19]。

$$LWR = \frac{L}{W} \quad (2)$$

式中: L, W, LWR 分别为每个江心洲洲体的长度、宽度及长宽比, L 为洲体的最大长度, W 为洲体的最大宽度。

2) 重心迁移模型

重心迁移模型可以从时空上很好地描述江心洲的演变过程, 通过江心洲面积的重心迁移研究不同蓄水阶段江心洲整体上的变化趋势^[28-29]。

$$X_s = \sum_{i=1}^n (A_{si} x_i) / \sum_{i=1}^n A_{si} \quad (3)$$

$$Y_s = \sum_{i=1}^n (A_{si} y_i) / \sum_{i=1}^n A_{si} \quad (4)$$

式中: X_s, Y_s 分别为第 s 阶段三峡库区整体江心洲重心的经纬度坐标; A_{si} 为第 s 阶段第 i 个江心洲面积; x_i, y_i 分别为第 i 个江心洲几何中心的经纬度; n 为江心洲斑块总数。已知不同蓄水阶段的重心迁移所在位置, 可以计算出重心空间移动距离, 重心年际空间移动距离的测度公式如下:

$$D_{s'-s} = \sqrt{(Y_{s'} - Y_s)^2 + (X_{s'} - X_s)^2} \quad (5)$$

式中: $D_{s'-s}$ 为重心变化的距离; s' 为研究的起始蓄水阶段; s 为研究的终止蓄水阶段; $(X_{s'}, Y_{s'})$, (X_s, Y_s) 分别为第 s' 年和 s 年的重心在研究区域的地理坐标。

2 结果与分析

2.1 数据统计分析

通过前期的野外调查和室内解译发现三峡库区江心洲类型多样, 面积参差不齐, 最大的江心洲面积达到近 $1\,134\text{ hm}^2$, 最小的江心洲面积却不足 0.2 hm^2 。其中, 不同蓄水阶段内面积小于 3 hm^2 的江心洲平均占比 55.6% , $[3, 10)\text{ hm}^2$ 范围内的平均占比 21.0% , $[10, 100)\text{ hm}^2$ 范围内的平均占比 16.1% , 而只有 7.3% 的江心洲在 100 hm^2 及以上, 由此可见库区不同蓄水阶段内江心洲面积之间的差距较大。不同规模的江心洲对水文情势的响应可能不同, 其发育规律也不一致, 对其进行分析时应充分考虑规模效应可能带来的影响。因此, 在参照已有研究的基础上, 结合三峡库区的实际情况, 将江心洲按照面积划分为 4 种不同规模类型, 面积小于 3 hm^2 为小型江心洲, 面积 $[3, 10)\text{ hm}^2$ 为中型江心洲, 面积 $[10, 100)\text{ hm}^2$ 为大中型江心洲, 面积大于等于 100 hm^2 为大型江心洲。

2.2 不同蓄水阶段库区江心洲的时间变化特征分析

2.2.1 数量与面积变化特征

随水位的不断抬升, 库区江心洲的数量及面积发生显著变化(图 2)。总体来看, 江心洲数量波动较大, 在经历围堰蓄水和一期蓄水后, 库区江心洲总数量持续降低(图 2a), 由自然状态的 150 个降至一期蓄水后的 89 个。而二期蓄水后江心洲数量增加至 103 个, 正常运行后又略微下降至 99 个。库区干流中的江心洲数量(图 2b)从围堰蓄水开始呈不断降低的趋势, 而支流中江心洲数量(图 2c)从二期蓄水开始, 急剧增加, 正常运行后达到总数量的 45.5% 。同时, 江心洲总面积(图 2d)随着水位的抬升呈现急剧减少的趋势, 由自然状态下河道的最大总面积 $4\,910.56\text{ hm}^2$ 降至正常运行后的最小总面积 $3\,214.6\text{ hm}^2$ 。其中, 库区干流中的面积(图 2e)与整个库区的面积变化趋势相似, 但支流中的面积(图 2f)在库区正式运行前变化不大, 正式运行后面积急剧增加至 288.07 hm^2 。此外, 库区江心洲面积主要分布在 $0.2\sim 1\,134\text{ hm}^2$, 在水文情势巨大变化的影响下, 库区江心洲的平均面积波动较大。而干流的平均面积远大于支流, 库区正式运行后达到最大平均面积, 分别为 54.19 hm^2 和 6.4 hm^2 。平均面积的变化情况也更直观地反映了库区江心洲面积的集中趋势。

不同规模江心洲的数量及面积变化趋势如图 3 所示, 从江心洲的数量来看, 小型江心洲数量最多, 占到了江心洲总数的 55% 以上, 尤其是库区正式运行后, 有 70% 以上的江心洲面积小于 3 hm^2 。其中, 二期蓄水后支流江心洲数量急剧增加, 主要由小型江心洲的变化导致。虽然数量占主导, 但其面积占比较低,

平均占比不足 2%。随水位抬升, 中型与大中型江心洲的数量及面积变化相似, 围堰蓄水后略微增加, 一期蓄水后都显著减少。尽管大型江心洲的数量最少, 平均占比不足 8%, 但面积仍然占优势, 各阶段占比均达到 76% 以上, 由此可见, 其面积变化主导了不同蓄水阶段江心洲整体面积的变化趋势。大型江心洲的出露面积随着水位的抬升持续降低, 但库区正常运行后, 新生的大型江心洲出现, 面积达 1 133. 88 hm² (位于忠县涂井乡), 导致大型江心洲面积增加。

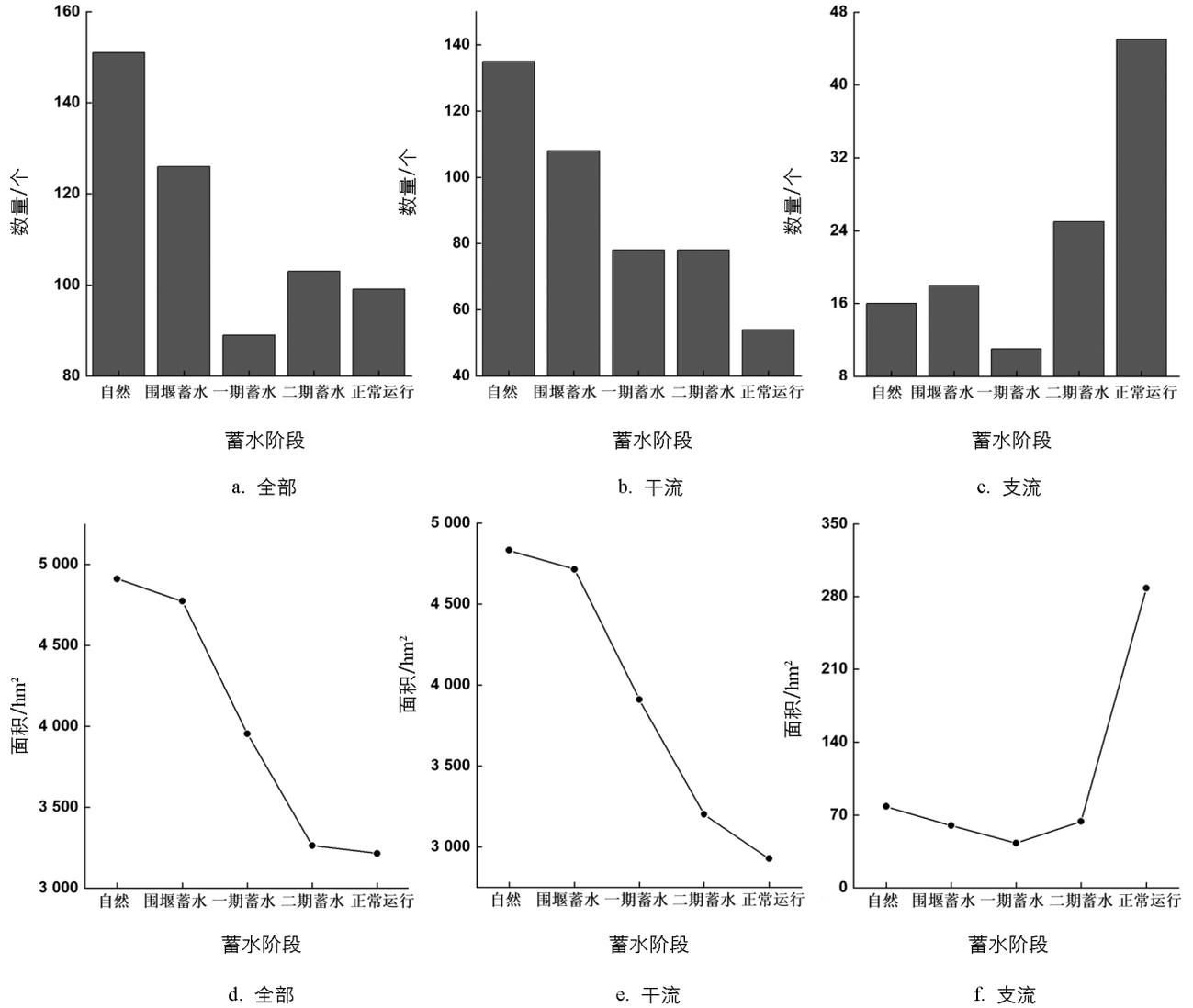


图 2 三峡库区江心洲数量及面积变化情况

2.2.2 形态变化特征

库区江心洲的长宽比变化趋势如图 4 所示。从整体来看(图 4a), 不同蓄水阶段的库区江心洲长宽比处于不断调整的状态, 范围介于 1.01~10.22, 平均值分别为 2.78, 3.05, 2.69, 2.17, 2.10。其中, 围堰蓄水后的江心洲长宽比最大, 而从一期蓄水后开始, 长宽比表现为持续减小的趋势, 且分布范围从散乱朝较为聚集的状态发展。表明随蓄水位的抬升, 库区江心洲整体由窄长趋向于相对短圆的形态。此外, 江心洲的形态具有一定的规模效应, 平均而言, 江心洲长宽比整体上从大到小依次为: 大中型、中型、大型、小型。小型江心洲(图 4b)长宽比最小, 形态倾向于短圆, 因其面积小、高度低, 容易受水淹而消失、冲刷与淤积, 长宽比呈不规则的波动特征。而大型江心洲(图 4e)面积较大, 水淹对形态的影响相对滞后, 前两阶段变化相对较小, 而一期蓄水后受到明显的影响。中型(图 4c)与大中型(图 4d)的江心洲长宽比变化相似, 围堰蓄水后略有增加, 一期蓄水开始整体呈下降的趋势, 形态由窄长趋于短圆。

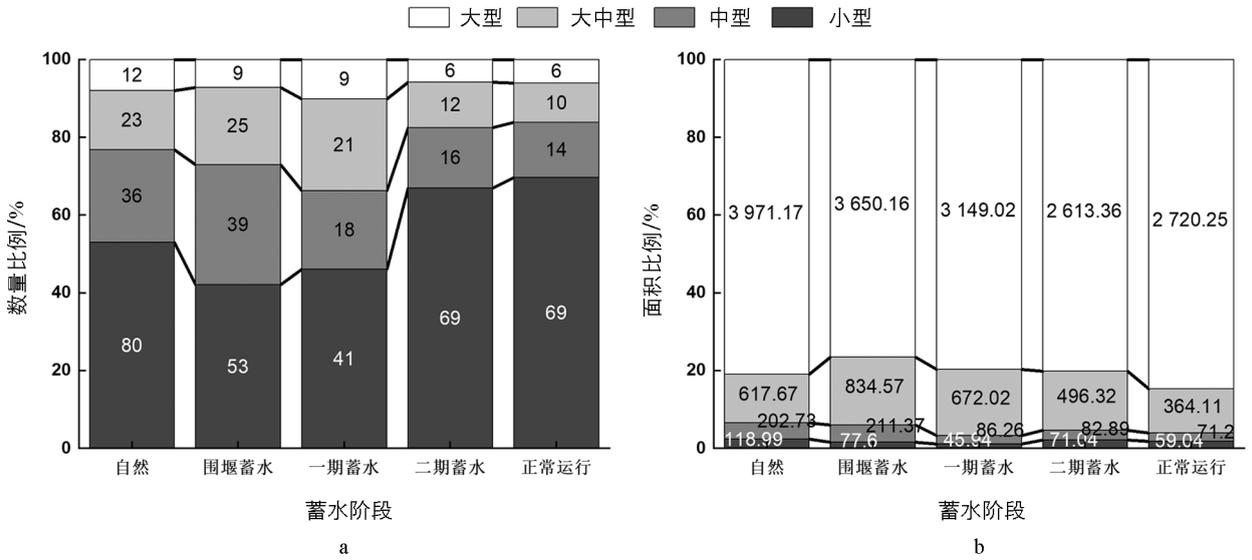


图 a 单位: 个; 图 b 单位: hm^2

图 3 三峡库区不同规模江心洲数量及面积变化情况

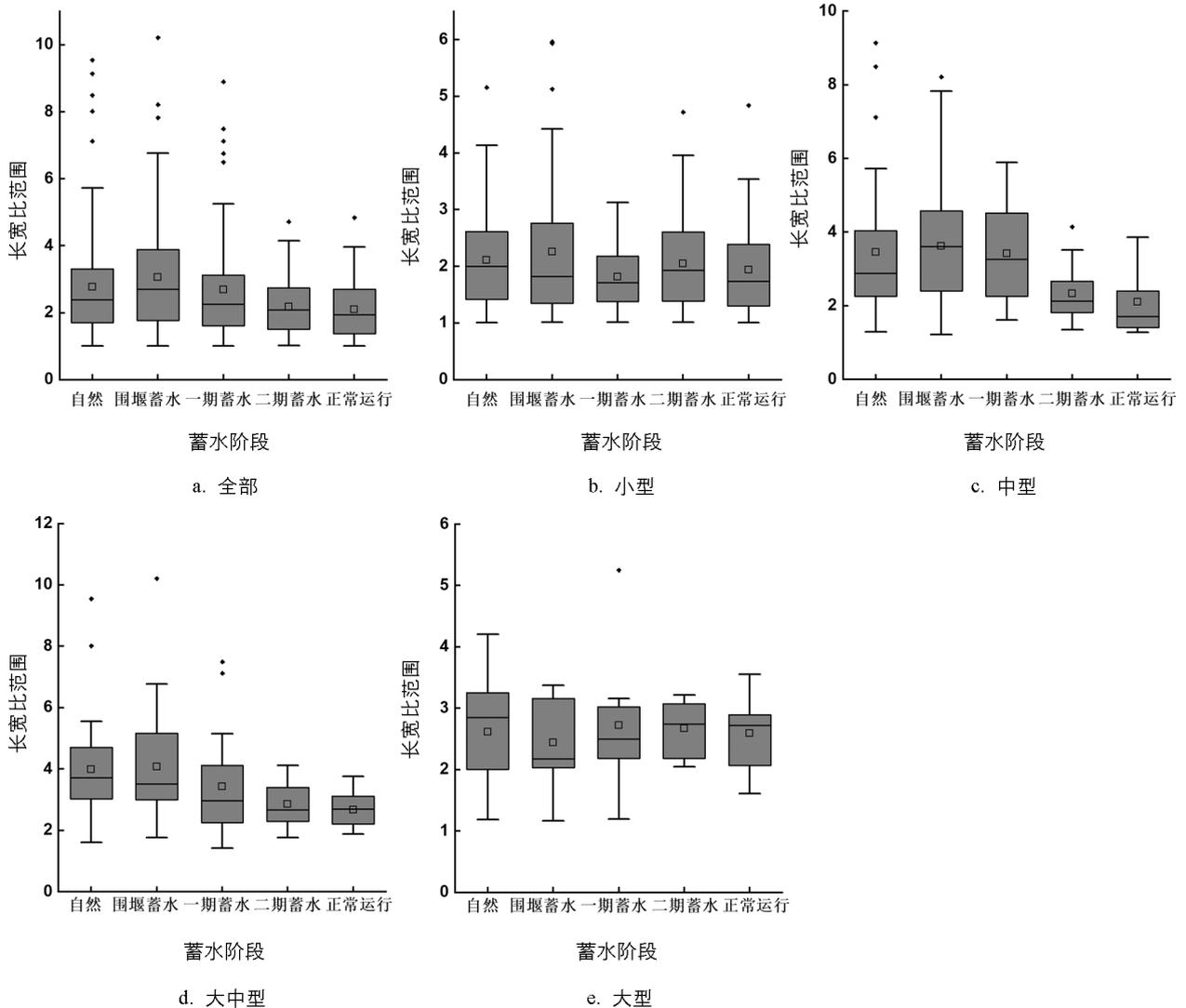
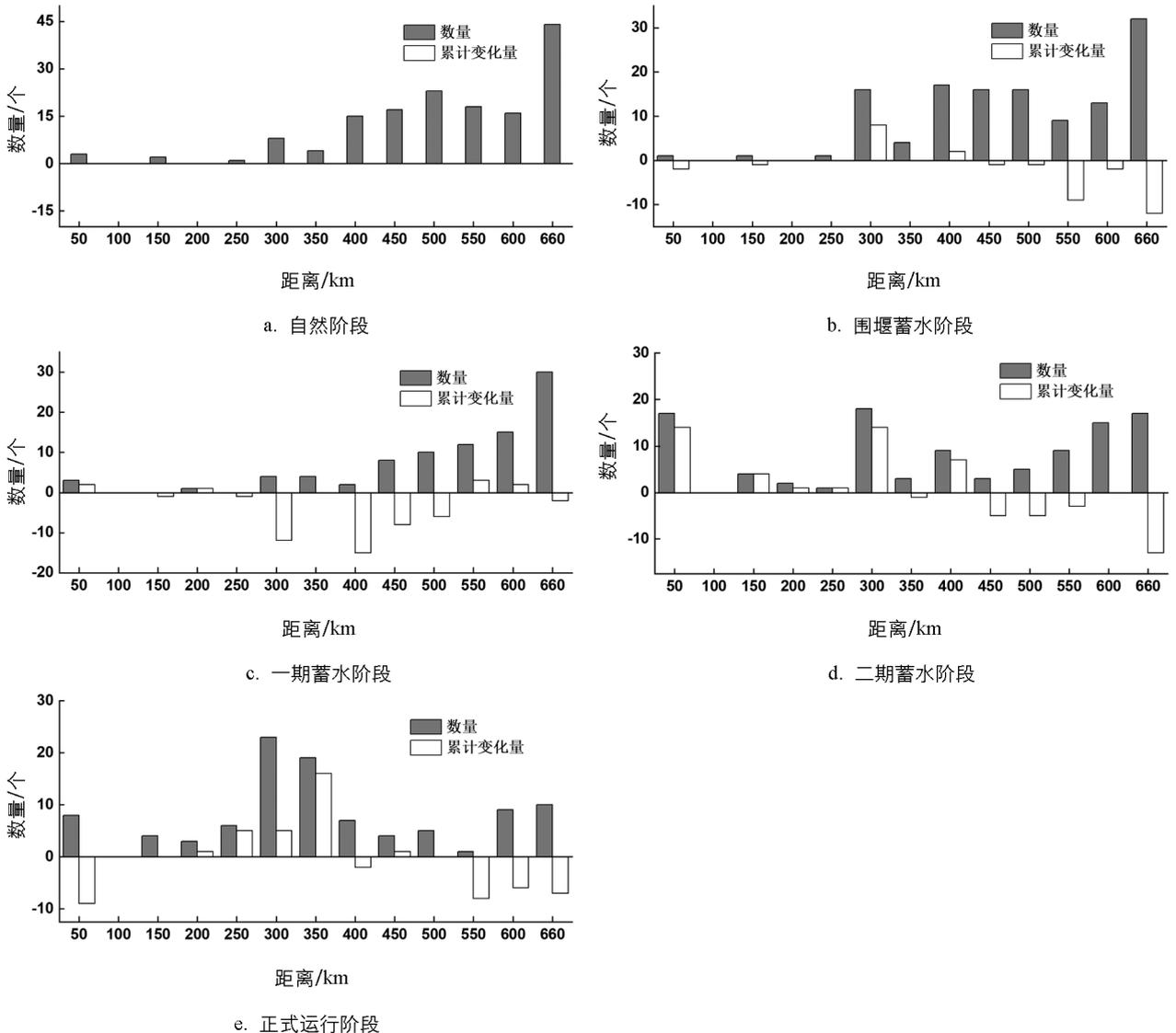


图 4 三峡库区江心洲长宽比动态变化情况

2.3 不同蓄水阶段库区江心洲的空间变化特征分析

2.3.1 空间分布特征

三峡库区江心洲在不同蓄水阶段的空间分布不均匀(图 5). 自然状态下江心洲(图 5a)主要分布在距离大坝 300~660 km(万州—江津)处, 数量占比 96.7%. 围堰蓄水后(图 5b), 库区内江心洲的分布仍与自然阶段相似, 库区上段江心洲数量减少的原因可能与采砂等人类活动有关. 一期蓄水后(图 5c), 水位蓄至 139m, 距大坝 250~500 km(云阳—涪陵)处共消失 41 个江心洲, 总面积达 1 068.03 hm². 二期蓄水后(图 5d)水位达到 156 m, 整个库区的江心洲分布发生了巨大的变化. 距大坝 0~400 km(大坝—丰都)位置变化剧烈, 水域范围扩大后有较多因陆地水淹形成的沿江孤岛, 导致该位置共增加 40 个江心洲. 同时, 400~660 km 处也受水位的影响减少了 26 个江心洲. 库区正常运行后(图 5e)水位上升至 175 m, 在 200~350 km(云阳—忠县)位置共增加 26 个江心洲, 但主要分布在云阳支流(小江), 同时距大坝 500~660 km 处有 21 个江心洲消失. 总体来看, 江心洲距离大坝越远, 受到回水的影响越滞后, 库区江心洲空间分布上的剧烈演变, 与库区分期蓄水, 淹水范围不断扩大有关, 蓄水后使库区江心洲的数量分布变得更加均匀.



此处将支流江心洲归到最邻近的干流位置.

图 5 三峡库区江心洲空间分布变化情况

性。在之后的研究中,会获取更多及更高分辨率的遥感影像,进一步降低水位的影响,达到最优效果。在库区分期蓄水及“蓄清排浊”调度方案^[5]的背景下,年内存在高低水位不断涨落的现象,但此处仅对枯水期 11 月至次年 3 月的库区江心洲展开了初步研究,江心洲年内变化之后还需继续展开探讨。由于该调度方式的运用导致库区形成常年回水区与变动回水区,而不同蓄水阶段的回水末端位置也存在差异,之后仍需具体分析不同回水区段典型江心洲的发育机制。库区江心洲仍有较多工作待开展,这一工作将有助于三峡库区江心洲整治规划、洲滩生态修复、库区航道整治等工作的进行,可为其提供更多的科学参考依据。

3.2 结论

本研究以遥感反演和 GIS 空间分析为基础,采用形状指数、重心迁移模型等方法,分析了三峡库区不同蓄水阶段下江心洲的数量、面积、形态及位置分布的动态演变特征,探讨库区江心洲在时空上的响应,得出以下结论:

1) 库区江心洲主要受不同蓄水阶段水位抬升的影响,数量及面积经历了不同程度的波动过程。水域扩大,导致库区干流大量江心洲被淹没或出露面积减少。而库区支流及涪陵以上的干流位置在高水位影响下,出现较多由河流边滩、沿岸陆地水淹切割而形成的江心洲栖息地。其中,小型江心洲数量占比最高,大型江心洲面积占比最高,分别主导了库区整体的数量及面积变化趋势。

2) 库区水位抬升破坏了江心洲形态发育的平衡状态,不同蓄水阶段的江心洲从整体来看,由“窄长”趋向于相对“短圆”的形态。按不同规模划分后,发现江心洲规模越大形态变化上越相对稳定,规模越小越不稳定。

3) 不同蓄水阶段之间江心洲空间分异特征显著。自然状态下库区江心洲分布不均,万州—江津位置江心洲数量占比 96.7%,而受库区分期蓄水、淹水范围不断扩大的影响后,江心洲数量空间分布变得更加均匀。重心不断迁移,但重心的位置都分布在涪陵及上游位置,也就是库区江心洲面积在库区的变动回水区段占比更大,呈西多东少的分布格局。需要及时对变动回区内河道进行疏浚,防止江心洲的发育对通航造成影响。

参考文献:

- [1] 高超. 基于 MSS/TM/ETM 图像的长江马芜铜段江心洲演化研究 [J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 135-141.
- [2] XU J X. Evolution of Mid-Channel Bars in a Braided River and Complex Response to Reservoir Construction: an Example from the Middle Hanjiang River, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22(10): 953-965.
- [3] 谢平. 长江的生物多样性危机——水利工程是祸首, 酷渔乱捕是帮凶 [J]. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1279-1299.
- [4] WEN Z F, YANG H, ZHANG C, et al. Remotely Sensed Mid-Channel Bar Dynamics in Downstream of the Three Gorges Dam, China [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 409.
- [5] 刘洁, 杨胜发, 沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响 [J]. 泥沙研究, 2019, 44(6): 33-39.
- [6] 杨扬, 沈超敏, 孙国荣. 长江江心洲的形成和演变机理探讨 [J]. 河南水利与南水北调, 2012(3): 51-53.
- [7] 李倩. 长江上游保护区干流鱼类栖息地地貌及水文特征研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [8] HOOKE J M, YORKE L. Channel Bar Dynamics on Multi-Decadal Timescales in an Active Meandering River [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(14): 1910-1928.
- [9] 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 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 65-73.
- [10] LI D F, LU X X, CHEN L, et al. Downstream Geomorphic Impact of the Three Gorges Dam: With Special Reference to the Channel Bars in the Middle Yangtze River [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(13): 2660-2670.
- [11] SCHUURMAN F, KLEINHANS M G. Bar Dynamics and Bifurcation Evolution in a Modelled Braided Sand-Bed River [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(10): 1318-1333.
- [12] 李志威, 李艳富, 王兆印, 等. 分汉河流江心洲洲头冲淤概化模型 [J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 1-10.
- [13] WANG D W, MA Y X, LIU X F, et al. Meandering-Anabranching River Channel Change in Response to Flow-Sediment

- Regulation; Data Analysis and Model Validation [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124209.
- [14] CROSATO A, MOSSELMAN E, BEIDMARIAM DESTA F, et al. Experimental and Numerical Evidence for Intrinsic Nonmigrating Bars in Alluvial Channels [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(3): W03511.
- [15] 李志威,王兆印,李文哲,等.卵石沙洲发育与冲刷试验 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 797-805.
- [16] 李露,唐伟,王云波.来水流量变化条件下沙洲冲淤试验研究 [J]. *陕西水利*, 2019(5): 1-3, 6.
- [17] TUBINO M, REPETTO R, ZOLEZZI G. Free Bars in Rivers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1999, 37(6): 759-775.
- [18] ADAMI L, BERTOLDI W, ZOLEZZI G. Multidecadal Dynamics of Alternate Bars in the Alpine Rhine River [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8938-8955.
- [19] LYU Y W, FAGHERAZZI S, TAN G M, et al. Hydrodynamic and Geomorphic Adjustments of Channel Bars in the Yichang-Chenglingji Reach of the Middle Yangtze River in Response to the Three Gorges Dam Operation [J]. *CATENA*, 2020, 193: 104628.
- [20] 刘晓芳,黄河清,邓彩云.江心洲平衡形态水动力条件的理论分析 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 477-483.
- [21] RASBOLD G G, STEVAUX J C, PAROLIN M, et al. Sponge Spicules as Indicators of Paleoenvironmental Changes in Island Deposits - Upper Paraná River, Brazil [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 536: 109391.
- [22] LOU Y Y, MEI X F, DAI Z J, 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 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(10): 1-18.
- [23] WANG Z Y, LI H, CAI X B. Remotely Sensed Analysis of Channel Bar Morphodynamics in the Middle Yangtze River in Response to a Major Monsoon Flood in 2002 [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1165.
- [24] 毛海涛,王正成,林荣,等.三峡水库蓄水后上下游河段水沙特性变化及影响因素分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 161-169.
- [25] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [26] MCFEETERS S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [27] 李志威,王兆印,张康.典型沙洲形态与河道的关系 [J]. *泥沙研究*, 2012(1): 68-73.
- [28] 李岩,黄超傑,王珂,等.安徽省森林生态承载力及其重心迁移研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(1): 87-96.
- [29] 程希,郭倩,廖和平,等.县域多维贫困测度及贫困重心迁移路径研究——以重庆市武陵山片区为例 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(3): 1-9.
- [30] HUANG H Q, DENG C Y, NANSON G C, et al. A Test of Equilibrium Theory and a Demonstration of Its Practical Application for Predicting the Morphodynamics of the Yangtze River [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(5): 669-675.