

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.02.20

湘江长沙综合枢纽下游河段典型江心洲演变规律

隆院男^{1,2,3}, 夏涵韬¹, 蒋昌波^{1,2,3}, 李志威^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙410114; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙410114)

摘要: 长沙综合枢纽建成后,对湘江下游分汊河段江心洲演变产生较大影响。选取该河段3个具有代表性的江心洲(甄皮洲、萝卜洲和沙坪洲),通过Landsat遥感影像和1983、2008和2015年江心洲河段的实测地形数据,以及湘潭站多年实测水沙数据,分析近30余年河段内江心洲演变过程及主要影响因素。结果表明:径流量年际变化较小且年内分配趋于稳定,年输沙量呈现周期性波动下降的趋势,1990年代枯水期输沙量相比1980年代同期有所增加。1984-1994年期间,江心洲处于自然发育状态,面积和体积都有所增加,1994-2005年,3个江心洲也均有不同程度的增大。至2009年,江心洲面积继续扩大。2012年后由于长沙综合枢纽的建成运行,下游河段江心洲进一步萎缩。

关键词: 长沙综合枢纽; 江心洲; 冲刷; 水沙变化; 湘江下游

中图分类号:TV147

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)02-0134-08

Evolution law of typical mid-channel bars in Xiang River below the Changsha Comprehensive Hydraulic Pivot

LONG Yuannan^{1,2,3}, XIA Hantao¹, JIANG Changbo^{1,2,3}, LI Zhiwei^{1,2,3}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Water Environment Treatment and Ecological Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: The completion of the Changsha comprehensive hydraulic pivot had a great influence on the evolution process of mid-channel bars in the bifurcated reach of the lower Xiang River. Three representative bars (Zhenpi Bar, Luobo Bar, Shaping Bar) in the reach were selected to analyze the evolution process and main influencing factors of mid-channel bars in the past 30 years, based on Landsat remote sensing images, measured topographic data of this reach in 1983, 2008 and 2015, as well as measured water and sediment data of Xiangtan hydrological station of years. The results showed that the inter-annual runoff variation in the lower reach of the pivot was small and the distribution basically maintained stable during the year, but the annual sediment transport volume showed a downward trend of cyclical fluctuation. However, the sediment transport load in the dry season of the 1990s increased compared with the same period of the 1980s. The 3 mid-channel bars were in a state of natural development, with an increase in area and volume from 1984 to 1994. They all increased by different degrees from 1994 to 2005. They kept expanding in 2009 until the operation of the Changsha Comprehensive Hydraulic Pivot in 2012, after which the bars started shrinking.

Key words: Changsha Comprehensive Hydraulic Pivot; mid-channel bars; erosion; water-sediment variation; lower Xiang River

1 研究背景

湘江长沙综合枢纽下游河段内发育着大量岛屿

或江心洲,江心洲稳定对于下游航道安全、洞庭湖湿地和流域经济生产都有重要的影响。枢纽建成运行后,正常蓄水位达29.7 m,改变了下游来水来沙条

收稿日期:2019-09-15; 修回日期:2019-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51809020);湖南省教育厅科学研究项目(19B036);湖南省水利科技项目(湘水科计[2016]194-23)

作者简介:隆院男(1985-),男,湖南宁乡人,博士,讲师,研究方向为水资源时空演变及流域水文模型。

通讯作者:李志威(1984-),男,湖北云梦人,博士,副研究员,研究方向为水动力学与河流动力学。

件,而河段水动力条件的改变又进一步影响了河道演变。枢纽下游航段水面虽宽,但水下潜洲等较多,船舶通过此处航段时易擦碰水下潜洲而导致重大事故^[1],因此,需要根据江心洲的演变规律对部分洲体采取必要的保护措施,以阻止或减缓江心洲被冲刷蚀退过程。目前,关于湘江下游河道江心洲演变已有众多学者研究报道^[2-3],但未就长沙综合枢纽对江心洲演变进行量化分析,对其演变影响因素的揭示有利于相关单位采取合理的工程保护措施和科学的管理策略。

近10年来,国内学者从不同方面对分叉河道的江心洲形成和演变过程进行研究,如通过实测地形资料探究河床形态指标(河道岸线、深泓线)变化,分析河床调整的主要影响因素^[4-6]。也有学者通过沉积环境、地域分布、形成水动力环境等揭示其发育规律^[7-8]。利用遥感图像数据研究江心洲演变规律也有一些尝试^[9-10],但仅仅是分析江心洲露出水面的部分洲体,缺乏对江心洲水下地形数据的分析。国外学者主要从水动力模拟和沉积学两个方面研究江心洲的泥沙淤积特征、淤积过程及洲体演变规律,并采用水沙数学模型模拟江心洲的形成和演变过程^[11-14]。前人主要研究江心洲自然演变规律,而很少分析人为因素(比如水利枢纽工程)对下游江心洲发育规律的影响。

湘江长沙综合枢纽建成运行后,引起其下游河段水沙条件的变化,势必影响江心洲自然演变过程,并发生显著的冲刷蚀退^[15]。本文利用湘潭水文站多年实测水沙资料,分析枢纽下游河段水沙特性,基于遥感图像和实测地形图分析枢纽下游河段江心洲的演变过程,可为长沙综合枢纽下游段江心洲今后的演变趋势以及河段航运安全的保护提供一定的理论参考。

2 研究区概况

2.1 河道特征

本研究河段为长沙综合枢纽至濠河口河道(图1),为典型的江心洲分叉河道。该河段河长约26.6 km,河宽600~1 600 m,河床平均坡降为0.0824‰,属于中部较低、东西较高的地形。河段两侧多为由河流沉积作用而形成的冲积平原,另有少许的丘陵,属于典型的平原河流。该段有一处由团头湖流入的小支流。研究河段内的江心洲有3个,从上游到下游分别是甄皮洲、萝卜洲、沙坪洲。湘江是典型的少沙河流,长沙以下河段多为砂性土,抗冲条件差,存

在岸坡冲刷问题。

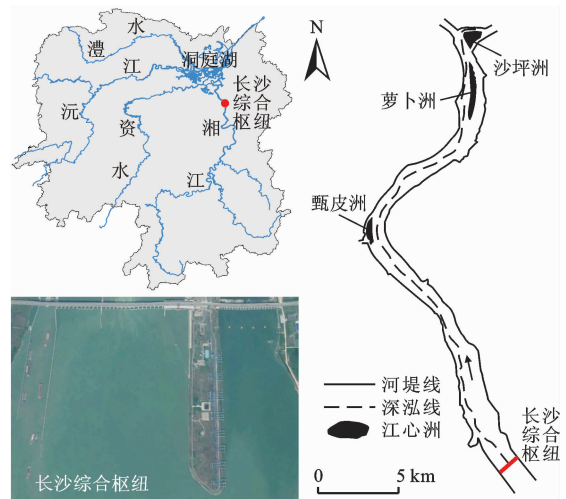


图1 湘江长沙综合枢纽地理位置及以下河段江心洲分布

2.2 江心洲基本介绍

甄皮洲(28°31'06"N, 112°44'31"E)位于湖南省望城县乔口镇以东的湘江主河道上,该河段属于典型的首尾窄深单一的弯曲型河段。河段左岸有一条从团头湖流入湘江的支流,1980年前,甄皮洲完全在支流入口下游,呈叶片状,随着湘江中的泥沙长期在洲头处淤积,使得甄皮洲不断地向南拓展,2009年的遥感图像表明,甄皮洲面积最大时呈现刀头的形状,而洲体中部依稀可见有一处裂痕,用于区分洲头处淤积的洲体与固定洲体。新增洲体的稳定性受湘江来水量以及输沙量变化的影响。

萝卜洲(28°35'32"N, 112°48'31"E)位于乔口镇东北方向,距镇中约12.7 km,由南至北,横贯江心。萝卜洲分为上萝卜洲和下萝卜洲,从2005年的遥感图像可见上下洲的分界线。萝卜洲洲体稳定,多年来面积无大幅变动。

沙坪洲(28°37'30"N, 112°48'32"E)位于湘江濠河口,属于鹅头型江心洲,沙坪洲的左岸较稳定,与湘江支流左岸的距离约为220 m。从1984和1994年的图像上来看,沙坪洲距右岸约有400 m;而2000年后的平均距离约为200 m,水位低时,沙坪洲与湾河围连为一体;2005年影像表明,沙坪洲的右岸首窄尾宽,这是因为洲头更靠近濠河分叉口,湘江中的泥沙在此淤积较多,所以比洲尾淤积明显。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

美国NASA的陆地卫星计划从1972年启动,到现在一共有8颗卫星,拍摄周期较短(2~3周),且时

间跨度序列较长,遥感影像覆盖范围较广,从 USGS (United States Geological Survey) 网站上可以免费下载相关数据。其中 Landsat MSS、Landsat TM、Landsat OLI_TIRS 经过预处理(辐射定标和大气校正)后,数据产品处理简单,使用方便。本文借助 Landsat 数据来研究枢纽下游典型江心洲平面形态的时空演化特征。Landsat 数据遥感影像信息见表 1。

表 1 Landsat 数据遥感影像信息表

年份	数据集	成像日期	湘阴站 水位/m	波 段
1984	Landsat5 (MSS)	1984-08-16	30.26	
1994	Landsat5 (TM)	1994-08-12	30.83	7 5 1
2005	Landsat5 (TM)	2005-06-23	30.64	7 5 1
2009	Landsat5 (TM)	2009-08-21	30.14	7 5 1
2013	Landsat5 (TM)	2013-06-13	30.22	7 5 1
2016	Landsat8 (OLI)	2016-06-05	30.42	7 5 1

研究河段所在 TM/OLI 影像的轨道号为 125/42 和 122/39。水位变化是水陆边界提取的干扰因素之一,水位浮动较大会使得提取的数据没有对比性^[16]。因此本文选取水位大致相同的遥感数据。受到卫星的拍摄周期和枢纽下游流域云层覆盖度等不确定因素的影响,选取的不同年份遥感数据的成像日期也不尽相同。由表 1 可知,选取遥感影像的日平均水位均在 30~31 m 之间,因此选取的 6 期遥感影像所解译的江心洲时空演变信息具有对比性。

在解译枢纽下游典型江心洲的平面形态之后,根据长沙综合枢纽上游布设的湘潭水文站 1953-2014 年实测逐日水沙资料(数据来源于湖南省水文水资源勘测局),从水沙的年际变化和年内变化角度,分析枢纽下游河段典型江心洲的演变过程。

3.2 研究方法

长沙综合枢纽下游河段的图像跨越 125/42 和 122/39 两个轨道,因此需要对遥感图像预处理(几何校正、辐射定标和大气校正),图像由 UTM 投影系统转换为等面积投影系统,然后再消除光照和大气等因素对地物反射的影响。在对遥感影像进行预处理及对部分图像合成拼接的基础上,采用区域裁剪和截图的方法得到江心洲区域的遥感资料,本文主要使用归一化水体指数 $NDWI$ (normalized difference water index),其公式如下:

$$NDWI = (Band_{Green} - Band_{NIR}) / (Band_{Green} + Band_{NIR}) \quad (1)$$

式中: $Band_{Green}$ 为绿色波段; $Band_{NIR}$ 为近红外波段。

研究方法的原理参考借鉴 Mcfeeters^[17] 和徐涵秋^[18] 利用归一化水体指数 ($NDWI$) 抑制遥感影像中的土壤和植被信息提取水体的方法,再结合 ArcGIS 计算相应的数据(面积、洲长、洲宽、距离左右岸的距离),最后借鉴相关文献资料及地质、水文资料分析江心洲演变过程的时空特征并探究其可能的影响因素。

受天气和流域云层分布等自然因素的干扰,难以提取不同时间、相同水位下的遥感影像。考虑到水位是江心洲露水面积变化的重要影响因素,因此,本研究所采用遥感影像对应日期水位基本一致;此外,不同于遥感数据,实测河道地形资料不会受到河道水位变化的干扰,本研究通过计算洲体体积的变化,定量认识江心洲的演变规律。

4 水沙变化分析

4.1 水沙的年际变化因素

湘潭站多年平均径流量为 $663.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年平均输沙量为 $969 \times 10^4 \text{ t}$,图 2 为 1953-2014 年湘潭站水沙年际变化距平图,直观地反映了湘江下游来水来沙情况,通过年际径流量和输沙量的波动曲线反映河段的水文要素的变化规律。由图 2 可知,年径流量变化趋势不明显,而年输沙量呈减少趋势。1990 年以前,湘江流域的人类活动并未对当地水文要素产生重大影响。在这个时段内,河段的径流量和输沙量均处于自然状态下。1990 年后,随着湘江流域的建设发展,湘江河段兴建大量的水利设施,工业、农业、城市用水大量增加,这些都对河段水文要素的变化产生了重大的影响。

4.2 水沙的年内变化因素

图 3 为湘潭站月平均径流量和输沙量分布。由图 3 可看出,月最大径流量在 5 月份,为 $114.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,最小径流量在 12 月份,为 $23.89 \times 10^8 \text{ m}^3$;月最大输沙量在 6 月份,为 $236.32 \times 10^4 \text{ t}$,月最小输沙量在 12 月份,为 $7.02 \times 10^4 \text{ t}$ 。

图 4 为研究时段内不同年代湘潭汛期和非汛期的径流量和输沙量分布。湘潭站枯水期平均径流量和输沙量分别为 $204 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $128 \times 10^4 \text{ t}$,分别占年径流量和输沙量的 31% 和 13%。如图 4 所示,1980 年后,汛期径流量呈现先增大后减小的趋势,而汛期输沙量却持续下降;同样从 1980 年开始,枯水期的径流量和输沙量均呈现先增大后减小的变化趋势。

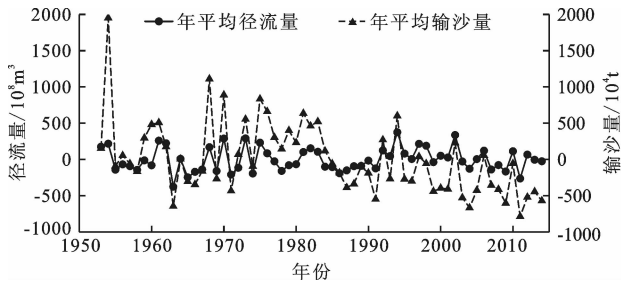


图 2 1953 - 2014 年湘潭水文站年径流量和年输沙量距平图

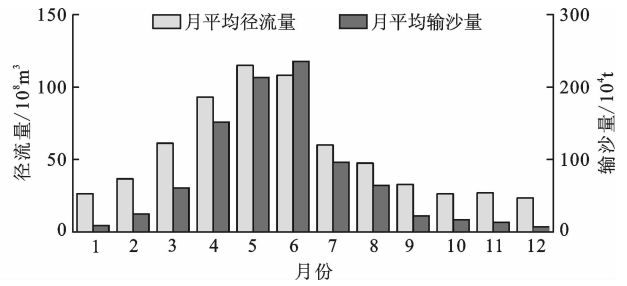


图 3 湘潭站月平均径流量和输沙量年内分布

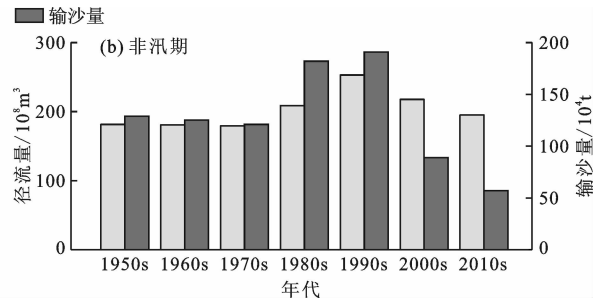
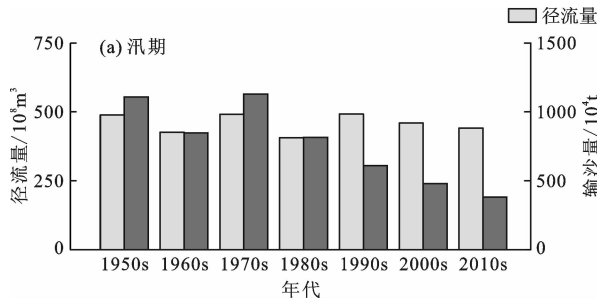


图 4 研究时段内不同年代湘潭站汛期与非汛期径流量和输沙量

采用径流、输沙年内分配不均匀系数探讨湘江下游水沙年内分配不均匀性。年内分配不均匀系数 C_{vy} 的计算方法如下:

$$C_{vy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{k_i}{\bar{k}} - 1 \right)^2}{12}} \quad (2)$$

式中: C_{vy} 为水文参数年内分配不均匀系数, C_{vy} 值越大,表明月径流量(输沙量)相差越悬殊,即径流量(输沙量)年内分配越不均匀^[19]; k_i 为各月径流量或输沙量; \bar{k} 为多年平均径流量或输沙量。

根据湘潭站各月径流量和输沙量为参数计算出 C_{vy} (图 5),径流年内分配不均匀系数在 0.4 ~ 1.2 之间波动,波动幅度较大,1990 年前的 C_{vy} 平均值为 0.79,而 1990 年年后的 C_{vy} 均值为 0.64,略有下降趋势,表明 1990 年后,湘江中下游修建的大源渡和株洲枢纽工程致使径流调蓄能力增强。

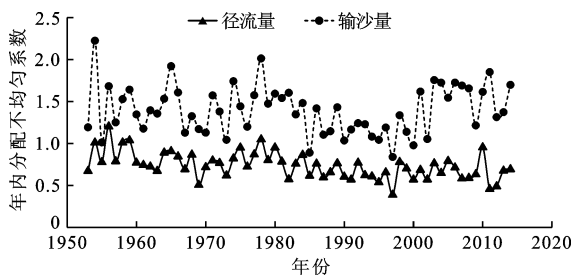


图 5 1953 - 2014 年湘潭站径流量和输沙量年内分配不均匀系数

输沙量 C_{vy} 的波动范围在 0.75 ~ 2.2,波动幅度明显大于径流量 C_{vy} 。1990 年前的 C_{vy} 均值为 1.42,1990 年后的 C_{vy} 均值为 1.13,2000 年后的 C_{vy} 均值为

1.49,可见输沙量的年内分配不均匀度经历了高 - 低 - 高的发展过程,特别是 2000 年之后,年内分配愈发不均匀。

5 江心洲演变分析

5.1 遥感影像的提取与分析

甄皮洲 1984 - 2016 年遥感影像如图 6 所示,甄皮洲洲体参数见表 2。由图 6 和表 2 可知,1984 - 1994 年,甄皮洲平面形态变化较小,至 2005 年,甄皮洲洲头有部分的浅滩出露。2009 年,洲头持续淤积前进,洲长发展至 2.69 km。2013 年,洲头浅滩持续冲刷后退和洲体右缘逐渐冲刷萎缩使右汊河道得以发展,汊道展宽至 0.63 km。2013 - 2016 年,甄皮洲洲头持续受到清水冲刷,洲体面积变小。

表 2 1984 - 2016 年甄皮洲洲体参数表

年份	面积/ km ²	洲体长 度 L/km	洲体宽 度 B/km	长宽比 L/B	左汊河 宽/km	右汊河 宽/km
1984	0.439	1.43	0.45	3.17	0.12	0.65
1994	0.439	1.43	0.45	3.17	0.09	0.65
2005	0.938	2.60	0.48	5.41	0.12	0.62
2009	0.972	2.69	0.48	5.60	0.12	0.62
2013	0.782	2.01	0.48	4.18	0.11	0.63
2016	0.612	1.85	0.48	3.85	0.10	0.63

萝卜洲 1984 - 2016 年遥感影像如图 7 所示,萝卜洲洲体参数见表 3。图 7 和表 3 表明,萝卜洲由上、下萝卜洲组成,从 1984 年的遥感图像上可清晰

看出上下萝卜洲及其分界线,上萝卜洲的面积约为 0.469 km^2 ,占总面积的44%,下萝卜洲的面积约为 0.598 km^2 ,占总面积的56%。1984-2009年间,萝卜洲面积有所增加;2009-2016年,洲体面积减小。

表3 1984-2016年萝卜洲洲体参数

年份	面积/ km^2	洲体长 度 L/km	洲体宽 度 B/km	长宽比 L/B	左汊河 宽/ km	右汊河 宽/ km
1984	1.067	3.63	0.39	9.3	0.56	0.42
1994	1.082	3.63	0.39	9.3	0.57	0.41
2005	1.152	3.65	0.35	10.4	0.53	0.39
2009	1.171	3.66	0.35	10.5	0.37	0.40
2013	1.147	3.64	0.35	10.4	0.45	0.40
2016	1.130	3.63	0.35	10.4	0.48	0.39

沙坪洲1984-2016年遥感影像如图8所示,沙坪洲洲体参数见表4。图7和表4表明,沙坪洲位于湘江濠河口分汊处,从1984年和1994年的影像分析,沙坪洲洲尾淤积形成一个沙嘴,有向东继续发育的趋势,但面积从 0.227 km^2 减小至 0.201 km^2 。2005年相比1994年,洲体的右缘向南发育,洲体面

积和长度没有明显变化。2009年,洲尾的沙嘴持续沿着右汊河道延伸到洲体东部,面积和长度分别大幅度增加至 0.475 km^2 和 0.87 km 。2009-2013年,洲头浅滩严重萎缩,洲体中间靠右汊水流不断淘蚀,沙坪洲的面积和长度分别减至 0.394 km^2 和 0.83 km ;2016年,洲体中部继续冲刷蚀退,面积和长度变化较小。

图9为1984-2016年3个江心洲的面积变化趋势。图9表明,枢纽下游河段3个典型江心洲自1984-2016年总体上面积呈现先增大后减小的趋势,但是各江心洲不同时段的面面积变化速率有较大差异。这主要是由江心洲所处河段以及分汊类型等因素所导致,1984-1994年期间,江心洲处于原始发育状态,结合湘潭水文站的水沙资料,年径流量和枯水期径流量变化较小,但枯水期输沙量占比有所增加。受小水大沙的影响,洲体容易发生淤积。1994-2005年,3个江心洲面积均有不同程度的增大。至2009年,江心洲面积继续扩大。2012-2016年,长沙综合枢纽建成运行后,清水下泄导致洲体受到冲刷引起洲体萎缩。

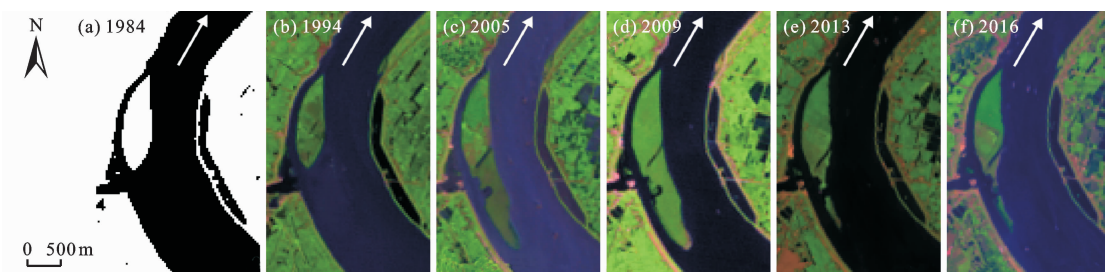


图6 1984-2016年甄皮洲平面形态演变

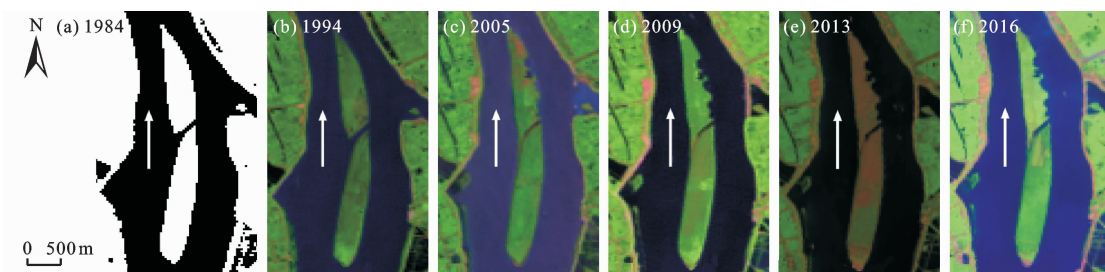


图7 1984-2016年萝卜洲平面形态演变

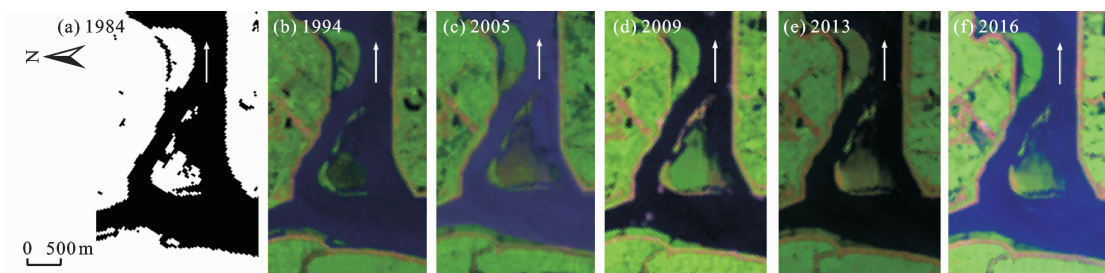


图8 1984-2016年沙坪洲平面形态演变

表 4 1984 - 2016 年沙坪洲洲体参数表

年份	面积/ km ²	洲体长 度 L/km	洲体宽 度 B/km	长宽比 L/B	左汊河 宽/km	右汊河 宽/km
1984	0.227	0.48	0.64	0.75	0.27	0.54
1994	0.201	0.58	0.63	0.92	0.31	0.40
2005	0.436	0.83	0.74	1.12	0.34	0.25
2009	0.475	0.87	0.79	1.10	0.33	0.21
2013	0.394	0.82	0.65	1.26	0.35	0.27
2016	0.361	0.80	0.61	1.31	0.36	0.34

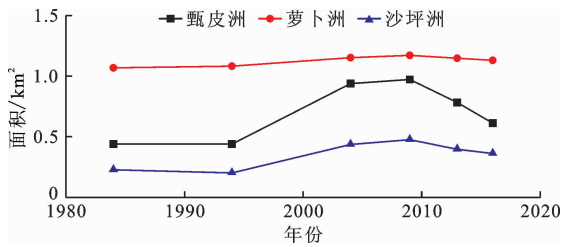


图 9 1984 - 2016 年 3 个江心洲面积变化趋势

5.2 江心洲的实测地形分析

对比遥感数据,实测河道地形数据不仅能可靠地反映江心洲的面积变化,还可以准确地计算出江

心洲体积的变化情况,以便深入了解典型江心洲的演变规律。对 3 个江心洲 1983、2008 和 2015 年的实测地形数据进行了提取、计算和分析。

图 10 为甄皮洲、萝卜洲和沙坪洲 1983、2008 和 2015 年的地形变化。甄皮洲洲头体积在 1983、2008、2015 年分别为 0.009、0.014 和 0.003 km³。1983 - 2008 年期间,洲头体积增加 50%,这是受小水大沙的影响,导致江心洲洲体淤积,另外,该时期湘江下游的江心洲处于发育阶段,体积增加。2008 年后,甄皮洲洲体加固,洲头和左汊停止萎缩。萝卜洲洲体体积分别为 0.040、0.038 和 0.037 km³,洲体体积略有减小,1983 - 2008 年,上下萝卜洲结合为一体,洲尾淤积向北移动。沙坪洲洲体体积分别为 0.014、0.015 和 0.011 km³。从体积上看,1983 - 2008 年泥沙在沙坪洲淤积造成沙坪洲体积缓慢增加,2015 年,沙坪洲的体积减小。

5.3 江心洲横断面地形分析

枢纽下游河段总体上呈现冲刷下切趋势,但是对比 3 个年份(1983、2008、2015 年)的河道断面,受自然和人为因素的影响,各个断面的变化情况略有差异(图 11 ~ 13)。

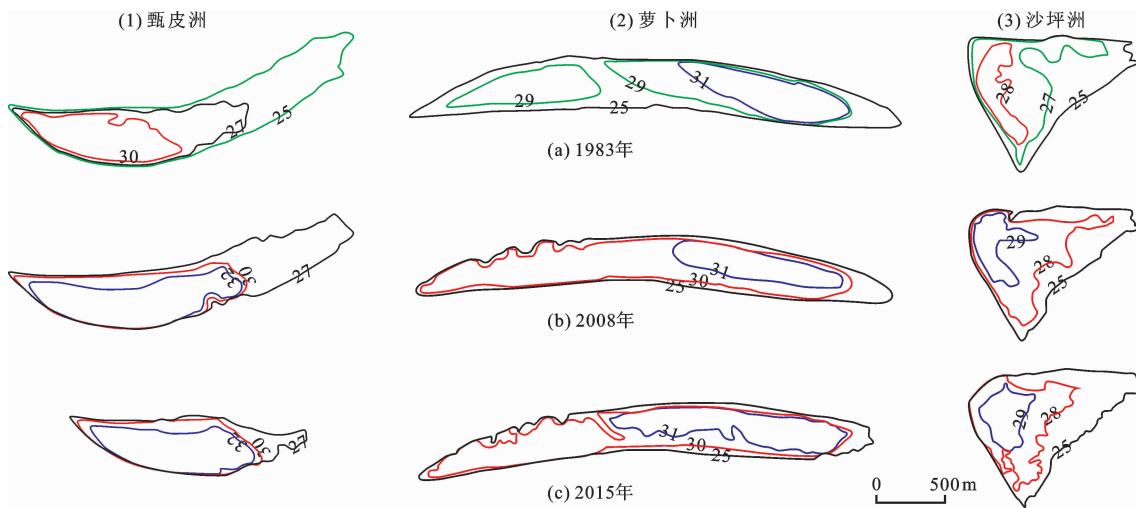


图 10 1983、2008、2015 年 3 个典型江心洲地形变化

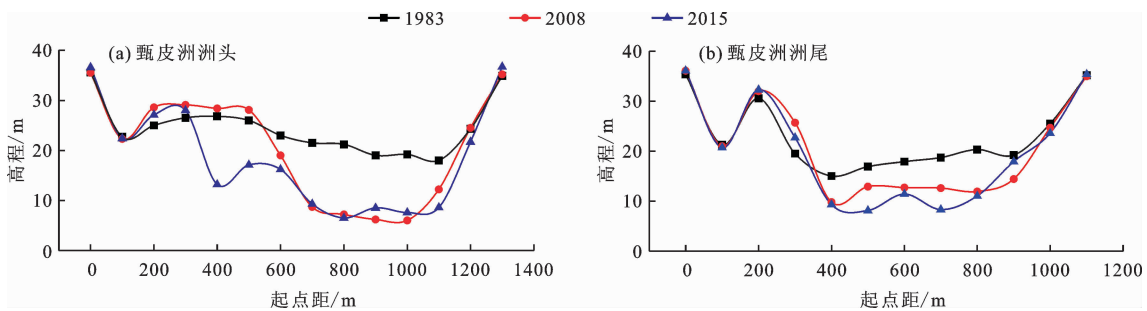


图 11 1983、2008、2015 年甄皮洲洲头和洲尾断面地形变化图

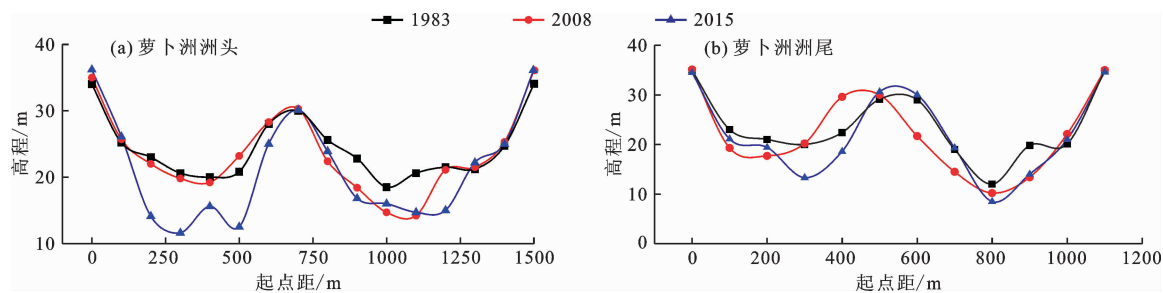


图12 1983、2008、2015年萝卜洲洲头和洲尾断面地形变化图

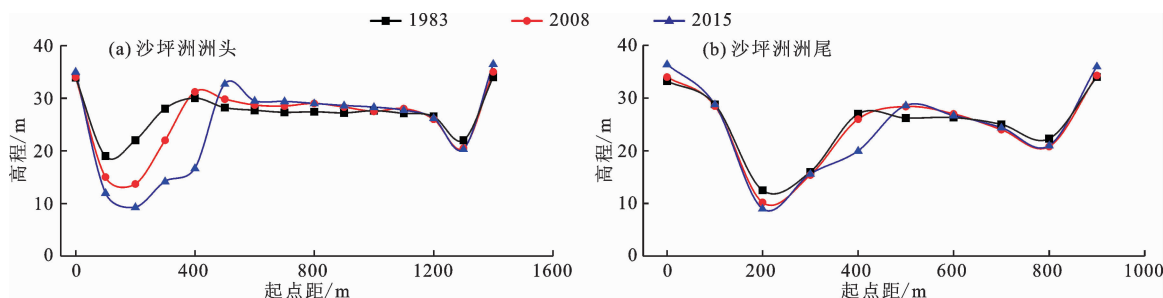


图13 1983、2008、2015年沙坪洲洲头和洲尾断面地形变化图

1983-2008年,甄皮洲洲头浅滩随着泥沙淤积而抬升,右侧河道由于水流的冲刷而下切。至2015年,江心洲部分下切,形成了1个二级深槽,最深处累计下切11.4 m,主要是受到人为建设洲体护岸的影响,而右侧主槽略有淤积。甄皮洲洲尾断面整体冲刷下切,最大处累计冲刷8.7 m。

萝卜洲河段下游为濠河口,湘江在濠河口处分成2条支流,河流比降下降,洲头断面曲线散乱,1983-2008年,右侧河槽冲刷下切,左侧河床冲刷不大,而2008年后,在洲头断面左侧河床下切形成深槽,变化最深处下切达12 m。萝卜洲洲尾断面左侧河槽向右岸移动,形成了1个二级深槽,河槽下切最深处达到7.1 m。

沙坪洲河段处于濠河口处,悬移质在右岸堆积,造成了右岸洲体淤积上升,而断面左侧不断地冲刷下切,最大处累积冲刷12.7 m。洲头断面曲线散乱,局部滩槽交错。洲尾断面的河段主槽在向右岸移动,江心洲两侧都有冲刷下切,在右侧形成一个深槽,冲刷最大处达到15 m。

6 结论

本文利用湘江湘潭水文站多年实例水沙资料分析了长沙综合枢纽下游河段的水沙特征,并运用实测地形和遥感数据选取长沙综合枢纽下游3个典型江心洲,分析其面积、体积发育和萎缩过程,主要结论如下:

(1)近30年来,湘江下游年径流量变化趋势不

明显,而年输沙量呈减小趋势;枯水期径流量和输沙量都呈现先增大后减小的趋势,相比之下径流量年内分配的均匀程度高于输沙量。

(2)在长沙综合枢纽建成运行前,枢纽下游河段3个典型江心洲的面积与体积均呈现不同程度的增大趋势。

(3)2012年长沙综合枢纽建成后,清水下泄导致江心洲均呈现萎缩趋势,但变化程度有所不同。所在河段的河床冲刷下切更为明显。

参考文献:

- [1] 陈尔健. 两型社会背景下湘江航运发展探析[D]. 长沙:湖南大学,2013.
- [2] 蒋昌波,李昌玲,李正最,等. 湘江湘潭-濠河口河段河道演变特点分析[J]. 泥沙研究,2013,38(3):19-26.
- [3] 隆院男,刘晶,李志威,等. 近30年湘江中下游典型江心洲演变规律[J]. 泥沙研究,2017,42(6):8-15.
- [4] 师长兴. 黄河上游内蒙古段河床演变及其与水沙变化的关系[J]. 地理科学,2016,36(6):895-901.
- [5] 朱玲玲,葛华. 三峡水库175m蓄水后荆江典型分汉河段演变趋势预测[J]. 泥沙研究,2016,41(2):33-39.
- [6] 孙昭华,李义天,黄颖,等. 长江中游城陵矶-湖口分汉河道洲滩演变及碍航成因探析[J]. 水利学报,2011,42(12):1398-1406.
- [7] 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.
- [8] 张昌民,朱锐,赵康,等. 从端点走向连续:河流沉积模式研究进展述评[J]. 沉积学报,2017,35(5):926-944.

- [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] 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.
- [11] DEFINA A. Numerical experiments on bar growth[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(4): 285-285.
- [12] WANG Bo, XU Y J. Dynamics of 30 large channel bars in the Lower Mississippi River in response to river engineering from 1985 to 2015[J]. *Geomorphology*, 2018, 300(1): 31-44.
- [13] LUCHI R, HOOKE J M, ZOLEZZI G, et al. Width variations and mid-channel bar inception in meanders: River Bollin (UK)[J]. *Geomorphology*, 2010, 119(1): 1-8.
- [14] WINTENBERGER C L, RODRIGUES S, CLAUDE N, et al. Dynamics of nonmigrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France)[J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 185-204.
- [15] 李晓鹏. 湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
- [16] 刘海, 殷杰, 陈晶, 等. 基于遥感影像的丹江口水库水域面积动态变化与原因研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11): 1759-1766.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 刘培亮, 毛德华, 周慧, 等. 1990-2013年资水流域汛期径流量变化规律分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(Z1): 6-13.

(上接第133页)

- [9] 张兰芳, 陆峰, 雷兴. 西津水利枢纽一、二线船闸轴线间距研究[J]. 西部交通科技, 2018(4): 191-195.
- [10] 叶玉康, 刘晓平, 张宇, 等. 弯曲河段船闸口门区通航水流条件探讨[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 72-75+87.
- [11] 孙保虎, 李君涛. 汉江雅口航运枢纽船闸通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2017(1): 94-97+120.
- [12] 李君涛, 闫涛, 王艳华. 汉江雅口航运枢纽泄流能力试验研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 38-41.
- [13] 徐进超, 李云, 宣国祥, 等. 船闸泄水作用下引航道中动水冲沙规律[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 186-195.
- [14] 胡旭跃, 许晓琳, 沈小雄. 江心洲型船闸通航安全问题及改善措施研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 94-97.
- [15] 李君涛. 汉江雅口航运枢纽平面布置特点分析及优化布置研究[J]. 水道港口, 2017, 38(3): 258-262.
- [16] 伍志元, 蒋昌波, 陈杰. 泄水闸开启方式对通航水流条件的影响[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 73-77+82.
- [17] 彭伟, 冯小香, 普晓刚. 船闸下游引航道口门区急流碍航改善措施比选[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(10): 47-52.
- [18] 符蔚, 王能, 李志威, 等. 分汊河段船闸引航道整治试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 17-22.
- [19] 郝媛媛, 普晓刚, 李君涛, 等. 长沙枢纽船闸下游口门区出口支流入汇段通航条件研究[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 399-403.
- [20] 曹一中, 张公略, 金国强, 等. 富春江船闸扩建改造工程总体布置方案[J]. 水运工程, 2009(9): 136-141.
- [21] 杨娟, 黄靖, 程开宇. 富春江船闸扩建改造工程影响分析[J]. 浙江水利科技, 2012(4): 8-12+20.
- [22] 董志俊, 李君涛, 郝媛媛. 富春江船闸扩建改造工程平面布置优化研究[J]. 水道港口, 2009, 30(5): 357-360.
- [23] 王毓莹. 基于泄洪移民区域分汊河道泄流相互影响的模型试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 139-145.