

基于多源遥感解译的洞庭湖区自然湖岸线演变过程研究*

白宽宽¹, 李志威^{1**}, 张 鹏¹, 王在艾², 赵文刚², 鲁瀚友²

(1: 武汉大学, 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

(2: 湖南省水利水电科学研究院, 长沙 410007)

摘 要: 伴随泥沙淤积、水库运行、湖区围垦、岸线侵占和破坏等自然和人为因素的影响, 洞庭湖区湖岸线已发生显著的改变, 但是目前仍缺少遥感解译揭示其演变过程。利用 1986—2022 年多源遥感影像, 通过归一化差异植被指数、最大值合成法以及大津法和目视解译相结合的阈值划分方法, 识别并提取东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖的植被带范围, 进而分析洞庭湖区湖岸线的演变规律。通过栅格计算得到湖泊每年(相比于上年)植被带扩张和萎缩的面积, 以及 1986、1990、2000、2010 和 2020 年植被带变化的空间分布。结果表明, 洞庭湖区自然湖岸线呈现普遍扩张的趋势, 并且不同位置在不同时期扩张和萎缩面积的占比不尽相同。东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖的自然岸线所围水域面积分别缩减 144.84、191.42 和 80.48 km², 缩减率分别为 27.83%、39.20% 和 48.26%。藕池河东支尾闾汇入东洞庭湖内, 通过数字岸线分析系统对其自然岸线进行统计分析, 结果表明: 藕池河东支尾闾的自然岸线平均每年扩张距离为 45 m, 净岸线移动最大和最小距离分别为 3281 和 386.93 m, 线性回归的决定系数为 0.68。总体而言, 泥沙冲淤和水位变化是洞庭湖自然岸线变化的主要原因, 人类采砂活动在局部区域造成了洞庭湖自然岸线的萎缩。

关键词: 洞庭湖; 湖岸线; 植被带; 扩张萎缩; 岸线演变; 主控因子

Shoreline evolution of natural lakes in Lake Dongting area based on multi-source remote sensing interpretation*

Bai Kuankuan¹, Li Zhiwei^{1**}, Zhang Peng¹, Wang Zai'ai², Zhao Wengang² & Lu Hanyou²

(1: *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China*)

(2: *Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, P.R.China*)

Abstract: With the influence of natural and anthropogenic factors such as sediment deposition, reservoir operation, lake reclamation, shoreline encroachment and destruction, the lake shoreline of Lake Dongting area has changed significantly. However, the results based on remote sensing interpretation are still lacking to reveal its evolution processes so far. Based on the multi-source remote sensing imagery from 1986 to 2022, the range of vegetation zone in the east Lake Dongting, south Lake Dongting and Lake Muping were identified and extracted to analyze evolution processes of the lake shoreline using the threshold division methods, such as NDVI and maximum value composite combining with Otsu and visual interpretation. Through raster calculation, the annual expansion and erosion area relative to the previous year, as well as the spatial distribution in 1986, 1990, 2000, 2010 and 2020 of vegetation zone were obtained. The results showed that the area of vegetation zone in Lake Dongting presented a general trend of expansion, and the proportion of expansion and erosion showed spatiotemporal differences. The water area enclosed by the natural shoreline decreased by 144.84, 191.42 and 80.48 km², with a reduction rate of 27.83%, 39.20% and 48.26%, respectively. The analysis using the digital shoreline analysis system showed that the average annual moving distance of the natural shoreline in the tail zone of the east branch of Ouchi River entering the east Lake Dongting was 45 m. The maximum and minimum distance of the net shoreline movement was 3281 and 386.93 m, respectively, and the coefficient of determination of the average linear regression was 0.68. In general, the sediment erosion and deposition and water level change are the main driving force for the change of the

* 2023-11-04 收稿; 2024-01-12 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC3209502)、湖南省重大水利科技项目(XSKJ2019081-03)和湖北省技术创新重点研发计划项目(2023BCB110)联合资助。

** 通信作者; E-mail: lizw2003@whu.edu.cn。

natural lake shoreline in Lake Dongting, and sand mining activities have caused the erosion in the local area.

Keywords: Lake Dongting; lake shoreline; vegetation zone; expansion and retreat; shoreline evolution; dominant factors

河湖岸线资源是稀缺的、不可再生的战略资源,具有重要的生产、生活和生态环境功能^[1]。河湖岸线既是陆生与水生系统间重要的过渡地带,也是维系河流、湖泊系统生态健康的关键区域,更是沿岸经济社会发展的重要依托^[2]。洞庭湖是长江中游最重要的吞吐型通江湖泊,是全球重要的湖泊沼泽湿地,处在长江经济带的中心地带和湖南“一湖四水”交汇的生态经济区域,其岸线资源的管理保护与科学高效利用,有利于湖泊周边地区经济的增长、湖内生态环境质量的提升和江湖关系的协调发展。

然而,由于梯级水库运行、长江水沙变化、湖区围垦以及 1998 年以来“退田还湖”等自然和社会因素的影响,长江干流河床下切,洞庭湖泥沙淤积,“四口”口门位置与长江河床相对高程发生变化,江湖关系发生了多次调整,使得湖泊洲滩和湖岸线发生显著改变^[3-9]。而且,由于河湖水域岸线保护和开发利用管理水平的不足,以及对岸线利用模式和河湖功能的关系认识不够深刻,如洞庭湖区局部湖岸线存在利用布局不合理、岸线利用率低的问题,更有违规建设、乱堆乱放、非法采砂、私建矮围等岸线侵占和破坏湖泊的情况,造成洞庭湖区湖岸线及其生态环境遭受严重的威胁。为了加强河湖水域岸线管理和保护,提高岸线资源的利用效率,保护湖泊的生态环境,亟需研究洞庭湖区湖岸线的演变过程,而植被带范围是反映自然岸线变化最有效的可研究目标之一。

目前,利用遥感影像提取岸线并进行海岸、湖岸和河流岸线的时空演变和主控因子分析,是关于岸线研究的主要内容^[10-13]。数字岸线分析系统(digital shoreline analysis system, DSAS)是 ArcGIS 软件中一个模块,进行岸线时序演变分析的有效工具^[14-16]。然而,当前关于岸线时空演变的分析研究主要聚焦在海岸线,而关于内陆河湖岸线的演变分析较少,并且岸线的提取方法主要是基于单幅遥感影像的水体指数法。由于遥感卫星重访周期和云层遮蔽的影响,很难使不同时期的遥感影像在时间上、水位或潮位上保持一致。

本研究采用 1986—2022 年的 Landsat 系列和 Sentinel-2 遥感影像数据,基于归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和最大值合成法(maximum value composite, MVC)获取洞庭湖区湖泊植被覆盖情况,基于大津法(Otsu)和目视解译相结合的阈值划分方法对植被带和背景进行二值化分割,提取洞庭湖区自然湖岸线。通过栅格计算分析湖岸线扩张和萎缩面积以及岸线所围水域面积的变化。通过 DSAS 工具统计藕池河东支尾闾处 1986、1990、2000、2010 和 2020 年岸线的净岸线移动距离(NSM)、端点速率(EPR)和线性回归率(LRR),分析其岸线的迁移变化。本研究结果对洞庭湖区河湖水域岸线空间的管理、保护和利用具有重要的现实意义。同时,基于 NDVI 和 MVC 的方法提取植被带并用以分析湖泊自然岸线的演变,能够有效避免基于单幅遥感影像提取的不同时相水边线在时间上和水位上不一致的问题。植被带临水侧的自然岸线作为一种岸线指标,可考虑将其作为岸线带临水边界线的划分依据,也为临水边界线的划定提供了参考。

1 研究区域和数据获取

1.1 研究区域概况

长江中游来水来沙先后经过松滋河、虎渡河和藕池河“三口”进入洞庭湖区,并与湘江、资水、沅江、澧水“四水”在目平湖、南洞庭湖和东洞庭湖汇聚,经过洞庭湖的调蓄之后,通过岳阳市的城陵矶汇入长江干流。如图 1 所示,目平湖北接澧水、松滋河和虎渡河来水,西承沅江入汇,并分别在南咀和小河咀流入南洞庭湖,堤防所围湖泊面积为 328.26 km²。南洞庭湖由目平湖、松滋河和藕池河来水入汇,南接湘江和资水,在磊石山流入东洞庭湖,堤防所围湖泊面积为 922.01 km²。东洞庭湖自南洞庭湖湖水流入之后,又有藕池河东支从西入汇,汨罗江和新墙河从东入汇,最后在岳阳县的城陵矶注入长江,堤防所围湖泊面积为 1336.66 km²。

1.2 数据资料及获取

研究区域为东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖,由于覆盖研究区域的 Landsat 系列遥感影像最早可追溯到 1986 年,故研究时间尺度选取 1986—2022 年。数据资料选取 1986—2022 年时间尺度覆盖整个研究区域的尽可能多的可用 Landsat 系列和 Sentinel-2 遥感影像,具体如表 1 和图 2 所示,并挑出一些质量不满足要求的

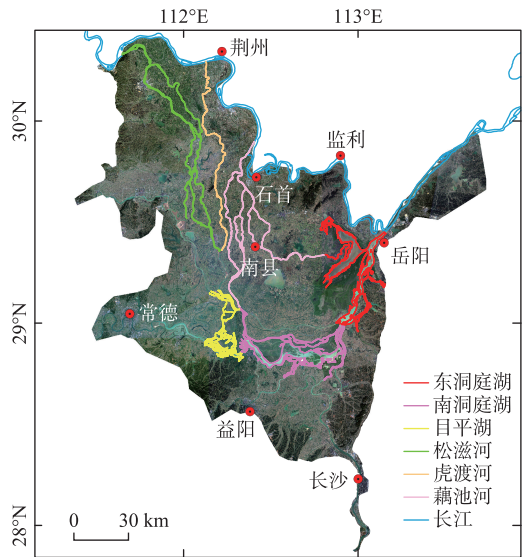


图 1 洞庭湖区 2020 年湖岸线分布

Fig.1 Distribution of lake shorelines in Lake Dongting area in 2020

影像,如 2001—2002 年 Landsat 5 TM 和 2003—2010 年 Landsat 7 ETM+ SLC 发生故障之后的影像,弃之不用。水位数据选取七里山和小河咀水文站 1986—2020 年的月均和年均水位数据。

表 1 洞庭湖区湖岸线演变分析所用遥感数据

Tab.1 Remote sensing data for analysis of lake shoreline evolution in Lake Dongting area

数据集	卫星	传感器	分辨率/m	时间	波段
LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA	Landsat 5	TM	30	1986—2000 年, 2003—2011 年	Band 3, 4
LANDSAT/LE07/C02/T1_TOA	Landsat 7	ETM+	30	1999—2002 年, 2012 年	Band 3, 4
LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA	Landsat 8	OLI	30	2013—2021 年	Band 4, 5
COPERNICUS/S2	Sentinel-2	MSI	10	2014—2022 年	Band 4, 8

所用遥感数据都是在 Google Earth Engine(GEE)云平台上获取。GEE 云平台是集成了海量遥感数据的遥感影像在线处理平台,可以使用简单的 JavaScript 和 Python 编程,通过在线服务器对遥感影像进行云处理,不占用本地电脑内存,可以降低用户硬件成本的投入。GEE 通过对海量遥感影像进行快速的处理,提高了遥感影像信息挖掘的效率,同时,GEE 云平台也可与 ArcGIS、ENVI 等传统桌面端遥感处理平台联合使用。使用用户能够更加灵活方便地对遥感影像进行处理。GEE 云平台因其强大的云处理功能和便捷的操作,具有广泛的应用前景。

2 研究方法 with 基本思路

洞庭湖区自然岸线的提取过程和计算分析方法如图 3 所示。首先对影像池中每年的遥感影像(数量和类型见图 2)进行 NDVI 和 MVC 处理,得到每年植被覆盖的灰度图,然后通过 Otsu 和目视解译相结合的阈值

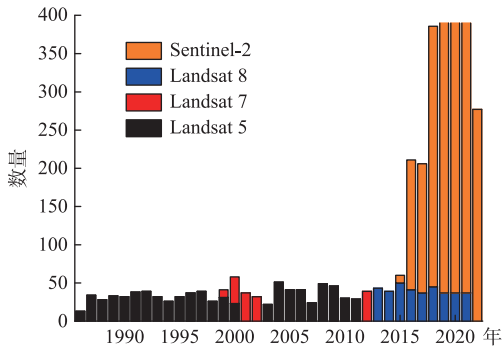


图 2 每年用于最大值合成的影像数量
Fig.2 The number of imagery used for MVC per year

划分方法,分割出植被和背景的二值化栅格图像。对不同时期相的二值化栅格图像进行相减运算,可以得到自然岸线扩张和萎缩的面积及空间分布。提取植被所围部分,得到伪水域,其面积的变化反映了植被带的变迁。对伪水域进行面转线和平滑线等操作,完成植被带临水侧边界线的提取和去锯齿化,并进行 DSAS 分析。

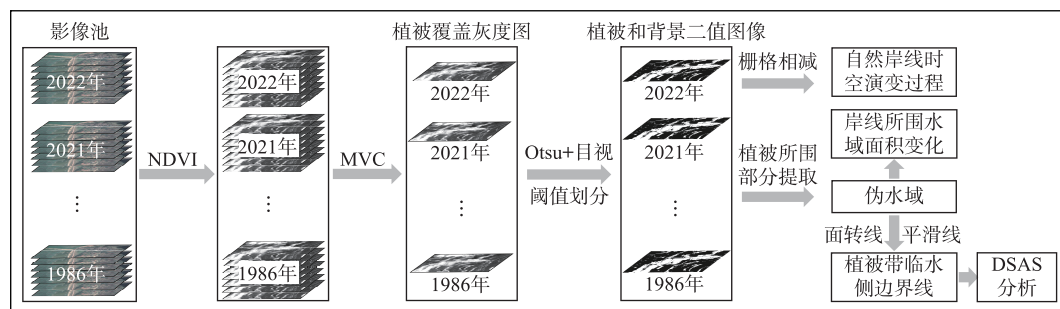


图 3 洞庭湖区自然岸线提取和分析

Fig.3 Extraction and analysis of natural shoreline in Lake Dongting area

2.1 河湖岸线定义及计算参数

河湖岸线是指河流两侧、湖泊周边一定范围内水陆相交的带状区域。岸线边界线是指沿河流走向或湖泊沿岸周边划定的、用于界定各类岸线功能区垂向带区范围的边界线,分为临水边界线和外缘边界线^[17]。临水边界线既可以采用多年平均水位下对应的水陆交界线,也可以采用平滩流量下对应的水陆交界线。除此之外,植被线也是常用的岸线指标之一^[11]。洞庭湖区河湖岸线植被覆盖度较高,可以通过提取不同时期植被带范围和植被带临水侧边界线进行自然岸线的演变分析,如图 4a 所示。

自然岸线扩张或萎缩面积的计算方法如图 4b 所示。等号左侧栅格影像中,数值 1 代表此处为植被覆盖区域,数值 0 代表此处为非植被覆盖区域。将反映植被覆盖不同年份的栅格影像相减,可以得到自然岸线扩张或萎缩的面积,即等号右侧栅格影像,其中数值为 1 的像元代表自然岸线扩张,数值为-1 的像元代表自然岸线萎缩。

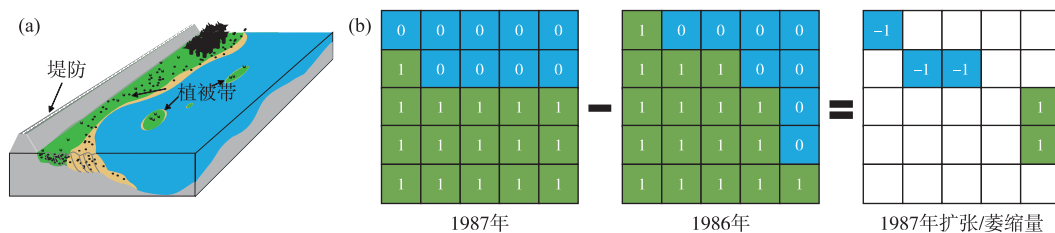


图 4 湖区自然岸线示意图(a)和自然岸线扩张或萎缩面积栅格计算(b)

Fig.4 Natural shoreline of lake area (a) and grid calculation of natural shoreline expansion and retreat area (b)

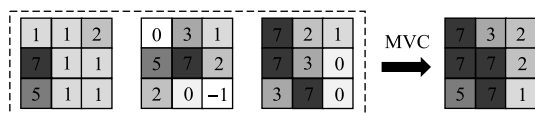


图 5 最大值合成法

Fig.5 Maximum value composite

2.2 自然岸线提取

NDVI^[18]是反映植被覆盖度最常用的遥感指数方法。MVC 是在多幅栅格影像的不同像元值中取最大值作为新的栅格影像的像元值(图 5)。通过对一年植被生长周期的所有遥感影像进行最大值合成,可以得到当年植被生长所能覆盖到的最大范围,从而使得到的自然临水边界线更准确。此外,

在 NDVI 灰度图中,植被表现为高值,云层表现为低值,因此在对影像进行最大值合成的过程中能够有效消

除云层的遮蔽影响,可以省去对单张影像的去云操作步骤,从而提高影像的利用率。

由波段合成得到的 NDVI 灰度图需要通过阈值将图像分为前景和背景的二值图像,为了使植被覆盖区域与非植被覆盖区域更好地分割开来,需要选取最优的阈值。本文通过大津法 (Otsu)^[19] 和目视解译相结合的阈值划分方法,进行植被覆盖区域和非植被覆盖区域的分割。

2.3 DSAS 分析工具

DSAS 是工作于 ArcGIS 的岸线分析专用工具。运用 DSAS 工具分析岸线的演变,需要设置基线、历年岸线、生成横断线的间隔、计算参数等。本文根据藕池河东支尾闾处 1986 年的自然岸线设置缓冲区,并沿着缓冲区陆地一侧的边界通过手动编辑生成基线,然后沿着垂直于基线的方向,以 20 m 的间隔生成横断线 (transect),横断线与 1986、1990、2000、2010 和 2020 年的岸线相交得到 5 个交点。计算每个横断线上的 5 个交点各自到基线的距离,进而统计 *NSM*、*EPR* 和 *LRR*。

NSM 是每个横断线上时间最近和最远岸线之间的距离 (单位:m),表示研究时间跨度内岸线移动的净距离。*EPR* 是 *NSM* 除以两岸线之间的时间间隔 *Time* (单位:a),表示研究时间跨度内平均每年岸线移动的速率,*EPR* 为正值时表示自然岸线向湖内扩张,为负值时表示向陆地萎缩。*LRR* 是通过对每个横断线上不同时间岸线的位置到基线的距离进行最小二乘法线性回归分析确定的,所得二元一次拟合直线的斜率,*LR2* 是线性回归的决定系数,*LR2* 越接近 1,拟合效果越好。

$$EPR = \frac{NSM}{Time} \quad (1)$$

$$\overline{EPR} = \frac{\sum_{i=1}^n EPR_i}{n} \quad (2)$$

式中, $\overline{EPR}$ 为目标岸线端点速率 *EPR* 的平均值,*i* 表示生成的第 *i* 个横断线,*n* 为生成横断线的数量,*EPR_i* 为第 *i* 个横断线上的端点速率。

2.4 误差分析

本研究采用多源遥感影像提取植被带和植被带临水侧边界线的误差主要来源于 3 部分:(1) 通过大津法和目视解译相结合的阈值划分方法,确定植被带范围时带来的误差。由于遥感影像成像时期天气和光照的不同,植被亮度不同,尤其是在同一副影像中植被亮度差距较大时,通过自动阈值进行植被带的提取效果往往不够理想,误差较大。但是,可以通过对每一幅遥感影像的阈值效果进行目视监督,然后调整阈值的大小使得每副影像的划分效果达到最佳,将误差控制在可接受的范围。(2) 遥感影像的分辨率引起的误差。采用的 Landsat 系列和 Sentinel-2 遥感影像,空间分辨率分别为 30 和 10 m,由分辨率引起的误差取决于独立成片植被带面积的大小,独立成片植被带面积越大,则由分辨率造成的误差越小。本研究中扩张或萎缩的面积由较大独立成片植被带所主导,分辨率带来的误差较小。藕池河东支尾闾入东洞庭湖处,在研究期间岸线平均移动距离为 1530 m,由 30 m 分辨率带来的误差为 1.96%,误差可接受。(3) 岸线修正带来的误差。由于裸地、建筑等造成的岸线不连续,需要通过目视解译手动修正,修正的过程在 1~2 个像素内进行,其引起的误差在 4% 以内。

3 结果与讨论

基于 NDVI、MVC 以及 Otsu 和目视解译相结合的阈值划分方法,得到洞庭湖区东洞庭湖、南洞庭湖、目平湖 1986—2022 年每年的植被带范围和植被线。通过栅格计算,得到自然岸线每年 (相比于上年) 扩张和萎缩的面积数据,选取 1986、1990、2000、2010 和 2020 年的植被带进行空间变化制图以分析自然岸线的时空演变。通过 DSAS 工具,根据 1986、1990、2000、2010 和 2020 年植被带临水侧的边界线,计算藕池河东支尾闾处的 *NSM*、*EPR*、*LRR* 和 *LR2*。

3.1 湖泊岸线扩张和萎缩面积的时空演变过程

3.1.1 东洞庭湖 如图 6~7 所示,东洞庭湖自然岸线 1986—2020 年扩张 171.78 km²,萎缩 28.91 km²,净扩张 142.87 km²,整体以扩张为主。1986—1990 年、2000—2010 年和 2010—2020 年期间东洞庭湖自然岸线分别净

扩张 64.08、73.58 和 31.19 km²。在 1990—2000 年期间,东洞庭湖自然岸线在 1998 年以前保持大幅度扩张的趋势,受 1998 年大洪水事件影响,1999 年的萎缩面积为 98.38 km²,而仅扩张 1.92 km²,净萎缩 96.45 km²,使得 1990—2000 年自然岸线净萎缩 25.74 km²。另外,东洞庭湖自然岸线在 2010—2020 年净扩张 31.19 km²,但其萎缩面积也达到 45.40 km²,也是主要的萎缩时期,其萎缩范围主要分布在南洞庭湖水流入汇处。

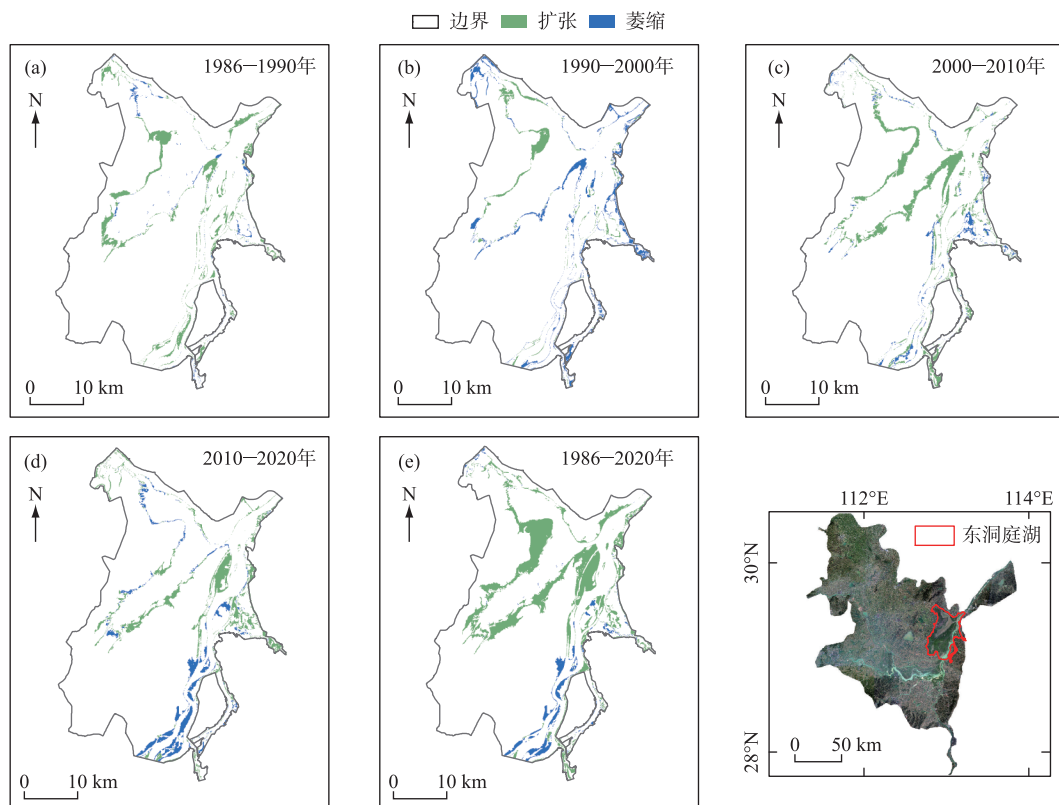


图 6 东洞庭湖扩张和萎缩变化

Fig.6 Temporal change of expansion and retreat in the east Lake Dongting

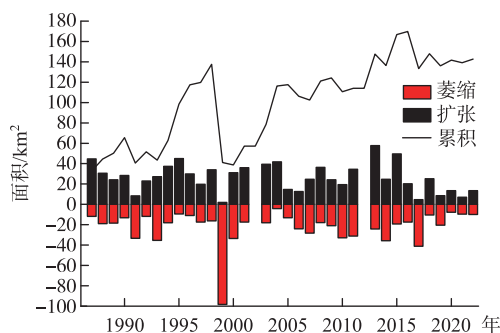


图 7 东洞庭湖自然岸线每年扩张和萎缩面积及累积面积

Fig.7 Annual area and accumulation area of expansion and retreat on the natural shoreline of the east Lake Dongting

3.1.2 南洞庭湖 如图 8~9 所示,南洞庭湖自然岸线 1986—2020 年扩张 220.73 km²,萎缩 12.28 km²,净扩张 208.44 km²,整体以扩张为主。南洞庭湖自然岸线的扩张主要发生在 2000—2010 年,净扩张 111.93 km²。1990—2000 年期间南洞庭湖自然岸线冲淤相差不大,扩张略多于萎缩,净扩张只有 5.73 km²,其原因与 1998 年大洪水事件有关。1998 年大洪水导致南洞庭湖自然岸线连续两年大面积萎缩(图 9),受其影响,1999 年和 2000 年南洞庭湖自然岸线分别萎缩 63.09 和 66.93 km²,而扩张面积只有 18.10 和 1.84 km²。除此之外,其余时间段南洞庭湖自然岸线都是以扩张为主,在 1986—1990 年和 2010—2020 年期间分别净扩张 31.79 和 58.95 km²。

3.1.3 目平湖 如图 10~11 所示,目平湖自然岸线

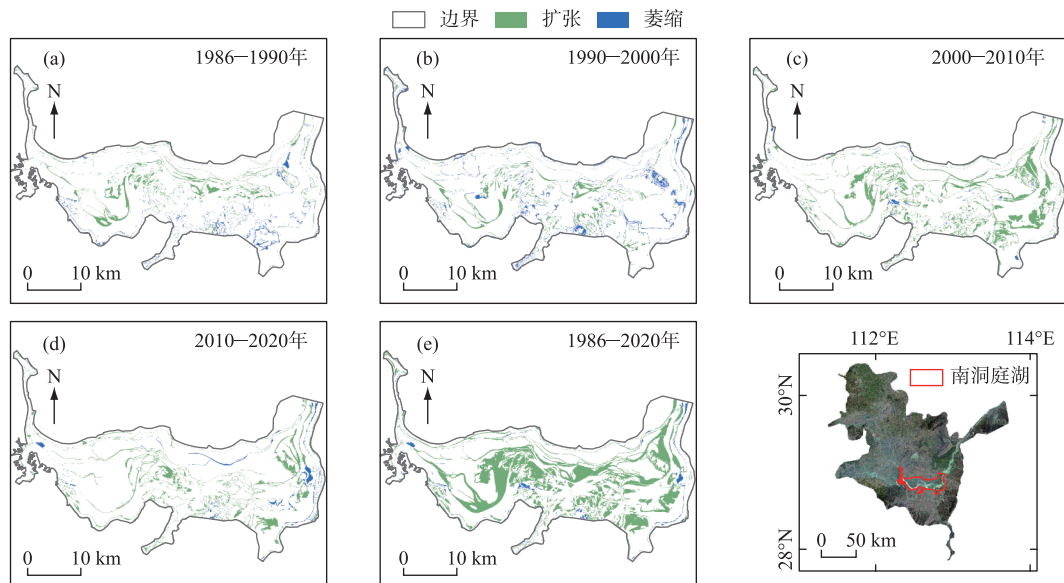


图8 南洞庭湖扩张和萎缩变化

Fig.8 Temporal change of expansion and retreat in the south Lake Dongting

1986—2020 年扩张 89.77 km^2 , 萎缩 4.67 km^2 , 净扩张 85.10 km^2 , 整体以扩张为主。目平湖自然岸线的扩张主要发生在 2000—2010 年时期, 扩张 48.38 km^2 , 萎缩 1.77 km^2 , 净扩张 46.61 km^2 , 尤其 2004 年, 是此时期主要的扩张年份, 净扩张面积达到 66.85 km^2 。1986—1990 年目平湖自然岸线扩张 18.88 km^2 , 萎缩 16.90 km^2 , 净扩张 1.98 km^2 , 基本达到冲淤平衡。除此之外, 其余时间段目平湖自然岸线也都是以扩张为主, 在 1990—2000 年和 2010—2020 年期间分别净扩张 25.54 和 11.19 km^2 。

3.1.4 扩张或萎缩占比的时空分布变化 根据扩张和萎缩在相应湖泊的主要部位, 结合河流入汇位置, 将东洞庭湖分为藕池河东支尾间 (D1)、瓢尾洲 (D2)、汨罗江尾间亦南洞庭湖来水处 (D3) 和新墙河尾间 (D4) 4 个部分, 将南洞庭湖分为南洞庭湖出水处 (N1)、湘江尾间 (N2)、资水尾间 (N3)、北胜洲等洲滩 (N4) 和南咀来水河道 (N5) 5 部分, 将目平湖分为沅江尾间 (M1)、目平湖中部洲滩 (M2) 和澧水洪道及松虎洪道尾间 (M3) 3 部分, 并统计分析不同时期不同部分的扩张和萎缩面积及占比, 结果见表 2 和图 12。

1986—2020 年, 除东洞庭湖 D3 位置之外, 洞庭湖其余各个位置的自然岸线普遍扩张多于萎缩, 扩张面积占比都在 80% 以上, 尤其是 D1、D2 和 M2 位置, 扩张的自然岸线占比超过 99%, 扩张面积分别为 54.21 、 63.87 和 38.47 km^2 。而在东洞庭湖的 D3 位置, 萎缩的自然岸线占比为 73.60%, 萎缩面积为 22.22 km^2 , 萎缩却明显多于扩张。

从不同的时期来看, 不同位置扩张和萎缩占比不尽相同。比如, D1 位置在不同时期均以扩张为主, 但在 2010—2020 期间, 萎缩的自然岸线占比达到 41.92%, 比前期占比明显增加。D2 位置在 1990—2000 年时

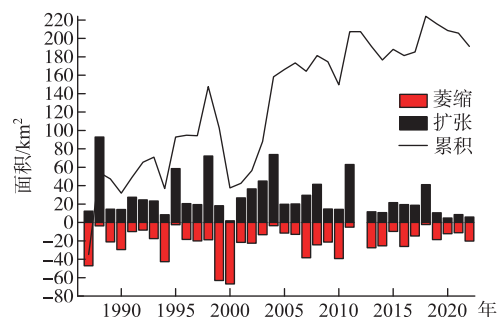


图9 南洞庭湖自然岸线每年扩张和萎缩面积及累积面积

Fig.9 Annual area and accumulation area of expansion and retreat on the natural shoreline of the south Lake Dongting

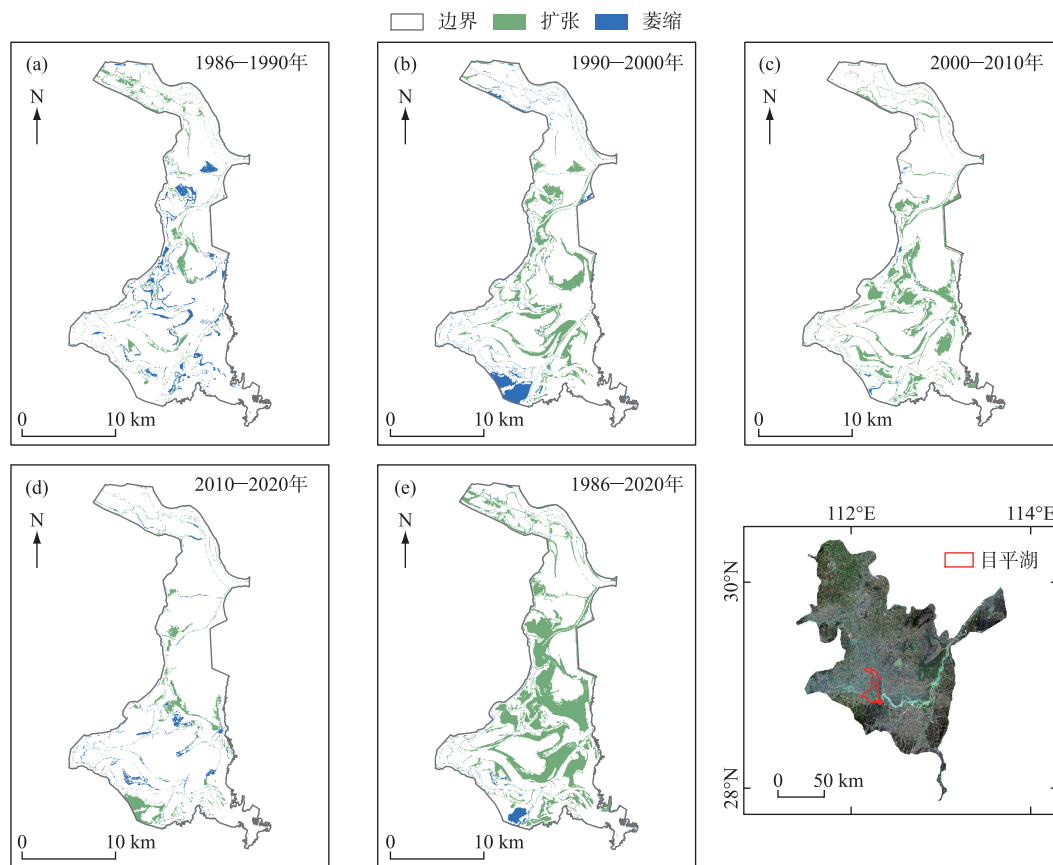


图 10 目平湖扩张和萎缩变化

Fig.10 Temporal change of expansion and retreat in Lake Muping

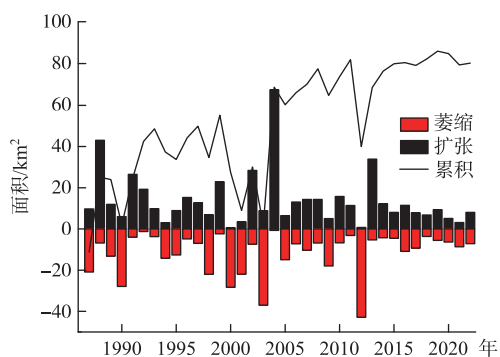


图 11 目平湖自然岸线每年扩张和萎缩面积及累积面积

Fig.11 Annual area and accumulation area of expansion and retreat on the natural shoreline of Lake Muping

期萎缩的自然岸线占比达到 87.47%, 萎缩面积为 13.20 km², 萎缩明显多于扩张, 而其他时期均以扩张为主。D3 位置在 1986—1990 年期间, 萎缩的自然岸线占比仅有 5.44%, 而后的 3 个时期, 萎缩的自然岸线占比分别为 76.07%、40.07% 和 82.91%。可以看出, D3 位置在 1990 年之后大部分自然岸线都呈现萎缩的趋势, 尤其在 2010—2020 年期间, 由于非法采砂造成了自然岸线的大面积萎缩。1990—2000 年期间, 受 1998 年大洪水影响, 洞庭湖各个位置萎缩的自然岸线占比都明显增大, 而 D1、N3、N4、M1 和 M2 位置依然是扩张的自然岸线多于萎缩的自然岸线。

3.2 岸线所围水域面积变化

由于湖泊自然岸线的不断扩张, 东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖岸线所围水域面积整体呈现减少的趋势, 洞庭湖调蓄能力不断下降(图 13)。岸线所围水域面积的变化大致可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段为 1986—1998 年, 岸线所围水域面积缩减的速度最大; 第 2 阶段

为 1998—2003 年,受 1998 年大洪水事件影响,自然岸线大范围萎缩,岸线所围水域面积明显增大,并持续数年,其原因可能与泥沙落淤淹没植被有关;第 3 阶段为 2003 年之后,岸线所围水域面积继续缩减,但缩减的速度放缓。

表 2 洞庭湖各部分不同时期的扩张和萎缩面积(km²)

Tab.2 Area of expansion and retreat in different periods and parts of Lake Dongting

位置	1986—2020 年		1986—1990 年		1990—2000 年		2000—2010 年		2010—2020 年	
	扩张	萎缩	扩张	萎缩	扩张	萎缩	扩张	萎缩	扩张	萎缩
D1	54.21	0.09	19.69	1.16	14.38	2.26	21.33	0.52	6.60	4.76
D2	63.87	0.53	15.35	1.52	1.89	13.20	36.56	2.44	29.48	3.01
D3	7.97	22.22	10.42	0.60	1.87	5.95	7.58	5.07	5.84	28.35
D4	13.18	3.01	7.18	1.22	2.18	7.01	5.90	5.03	12.00	3.80
N1	27.46	2.18	4.79	3.84	2.55	8.30	20.16	0.90	14.04	3.21
N2	50.61	3.04	6.66	6.72	6.76	7.77	37.00	1.22	18.37	5.51
N3	45.88	2.18	11.10	4.41	13.36	7.50	19.06	1.15	14.93	1.70
N4	87.71	3.51	23.07	3.24	19.27	7.59	32.24	2.09	18.16	1.62
N5	3.38	0.48	1.11	0.30	1.15	2.44	2.21	0.68	2.04	0.18
M1	37.60	3.00	5.04	8.17	18.90	7.77	24.37	0.67	8.17	5.27
M2	38.47	0.27	6.53	7.32	18.42	1.31	15.62	0.55	7.69	0.88
M3	9.54	0.42	6.21	0.46	1.72	2.53	4.34	0.21	1.58	1.30

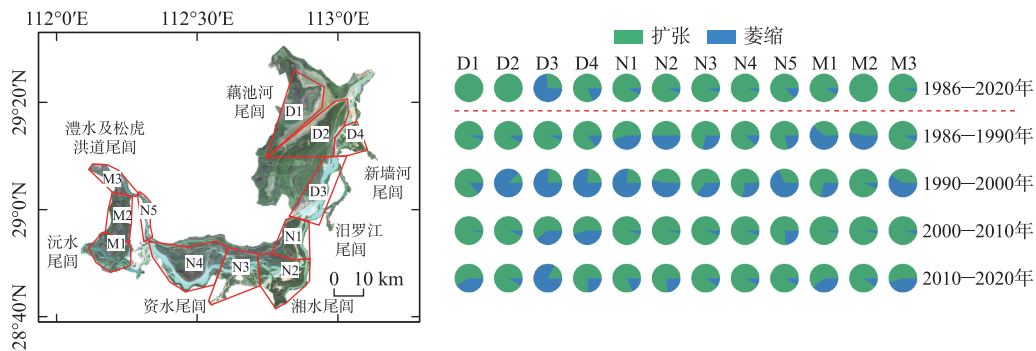


图 12 洞庭湖自然岸线扩张和萎缩占比的时空分析

Fig.12 Spatiotemporal analysis of expansion and retreat proportion of natural shoreline in Lake Dongting

1986—2022 年,东洞庭湖岸线所围水域面积由 520.49 km²缩减到 375.65 km²,缩减 144.84 km²,缩减率为 27.83%;南洞庭湖由 488.33 km²缩减到 296.90 km²,缩减 191.42 km²,缩减率为 39.20%;目平湖由 166.76 km²缩减到 86.28 km²,缩减 80.48 km²,缩减率为 48.26%。南洞庭湖岸线所围面积缩减量最高,为 191.42 km²;目平湖缩减面积最低,为 86.28 km²。但目平湖岸线所围面积缩减率最高,为 48.26%。

3.3 岸线 DSAS 分析结果(以藕池河东支尾闾为例)

藕池河东支尾闾汇入东洞庭湖,岸线淤积严重。根据 1986、1990、2000、2010 和 2020 年的自然岸线进行 DSAS 分析(图 14)。藕池河东支尾闾自然岸线不

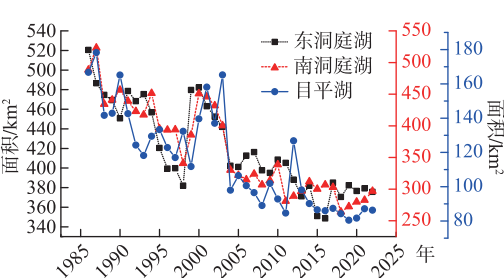


图 13 洞庭湖自然岸线所围水域面积变化
Fig.13 Change of water area surrounded by natural shoreline of Lake Dongting

断向湖内扩张,但在 2010—2020 年,岸线略有萎缩。通过计算,藕池河东支尾间自然岸线 *EPR* 平均值为 45.00 m/a,即自然岸线平均每年向湖内扩张 45 m。*NSM* 最大距离达到 3281 m,最小距离为 386.93 m。线性回归率平均值为 47.92,决定系数 *LR2* 平均值为 0.68,部分岸线的 *LR2* 在 0.80 之上,甚至达到 0.95 以上(图 14, 800<transect<1300),线性回归分析拟合效果较好,拟合结果可用于预测岸线未来的发展趋势。同时,在位置 800~1300 之间,岸线的 *EPR* 和 *LRR* 值也相对较高,岸线扩张的速率最快。

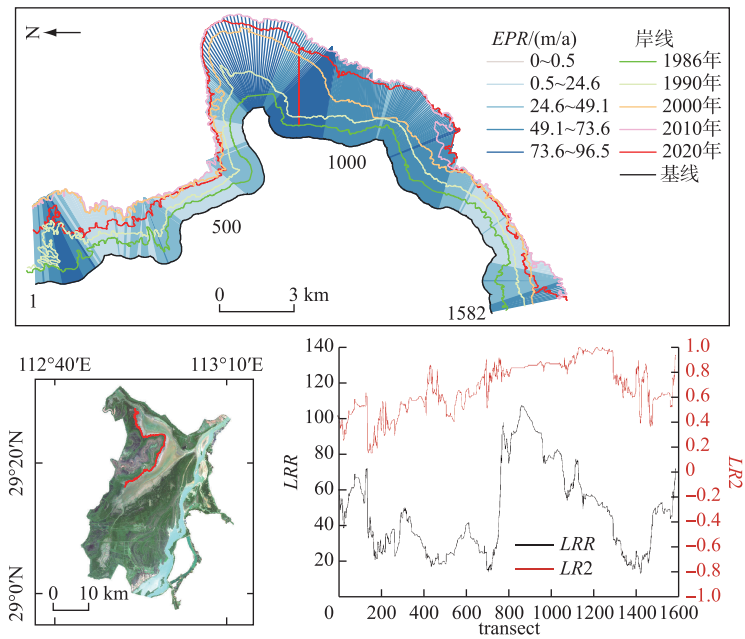


图 14 藕池河东支尾间 DSAS 分析结果

Fig.14 Calculation results of DSAS in the tail zone of the east branch of Ouchi River

3.4 主控因子

3.4.1 水位影响 将洞庭湖植被所围水域面积 1986—2020 年的时序数据,分别与 1986—2020 年各月平均水位和年均水位数据进行相关性分析。东洞庭湖指示水位采用七里山水文站水位,南洞庭湖和目平湖指示水位采用小河咀水文站水位。如图 15 所示,东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖植被所围水域面积与相应水文站 10 月的月均水位的相关系数 *r* 分别为 0.55、0.51 和 0.4,且显著性水平 *P* 值分别小于 0.01、0.01 和 0.05。因此,洞庭湖区自然湖岸线的扩张与 10 月的水位下降具有中等程度相关性。

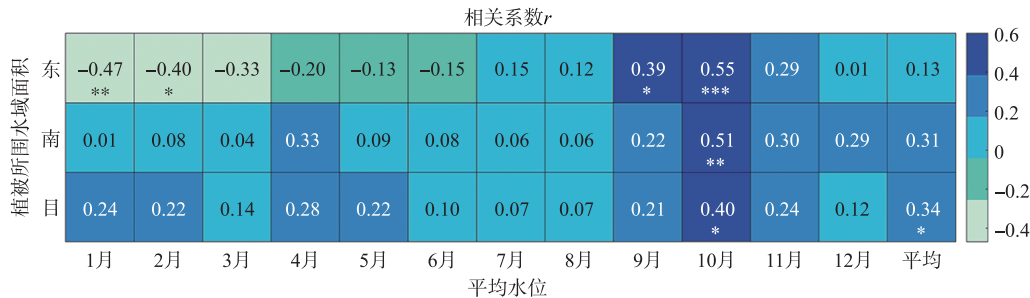


图 15 自然岸线演变与水位的相关性分析(东、南和目分别代表东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖;

*、**和*** 分别代表显著性 *P* 值小于 0.05、0.01 和 0.001)

Fig.15 Correlation analysis between natural shoreline evolution and water level

3.4.2 泥沙冲淤不平衡 洞庭湖入湖泥沙来自松滋河、虎渡河、藕池河和湘江、资水、沅江、澧水,出湖泥沙从城陵矶汇入长江干流。近年来,由于长江上游和“四水”梯级水库的运行,洞庭湖“三口”“四水”入湖和城陵矶出湖泥沙都呈现减少或明显减少的趋势^[7,20-22],湖盆泥沙淤积量呈显著下降趋势^[23]。1956—1980年,“三口”“四水”和城陵矶年均输沙量分别为15564万、3218万和5111万 t/a,年均淤积量为13671万 t/a,湖盆淤积严重。1981—2002年,“三口”“四水”和城陵矶输沙量不断减少,年均输沙量分别为8861万、1941万和2634万 t/a,相比于1956—1980年下降43%、40%和48%,年均淤积量为8168万 t/a,相比于1956—1980年下降40%,湖盆仍然呈现淤积的趋势,但淤积趋势减弱。在此淤积量下,洞庭湖岸线所围水域面积年均缩小约19.17 km²。根据《中国河流泥沙公报》2003—2022年数据,2003年三峡工程运行之后,“三口”“四水”和城陵矶输沙量分别由2003年的2050万、1776万和1750万 t,减少到2022年的63万、484万和1300万 t,分别减少97%、73%和26%。2003—2022年,“三口”“四水”和城陵矶年均输沙量分别为811万、790万和1721万 t/a,与1981—2002年相比下降91%、59%和35%,“三口”入湖泥沙量减少趋势最为明显,湖盆年均淤积量为-120万 t/a,由淤积向冲刷转变。在此淤积量下,洞庭湖岸线所围水域面积年均缩小约3.98 km²,与1981—2002年淤积量下的岸线所围水域年均缩小面积相比大幅减小。

洞庭湖岸线演变与泥沙变化密切相关。1986—2022年,洞庭湖岸线所围水域面积变化趋势与“三口”“四水”和城陵矶输沙量变化趋势一致,不断减少,且减少速度以2003年三峡工程的运行为临界点,由快变慢。三峡工程运行之后,洞庭湖输沙逐渐向冲淤平衡甚至冲刷转变^[21,23],根据本研究结果,自然岸线扩张趋势和岸线所围水域面积减少趋势也都逐渐趋于平衡。在湖区局部位置,如藕池河东支尾间,出现明显的岸线萎缩迹象(图14)。

3.4.3 采砂活动 区域经济社会的快速发展,使得基础设施建设对砂石的需求量大幅度增加。洞庭湖水域面积辽阔,砂石资源丰富,是沿岸周边基建砂石开采的主要源区。开采面的水涯线呈明显的锯齿状是人类采砂活动遥感解译特征之一^[24]。根据1986、1990、2000、2010和2020年洞庭湖植被带临水侧边界线的提取结果,与2010年相比,2020年的自然洲滩岸线由于人类采砂活动出现一定范围的萎缩(图16)。有关研究表

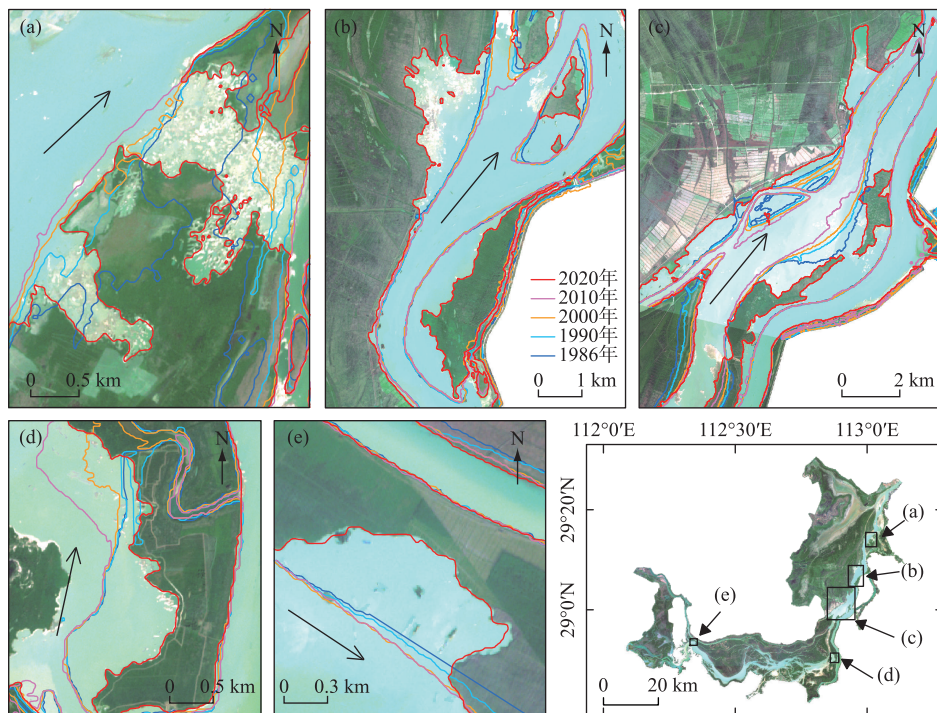


图16 洞庭湖区主要的采砂区域

Fig.16 Main area of sand mining in Lake Dongting

明, 2011 年以来因湖砂开采引起的洞庭湖洲滩年均降幅为 $12.67 \text{ mm/a}^{[25]}$, 2006—2016 年东洞庭湖飘尾洲非法采砂导致洲滩缩减面积为 $2221.99 \text{ hm}^2^{[24]}$ 。2015 洞庭湖年采砂量约 2000 万 t, 可作为近 4 年的年均采砂量^[26]。可见, 洞庭湖的非法采砂和过度采砂活动造成了过去数十年来自然洲滩岸线一定范围的萎缩。但是, 相比于水沙过程, 采砂活动对洞庭湖区自然岸线萎缩的影响范围有限, 且多发生于在湖内洲滩位置。随着近年来相关采砂规划和管理政策的严格实施, 以及执法监督和打击非法采砂力度的加强, 目前洞庭湖采砂量已经被控制在合理的范围内。根据《湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2023—2027 年)》, 在 2023—2027 年规划期, 东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖采砂控制总量分别为 29560 万、10770 万和 8160 万 t。

4 结论

1) 1986—2022 年东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖自然岸线呈现不断向湖内扩张的趋势, 但扩张速度变缓并逐渐趋于稳定, 其净扩张面积反映在自然岸线所围水域面积缩减上, 分别为 144.84、191.42 和 80.48 km^2 , 其中目平湖岸线所围水域面积缩减率最高, 为 48.26%。从局部来看, 在南洞庭湖和东洞庭湖的连接水域, 岸线以萎缩为主, 萎缩占比为 73.60%, 其原因与 2006—2016 年的非法采砂有关。除此之外, 其余各部分岸线都以扩张为主, 扩张占比都在 80% 以上, 尤其在藕池河东支尾间、飘尾洲北部和目平湖中部, 岸线扩张占比超过 99%, 扩张面积远远大于萎缩面积, 其中藕池河东支尾间岸线平均每年向湖内迁移 45 m。

2) 从不同时期来看, 1998 年之前洞庭湖自然岸线主要呈大幅度扩张趋势; 1998—2002 年, 由于大洪水的影响, 洞庭湖自然岸线大面积萎缩并保持数年, 其原因可能与泥沙落淤淹没植被有关; 2003 年三峡水库运行之后, 自然岸线继续呈现扩张趋势, 但扩张幅度变小并逐渐趋于稳定。洞庭湖自然岸线的扩张与 10 月水位的下降呈中等程度相关性, 并且与泥沙变化密切相关, 采砂活动造成了湖内洲滩部分岸线的萎缩。随着洞庭湖湖盆泥沙由淤积向冲刷转变, 洞庭湖岸线已出现局部萎缩的趋势。

本研究在植被带提取过程中还存在一定的误差, 需要继续改善提取方法。岸线演变与洞庭湖来水来沙和人类活动的相关性研究还不够全面和深刻, 仍需进一步剖析。

5 参考文献

- [1] Jin TT, Duan XJ, Zou H. Change and influencing factors of shoreline resources utilization in the Nanjing section of the Yangtze River. *East China Geology*, 2021, **42**(1): 9-20. DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.01.002. [靳婷婷, 段学军, 邹辉. 岸线资源利用变化与影响因素——以长江南京段为例. 华东地质, 2021, **42**(1): 9-20.]
- [2] Tan GM, Yao SM, Li LG. Key technical problems and expected achievements in efficient use and protection of the resources of river and lake shoreline and inland river marshland. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, **51**(3): 1-8. DOI: 10.15961/j.jsuese.201900265. [谈广鸣, 姚仕明, 黎礼刚. 河湖岸线和内河洲滩资源高效利用与保护中的关键科学技术问题与预期成果展望. 工程科学与技术, 2019, **51**(3): 1-8.]
- [3] Li JB, Chang J, Lv DQ et al. The hydrological effect between Jingjiang River and Dongting Lake during initial period of Three Gorges Project operation. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(11): 1342-1352. DOI: 10.3321/j.issn: 0375-5444.2009.11.006. [李景保, 常疆, 吕殿青等. 三峡水库调度运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应. 地理学报, 2009, **64**(11): 1342-1352.]
- [4] Hu GW, Mao DH, Li ZZ et al. Research overview on the influence of the Three Gorges Project construction on Dongting Lake. *Journal of Natural Disasters*, 2013, **22**(5): 44-52. DOI: 10.13577/j.jnd.2013.0507. [胡光伟, 毛德华, 李正最等. 三峡工程建设对洞庭湖的影响研究综述. 自然灾害学报, 2013, **22**(5): 44-52.]
- [5] Yu DQ, Yu SC, He QH et al. Monitoring of Dongting Lake atrophy in the past 100 years by combining historical map and remote sensing technology. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, **28**(3): 116-122. DOI: 10.6046/gtzyyg.2016.03.19. [余德清, 余姝辰, 贺秋华等. 联合历史地图与遥感技术的洞庭湖百年萎缩监测. 国土资源遥感, 2016, **28**(3): 116-122.]
- [6] Zhou H, Mao DH, Liu PL. The investigation on water lever of East Dongting Lake affected by Three-Gorge Reservoir. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014, (4): 180-186. [周慧, 毛德华, 刘培亮. 三峡运行对东洞庭湖水位影响分析. 海洋湖沼通报, 2014, (4): 180-186.]
- [7] Zhang YC, Zhang YG, Song QL et al. The history and future of the relationship between the Yangtze River and connected lakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(10): 1183-1192. [张云昌, 张业刚, 宋秋龄等. 江湖关系的历史和未来. 水利学报, 2021, **52**(10): 1183-1192.]
- [8] Zhang YH, Wang DC, Wu XH et al. Driving factors of wetland evolution in Lake Dongting during 1900–2020. *J Lake Sci*, 2023, **35**(5): 1786-1795. DOI: 10.18307/2023.0541. [张英豪, 王殿常, 吴兴华等. 近百余年(1900—2020 年)洞庭湖湿地演化驱动因素分析. 湖

- 泊科学, 2023, **35**(5): 1786-1795.]
- [9] Yao SM, Hu CW, Qu G *et al.* Research advances in morphological evolution of lakes connecting the Yangtze River and its influences. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(9): 15-23. DOI: 10.11988/ckyyb.20220304. [姚仕明, 胡呈维, 渠庚等. 长江通江湖泊演变及其影响效应研究进展. 长江科学院院报, 2022, **39**(9): 15-23.]
- [10] Fan QD, Liang LK, Liang F *et al.* Research progress on coastline change in China. *Journal of Coastal Research*, 2020, **99**(sp1): 289. DOI: 10.2112/si99-041.1.
- [11] Li X, Zhou YX, Kuang RY. Analysis and trend prediction of shoreline evolution in Chongming Dongtan, Shanghai. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, **40**(2): 417-424. [李行, 周云轩, 况润元. 上海崇明东滩岸线演变分析及趋势预测. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, **40**(2): 417-424.]
- [12] Chen C, Liang JT, Xie F *et al.* Temporal and spatial variation of coastline using remote sensing images for Zhoushan archipelago, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, **107**: 102711. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102711.
- [13] Zhu QT, Li P, Li ZH *et al.* Spatiotemporal changes of coastline over the Yellow River Delta in the previous 40 years with optical and SAR remote sensing. *Remote Sensing*, 2021, **13**(10): 1940. DOI: 10.3390/rs13101940.
- [14] Ferreira TAB, Aquino da Silva AG, Reyes Perez YA *et al.* Evaluation of decadal shoreline changes along the Parnaíba Delta (NE Brazil) using satellite images and statistical methods. *Ocean & Coastal Management*, 2021, **202**: 105513. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105513.
- [15] Qiao G, Mi H, Wang WA *et al.* 55-year (1960–2015) spatiotemporal shoreline change analysis using historical DISP and Landsat time series data in Shanghai. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **68**: 238-251. DOI: 10.1016/j.jag.2018.02.009.
- [16] Zhu YD, Li ZJ, Zhao Z *et al.* Spatio-temporal changes of coastline in Jiaozhou Bay from 1987 to 2022 based on optical and SAR data. *Frontiers in Marine Science*, 2023, **10**: 1233410. DOI: 10.3389/fmars.2023.1233410.
- [17] 水利部水利水电规划设计总院. 河湖岸线保护与利用规划编制指南(试行). 北京: 水利部水利水电规划设计总院, 2019.
- [18] Tian QJ, Min XJ. Research progress of vegetation index. *Advances in Earth Science*, 1998, **13**(4): 327-333. [田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 327-333.]
- [19] He ZY, Sun LN, Chen LG. Fast computation of threshold based on otsu criterion. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(2): 267-272. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.010. [何志勇, 孙立宁, 陈立国. Otsu 准则下分割阈值的快速计算. 电子学报, 2013, **41**(2): 267-272.]
- [20] Li JB, Wang KL, Qin JX *et al.* The evolution of annual runoff and sediment in the Dongting Lake and their driving forces. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60**(3): 503-510. DOI: 10.3321/j.issn: 0375-5444.2005.03.017. [李景保, 王克林, 秦建新等. 洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因. 地理学报, 2005, **60**(3): 503-510.]
- [21] Li ZZ, Xie YB, Xu DM. Runoff-sediment variation and its effect on the Dongting Lake. *Journal of China Hydrology*, 2011, **31**(1): 45-53, 40. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.01.010. [李正最, 谢悦波, 徐冬梅. 洞庭湖水沙变化分析及影响初探. 水文, 2011, **31**(1): 45-53, 40.]
- [22] Liu XQ, Yi FH, Luan ZY *et al.* Processes of East Dongting Lake in recent period. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(4): 25-32. [刘晓群, 易放辉, 栾震宇等. 东洞庭湖近期冲淤演变分析. 泥沙研究, 2019, **44**(4): 25-32.]
- [23] Zhang L, Ma JX, Zhang Q *et al.* Characteristics of runoff-sediment variation of Dongting Lake in recent six decades and its relationship with human activities. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(9): 14-20. DOI: 10.11988/ckyyb.20200708. [张琳, 马敬旭, 张倩等. 近 60 多年洞庭湖水沙演变特征及其与人类活动的关系. 长江科学院院报, 2021, **38**(9): 14-20.]
- [24] Tang H, Zou J, Yin XH *et al.* River and lake sand mining in the Dongting Lake area: Supervision based on high-resolution remote sensing images and typical case analysis. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, **35**(3): 302-309. DOI: 10.6046/zrzyyg.2023075. [唐晖, 邹娟, 尹向红等. 基于高分遥感的洞庭湖区河湖采砂监管及典型案例. 自然资源遥感, 2023, **35**(3): 302-309.]
- [25] Yu SC, Yu DQ, Wang LC *et al.* Remote sensing study of Dongting Lake beach changes before and after operation of Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 2019, **44**(12): 4275-4283. [余姝辰, 余德清, 王伦澈等. 三峡水库运行前后洞庭湖洲滩面积变化遥感认识. 地球科学, 2019, **44**(12): 4275-4283.]
- [26] Li ZW, Fu W, Hu XY *et al.* Calculation and analysis of sand excavation quantity in Jingjiang River reach and Dongting Lake's river network. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2019, **36**(2): 8-12, 38. DOI: 10.11988/ckyyb.20170861. [李志威, 符蔚, 胡旭跃等. 荆江河段与洞庭湖水系的采砂量计算分析. 长江科学院院报, 2019, **36**(2): 8-12, 38.]