

基于遥感的腰沙海域潮滩演变趋势研究^{*}

吴佳乐¹,徐敏^{1,2*},刘佰琼¹

(1. 南京师范大学地理科学学院,江苏南京 210023;

2. 江苏省海洋综合开发与生态建设工程中心,江苏南京 210023)

摘要:腰沙位于江苏省南通市东南侧海域,是江苏岸外辐射状沙脊南翼最大的沙洲,其滩槽地貌形态较为复杂,但潮滩和深槽均相对比较稳定,深水岸线富有。通过对 1987,1995,2000,2008,2015 年五个时期的卫星遥感数据和辐射沙洲地区调查资料分析,利用适合腰沙沙洲岸线演变的遥感波段组合,获得了腰沙地区 20 多 a 来岸滩典型地理特征演变的信息,结果表明:1987—2015 年,腰沙潮滩内缘区围垦发展迅速,人工岸线愈加复杂。腰沙“水道—沙洲系统”组合形态总体态势呈现外缘区东侧及南侧淤涨,北侧侵蚀。小庙洪水道总体有向南偏移的趋势。潮滩南北方向在形态及演变动态上存在空间分异。

关键词:腰沙;潮滩演变;遥感;趋势

中图分类号: P736.22 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.04.003

腰沙是江苏辐射沙洲南翼最大的淤长型沙洲,近年来对滩涂的开发活动不断增加。腰沙海域潮滩地形的监测与演变趋势研究对于腰沙地区的开发利用、重大海岸工程建设、港口维护及海洋环境保护等都有十分重要的意义。

遥感具有信息获取速度快、成本低、精度高、多时相等突出优势,能够有效地进行海岸带资源环境的监测。刘燕春等^[1-4]利用 TM 影像对射阳河口海岸线及潮滩岸线的演变状况进行了调查与监测,探讨了岸线的演变特点及原因;韩志远等^[5]采用遥感和 GIS 相结合的方法,对福建文渡湾海域淤泥质潮滩的冲淤演变特征进行监测,结果表明淤积的原因与湾口缩窄、泥沙运移有关;王小丹等^[6]采用多时相的遥感影像及潮位资料,分析研究了曹妃甸地区潮间带的空间分布特征及潮滩动态演变趋势,结果表明人类活动破坏了潮滩的平衡状态,导致潮间带形态发生了很大变化。目前,对腰沙地区的遥感监测研究较少。

本文选取 1987,1995,2000,2008,2015 年五个时期不同潮位时相的遥感数据,进行典

^{*} 收稿日期:2016-07-31

资助项目:国家自然科学基金项目——江苏海岸带现代沉积速率及重金属来源示踪研究(41373112);江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116);江苏省自然科学基金项目——基于空间相互作用的我国海洋经济格局演变研究(BK20161018)

作者简介:吴佳乐(1992-),女,硕士研究生,主要从事江苏海岸带资源开发利用方面研究. E-mail:wujiale6koala@sina.com

^{*} **通讯作者:**徐敏(1971-),女,教授,博士,主要从事海洋资源与环境,海域管理方面研究. E-mail:xumin0895@njnu.edu.cn

型潮滩特征线的提取,分析腰沙潮滩演变趋势及其原因。

1 研究区域概况

腰沙附近海域主要由腰沙、冷家沙两大沙洲及冷家沙前缘深水区、三沙洪水道和小庙洪水道三道水道相间分组组成^[7]。其西侧内缘潮汐水道中潮流以往复流为主,水道深槽中最大流速普遍大于开敞水域,潮流流速较大,大、小潮潮流强度差异明显,开敞水域旋转流特征明显。

腰沙位于长江口北岸,是江苏省南通市通州湾港区的重要组成部分,南北最大距离114.2 km,东西最宽处为158.8 km。腰沙呈半岛状向海突出,是江苏岸外辐射状沙脊南翼面积最大的沙洲且早已并岸。腰沙北部相对平缓,有一系列潮沟深入腰沙主体,等高线曲折;而南部地貌相对单一、坡度较大且等高线顺直。

三沙洪位于腰沙与冷家沙之间,是网仓洪的西延水道,走向为NW-SE,与辐射沙洲南翼潮流主轴方向一致,水道形态狭长且水道两侧有大型沙体的掩护。小庙洪水道走向为NW-SE,与海岸线基本一致,是辐射沙洲南端最大的近岸大型潮汐通道。

小庙洪水道尾部不与相邻的潮汐水道连通,其北侧的大面积沙洲(腰沙)将水道与北部的三沙洪隔开,这是小庙洪水道与辐射沙洲区其他大型潮汐水道的不同之处。目前腰沙沙脊已大部分高于理论基面2.0 m,涨落潮过程中越过腰沙滩脊自由交换的潮量很少,使小庙洪水道成为一个相对独立的水沙系统^[8-9]。

根据腰沙海域遥感影像和水下地形图(图1和图2),腰沙沙洲整体呈锥形,0 m等深线自岸向海伸出约35 km,根部与大陆岸线相连部分约10 km宽,总面积约280 km²。由图可知,腰沙北部则有一系列潮沟深入腰沙主体,地形等高线曲折;而南部地貌相对单一、坡度较大且等高线顺直^[10-11]。

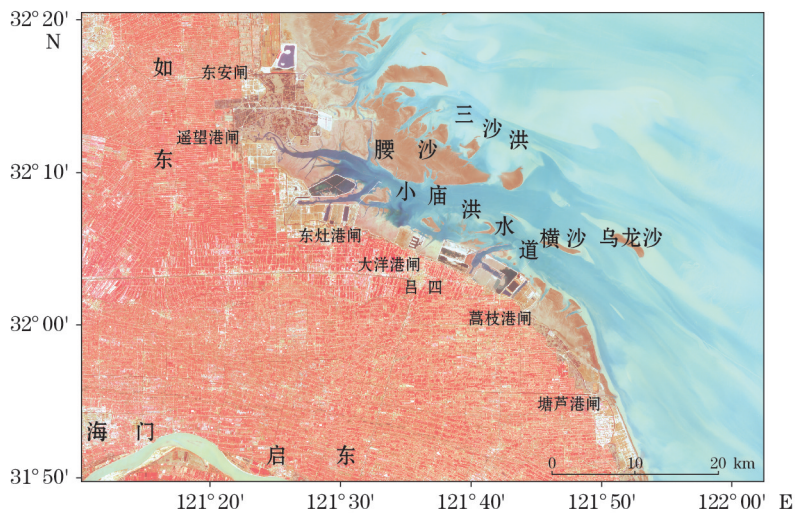


图1 腰沙地理位置

Fig. 1 Geographic location of the Yao Sandbank

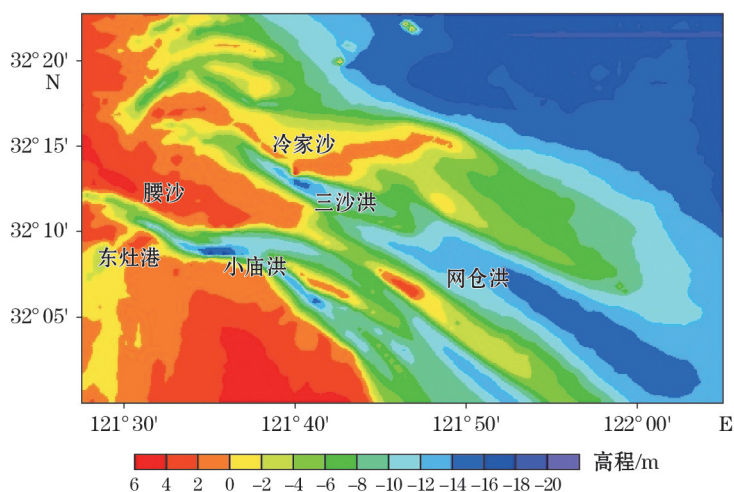


图 2 腰沙附近水域水下地形图(2009-06)

Fig. 2 Seafloor topography of the area around the of Yao Sandbank(June, 2009)

2 研究方法

2.1 数据来源

选取江苏省南通市 1987,1995,2000 和 2008 年 TM 影像、2015 年 ETM+ 影像资料。遥感影像资料详情见表 1。

表 1 遥感影像资料详情

Table 1 Details of the remote sensing images

成像时间	传感器	潮位/cm	成像时间	传感器	潮位/cm
1987-11-10T09:52	TM	-102.3	1987-06-03T09:49	TM	-166.9
1995-03-05T09:35	TM	-172.4	1995-08-12T09:28	TM	-124.4
2000-06-06T10:08	TM	-209.9	2000-02-07T10:17	TM	21.6
2008-05-11T10:13	TM	-186.3	2008-11-19T10:08	TM	-136.6
2015-01-23T10:24	ETM+	-65.6	2015-03-12T10:24	ETM+	-144.4

注:成像时间为北京时间;基准面为平均海平面

2.2 潮滩内侧界线遥感解译

江苏淤泥质海岸经过长期开发,人工海堤已经处于平均高潮位左右,并逐步向下发展,已经成为事实上的人工岸线^[12-13]。我们以南通市沿海海堤或围填海工程围堤(不算突堤及未闭合的工程)作为腰沙潮滩分布的内侧界限。

目前主要有目视解译和自动解译两种方法用于用遥感图像解译海岸线变化。腰沙地区作为本文的研究区,海岸线以人工岸线为主,海岸线平滑顺直且清晰可辨,可以通过目视解译较为精准地在遥感图像上提取。因此,本文在 Arcgis 中对经过几何校正和假彩色合成的影像进行人工跟踪海岸线,得到矢量海岸线^[14-15]。

2.3 平均大潮低潮线提取

水边线是水陆的交界线,其位置随涨落潮时的不同而不断变化。目前主要利用目视判读、单波段密度分割、边缘探测和多波段分类提取等方法对低潮水边线进行提

取^[6,16-18]。由于不同影像的成像时间不同,不同影像上水边线的潮位也不同,直接提取影像上的即时水边线对研究潮滩资源的演变趋势没有意义。因此,本文选择两景成像时间不同的影像,提取两条潮位不同的水边线,再根据同一时刻水边线上不同位置的地方具有不同的潮位和坡度,推算平均大潮低潮线。

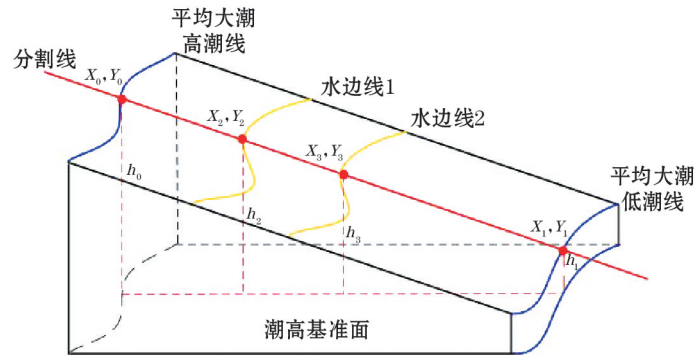


图3 平均大潮低潮线离散点推算示意图

Fig. 3 A sketch map showing the discrete point estimation of low water line of mean spring

假定2条水边线之间的坡度即为潮间带内滩面的坡度,此时分割基线上平均大潮低潮线对应点的经度坐标推算公式为

$$\frac{X_2 - X_3}{X_2 - X_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

式中, X_1 是待推算的平均大潮低潮点经度坐标; X_2, X_3 是分割线分割得到的水边线离散点经度坐标; h_1 是潮高基准面上的平均大潮低潮潮位值; h_2, h_3 是遥感影像成像时刻水边线离散点对应的潮位值。纬度推算同上。将平均大潮低潮线离散点连成线,生成低潮水边线^[15,20-21]。

2.4 滩脊线提取

滩脊线是低潮出露潮滩的分水线。在海洋的落潮期间,沙脊处最先露出水面,因此滩脊线处的含水量就比其四周较小,因此其光谱反射率就比四周要大,因此在遥感图像中的光谱值的最高点的连线就是滩脊线的位置^[22]。根据辐射沙洲低潮期间出露滩面的汇水特点和沟槽分布,通过对图像的增强处理,利用目视判读的方法确定反射率最大的点,并对处理后的散点进行缓冲区分析,提取缓冲区的中线。再结合滩面汇水动力特点,依据相邻潮沟系统的相对边界修改并确定滩脊线^[7]。

2.5 水道中轴线

水道中轴线是潮汐水道平面几何形态的轴线,其动态变化特点可反映潮沟的演变特征。中轴线生成方法主要包括水道的分离和提取中轴线两部分。在同一时间的潮波系统控制下,同一潮汐通道两侧的水下沙洲地形在遥感影像光谱特征上具有一致性和连续性,可通过选择成像质量好的遥感影像数据确定其相对边界轮廓。因此,虽然精准反演腰沙海域水下地形受到限制,但由于腰沙水下沙洲和潮汐水道具有独特的形态特征,可采用遥感技术,利用腰沙水下沙洲和潮汐水道独特的形态特征来确定其相对边界轮廓。本文利用目视判读的方法,利用增强后的影像分离腰沙地区的小庙洪、三沙洪、冷家沙前缘深水

区水道,再将用于水道分离的掩模文件利用 Arcgis 对图像进行矢量化提取,并对照影像去除延伸到滩涂的多余分支,得到不同潮汐水道的主中轴线^[23]。这种依据水下沙洲边界轮廓线确定的水道中轴线能够较准确地反映潮汐水道的位置特征。

2.6 研究方法检验

依据 2009 年冷家沙附近的实测地形图进行各地理要素位置检验,与实测水深点插值结果的进行对比显示。

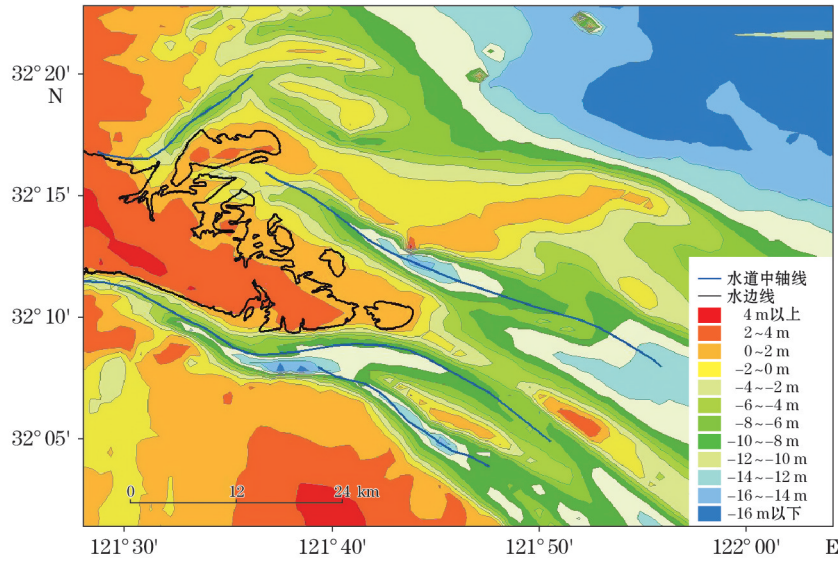


图 4 平均大潮低潮线与水道中轴线检验(2009 年实测地形图)

Fig. 4 Examination between the low water line of mean spring and the central axis of the channel (Measured in 2009)

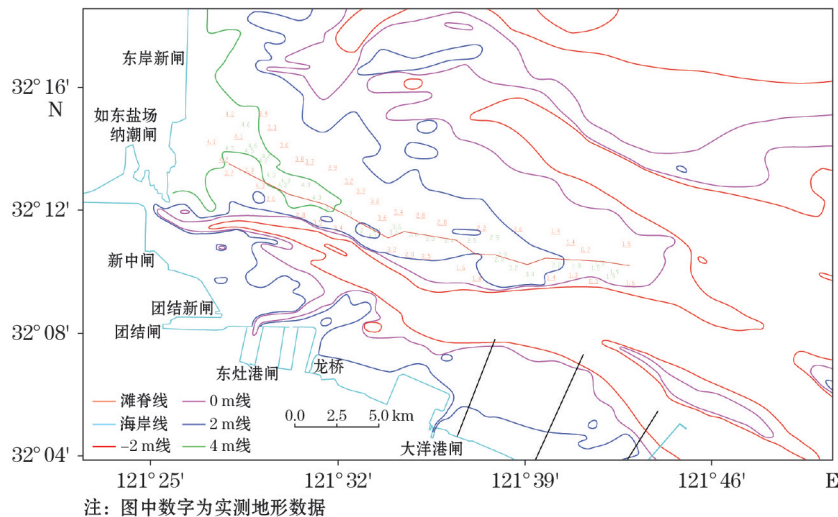


图 5 滩脊线检验(2009 年实测地形图)

Fig. 5 Examination of the beach ridge line (Measured in 2009)

检验结果显示,本文推算的平均大潮低潮线范围介于0~2 m等高线范围,水道道中轴线基本位于实测等深线之间的中心位置,滩脊线基本位于实测最高地形处,能够较好反映腰沙潮滩的形态与潮汐水道平面形态特征。

3 研究结果

地貌形态空间及要素的分布格局可以深刻反映区域空间动力地貌过程,因此,基于形态成因的地貌特征线分析为区域动力地貌演变发展研究提供了主要依据。作为辐射沙洲南翼的半岛式连岸沙洲,腰沙的典型地貌特征线主要有潮滩内侧界线遥感解译(海岸线)、平均大潮低潮线、滩脊线、水道中轴线等^[15]。利用第三章的研究方法,以地貌形态和成因为基础,对获取的遥感图像进行观察分析与提取,得到腰沙地区潮滩典型特征线的遥感解译结果^[24-26]。

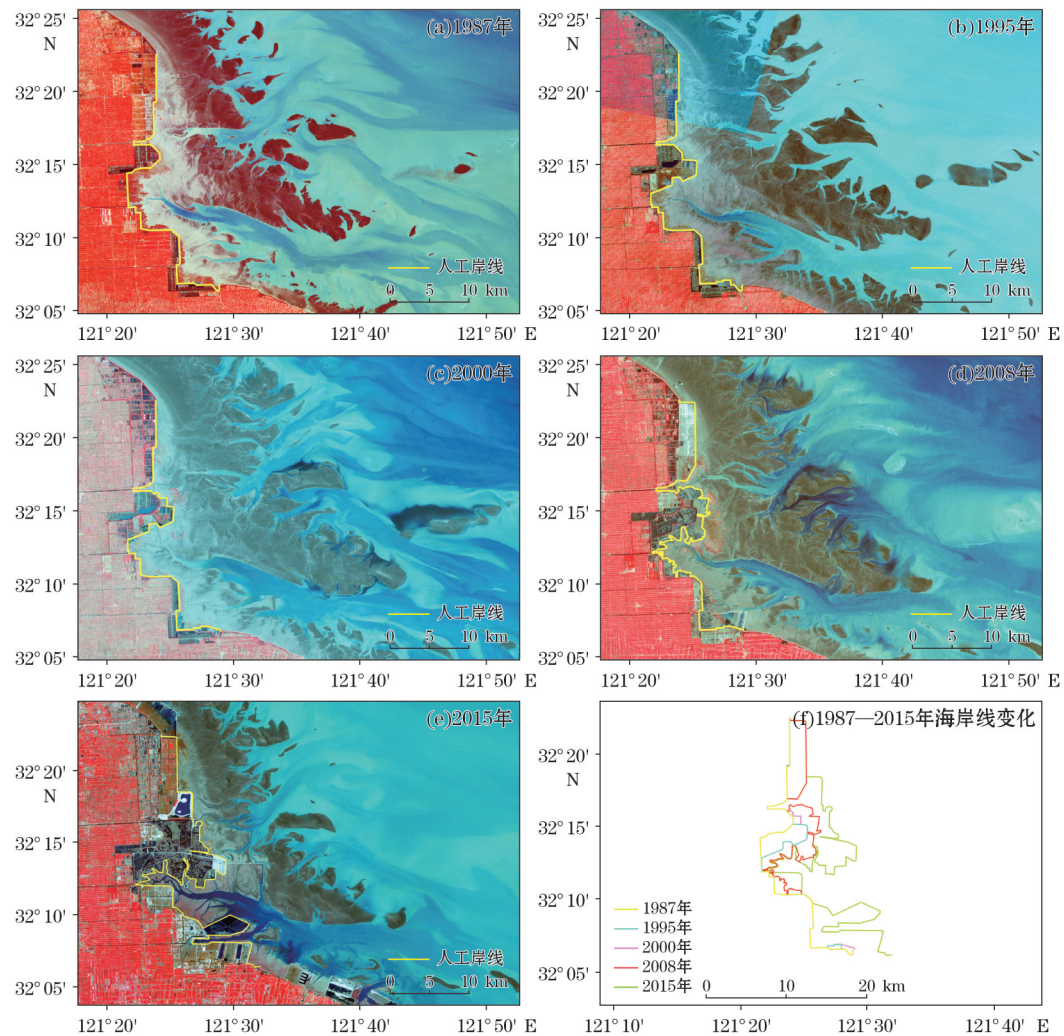


图6 各年份海岸线变化

Fig. 6 Changes of the coastlines in different years

3.1 潮滩内侧界线(海岸线)遥感解译

本论文以最外侧海堤作为海岸线的识别标志(突堤及未闭合的工程不算在内),并以此作为潮滩地貌分布的陆侧边界。结合实地调查和人工海堤在遥感影像上的成像特征,以掘坎河河口及东灶港闸为端点,确定岸线目视解译标志进行提取。

腰沙附近的海岸线逐年向海推进,向海推进最远处位于大洋港附近,推进距离为 11.88 km。

掘坎河口至东安闸岸段海岸线在 1987—2000 年间没有变化;2000—2008 年间,由于掘东垦区的发展,该段海岸线向海推进,推进距离为 2.6 km。

海岸线形态变换明显的岸段集中在东安闸至遥望港闸段。在 1987—2015 年间逐年向海推进,平均推进距离为 0.4 km/a。

遥望港闸至东灶港段海岸线在 1987—2008 年间变化不明显,2008—2015 年,海岸线向海推进最远距离为 7.8 km。原因应是近 10 a 来人工开发强度的不断加大,围垦区的不断扩张,导致海岸线不断向海延伸。

由于围垦开发利用强度的不断增大,围垦区的面积不断增大 1995 年、2000 年、2008 年、2015 年围垦面积较 1987 年增量分别为 13.86、16.26、56.69 和 140.40 km²,围垦面积年均增量为 5.01 km²/a。

3.2 平均大潮低潮线

根据 1987 年、1995 年、2000 年、2008 年以及 2015 年五个时期 10 个时相的遥感影像进行潮滩面积的变化分析。潮滩外界线依据前文所述的平均大潮低潮线提取方法进行确定。

根据图 7 中各年份平均大潮低潮线在遥感影像中的位置变迁分析,可知腰沙外缘区潮滩北侧向南缩进,南侧略有淤积。根据遥感影像提取的潮滩范围进行潮滩冲淤变化的分析,对比图 8 中 1987—2015 年潮滩面积增加区域与减少的区域。结果显示腰沙主体沙洲范围整体向南偏移,外缘区北部表现为侵蚀区,年冲刷强度为 2.63 km²/a;南部表现为淤积区,年淤积强度为 0.90 km²/a。

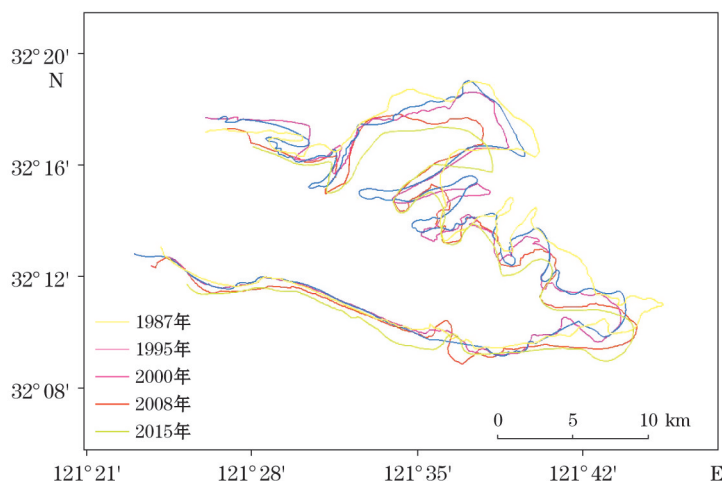


图 7 1987—2015 年平均大潮低潮线变化

Fig. 7 Changes of the low water line of mean spring in the period of 1987—2015

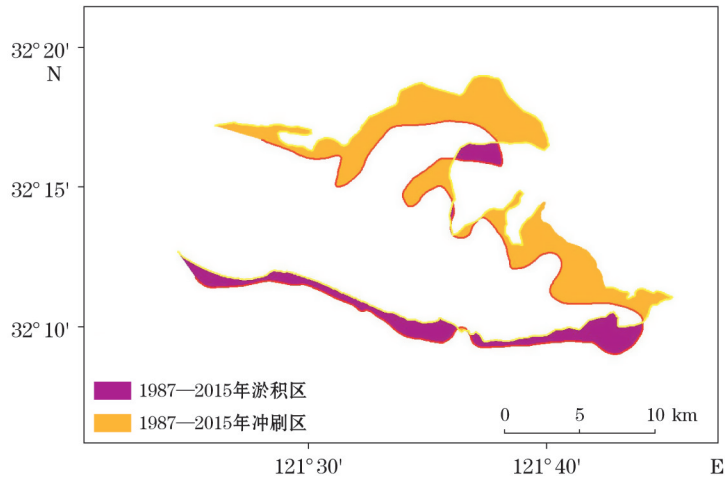


图8 1987—2015年潮滩面积变化

Fig. 8 Changes of the tidal flat area in the period of 1987—2015

3.3 滩脊线

滩脊线是潮流汇水在地貌形态上的响应,分析其动态特征对于认识辐射沙洲宏观演变特征具有重要意义。腰沙地区主要受东海前进潮波影响控制,位于冷家沙前缘深水区、三沙洪水道和小庙洪水道之间,其北部较为平缓,有一系列潮沟深入腰沙主体,等高线曲折;南部地貌相对单一,坡度较大,等高线顺直。按文中阐述的方法进行滩脊线提取结果如下(图9)。

腰沙地区滩脊线主要在潮滩偏南部发育,走向为NW-SE走向,长约21 km。根据图9f各年份滩脊线变化分析,1987—1995年间,腰沙滩脊线较为顺治,变化幅度不大。1995—2008年间是腰沙滩脊线变化幅度加剧的时期,2008年相较于1995年,腰沙滩脊线总体表现为西北部稳定,中部及东南部迁移变化较大,最大摆动幅度约1 200 m左右。2008—2015年,腰沙地区滩脊线分为不连续的两段,走向均为NW-SE,原因应是腰沙南部中端水动力条件改变,小庙洪水道分支对腰沙南部中端冲刷力度加大,使腰沙滩南部潮沟加深,切断了原有滩脊线的走向。

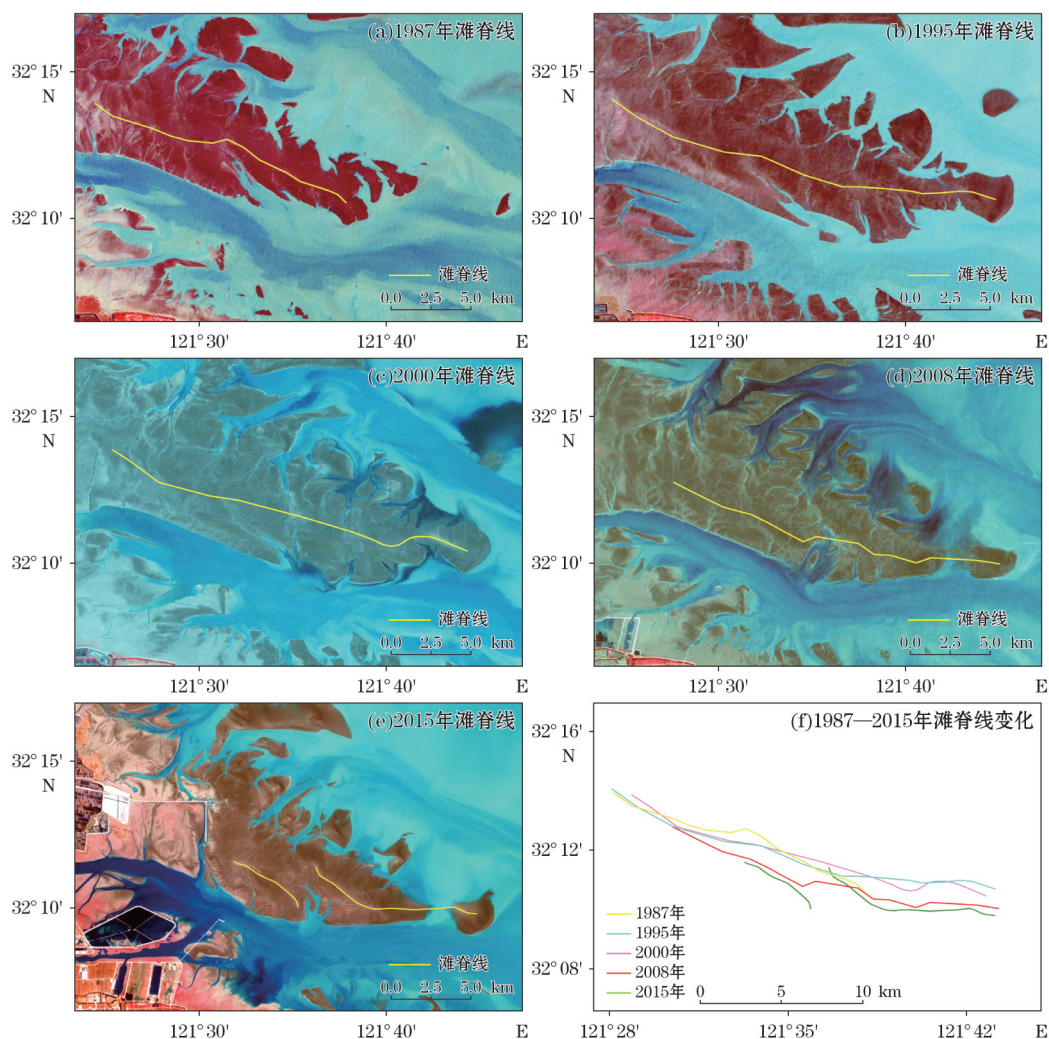


图 9 各年份滩脊线变化

Fig. 9 Changes of the beach ridge line in different years

3.4 水道中轴线

潮汐水道是水道—沙洲系统的控制动力,水道中轴线的分析能够反映大范围区域动力主轴的变化特征,有利于深化认识辐射沙洲的宏观演变特征。

根据图 10 可知,三沙洪水道、小庙洪水道余冷家沙前缘深水区中轴线提取较完整。三沙洪水道中轴线在 1987—2015 年间总体摆动特点表现为两端稳定,中部迁移变化较大,摆动方向表现为先东北后西南,水道中部在 2008 年位置相较 1987 年向西南摆动幅度约 2 000 m;东南端水道由分支水道变为稳定的单一顺直水道。小庙洪水道总体呈向西南方向摆动趋势,西北端变化较小,中部及东南部变化较大,但由于西南端分支水道距离本论文研究区较远,对本论文研究区域没有影响。冷家沙前缘深水区中轴线变化较小,整体主要表现为以西南端为端点,水道顺时针旋转 10° 。

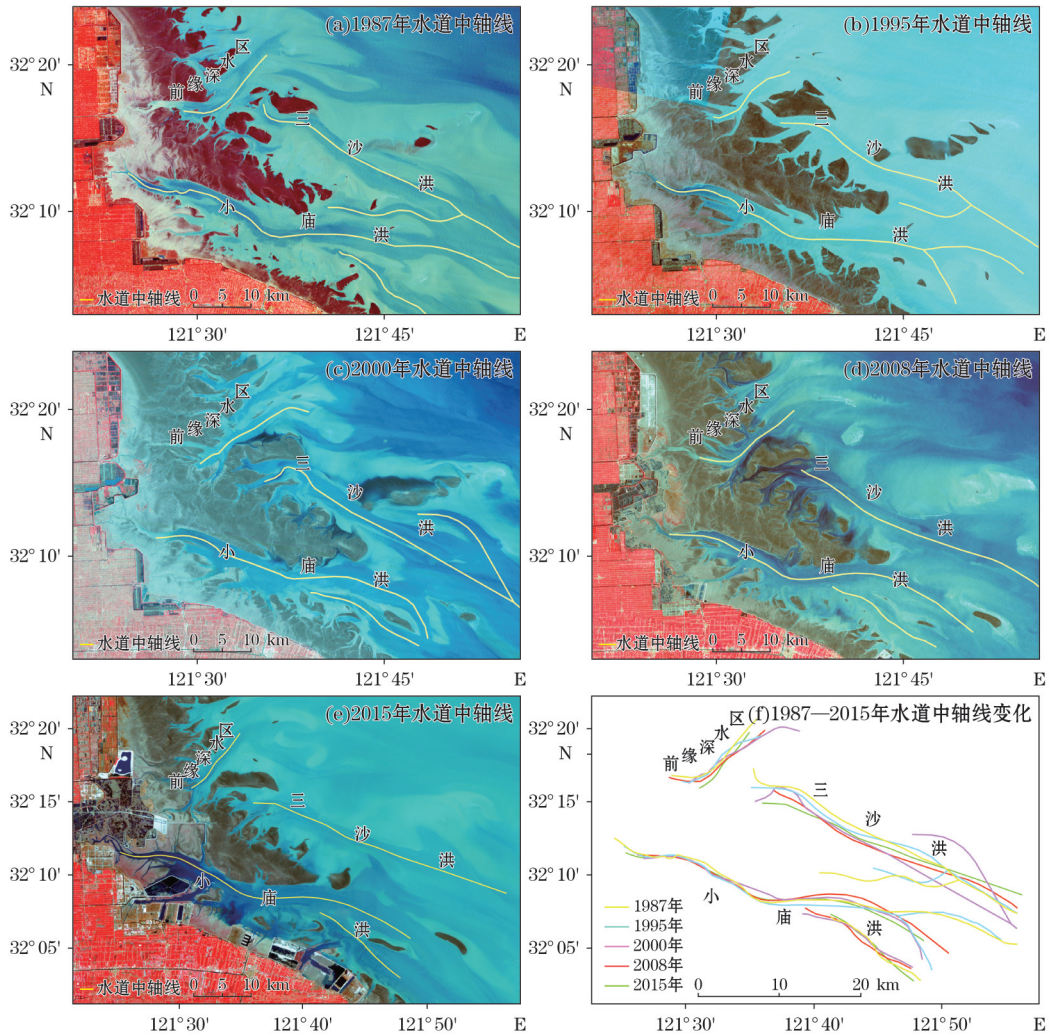


图 10 各年份水道中轴线变化

Fig. 10 Changes of the central axis of the channel in different years

3.5 格局演变特征

综上所述,1987—2015年腰沙地区围垦面积增加了 140.40 km^2 ,围垦面积年均增量为 $5.01\text{ km}^2/\text{a}$;正是由于围垦力度的不断加大,人工岸线不断向海推进,潮滩资源逐渐减小;小庙洪、冷家沙前深水区主要潮汐水道大体稳定,三沙洪水道与水道有逐渐南移的趋势,由于水道的偏移及水动力环境的改变,2015年腰沙地区沙脊线西北端消失,西南端破碎为不连续的两段;人工围垦力度的加大及水动力环境的变化,是腰沙沙洲外缘区南侧呈现淤涨,北侧呈现侵蚀的主要原因。

4 讨论

腰沙是江苏辐射沙洲南翼最大的淤长型沙洲,腰沙海域地形地貌的监测与演变趋势

研究对于腰沙地区的开发利用、重大海岸工程建设、港口维护及海洋环境保护等都有十分重要的意义。而目前,对于腰沙地区的遥感监测研究较少。本文利用 1987,1995,2000 和 2008 年四个时期的 TM 影像以及 2015 年的 ETM+ 影像获取了腰沙地区典型地貌特征线,并对其演变数据进行了定量统计与分析,比较客观真实地反映了海域地形地貌的演变及其原因。

本文从遥感影像中提取人工岸线作为海岸线;根据同一时刻水边线上不同位置的地方具有不同的潮位和坡度,推算平均大潮低潮线;提取沙洲的滩脊线以及沙洲两侧水道中轴线作为研究潮滩演变的方法。针对南黄海辐射沙洲地区复杂的冲淤演变,该方法有一定的指导意义,并可以推广至更长时间段的遥感影像,对辐射沙洲未来演变趋势进行预测。

在今后的研究中,可选取大比例尺地形图,运用多种方法插值,对提取的地理要素进行不同方法的检验与矫正,可以使得研究结果更为精细与准确。

致谢:地理空间数据云以及美国地质勘探局(USGS)提供本文影像数据。

参考文献:

- [1] 刘燕春,张鹰.基于遥感岸线识别技术的射阳河口潮滩冲淤演变研究[J].海洋通报,2010,29(6):658-663.
- [2] 丁贤荣,康彦彦,葛小平,等.辐射沙脊群条子泥动力地貌演变遥感分析[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(2):231-236.
- [3] 陈可锋,陆培东,王艳红,等.南黄海辐射沙洲趋势性演变的动力机制分析[J].水科学进展,2010(2):267-273.
- [4] 黄海军.南黄海辐射沙洲主要潮沟的变迁[J].海洋地质与第四纪地质,2004(2):1-8.
- [5] 韩志远,李孟国.基于遥感和 GIS 的福建文渡湾海域潮滩演变研究[J].海洋学研究,2015,33(3):42-47.
- [6] 王小丹,方成,康慧,等.曹妃甸地区潮间带演变的遥感监测[J].海洋通报,2014(5):559-565.
- [7] 李海宇,王颖.GIS 与遥感支持下的南黄海辐射沙脊群现代演变趋势分析[J].海洋科学,2002,26(9):61-65.
- [8] 马建华.浅论南通的区位优势与不足[J].南通师范学院学报(哲学社会科学版),1999(1):106-109.
- [9] ZHANG W Y. Siltation and its control in downstream tidal gates in north of Jiangsu Province[J]. Journal of Sediment Research, 2000(1):73-76.
- [10] 刘佰琼.基于 GIS 的围填海规模评价方法研究[D].南京:南京师范大学,2013.
- [11] 王颖,朱大奎,周旅复,等.南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J].中国科学,1998(5):385-393.
- [12] 王艳红,张忍顺,谢志仁.平均高潮位记录分析淤泥质海岸的相对海面变化——以江苏淤泥质海岸为例[J].海洋通报,2004(5):59-64.
- [13] 王艳红,温永宁,王建,等.海岸滩涂围垦的适宜速度研究——以江苏淤泥质海岸为例[J].海洋通报,2006,25(2):66-73.
- [14] 王静,徐敏,陈可锋.基于多目标决策模型的如东近岸浅滩适宜围填规模研究[J].海洋工程,2010(1):76-82.
- [15] 李飞.南黄海辐射沙洲内缘区演变驱动机制及围垦布局研究[D].南京:南京师范大学,2014.
- [16] WHITE K, ASMAR H M E. Monitoring changing position of coastline using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta[J]. Geomorphology, 1999, 29(1-2):93-105.
- [17] 刘艳霞,黄海军,丘仲锋,等.基于影像间潮滩地形修正的海岸线监测研究——以黄河三角洲为例

- [J]. 地理学报, 2012, 67(3): 377-387.
- [18] 程义吉, 张建怀, 杨晓阳. 黄河三角洲海岸线的演变特征分析[J]. 人民黄河, 2011, 33(10): 118-120.
- [19] 张明, 蒋雪中, 郝媛媛, 等. 遥感水边线技术在潮间带冲淤分析研究中的应用[J]. 海洋通报, 2010, 29(2): 176-181.
- [20] 陈勇. 海岸带滩涂资源遥感应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 296-304.
- [21] 顾燕, 荆雪涵. 南黄海辐射沙脊群地形遥感识别及分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013(3): 102-108.
- [22] 顾燕, 张鹰, 龚明劼. 基于遥感影像和中轴线法的小庙洪水道演变分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(3): 107-114.
- [23] 王正军, 张鹰, 陈理凡, 等. 从高分辨率卫星影像挖掘海岸冲淤变化信息的方法[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(1): 63-68.
- [24] 陈炜, 李九发, 蒋陈娟, 等. 长江河口九段沙近期冲淤演变过程研究[J]. 泥沙研究, 2011, (1): 15-21.
- [25] 何茂兵, 吴健平. 长江口九段沙潮滩动态演变遥感研究[J]. 人民长江, 2007, 38(11): 97-99.

Study on Tidal Flat Evolution Trend in the Yao Sandbank Area Based on Remote Sensing

WU Jia-le¹, XU Min^{1,2}, LIU Bai-qiong¹

(1. *Department of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;*

2. *Jiangsu Engineering Center for Marine Development and Ecological Construction, Nanjing 210023, China*)

Abstract: The Yao Sandbank(YS) located in the southeastern sea area of Nantong, Jiangsu Province, is the largest sandbar in the south wing of the radial sand ridges off the Jiangsu coast. It is complex in the geomorphic forms of the trough, but has relatively stable tidal flat and deep trough and is also rich in deep water coastline, so that it has a great potential for development. Therefore, the research on its geomorphological evolution is of great significance for its further exploitation and construction. Through the analyses of the remote sensing and survey data obtained in the radial sand ridge area in the year of 1987, 1995, 2000, 2008 and 2015 and by using the remote sensing band combinations suitable for the sandbar shoreline of the YS, information about typical tidal flat evolution in the past more than 20 years in the study area is obtained. The results show that from 1987 to 2015 the reclamation was developed rapidly and the artificial shoreline became more complicated in the inner edge of the YS. The combination form of the "channel-sandbar system" in the YS appears generally to be silting at the eastern and southern sides of the inner edge and eroding at the northern side, and the Xiaomiao-hong Channel tends generally to move toward the south. The tidal flat varies spatially in its form and evolution trends in the north and the south.

Key words: Yao Sandbank; tidal flat evolution; remote sensing; trends