

# 基于遥感和GIS的江苏省海岸线时空变化

李 行<sup>1,2</sup>, 张连蓬<sup>1</sup>, 姬长晨<sup>3</sup>, 刘红樱<sup>4</sup>, 黄巧华<sup>3</sup>

(1. 江苏师范大学测绘学院, 徐州 221116; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;

3. 江苏师范大学城市与环境学院, 徐州 221116; 4. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016)

**摘要:** 以江苏省海岸 1973-2012 年的 Landsat MSS/TM/ETM+ 遥感影像为数据源, 利用遥感和 GIS 技术, 对江苏省海岸线的时空变化进行分析。结果表明: 显著侵蚀岸段以废黄河口为中心, 北至新淮河口, 南至双洋港, 长度约 79.05 km, 占研究区岸线总长度的 8%; 淤涨岸段以弶港为中心, 北至运粮河口, 南至新中港, 长约 715.50 km, 占 72%; 其它部分稳定岸段与淤涨岸段相间存在。最大侵蚀速率为  $-23.37 \pm 11.92$  m/a, 位于废黄河口南侧; 最大淤涨速率为  $445.37 \pm 66.80$  m/a, 位于射阳河口南侧。围垦是江苏省岸线变化的主要因素。总的来看, 1973 年以来 40 年间共围垦 1912.4 km<sup>2</sup>, 1980 年前后出现了一个围垦高峰, 之后围垦强度明显减弱且进入休养期, 90 年代以后围垦又普遍加强。

**关键词:** 海岸线变化; 遥感; GIS; 江苏省

DOI: 10.11821/dlyj201403002

## 1 引言

岸线是地表最为独特的特征, 也是海岸最古老和直观的表现形式。“岸线位置”(shoreline position) 被国际地质科学联合会 (IUGS) 指定为 27 个全球性地质指标 (Geoindicator) 之一<sup>[1]</sup>。岸线分析是研究海岸系统演变的基本方法和重要内容。Boak 等对岸线的定义和监测技术进行了总结和评述, 指出目前面临的挑战是完善岸线指标特征定量和基于过程的理解, 以及岸线指标与自然水陆界线的空间关系<sup>[2]</sup>。Gens 对利用遥感技术提取和监测岸线的有关技术方法做了较为详细的研究, 认为相关技术的发展已趋成熟, 可以为更复杂的海岸监测场景所服务<sup>[3]</sup>。目前, 已有多种数据源可以用来获取岸线数据, 如光学影像<sup>[4]</sup>、SAR 影像<sup>[5]</sup>、LiDAR 数据<sup>[6]</sup>、视频数据 (video imaging)<sup>[7]</sup>等。黄海军等分析了地形图、海图、航片和卫片等不同数据源获取岸线的精度, 发现利用陆地卫星监测岸滩变化误差在 40~50 m 左右, 而利用航片立体测图方法可达到更高的精度<sup>[8]</sup>。刘艳霞等针对潮汐涨落及潮滩坡度对岸线监测的影响, 提出了利用两景影像计算潮滩坡降进而获取岸线的方法<sup>[9]</sup>。常军等<sup>[10]</sup>以 Landsat 影像作为数据源, 利用监督分类方法对黄河口的海岸线进行了动态监测, 并分析了岸线变化与入海水沙之间的关系。周良勇等<sup>[11]</sup>、陆晓燕等<sup>[12]</sup>、杨智

收稿日期: 2013-04-09; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目 (12KJD170002); 河口海岸学国家重点实验室开放基金项目 (SKLEC-KF201210); 江苏师范大学自然科学研究基金项目 (11XLR04); 中国地质调查局地质调查项目 (1212011220004)

作者简介: 李行 (1981-), 男, 河南驻马店人, 讲师, 博士, 主要从事海岸带遥感与地理信息系统应用研究。

E-mail: lixing@jsnu.edu.cn

通讯作者: 黄巧华 (1965-), 男, 江苏涟水人, 教授, 博士, 从事海岸带环境和城市环境研究。E-mail: huangqh@jsnu.edu.cn

翔<sup>[13]</sup>都利用多时相Landsat影像对江苏省盐城-南通段海岸的变迁与滩涂围垦情况进行了动态监测。周良勇等<sup>[11]</sup>研究发现淤积快的地方围垦也相应较快,并根据冲淤的空间差异推断出海岸沉积物具有由北向南运移的特点。陆晓燕等<sup>[12]</sup>发现研究区滩涂开发总体上呈“围垦—修养—围垦”的模式。杨智翔<sup>[13]</sup>研究发现,研究区滩涂围垦与海岸线向海推进速度呈正相关,1975-2009年间其海岸线变化呈“快—慢—全面加速推进”的特点,1984-1992年、1992-2002年、2002-2009年的围垦速度分别为12.44 km<sup>2</sup>/a、53.05 km<sup>2</sup>/a、51.94 km<sup>2</sup>/a。本文则以Landsat影像作为数据源,结合遥感和GIS技术开展研究,研究区域从绣针河口到崇启大桥,基本涵盖江苏省全部岸线。

江苏省岸线资源丰富,拥有广袤的滩涂,未围垦滩涂面积约占全国总量的1/4<sup>①</sup>。江苏海岸围垦历史悠久,从11世纪范公堤修筑以来,共围垦开发了近2万km<sup>2</sup>的沿海滩涂。历史时期主要是高滩围垦,围堤平行于自然岸线依次向海推进<sup>[14]</sup>。随着江苏沿海开发正式上升为国家战略,新一轮的岸线开发热潮已然掀起。到2020年滩涂围垦将达到1800 km<sup>2</sup>的总规模<sup>①</sup>。在此背景下,集成已有研究成果对江苏省现代海岸线变化进行研究,分析围垦对江苏省海岸演变的影响,有助于为海岸带开发利用提供必要的决策参考。

2 数据获取与预处理

本研究选择Landsat MSS/TM/ETM+影像作为数据源,时间跨度为1973年至2012年。所有的Landsat影像数据都从美国地质调查局(USGS)网站(<http://glovis.usgs.gov/>)免费下载。成像时间不同,产品级别略有差别。大部分数据是经过精确几何校正和地形校正的L1T级(Level 1T)产品。若无必须的地面控制点或高程数据,则被处理成1G级产品或1Gt级产品。产品的几何处理精度可以从元数据中获取。MSS数据共4个波段,原始空间分辨率为79 m,下载数据分辨率已被处理为60 m;TM影像数据有7个波段,除6波段(热红外波段)的空间分辨率为120 m外,其它波段为30 m;ETM+影像有8个波段,6波段(热红外波段)的空间分辨率为60 m,8波段为全色波段,空间分辨率为15 m,其他波段分辨率为30 m。数据分辨率可以满足本研究的需求。

覆盖江苏省全部海岸需要三景Landsat影像数据(图1),为便于叙述,按照影像的覆盖区域,把江苏省岸线分为北、中、南三个部分。由于三景影像分别位于三个相邻的卫星

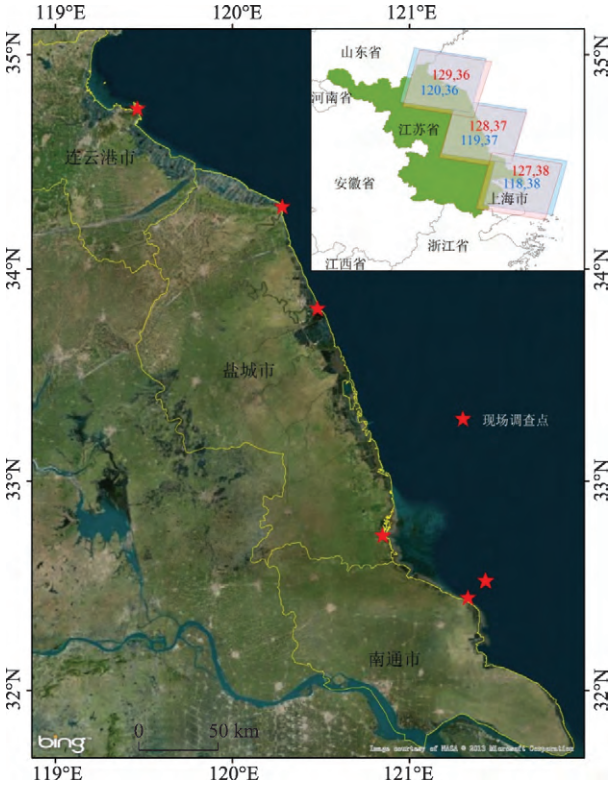


图1 江苏省海岸线Landsat影像覆盖情况及调查点分布  
Fig. 1 Landsat scenes covering Jiangsu coast and the field survey points

① 江苏省发展改革委,江苏省沿海办. 江苏沿海滩涂围垦开发利用规划纲要(2008-2020). 2010.

轨道上,难以保证它们成像时间完全一致,只能对三景影像分别进行分析。同时,考虑到江苏省海岸线的特点、数据本身的问题(如云覆盖、成像质量等)和数据的可获取性,本研究取大约5年为间隔选择影像数据。所选数据如表1所示,北部和南部各选9景影像,中部选择10景影像。

表1 所选影像数据列表及对应数字岸线的位置误差

Tab. 1 Landsat images selected and geometric error of corresponding digital coastline						
条带号	编号	卫星	传感器	成像日期	成像时间	位置误差*
129、036	1	Landsat 1	MSS	1973-11-17	10:06:47	98.651
	2	Landsat 3	MSS	1979-08-06	09:57:07	72.211
	3	Landsat 4	MSS	1983-08-01	10:06:07	71.930
	4	Landsat 5	TM	1988-10-09	10:07:11	31.303
	5	Landsat 5	TM	1992-10-20	09:58:02	31.222
120、036	6	Landsat 5	TM	1998-05-30	10:14:15	31.202
	7	Landsat 7	ETM+	2003-01-28	10:25:04	17.390
	8	Landsat 7	ETM+	2008-05-01	10:26:38	31.167
	9	Landsat 7	ETM+	2012-09-01	10:31:52	31.232
128、037	1	Landsat 1	MSS	1973-11-16	10:01:28	43.430
	2	Landsat 2	MSS	1977-04-20	09:34:27	40.732
	3	Landsat 3	MSS	1979-05-25	09:52:31	66.294
	4	Landsat 4	MSS	1983-11-14	09:59:42	62.620
	5	Landsat 5	TM	1989-05-30	09:59:07	31.009
119、037	6	Landsat 5	TM	1993-05-25	09:53:18	31.000
	7	Landsat 5	TM	2000-07-31	10:07:59	31.311
	8	Landsat 7	ETM+	2004-08-03	10:19:36	31.169
	9	Landsat 7	ETM+	2008-04-24	10:20:53	17.279
127、038	10	Landsat 7	ETM+	2012-05-05	10:25:20	30.963
	1	Landsat 1	MSS	1974-02-13	09:54:04	66.067
	2	Landsat 2	MSS	1977-06-12	09:26:21	63.591
	3	Landsat 2	MSS	1981-12-24	09:44:28	41.833
	4	Landsat 5	TM	1987-05-18	09:48:54	30.978
118、038	5	Landsat 5	TM	1993-06-03	09:47:33	30.977
	6	Landsat 7	ETM+	1999-11-03	10:17:53	16.894
	7	Landsat 7	ETM+	2003-10-29	10:13:25	30.986
	8	Landsat 7	ETM+	2008-07-06	10:14:31	30.950
	9	Landsat 7	ETM+	2012-09-19	10:20:28	31.126

\*由公式(1)计算得到的对应年份数字岸线总的位置误差。

为保证数据几何精度的一致性,需要对所选影像进行预处理。主要包括:①对部分几何处理精度低的影像利用ERDAS软件进行图像配准,配准精度小于0.5个像元;②对于成像质量不好或有薄云覆盖的影像,进行图像增强;③由于Landsat 7 ETM+机载扫描行校正器(SLC)故障导致2003年5月31日之后获取的图像出现了数据条带缺失,影响使用,采用SLC-off模型加以修复。为了遥感影像数据解译的准确性,于2012年7月开展江苏海岸带的现场勘察(图1),同时结合其他文献资料作为遥感数据的补充。

### 3 研究方法

#### 3.1 岸线提取和数字化

海岸线一般指海陆交界线<sup>[15]</sup>, 为多年平均大潮高潮时水陆分界的痕迹线, 受自然和人为因素影响, 海岸线始终处于动态变化中<sup>[16]</sup>。海岸线的高度动态性决定了现实中并不存在一条固定的“线”, 通常根据具体情况采用不同的岸线指标 (shoreline indicator) 或代理岸线 (shoreline proxy) 来表征真实岸线的位置<sup>[2]</sup>。考虑到江苏沿海海堤不断向海域推进, 目前的海岸线已成为人工岸线。尽管堤坝的建设主要受人为控制, 但多数堤坝在一定程度上反映了海岸的自然淤涨趋势, 其实际位置在理论上基本位于海岸线向海一侧<sup>[17]</sup>。因此, 本研究采用最外侧的海堤作为岸线指标。

江苏沿岸海堤多由石英质粗砂构成, 成像特征明显, 比较平直且清晰可辨<sup>[18]</sup>。也有相当部分为土堤, 堤顶两侧及内外坡均栽植草木, 可借助位置、形态和植被特征加以分辨<sup>[19]</sup>。但由于图像分辨率所限、多条海堤并存及其它线状地物的干扰, 全自动提取仍存在困难, 本研究采用半自动化的方法提取海岸线。首先, 对所选影像的近红外波段进行图像分割和阈值化处理, 生成二值图像; 然后, 借助 ArcGIS 提供的快速矢量化工具 ArcScan 提取矢量的线要素; 最后, 对得到的矢量线要素比照原始图像进行手工编辑修改。最终提取得到的矢量岸线如图2所示。

#### 3.2 误差计算

从遥感影像处理到数字岸线获取过程中会引入各种误差, 主要包括季节误差 (记为  $e_s$ )、几何校正误差 (记为  $e_g$ )、地形校正误差 (记为  $e_t$ )、配准误差 (记为  $e_r$ )、数字化误差 (记为  $e_d$ )。

在以大堤作为岸线指标的情况下, 理论上选择冬季的影像, 因此时植被最少, 植被的生长状况对判读大堤实际位置的影响也最小。但由于 Landsat 数据自身的特性, 研究区内数据的可获取性和可利用性受到限制, 本研究所选影像的成像日期涵盖了一年中所有月份。而在不同的季节, 大堤附近不同的植被长势会对解译大堤的准确位置带来不同的影响。春冬两季影响最小,  $e_s$  设为 0.5 个像元; 夏秋两季影响最大,  $e_s$  设为 1 个像元。几何校正误差和地形校正误差为影像提供下载之前处理产生的误差, 都可以在元数据文件中获取。配准误差是将图像下载到本地之后, 对于那些空间位置不能够很好匹配的数据进行图像配准产生的误差。因此,  $e_r$  的值为配准过程中实际产生的总体误差。数字化误差是提取矢量岸线的过程中产生的误差。为消除不同数字化工作人员所引入误差的差异性, 本研究所有用到影像的数字化工作都由一个人来完成。 $e_d$  的理论值是多位专业数字化工作人员重复数字化结果误差的标准差。 $e_d$  的值需针对不同空间分辨率的数据分别计算。

以上误差可以认为都是不相关的, 因此可以用一个单一的量度来表达某条岸线总的位置误差 ( $E_i$ )。

$$E_i = \pm \sqrt{e_s^2 + e_g^2 + e_t^2 + e_r^2 + e_d^2} \quad (1)$$

由此得到的各条岸线的位置误差如表1所示。最终岸线变化率的不确定性将包含每一条岸线的位置误差和岸线变化率计算模型的误差。



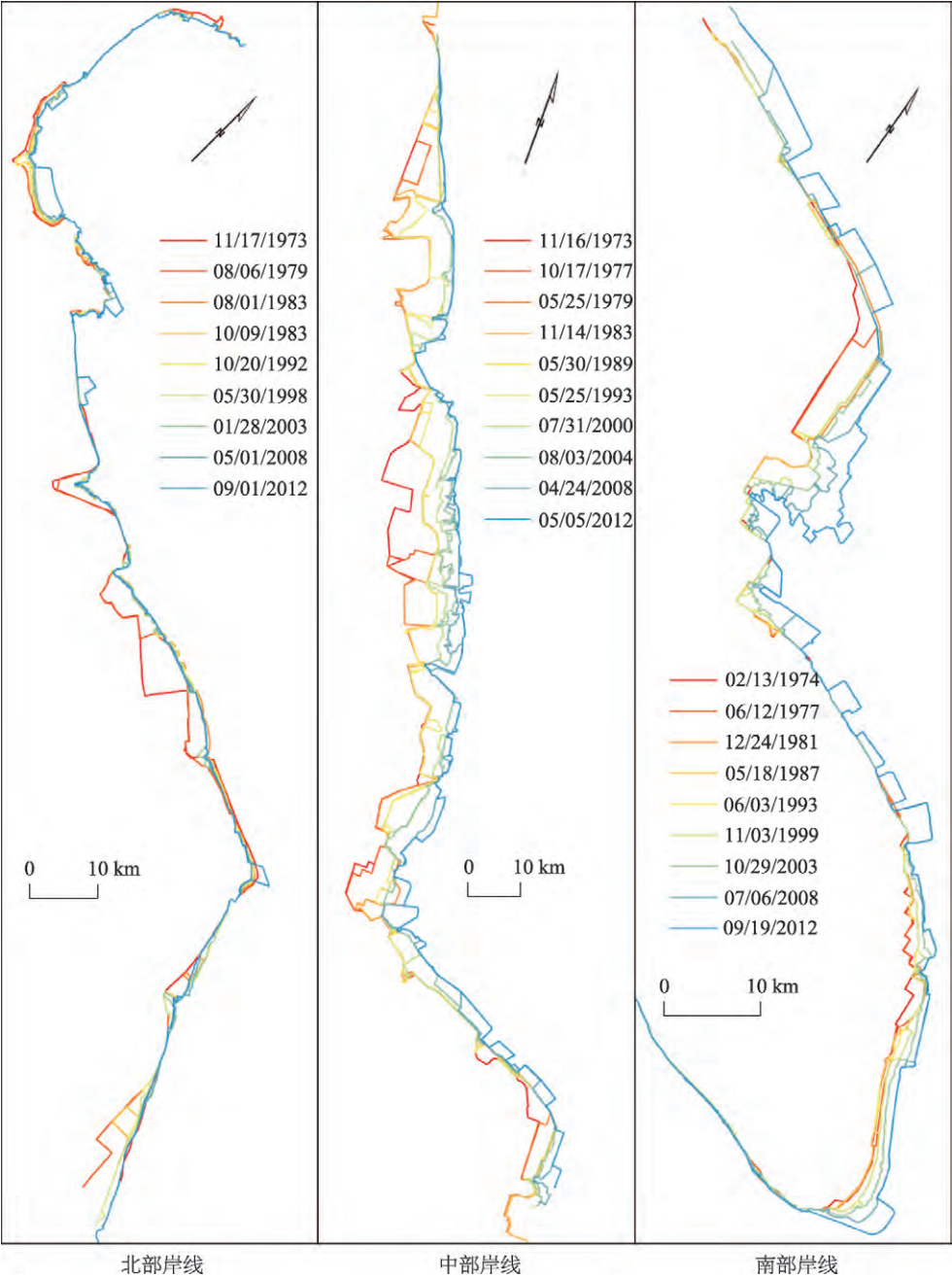


图2 最终提取得到的矢量岸线

Fig. 2 Digital coastlines extracted from Landsat images

3.3 岸线变化建模

常用的岸线变化建模方法是垂直断面法<sup>[20]</sup>，该方法已由美国地质调查局开发成 ArcGIS 的扩展模块 DSAS（Digital Shoreline Analysis System）<sup>[21]</sup>。本研究即采用该工具计算江苏省岸线变化率。其中，基线（Baseline）的创建是在所提取数字岸线的基础上，利用缓冲区（Buffer）的方法通过手工修改完成。断面间隔约 1 km，与岸线的总体趋势基本垂直。

考虑岸线的位置不确定性 ( $E_i$ ), 利用加权线性回归方法计算每条断面上的岸线变化率。第*i*条岸线的权重 ( $w_i$ ) 等于其总的位置误差 ( $E_i$ ) 平方的倒数<sup>[21]</sup>, 即:

$$w_i = 1/E_i^2$$

(2)

上式可以得知, 岸线的位置不确定性越大, 权重越小, 对回归趋势线的影响也越小, 而趋势线的斜率就是岸线变化率。正值表示淤涨, 负值表示侵蚀。

局部岸段平均岸线变化率可以通过对应范围内所有断面上岸线变化率的平均值求得。假设每条断面上加权线性回归的95%的置信区间是随机和独立的, 那么局部岸段平均岸线变化率的不确定性就可以通过下式求得。

$$U_{avg} = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2} / n$$

(3)

式中:  $U_i$ 是每条断面上岸线变化率的不确定性。

## 4 结果分析

### 4.1 江苏省岸线变化总体情况

根据全球行政区域数据库2.0版本 (GADM 2012, <http://www.gadm.org>) 中我国的行政边界数据, 可以测量得到研究区岸线长度约993.85 km。考虑到数据的空间跨度, 去除重叠部分, 把研究区海岸线分为北部、中部和南部海岸三个区域。北部海岸从江苏省最北端的绣针河口到运粮河口, 岸线长度约327.61 km; 中部海岸从运粮河口到南通市如东县滨海村, 岸线长度约460.22 km; 南部海岸从滨海村到崇启大桥北端, 岸线长度约206.02 km。北部、中部海岸选用数据区间为1973-2012年, 分别获取数字岸线9条和10条, 分别生成断面数178条和193条; 南部岸线选用数据区间为1974年至2012年, 获取数字岸线9条, 生成断面114条。

由于江苏省大部分海岸已为人工海岸, 利用遥感影像解译得到的也是大堤的边界, 海岸形态主要受人类活动的影响和控制。因此, 以下所述淤涨是指人工围垦的向海扩张, 而非自然淤涨, 甚至部分向海推进缓慢的岸段很可能是自然状态下的侵蚀岸段, 但侵蚀与自然的海岸蚀退一致。根据统计结果, 并排除无意义的统计值, 可以得到江苏省岸线的总体变化情况 (表2)。北部岸线平均变化率最小, 为 $15.18 \pm 0.96$  m/a, 淤涨岸段长度206.62 km, 约占北部海岸的63%, 侵蚀岸段长度79.05 km, 约占北部海岸的24%, 其它为稳定岸段; 中部岸线的平均变化率最大, 为 $186.87 \pm 2.73$  m/a, 全部为淤涨海岸; 南部岸线的平均变化率约 $54.85 \pm 2.22$  m/a, 无侵蚀岸段。

总体来看, 江苏省海岸线淤涨与蚀退并存。侵蚀岸段以废黄河口为中心; 淤涨岸段以

表2 江苏省各部分岸线变化总体情况  
Tab. 2 Shoreline change patterns of different sections of Jiangsu coast

区域	平均岸线变化率(m/a)	淤涨岸段		侵蚀岸段	
		长度(km)	百分比	长度(km)	百分比
北部岸线	15.18±0.96	206.62	63%	79.05	24%
中部岸线	186.87±2.73	460.22	100%	0	0
南部岸线	54.85±2.22	206.02	100%	0	0

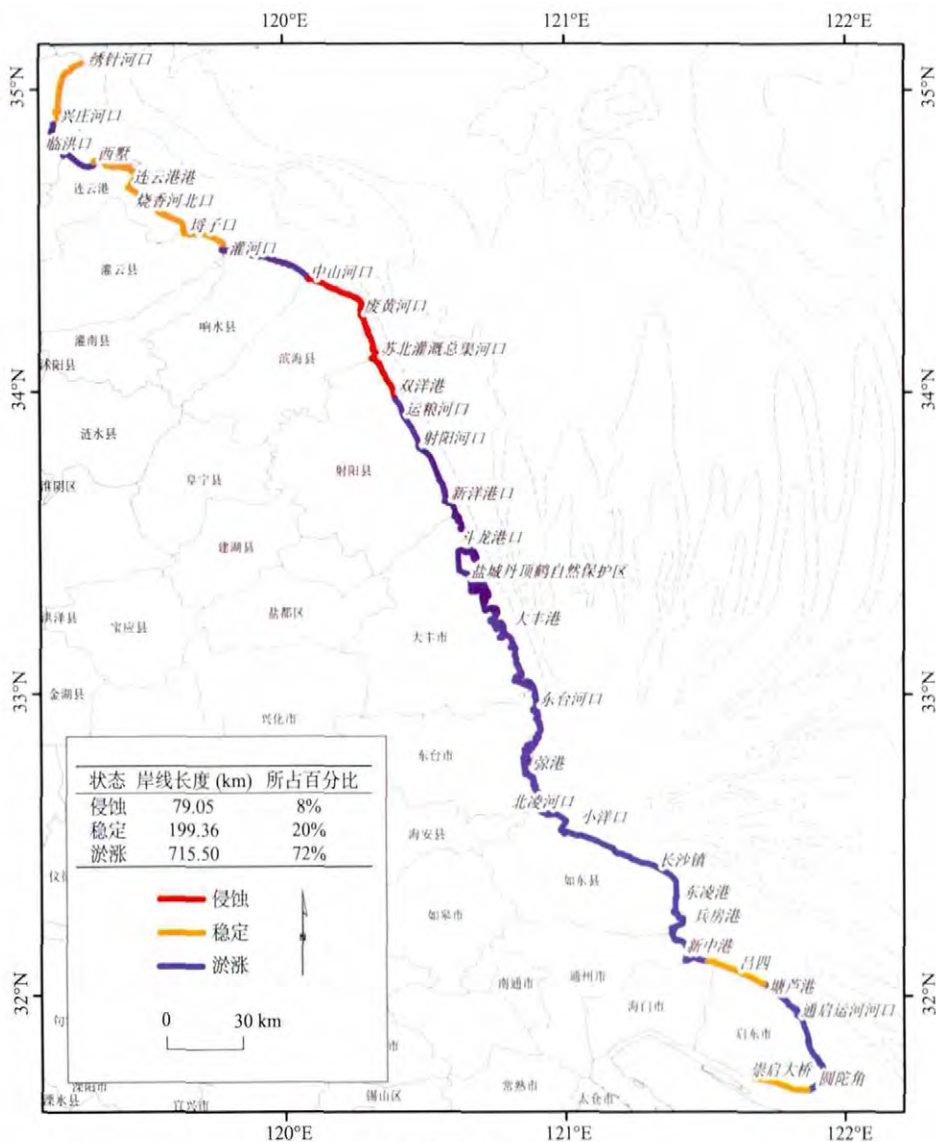


图3 江苏省海岸冲淤现状

Fig. 3 Shoreline change patterns along Jiangsu coast

弶港为中心，辐射沙洲位于其外缘；其他部分稳定岸段与淤涨岸段相间存在（图3）。其中，显著侵蚀岸段长度约79.05 km，占研究区岸线总长度的8%；稳定岸段长度199.36 km，占总长度的20%；显著淤涨岸段长约715.50 km，占72%。考虑到人工围垦的进度往往与自然冲淤变化相一致，即自然淤涨较快的岸段围垦力度较大，自然淤涨较慢或侵蚀的岸段围垦力度较小或不围垦，一部分稳定岸段很可能是侵蚀海岸，因此实际的侵蚀岸段长度可能超过25%。

4.2 江苏省岸线变化空间分异特征

4.2.1 江苏省北部海岸 江苏省北部海岸所在的县级行政区有赣榆县、连云区、灌云县、响水县、滨海县和射阳县。该区集中了江苏省所有的海岸类型。绣针河口至兴庄河口为砂质平原海岸，西墅至烧香河北口为基岩海岸，兴庄河口至西墅及其余部分岸段为粉砂淤泥质海岸。从计算结果可以看出（图4），主要的淤涨海岸位于兴庄河口至西墅、灌河口至

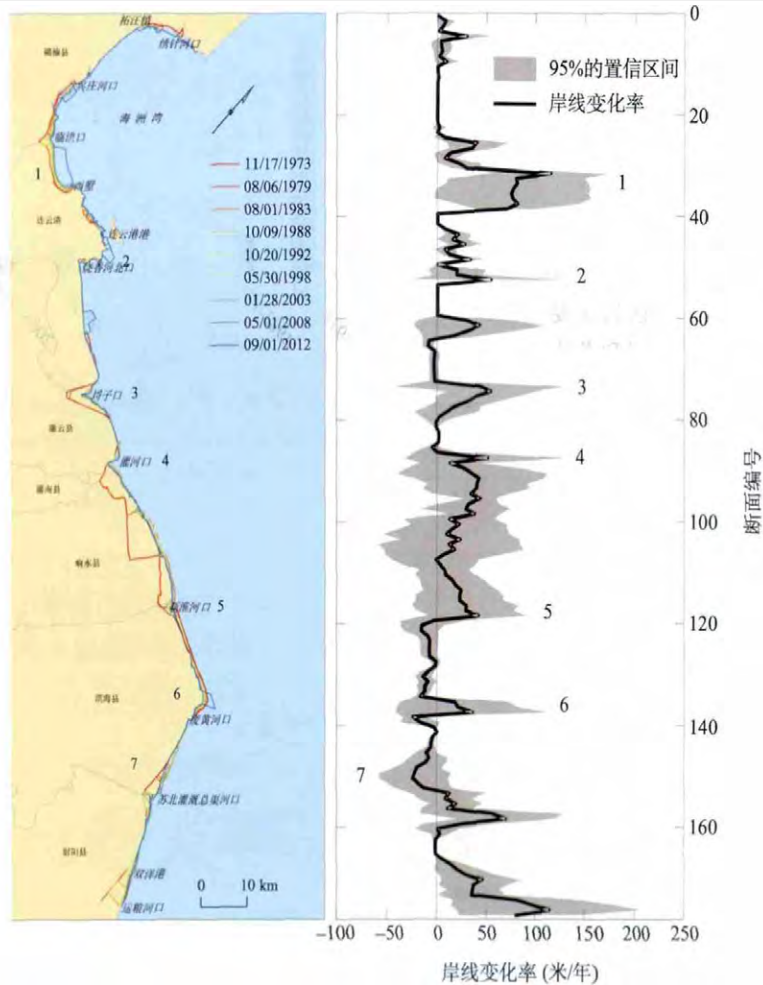


图4 江苏省北部岸线变化率

Fig. 4 Shoreline change rates of the northern Jiangsu coast

新淮河口以及双洋港以南。最大淤涨速率为 $114.18\pm19.76\text{ m/a}$ ，位于海洲湾临洪河口与西墅之间，该岸段为粉砂淤泥质海岸，2009年大面积的围垦对岸线变化率的贡献最大。侵蚀海岸主要位于以废黄河口为中心的南北两侧，南侧至双洋港，北侧至新淮河口。最大侵蚀速率为 $-23.37\pm11.92\text{ m/a}$ ，位于废黄河口南侧。从岸线变化率分析结果结合已有的文献资料还可以发现，一些原本侵蚀的海岸由于受到人为的影响已基本趋于稳定，岸线变化率接近于0，如兴庄河口以北至拓汪镇、烧香河口以南至灌河口，但局部地区受近期围垦的影响，岸线变化率有较大的增长。

由图5的岸线围垦面积变化情况可以看出，江苏省北部岸线由于存在部分侵蚀岸段目前围垦力度较小。局部的围垦主要发生在1973-1983年和2008年以后。1973-1983年间，围垦区域主要集中在埭子口、灌河口和新淮河口附近，增加围垦面积约 $120.4\text{ km}^2$ 。1983-2008年围垦力度相对较小，25年间共围垦 $45.3\text{ km}^2$ ，主要位于在临洪河口至西墅之间。2008-2012年间，临近兴庄河口以南、临洪河口至西墅，以及废黄河口、苏北灌溉总渠入海口和双洋港附近均有围垦发生，新增围垦面积约 $30.9\text{ km}^2$ 。1973-2012年共向海推进 $196.6\text{ km}^2$ 。

**4.2.2 江苏省中部海岸** 江苏省中部海岸所在的县级行政区有射阳县、大丰市、东台市、



如东县，主要海岸类型为粉砂淤泥质海岸。从计算结果可以看出（图6），淤涨较快的岸段主要位于射阳河口至北凌河口之间，其中新洋港口、大丰港和弶港附件淤涨最为迅速，淤涨速率多超过 100 m/a，最快淤涨速率为  $445.37\pm66.80$  m/a，位于射阳河口南侧。岸线变化较慢的区域主要位于新洋港口至斗龙港口之间和北凌河口以南，岸线变化率多小于 100 m/a，最慢速率为  $12.56\pm2.94$  m/a，出现在新洋港口南侧。其中，辐射沙洲即以弶港为中心，弶港潮滩是典型的淤涨型淤泥质潮滩。

从图7的岸线围垦面积变化情况可以看出，江苏省中部岸线的围垦速度较快，大体上可以1979年和1993年为界分为三个时段，1973-1979年和1993年以后的围垦速度较快，1979-1993年的围垦速度相对较慢。其中，1973-1977年的围垦区域主要位于斗龙港和大丰

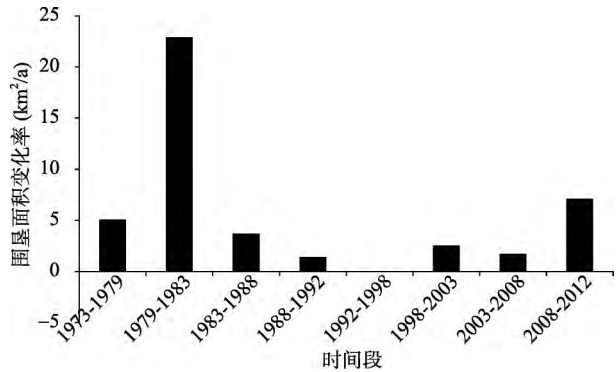


图5 江苏省北部岸线围垦面积变化情况  
Fig. 5 Reclamation area change of the northern Jiangsu coast in different periods

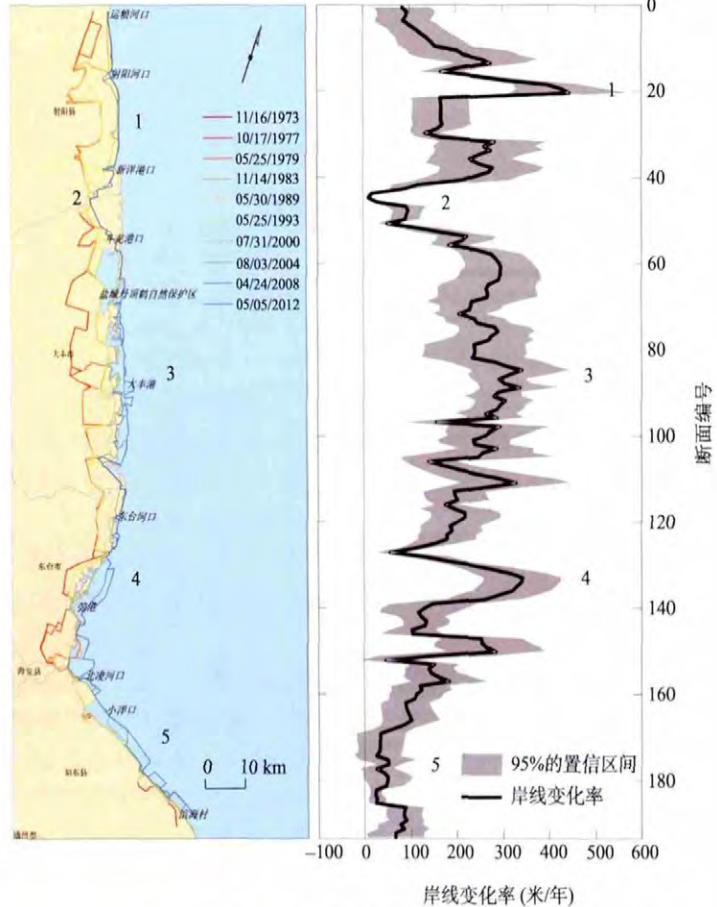


图6 江苏省中部岸线变化率  
Fig. 6 Shoreline change rates of the middle Jiangsu coast

港之间，1977-1979年的围垦区域主要在大丰港和弶港附近。1979-1993年围垦力度较小，主要发生在新洋港口、江界河口和弶港附近。1993年以来整个中部岸线几乎全线均有不同程度的围垦，累计新增围垦面积约824.0 km<sup>2</sup>，尤其以大丰港和弶港附近岸段围垦最为强烈。1973以来总计围垦面积约1414.2 km<sup>2</sup>。

**4.2.3 江苏省南部海岸** 江苏省南部海岸所在的县级行政区有如东县、通州市、海门市和启东市，为淤泥质海岸类型。从岸线变化率结果可以看出（图8），该区全部海岸都是淤涨海岸。从滨海村至新中港岸段为淤涨最快的部分，最快淤涨速率287.48±83.55 m/a，位于兵房港附近；其次是塘芦港至圆陀角岸段，平均岸线变化率超过50 m/a。而新中港-吕四-塘芦港岸段为稳定型海岸，但近年来围垦力度较大。圆陀角至崇启大桥北岸的海岸基本没有发生变化。

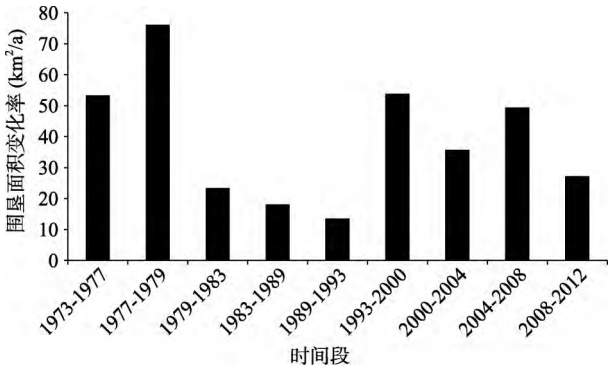


图7 江苏省中部岸线围垦面积变化情况

Fig. 7 Reclamation area change of the middle Jiangsu coast in different periods

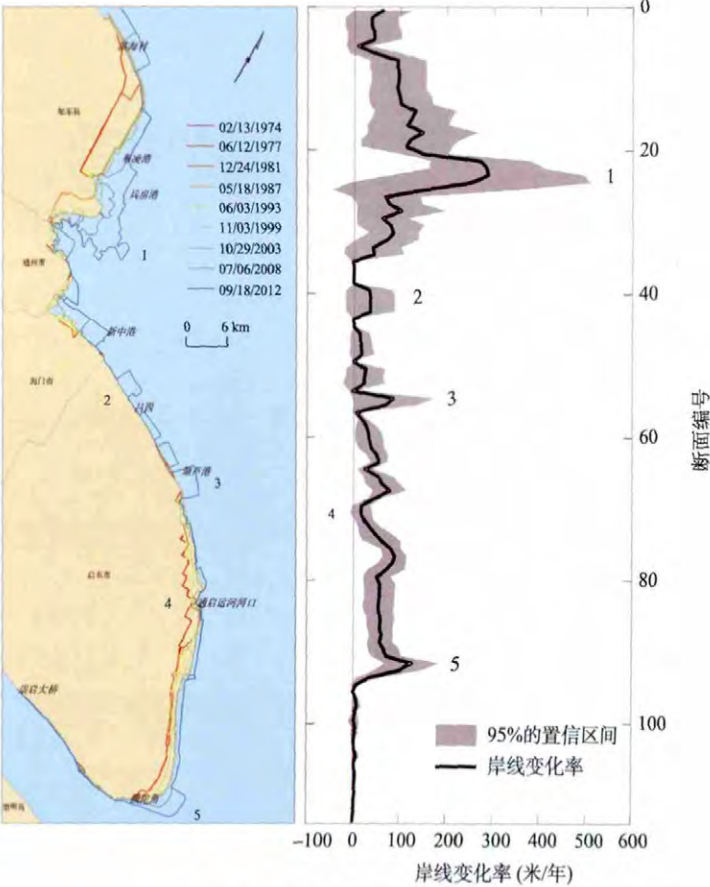


图8 江苏省南部岸线变化率

Fig. 8 Shoreline change rates of the southern Jiangsu coast

从图9的岸线围垦面积变化情况可以发现,总体上江苏省南部海岸的围垦力度呈递增趋势。1999年之前围垦速度较慢,其中,1974-1977年和1981-1987年基本没有任何围垦发生,1981-1987年的负值应为岸线解译误差所致;1977-1981年的围垦主要位于东凌港附近,面积约64.5 km<sup>2</sup>;1987-1993年的围垦主要发生在兵房港与环本港之间的区域,以及邻近圆陀角以北的岸段;1993-1999年间的围垦力度较小,主要在吕四以南和圆陀角以北的部分岸段。1999年以后围垦速度快速增长,至2012年累计增长面积约214.1 km<sup>2</sup>。1999-2008年的围垦区域主要位于新中港以北及塘芦港至圆陀角之间,而2008年以来对吕四附近即新中港至塘芦港之间的岸段也进行了围垦。1974-2012年总计向海推进面积301.6 km<sup>2</sup>。

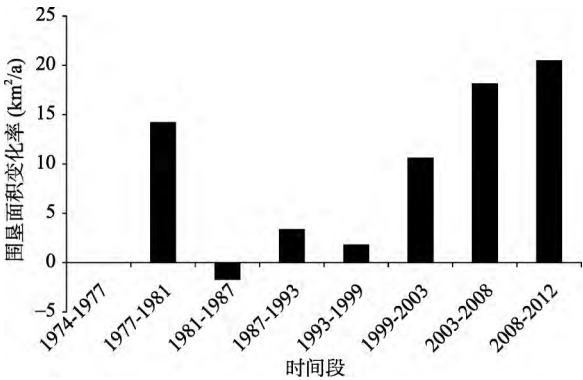


图9 江苏省南部岸线围垦面积变化情况  
Fig. 9 Reclamation area change of the southern Jiangsu coast in different periods

5 结论与讨论

本文利用1973-2012年28景Landsat遥感影像,以最外侧海堤作为岸线指标,在GIS环境下对江苏省全部岸线进行变化分析,得到了精确的计算结果,从数据获取、预处理、数字岸线的获取到变化分析、误差计算,形成了较完善的技术流程。结果表明,采用本文的技术路线可以满足快速岸线监测和分析的要求。根据岸线变化率计算结果,江苏省海岸演变具有明显的时空差异性,淤涨与蚀退并存。显著侵蚀岸段以废黄河口为中心,北至新淮河口,南至双洋港,长度约79.05 km,占研究区岸线总长度的8%;淤涨岸段以弶港为中心,北至运粮河口,南至新中港,长约715.50 km,占72%;其它部分稳定岸段与淤涨岸段相间存在。最大侵蚀速率为-23.37±11.92 m/a,位于废黄河口南侧;最大淤涨速率为445.37±66.80 m/a,位于射阳河口南侧。

人类活动对地球系统的影响日益显著,被称为“第三驱动力”<sup>[22]</sup>。江苏海岸受人类活动的影响由来已久,尤其到现代,各种围垦工程成为塑造海岸形态的重要力量。分析发现,1973年以来总围垦面积1912.4 km<sup>2</sup>,中部围垦最强,总面积达1414.2 km<sup>2</sup>;南部次之,为301.6 km<sup>2</sup>;北部最弱,为196.6 km<sup>2</sup>。1980年前后出现了一个围垦高峰期,之后围垦强度明显减弱进入休养期。90年代江苏省提出的“海上苏东”计划导致了新一轮的围垦高峰。目前,新一轮的围垦规划与历史岸线演变趋势基本一致,中南部区域有所加强。在此背景下,江苏省海岸形态及近岸水动力环境将面临新的调整,因此围垦实施过程中,有必要加强岸线及水文监测研究,以指导围垦工作的科学开展。

参考文献(References)

[1] Berger A R, Iams W J. Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996.

- [2] Boak E H, Turner I L. Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(4): 688-703.
- [3] Gens R. Remote sensing of coastlines: Detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1819-1836.
- [4] Pardo-Pascual J E, Almonacid-Caballer J, Ruiz L A, et al. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 1-11.
- [5] Al Fugura A'kif, Billa L, Pradhan B. Semi-automated procedures for shoreline extraction using single RADARSAT-1 SAR image. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(4): 395-400.
- [6] Yang B, Hwang C, Cordell H K. Use of LiDAR shoreline extraction for analyzing revetment rock beach protection: A case study of Jekyll Island State Park, USA. *Ocean & Coastal Management*, 2012, 69: 1-15.
- [7] Almar R, Ranasinghe R, Sénéchal N, et al. Video-based detection of shorelines at complex meso-macro tidal beaches. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(5): 1040-1048.
- [8] 黄海军, 王珍岩, 张忍顺. 航测、卫星遥感和GIS研究海岸动态变化的误差分析. *海洋科学*, 2002, 26(3): 8-10. [Huang Haijun, Wang Zhenyan, Zhang Renshun. The error analysis of the methods of monitoring the beach changes using digital photogrammetry, satellite images and GIS. *Marine Sciences*, 2002, 26(3): 8-10.]
- [9] 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. *地理学报*, 2012, 67(3): 377-387. [Liu Yanxia, Huang Haijun, Qiu Zhongfeng, et al. Monitoring change and position of coastlines from satellite images using slope correction in a tidal flat: A case study in the Yellow River delta. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 377-387.]
- [10] 常军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系. *地理研究*, 2004, 23(5): 339-346. [Chang Jun, Liu Gaohuan, Liu Qingsheng. Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation. *Geographical Research*, 2004, 23(5): 339-346.]
- [11] 周良勇, 张志珣, 陆凯. 1985-2002年江苏粉砂淤泥质海岸岸线和围海变化. *海洋地质动态*, 2010, 26(6): 7-11. [Zhou Liangyong, Zhang Zhixun, Lu Kai. Shoreline change and reclamation of silty coast in Jiangsu province during 1985-2002. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(6): 7-11.]
- [12] 陆晓燕, 杨智翔, 何秀凤. 2000-2009年江苏沿海海岸线变迁与滩涂围垦分析. *地理空间信息*, 2012, 10(5): 57-59. [Lu Xiaoyan, Yang Zhixiang, He Xiufeng. Analysis of monitoring shoreline changes and tidal flat reclamation of Jiangsu from 2000 to 2009. *Geospatial Information*, 2012, 10(5): 57-59.]
- [13] 杨智翔. 利用遥感技术监测江苏海岸线变迁与滩涂围垦. *人民黄河*, 2013, 35(1): 85-87. [Yang Zhixiang. Monitoring coastline changes and tidal flat reclamation in Jiangsu using remote sensing. *Yellow River*, 2013, 35(1): 85-87.]
- [14] 张长宽, 陈君, 林康, 等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2011, 39(2): 206-212. [Zhang Changkuan, Chen Jun, Lin Kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(2): 206-212.]
- [15] Dolan R, Hayden B P, May P, et al. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 1980, 48(4): 22-29.
- [16] 王颖. 中国区域海洋学: 海洋地貌学. 北京: 海洋出版社. 2012. 281. [Wang Ying. *Regional Oceanography of China seas: Marine Geomorphology*. Beijing: China Ocean Press, 2012. 281.]
- [17] 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. *海洋通报*, 2011, 29(6): 658-663. [Liu Yanchun, Zhang Ying. Study on the tidal flat evolution through changes of coastline and beach line of Sheyang River estuary by the remote sensing. *Marine Science Bulletin*, 2011, 29(6): 658-663.]
- [18] 曲伟秀, 张鹰, 刘燕春. 围垦对射阳河口海岸地形的影响. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(2): 220-223. [Qiu Weixiu, Zhang Ying, Liu Yanchun. Impacts of reclamation on coastal topography in Sheyang Estuary. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(2): 220-223.]
- [19] 李开涛, 徐向红. 基于可持续发展的江苏滩涂围垦与湿地保护. 见: 中国水利学会水资源专业委员会. 中国水利学会2005学术年会论文集: 水环境保护及生态修复的研究与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 127-135. [Li Kaitao, Xu Xianghong. Sustainable development based tidal flat reclamation and wetland protection in Jiangsu province. In: *Water Resources Commission, Chinese Hydraulic Engineering Society (CHES\_CWR). Chinese Hydraulic Engineering Society 2005 Annual Meeting Proceedings: Study and Practice of Water Environment*



- Protection and Bioremediation. Beijing: China Water & Power Press, 2005. 127-135.]
- [20] 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. [Li Xing, Zhou Yunxuan, Kuang Runyuan. Analysis and trend prediction of shoreline evolution in Chongming Dongtan, Shanghai. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 417-424.]
- [21] Thieler E R, Himmelstoss E A, Zichichi J L, et al. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278, <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/>. 2009.
- [22] 陈吉余, 程和琴, 戴志军. 河口过程中第三驱动力的作用和响应: 以长江河口为例. 自然科学进展, 2008, 18(9): 994-1000. [Chen Jiyu, Cheng Heqin, Dai Zhijun. Effect and response of the third driving force in estuary process: an example of the Yangtze estuary. Progress in Natural Science, 2008, 18(9): 994-1000.]

## Spatiotemporal changes of Jiangsu coastline: A remote sensing and GIS approach

LI Xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Lianpeng<sup>1</sup>, JI Changchen<sup>3</sup>, LIU Hongying<sup>4</sup>, HUANG Qiaohua<sup>3</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

3. School of Urban and Environmental Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

4. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Remote sensing and GIS techniques were used to extract the digital coastlines from the Landsat MSS/TM/ETM+ images obtained from 1973 to 2012, and to analyze the shoreline and reclamation area change of the Jiangsu coast. The remarkable erosion section is located in the abandoned Yellow River Delta, north to the mouth of the New Huaihe River, south to Shuangyang Port, with a length of 79.05 km, accounting for 8% of the total length of the Jiangsu coast. The main accretion section is centered in Jianggang Port, north to the mouth of the Yunliang River, south to Xinzhong Port, with a length of 715.50 km, accounting for 72% of the total length of the coast. The stable and accreting sections occur alternately in the rest of the coast. The maximum erosion rate is  $-23.37 \pm 11.92$  m/a, occurring at the south side of the mouth of the abandoned Yellow River. The maximum accretion rate is  $445.37 \pm 66.80$  m/a, occurring at the south side of the mouth of the Sheyang River. Reclamation is the main factor affecting the shoreline change along the Jiangsu coast. In general, a coastal area of about 1912.4 km<sup>2</sup> was reclaimed during the last 40 years from 1973 to 2012. The reclamation peak was found around 1980, then the reclamation rate reduced obviously, and reclamation activities have been reactivated since the 1990s.

**Key words:** coastline change; remote sensing; GIS; Jiangsu province