

图们江口及邻近区域海岸线遥感监测及变化分析

苗俊伟^{1,2}, 马毅^{1,2}, 张杰^{1,2}, 孙伟富², 胡亚斌^{2,3}

(1. 山东科技大学 青岛 266590; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061;
3. 大连海事大学 大连 116026)

摘要:文章利用1985、1995、2005、2009年的Landsat卫星遥感影像和2015年的GF-1卫星遥感影像,分析近30年来图们江口海岸线的变化特征。结果表明:近30年来图们江口海岸线长度整体呈增长态势,累积增加0.66 km,主要由人类开发活动及泥沙堆积等引起;人工岸线比例增大,但1985—1995年因河流改道致使岸线减少3.8 km。1985—2005年海岸带淤积面积大于侵蚀面积,其中河流改道使1995—2005年淤积面积达到4.522 7 km²;2005—2015年侵蚀面积大于淤积面积;2005—2009年径流量减少使侵蚀面积达到4.203 7 km²。河口处的岸线迁移变化最大,其他地区较稳定。

关键词:遥感;图们江口;海岸线;岸线变迁

中图分类号:P74 文献标志码:A 文章编号:1005-9857(2017)02-0039-07

Coastline Monitoring by Remote Sensing and Change Analysis in Tumen River Estuary and the Adjacent Area

MIAO Junwei^{1,2}, MA Yi^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, SUN Weifu², HU Yabin^{2,3}

(1. Shandong University of Science And Technology, Qingdao 266590, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 3. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Four years' Landsat satellite images of 1985, 1995, 2005, 2009 and one year's GF-1 remote sensing satellite images of 2015 were used to analyze the changing characteristics of the past 30 years in the Tumen River estuary coastline. The results showed that: over the past 30 years, the whole coastline length shows an increasing trend, mainly caused by human development activities and sediment buildup, and the cumulative increase is 0.66 km. The ratio of artificial shoreline increased, but between 1985 and 1995, the coastline length decreased 3.8 km because the river course was diverted. Between 1985 and 2005, the deposition area of the coastal zone was larger than that of the erosion area, and the river course was diverted to make the deposition area increase 4.522 7 km² between 1995 and 2005. From 2005 to 2015, the erosion area was greater than

收稿日期:2016-10-15;修订日期:2016-12-17

基金项目:高分海岸带遥感监测与应用示范.

作者简介:苗俊伟,硕士研究生,研究方向为海洋遥感与应用,电子信箱:rsmiaojunwei@163.com

通信作者:张杰,研究员,博士,研究方向为海洋遥感,电子信箱:zhangjie@fio.org.cn

the deposition area. From 2005 to 2009, the erosion area reached to 4. 203 7 km² because the runoff had been reduced. The shoreline at the mouth had the greatest changes in migration and other regions were more stable.

Key words: Remote sensing, Tumen River estuary, Coastline, Coastline change

1 引言

中华人民共和国国家标准《海洋学术语: 海洋地质学》(GB/T18190—2000)对海岸线的定义是: 海陆分界线, 在我国系指多年大潮平均高潮位时海陆分界线^[1]。海岸线不仅标志沿海地区的海陆分界线, 而且包含丰富的环境信息, 其变化可以直接影响潮间带的滩涂资源量以及海岸带的环境变化, 引起海岸带资源与生态过程的改变, 影响人类生产活动。因此, 对海岸线进行动态变化监测, 有利于了解海岸带的生态环境变化。

传统的海岸线获取方法主要依靠常规测量手段, 近年来 Baptista 等^[2]开始利用 GPS 结合沙滩摩托和步行方法进行岸线测量, 虽然岸线提取精度很高, 但现场踏勘费时费力且很多地区人员无法到达。与之相比, 遥感技术具有大范围、时效性强、节约资源等优势, 对于获取海岸线长时间的变化具有独特优势。

国内外在海岸线变迁遥感分析上成果颇多。在海岸线自动提取方面, Chen 等^[3]利用直方图均衡化及 Canny 边缘检测算子提取台湾西部外伞顶洲的水边线; 王李娟^[4]、晁晖等^[5]用 Sobel 算法和修复归一化水体指数提取海岸线; 以冯永玖、刘云朋为代表的学者利用 CV 模型^[6]、元胞自动机^[7-8]和岸线追踪技术^[9]等方法提取海岸线, 并在人工岸线、砂质岸线及淤泥质岸线进行应用和分析; Kuleli 等^[10]利用 Landsat TM 和 ETM+ 影像的水体指数进行阈值处理, 对二值图像矢量化后提取土耳其 5 个海岸带湿地的水边线。

在海岸线人一机交互解译提取方面, 部分学者界定遥感图像中海岸线的确切位置, 给出相应提取原则, 并对岸线提取结果进行精度验证^[11-15]。Misra 等^[16]基于 Landsat 卫星数据, 利用不同波段之间的比值区分海陆分界线, 进而人工提取海岸线; Kevin White 等^[17]基于 Landsat 系列卫星遥感影像提取尼罗河三角洲河口区域的岸线, 并研究岸线动态特征;

Mujabar^[18]通过人一机交互方法提取印度两地之间的岸线, 并利用 DSAS 分析海岸淤蚀状况; 张怡^[19]、包萌^[20]、赵宗泽^[21]、周相君^[22]基于卫星影像, 采用人一机交互方法提取海岸线, 并对其变化进行时空分析。

遥感具有范围广、多时相等特点, 国内外采用遥感手段进行海岸线变迁监测与分析较广泛。本文在建立的各岸线类型解译标志的基础上, 利用 1985、1995、2005、2009 年的 Landsat 卫星影像和 2015 年 GF-1 卫星遥感影像对图们江口及邻近区域海岸线进行提取, 从岸线长度变迁、岸线类型变化和海岸带侵蚀淤积状况等方面对图们江口地区海岸线变迁情况进行分析, 监测该区海岸线近 30 年的变化, 为该区岸线保护与开发提供科学参考。

2 研究区域

图们江大部分在中国境内, 以珲春市为截点出境, 注入日本海。图们江口地处 130°22'E—131°02'E、42°14'N—42°44'N, 涉及中、朝、俄三国, 毗邻韩、日两国, 是东北亚地区重要枢纽, 具有优越的地理位置与重要的战略地位, 未来该地区将成为我国在东北地区与其他国家进行合作交流的桥头堡, 推动东北地区大发展。

该区属温带大陆性气候, 临近日本海, 在东南季风、地形因素和日本海域的影响下, 降水和径流都比较丰富。图们江口海岸线类型以自然岸线为主, 近年来由于开发活动加剧, 河口处岸线类型及长度发生较大变化。由于地理位置特殊, 对该区域海岸线提取及变迁的研究尚为空白, 本文基于卫星遥感影像进行研究。

3 数据和方法

3.1 数据与处理

为监测图们江口地区海岸线近 30 年来的变化, 本文应用 1985 年、1995 年、2005 年、2009 年的 Landsat 影像和 2015 年的 GF-1 影像(表 1)。

表 1 研究区遥感数据源信息

卫星	传感器	空间分辨率/m	成像时间	数量/个
Landsat5	TM	30	1985 年 11 月	2
Landsat5	TM	30	1995 年 11 月	2
Landsat7	ETM+	30	2005 年 10、11 月	2
Landsat5	TM	30	2009 年 10 月	2
GF-1	PMS	8	2015 年 3 月	2

利用拼接、裁剪后的 2005 年 ETM+ 卫星影像数据对 TM 及经过正射校正的 GF-1 卫星数据进行几何配准,配准误差控制在 1 个像元之内,并对配准后的图像进行拼接裁剪,获得研究区卫星影像,利用近红外、红、绿波段组合开展海岸线提取。

3.2 方法

采用目视解译方法,根据不同海岸线类型在卫星影像中的特征建立海岸线类型的解译标志,进而提取图们江口海岸线。根据当地实际状况与卫星遥感影像信息,结合孙伟富等^[13]建立的海岸线类型遥感解译标志,将该地区海岸线分为基岩岸线、砂质岸线、粉砂淤泥质岸线与人工岸线 4 种,参考《我国近海海洋综合调查与评价专项海岸线修测技术规程》^[23]中的界定原则,结合各类海岸线的地貌特征,确定各类型岸线的位置。

基岩岸线位于由岩石组成的基岩海岸上,常有突出的海岬和深入陆地的海湾,岸线曲折。在影像中基岩岸线位于明显的水陆分界线上(图 1(a))。

砂质岸线位于砂质海岸上,砂质海岸通常较为平直,在大潮潮水搬运下常堆积成一条与海岸平行的脊状的砂质沉积——滩脊,该处即为海岸线位置。海岸的干燥滩面光谱反射率较高,在影像上表现为白亮的区域,滩脊痕迹线处堆积有植物碎屑、杂物等,亮度较低,海水的光谱反射率较低,含水量较高的沙滩光谱反射率也较低,在影像上表现略暗。在影像中砂质岸线的位置应取在滩脊痕迹线上限处(图 1(b))。

粉砂淤泥质岸线位于淤泥质海岸上,该类型海岸多由潮汐作用形成,受上冲流影响滩面坡度平缓,宽度可达数千米甚至更大。粉砂淤泥质海岸向陆一侧植被生长茂盛,成红色或者暗红色;向海一

侧植被较稀疏,呈现为浅红色或没有植被,裸露潮滩上多有树枝状潮沟发育,潮滩淹没时高潮线处植被稀疏。在影像中植被茂盛与稀疏程度明显差异处即为粉砂淤泥质岸线所在位置(图 1(c))。

人工岸线是人工建筑物形成的岸线,在影像上建筑物一般亮度较高,呈白色,狭长延伸分布,纹理平滑,堤外淤泥质滩涂颜色灰暗,人工岸线一般确定在建筑物外缘(图 1(d))。

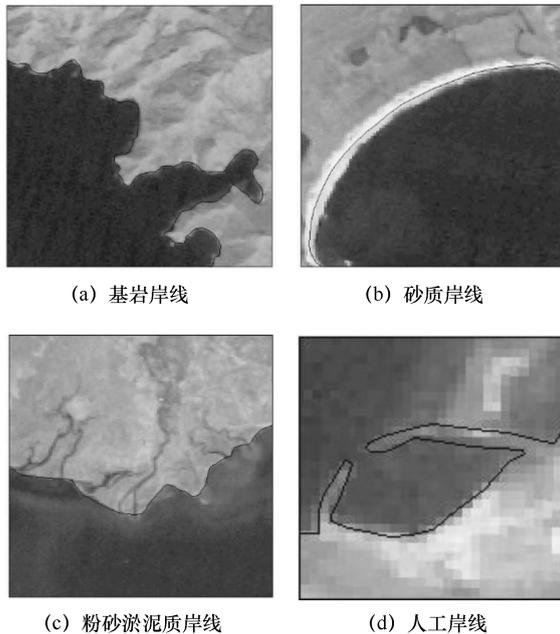


图 1 海岸线遥感解译标志

在海岸线提取结果上,从岸线长度、岸线类型、海岸带侵蚀淤积、迁移速率 4 个方面对 5 期海岸线进行变化监测,并根据卫星图像及文献资料分析岸线变化的主要原因。

4 结果与分析

4.1 岸线时空变迁总体分析

通过 5 期卫星遥感图像的海岸线提取结果可以发现:1985—2015 年图们江口区域的海岸线变迁主要发生在河口地区,其他地区变化较弱;目前岸线长度为 320.78 km,较 1985 年增加 0.66 km,陆域面积增加 1.000 4 km²,泥沙堆积使岸线长度增加,港口码头建设也增加岸线长度。

海岸线变迁程度受自身与外部因素影响。一方面,在海岸线各类型中,基岩岸线最为稳定,受外界自然因素影响较小,而砂质岸线与粉砂淤泥质岸

线较为脆弱,易受环境影响;另一方面,自然因素对海岸线的变迁作用较为缓慢,而人为因素可在极短时间内产生自然因素影响几十年才能产生的变化,人类活动一直在岸线变迁中起主导作用。

4.2 岸线类型转化分析

根据提取的5期图们江口区域海岸线,获取5期岸线类型信息(表2)。

表2 不同年份各类型海岸线的长度统计

年份	总长/km	基岩岸线		砂质岸线		人工岸线		粉砂淤泥质岸线	
		长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%
1985	320.12	139.18	43.5	157.53	49.2	10.21	3.2	13.21	4.1
1995	316.32	139.15	44.0	155.89	49.3	10.38	3.3	10.91	3.4
2005	318.82	138.69	43.5	158.47	49.7	10.79	3.4	10.88	3.4
2009	320.81	138.32	43.1	158.66	49.5	11.29	3.5	12.54	3.9
2015	320.78	138.31	43.1	158.67	49.5	11.35	3.5	12.45	3.9

结果表明:岸线总长度及各类型岸线长度均存在波动变化。1985—2015年由于人类活动使基岩岸线减少;砂质岸线整体增长,主要是河道内泥沙堆积引起,其中1985—1995年砂质岸线大量减少的主要原因是河流改道,1995—2005年河流再次改道,砂质岸线有所增加;由于修建港口码头、防护堤等人类活动,人工岸线持续增加;粉砂淤泥质岸线的变化与河流径流量及海浪冲刷关系较大,但1985—2005年粉砂淤泥质岸线减少的原因与砂质岸线类似,均为河流改道,而2005—2009年河道再次改变,粉砂淤泥质岸线长度增加,但与改道前相比长度减少,2009年之后海浪冲刷使河口处粉砂淤泥质岸线继续减少。整体上自然岸线比例减小、人工岸线比例增大,说明该区开发利用进一步加强。

4.3 海岸带侵蚀淤积分析

图们江口及邻近区域1985—2015年由于海岸线变迁导致陆地面积净增 1.0004 km^2 ,平均每年增加 0.0333 km^2 (表3)。

表3 海岸带侵蚀淤积统计 km^2

年份	侵蚀面积	淤积面积
1985—1995	0.8929	2.2380
1995—2005	0.4719	4.5227
2005—2009	4.2037	0.2857
2009—2015	0.9142	0.4367

情况不同,主要是由海水侵蚀、河流径流量变化、人类开发与泥沙堆积共同作用引起的。1985—1995年虽然河流改道侵蚀面积较大,但河流径流量充沛,泥沙堆积使岸线加长,加之围海造陆使淤积面积大于侵蚀面积,海岸带总面积增加;1995—2005年河流再次改道,使淤积面积远大于上一时期,海岸带增长面积也比上一时期大;2005—2009年降水减少、径流量减小,泥沙补充不足,原本在河口处的部分陆地变成沙洲,导致海岸带侵蚀加大,该时期内海岸带面积减小;2009—2015年径流量增大,但洪水冲刷河道导致河道侵蚀,使海岸带面积减小。

图们江口区域1985—2015年海岸带地区侵蚀淤积变化共存。其中岸线减少的主要原因是河流改道、泥沙补充不足导致侵蚀,以及在入海口地区海浪对砂质岸线的冲刷侵蚀。如,由于图们江位于松辽流域,根据松辽流域河流泥沙公报,2005—2009年该流域多属于枯水少沙状态,水量、沙量明显减少^[24],泥沙补充不足;同时在日本海海浪的侵蚀下,河口堆积的泥沙后退,侵蚀面积增大。2009—2015年该流域河流径流量变大、总输沙量增大,尤其是2010年发生洪水灾害^[24],使河流径流增大、携带泥沙量增大,导致2009—2015年砂质岸线略微变长,海岸带淤积面积较上一时期增大;但由于发生洪水时河流水速较快,对河道猛烈冲刷产生侵蚀,加之海浪的侵蚀作用,使侵蚀面积大于淤积面积,因此海岸带面积依旧呈减少态势。

图们江口区域1985—2015年4个时段的变迁

4.4 海岸线迁移分析

目前量化分析海岸线变迁的主要方法较多^[25],本研究选用基线法分析图们江口地区 30 年来的海岸线迁移状况。

基线法最早由 Doln 等^[26]提出,经过 Thieler 等^[27]的进一步完善,形成基于 ArcGIS 平台的“Digital Shoreline Analysis System, DSAS”功能模块,用于分析海岸的时空变化状况。采用 DSAS 分析模块,由海岸线向陆纵深得到基线并使海岸线在基线同侧,然后从基线向海岸线一侧做长度为 D 的垂线,与基线交点间的距离为基线采样间隔,每根垂线与各时期的海岸线相交,将每个交点至基线的距离相减,可得海岸线的变化距离。

本文选用的基线由手工绘制,基线采样间隔为 50 m,由 DSAS 分析得到最终时空变化(图 2)。

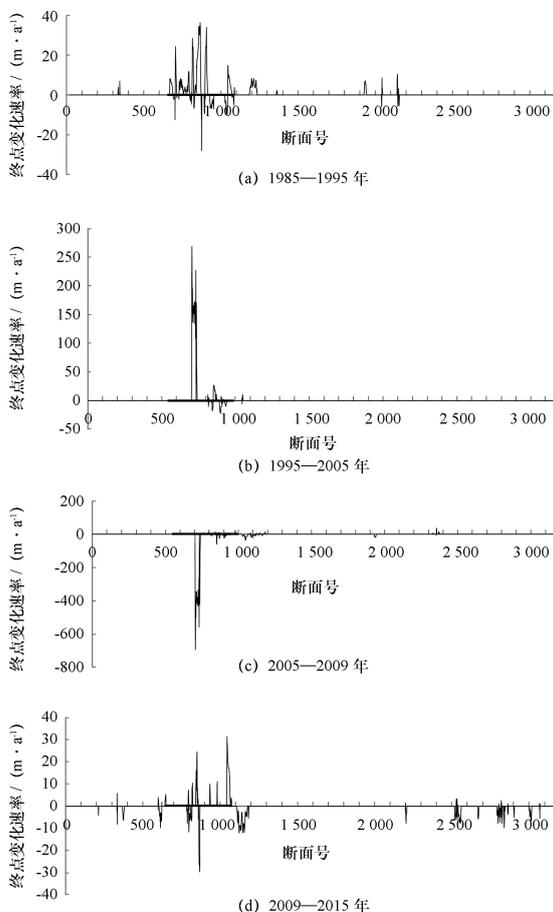


图 2 各时期不同区域终点变化速率分布

* 注:加重线段为河口区域

从海岸线终点变化速率及其分布空间来看,1985—2015 年河口地区(断面号大约位于 669~1 088)海岸线变化较为明显,其他地区变化较少。1985—1995 年由于河道部分地区泥沙淤积使岸线向水域推进,导致终点变化速率为正值,而河口地区由于河流改道使河口边界向陆地推移,终点变化速率为负值且变化速率较大。1995—2005 年河口位置再次发生变化,向水域猛烈推进,导致终点变化速率值巨大且为正值。2005—2009 年河口推进情况与上一时段相反,终点变化速率值为负值且数值巨大。2009—2015 年由于部分地区河道位置改变以及河口岸线位置改变,加之岸线推移较短,该时段终点变化速率较小、范围较广。除河口区域外的其他变化区域终点变化速率值较小且变化范围较小,主要是因为人类活动少,河流宽度较窄、多为细小河流,河道位置变化较小,河流径流量对河口区域影响较弱。

通过对比不同时期的变化可以发现,发生变化的断面越来越多,横轴右侧处(约在断面号 2 200 后)波动区域增加;根据断面号定位到遥感图像上,发现变化地区向北推进且变化率较大的断面号多分布在砂质岸线与基岩岸线处,由此说明该区砂质岸线受海浪影响加重,查阅资料并将断面号定位到遥感影像上可知,该地区沿海开发活动进一步增强。

5 岸线变迁原因

海岸线变迁驱动力复杂,通常受自然和人为因素双重影响,前者包括河流输沙量、风暴潮、气候变化、海浪和潮汐等,后者包括海岸工程采砂、岸堤修建、养殖池和盐池建设、围海造陆等。通过阅读研究区的历史资料及相关文献,并参考不同时期的遥感卫星影像,结合本文得出的岸线分析结果,进一步分析岸线变迁原因。

5.1 自然因素

从长时间序列看,海岸线变迁的主要自然因素是地壳运动和海平面升降;从短时间序列看,海岸线变迁的主要自然因素为海岸侵蚀、海水入侵、海浪、潮汐和风暴潮等。具体到图们江口,影响其大陆海岸线变迁的自然原因主要有以下几个方面。

5.1.1 波浪及潮流的作用

改变海岸地貌的主要外动力为波浪和潮流。

波浪在海岸塑造中最积极、最活跃,靠近东海的朝鲜海峡(大韩海峡)处的海潮潮差可达 2 m,剧烈的海浪对该区岸线的变化起到推动作用;潮流是泥沙运营的主要动力,沿东岸北流的对马暖流和沿西岸南流的利曼寒流组成日本海海流,形成反时针型的环流系统^[28]。在波浪、潮流等动力作用下,近岸泥沙发生转运,以沙嘴的形式形成堆积岸段;随着沙嘴的迁移,岸段另一端发生侵蚀,形成相对侵蚀的海岸。以 2005—2009 年为例,在图们江入海口附近,由于形成反时针型环流系统,在近海一端波浪从北向南流,在海浪和潮汐作用下海岸发生侵蚀;而在远海一端海浪侵蚀不到,从而发生淤积。

5.1.2 河流径流的作用

该区位于欧亚大陆东岸,属温带大陆气候,受东南季风、地形因素和日本海域的影响,降水和径流都比较丰富,因此降水对径流影响较大,二者分布规律大体相一致。近年来气候变化等因素使河流输沙逐渐减少,通过查阅松辽流域河流公报^[24]可以发现,2005—2009 年由于流域内径流量减少、河流输沙量减少,导致河流入海口附近的泥沙堆积减少;而 2010 年发生洪水灾害,河流带来大量泥沙,并在河道及河口堆积,使该流域入海口的岸线又变长。

5.2 人为因素

该区海岸线变化的主要原因是以填海造地为代表的各种人为活动。在人类活动的影响下,自然岸线总长度缩短、人工岸线增加、岸线形态更为曲折。总体看来,以下因素对于图们江口地区海岸线时空动态变化特征具有不同程度的影响。

5.2.1 港口码头的修建

该区地理位置复杂重要,各国为提高在该区的实力在海湾地区大力修建港口,促进海上经济发展。大规模的建设改变海湾的位置形状,如在朝鲜造山湾附近修建港口使岸线位置及类型发生变化。

5.2.2 防护堤坝的修建

近年来海平面上升和极端气象灾害频发,使岸线遭受严重威胁。为加固海岸,人工堤坝逐渐出现,保护岸线不受侵蚀,如河口南部地区在原始自然岸线的基础上修建人工岸线及堤坝。防护堤坝在人工岸线中所占比例较大,也是该区人工岸线变

化的主要类型。

6 结论

本文利用图们江口地区 1985 年、1995 年、2005 年、2009 年的 Landsat 影像和 2015 年的 GF-1 影像,基于 GIS、RS 技术,对 5 期海岸线进行信息提取,分析图们江口地区海岸线长度、类型、侵蚀淤积、岸线迁移的变化情况。

将研究区海岸线分为基岩岸线、砂质岸线、粉砂淤泥质岸线和人工岸线 4 类,以近红外、红、绿波段组合假彩色影像,根据不同岸线的特征建立图们江口地区主要岸线类型的遥感解译标志,并给出 4 类岸线的提取原则,经过目视解译提取得到最终的海岸线。

从岸线的长度、类型、侵蚀淤积、岸线迁移等方面对 5 期岸线的分布状况分别进行统计分析。结果表明,30 年间图们江口地区岸线长度增减共存,但总体上呈增加趋势;1985—2015 年共增加 0.66 km,原因是泥沙堆积使砂质岸线增长,而且人类开发活动也使岸线有所增长。从整个研究时期看,30 年间岸线类型的转化较为平缓,其中减少最多的是基岩岸线,共减少 0.87 km,减少的岸线多转变为人工岸线;增长最多的则是人工岸线与砂质岸线,均为 1.14 km,岸线变迁态势较稳定。1985—2005 年淤积面积大于侵蚀面积,其中 1985—1995 年因径流量充沛和人类开发活动加大,淤积面积为 2.238 0 km²、侵蚀面积仅为 0.892 9 km²;1995—2005 年河流改道使淤积面积达到 4.522 7 km²,侵蚀面积较上一时间段约减少 50%;2005—2015 年侵蚀面积大于淤积面积,2005—2009 年因径流量减少,侵蚀面积达到 4.203 7 km²;2009—2015 年侵蚀面积又有大幅度减少。30 年间因海岸线变迁导致陆域面积累积新增 1.000 4 km²。通过对比 4 个时期的终点变化速率分布可以发现,整体上岸线波动范围较小,河口地区岸线变化波动较大且变化区域向北移动,变化点多分布于砂质岸线与基岩岸线处。

人类活动在岸线变迁中作用时间短、效果明显,是岸线变迁的主要推动力,如港口及防护堤坝的修建都能在短时间内改变岸线长度及岸线类型。而自然因素在岸线变迁中推动缓慢、效果不明显,

如在不发生特殊气象灾害的情况下,海浪及河流径流量对岸线的影响效果要在几年内才可显现,且作用效果较小。

由于本文使用的 Landsat 影像为中低分辨率影像,对海岸线的目视解译造成一定的困难,使海岸线的提取结果存在偏差,今后将选用分辨率更高的影像进一步研究。此外,在岸线精度评价中,由于该区地理位置特殊,研究尚不全面,如缺乏实测岸线,不能更好地判断本文提取岸线的精度。今后将对该地区收集实测数据,获得实际海岸线位置。

参考文献

- [1] GB/T18190—2000 海洋学术语:海洋地质学[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [2] BAPTISTA P, CUNHA T, BERNARDES C, et al. A precise and efficient methodology to analyse the shoreline displacement rate[J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, 27(2): 223—232.
- [3] CHEN W W, CHANG H K. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2009, 84(1): 54—60.
- [4] 王李娟,牛铮,赵德刚,等.基于 ETM 遥感影像的海岸线提取与验证研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 235—239.
- [5] 晁晖,梁娜.遥感技术支持下海岸线提取算法[J]. *河北联合大学学报:自然科学版*, 2014(3): 82—85.
- [6] 刘云朋,王建梅,楼立志.基于 ALOS 影像与 CV 模型的瞬时海岸线提取[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014(2): 91—95.
- [7] 冯永玖,韩震.海岸线遥感信息提取的元胞自动机方法及其应用[J]. *中国图像图形学报*, 2012, 17(3): 441—446.
- [8] FENG Y J, LIU Y, LIU D. Shoreline mapping with cellular automata and shoreline progradation analysis in Shanghai, China from 1979 to 2008 [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, DOI:10.1007/s12517-0140-1515-7.
- [9] 冯永玖,袁佳宇,宋丽君,等.杭州湾海岸线信息的遥感提取及其变迁分析[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(2): 345—352.
- [10] KULELI T, GUNEROGLU A, KARSLI F, et al. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(10): 1141—1149.
- [11] 张霞,庄智,张旭凯,等.秦皇岛市海岸线遥感提取及变化监测[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(4): 625—630.
- [12] 巢子豪,高一博,李彦辉,等.基于遥感和 GIS 的海州湾海岸线提取方法研究[J]. *淮海工学院学报:自然科学版*, 2014(4): 87—91.
- [13] 孙伟富,马毅,张杰,等.不同类型海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究[J]. *测绘通报*, 2011(3): 41—44.
- [14] WANG Changying, ZHANG Jie, SONG Pingjian. An intelligent coastline interpretation of several types of seacoasts from TM/ETM+ images based on rules[J]. *Acta Oceanologica Sinica-English Edition*, 2014, 33(7): 89—96.
- [15] MARFAI M A, ALMOHAMMAD H, DEY S, et al. Coastal dynamic and shoreline mapping: multi-sources spatial data analysis in Semarang Indonesia[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, 142(1—3): 297—308.
- [16] MISRA A, BALAJI R. A Study on the Shoreline Changes and Land-use/ Land-cover along the South Gujarat Coastline [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116(1): 381—389.
- [17] KEVIN W, HESHAM M. Monitoring changing position of coastlines using thematic mapper imagery, an example from the Nile delta [J]. *Geomorphology*, 1999, 29: 93—105.
- [18] MUJABAR S, Chandrasekar. A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2011, 14(4): 282—293.
- [19] 张怡,李晓敏,马毅,等.基于遥感的珠江口海岸线变迁分析[J]. *海洋测绘*, 2014, 34(3): 52—55.
- [20] 包萌,孙伟富,马毅,等.近 40 年来清澜湾海岸线及其邻接地物遥感监测与变迁分析[J]. *海岸工程*, 2014, 33(02): 66—76.
- [21] 赵宗泽,刘荣杰,马毅,等.近 30 年来涇洲湾海岸线变迁遥感监测与分析[J]. *海岸工程*, 2013, 32(1): 19—27.
- [22] 周相君,李晓敏,马毅,等.基于遥感的广西防城湾海岸线变迁分析[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(1): 47—55.
- [23] 国家海洋局 908 专项办公室.我国近海海洋综合调查与评价专项海岸线修测技术规程: 试行本[M].北京:海洋出版社,2007.
- [24] 水利部松辽水利委员会.松辽流域河流泥沙公报 2006—2012 [Z]. 2006—2012.
- [25] 姚晓静,高义,杜云艳,等.基于遥感技术的近 30 年海南岛海岸线时空变化[J]. *自然资源学报*, 2013(1): 114—125.
- [26] DOLAN R, HAYDEN B, HEYWOOD J. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion[J]. *Coastal Engineering*, 1978, 78(2): 21—39.
- [27] THIELER E R, HIMMELSTOSS E A, ZICHICHI J L, et al. The digital shoreline analysis system (DSAS) version 4.0—an ArcGIS extension for calculating shoreline change[J]. *USGS Open-File Report*, 2008—1278 2009.
- [28] 佚名.日本海区的自然环境条件[J]. *海洋通报*, 1977(6): 28—43.