

引用格式:梁立,刘庆生,刘高焕,等.基于遥感影像的海岸线提取方法综述[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1745-1755. [ Liang L, Liu Q S, Liu G H, et al. Review of coastline extraction methods based on remote sensing images[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(12): 1745-1755. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180152

## 基于遥感影像的海岸线提取方法综述

梁立<sup>1,2</sup>,刘庆生<sup>1\*</sup>,刘高焕<sup>1</sup>,李鑫杨<sup>1,2</sup>,黄翀<sup>1</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; 2. 中国科学院大学,北京 100049

### Review of Coastline Extraction Methods Based on Remote Sensing Images

LIANG Li<sup>1,2</sup>, LIU Qingsheng<sup>1\*</sup>, LIU Gaohuan<sup>1</sup>, LI Xinyang<sup>1,2</sup>, HUANG Chong<sup>1</sup>

1. State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Coastline is the boundary between land and ocean, and the coastline position determination is the important content of the coastal zone, island and reef surveying. Coastline is generally divided into the island coastline and the mainland coastline. Under the background of global warming and the influence of the natural environment and human's exploitation, the coastline has been in a state of changing. Grasping the type, location, changing process and the future trend of the coastline accurately has great significance for guiding the coastal aquaculture, coastal zone development, navigation and transportation. Therefore, accurately and quickly extracting coastline and real-time monitoring its changes has the vital significance. Remote sensing technique has the features of observing large area synchronously, timely, and economically, which makes it an excellent choice for coastline classification and extraction. Now, remote sensing methods used in coastline extraction mainly include optical remote sensing, microwave remote sensing and laser radar technology. Various methods have been presented by researchers all over the world in recent years. However, some methods focus on waterline extraction instead of the defined coastline extraction. So this paper give summarize of waterline extraction and coastline extraction separately. Beyond that, the noise-reduction methods applied in coastline extraction and the solution of the inconsistency of level data in tidal are also mentioned in this paper. Overall, the paper reviews the recent research progresses on coastline extraction by all kinds of ways at home and abroad through analyzing their advantages, disadvantages and adaptability, and introducing their applications in many fields. Finally, feasible suggestion of the future research is forecasted based on its existent insufficiency.

**Key words:** remote sensing; coastline; waterline; marine survey; SAR; LiDAR

\*Corresponding author: LIU Qingsheng, E-mail: liuqs@reis.ac.cn

**摘要:**近年来,全球气候变暖等原因导致海平面不断升高,人类对海岸带的开发也越来越频繁,海岸带的变化比以前更为活跃,因此精确快速地提取出海岸线并实时监测其变化对我国海岸带的开发规划与利用具有重要的意义。本文详细梳理了国

收稿日期:2018-03-26;修回日期:2018-10-03.

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC1402701);国家自然科学基金项目(41801354)。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC1402701; National Natural Science Foundation of China, No.41801354. ]

作者简介:梁立(1994-),男,河南漯河人,硕士生,研究方向为遥感和地理信息系统应用。E-mail: liangl.16s@igsrr.ac.cn

\*通讯作者:刘庆生(1972-),男,博士,研究方向为遥感和地理信息系统应用。E-mail: liuqs@reis.ac.cn

内外利用光学遥感、微波遥感和雷达遥感手段提取瞬时水边线或理论海岸线的方法,对各种经典方法和一些近年来出现的新方法进行了分析和比较,并指出各种方法的适用情况和不足。最后,针对目前中国在此方面的研究现状给出了一些建议。

**关键词:** 遥感;海岸线;水边线;海洋测量;SAR;LiDAR 技术

## 1 引言

海岸线是陆地与海洋的交界线,一般分为岛屿海岸线和大陆海岸线。在自然环境和人类开发的影响下,海岸线一直处于变化状态中,准确地掌握海岸线的类型、位置及变迁过程和将来海岸线的变化趋势对于指导海岸养殖、海岸带开发航行运输等活动都具有十分重要的意义。

遥感具有大面积同步观测、时效性强、数据综合可比性和不受地理环境影响等优点,故成为海岸线提取的绝佳选择。利用遥感影像来进行海岸线提取的方法在总体上可以分为2类:人工目视解译和计算机自动解译。其中,目视解译虽然有解译精度高、提取海岸线的连续等优点,但其易受人主观因素影响且效率低下、耗费人工,而计算机自动解译以其极高的效率和可复用性等特点成为了国内外学者的主要研究方向。目前,用于提取海岸线的遥感影像是通过卫星光学遥感、微波遥感或者激光雷达遥感的方式获取的。此前,有学者曾针对各个不同类型的遥感手段对海岸线提取的方法做过综述<sup>[1-3]</sup>,但对各种方法综合、系统整理的文章很少。另外,近年来有许多新数据和新方法被利用于海岸线的自动分类和提取中,所以对海岸线自动分类与提取方法做一个新的总结与评述是十分有必要的。因此,本文围绕海岸线的提取方法系统梳理了国内外的各种方法,并总结了各个方法的优缺点和适用条件,希望通过本文能对我国海岸线提取的工作者能有所借鉴与帮助,同时也为今后的研究打下基础。

## 2 海岸线的概念与类型

中华人民共和国国家标准《海洋学术语 海洋地质学》(GB/T 18190-2000)<sup>[4]</sup>规定的海岸线定义为:“海岸线是海陆分界线,在我国系指多年大潮高潮位时的海陆界线”,这个定义与许多文献中所提到的平均大潮高潮面痕迹线<sup>[5]</sup>的含义是相同的。从定义中可以看出,海岸线大部分时间都是没有水浸过的,一个月中可能只有几天或者几个小时的时间海水能够到达海岸线的位置并留下痕迹,这些痕迹成

为了判读海岸线的重要依据。海岸类型通常分为生物海岸、基岩质海岸、人工海岸、淤泥质海岸与砂质海岸,不同岸线类型判定海岸线的依据和方法通常也不一样。人工海岸与基岩质海岸的判定较为简单,即为人工修筑的岸堤和基岩构成的岩壁,生物海岸的海岸线一般判读为生物的生长界线,砂质海岸则主要根据浪潮作用而形成的滩脊作为判定依据,而淤泥质海岸可以通过耐盐植物生长状况的变化和潮滩上贝壳碎屑和杂物的分界线来判断<sup>[6]</sup>。

## 3 海岸线提取降噪方法

在提取海岸线之前,往往需要对遥感图像进行一定的处理,以减少结果噪声和提高提取出来的海岸线的精准度。常用的方法主要有图像滤波和均值漂移处理。

### 3.1 图像滤波

图像滤波是平滑图像,减少图像噪声的重要方法,也是对遥感图像分割、分类和信息提取处理之前的重要步骤。在利用遥感影像特别是微波遥感图像自动提取海岸线之前,先对图像进行滤波降噪处理是十分有必要的<sup>[7]</sup>。常用的滤波算法主要有中值滤波、均值滤波、高斯滤波以及自适应的局部统计滤波器如Frost滤波、Gamma滤波、Lee滤波。在各种滤波方法中中值滤波、均值滤波以及高斯滤波均属于低通滤波,虽然这些方法都能有效地去除图像中的噪声,但也存在削弱线性特征、模糊边缘和略微扭曲目标等显著缺点所以不适合用于提取海岸线的图像预处理中。而自适应性的滤波在窗口较小时能在去除噪声的同时较好地保持边缘特征并且不存在畸变<sup>[8]</sup>,是进行岸线提取时的不错选择。在充分抑制噪声和较好保持边缘、细小特征方面,学者柏延臣等<sup>[9]</sup>提出了基于小波分析的滤波方法,该方法用多级小波分解对图像进行处理,得到了比一般的自适应滤波器更好的结果,值得在岸线提取方面尝试运用。

### 3.2 均值漂移处理

均值漂移算法(Mean shift)是由Fukunaga和

Hosteler 1975年提出的一种核密度估计算法,其根据数据概率密度不断迭代,搜寻模态点,直到满足一定条件为止<sup>[10]</sup>。此后,经过Cheng<sup>[11]</sup>、Comanicu等<sup>[12]</sup>对均值漂移算法的改进和发展,学者们逐渐认识到了该算法在图像平滑、聚类分析和图像分割方面的优势。特别是在图像平滑中,由于均值漂移算法是基于概率密度分布的,而且是一种无参取样,所以这种算法在变化不大的噪声区域能有效地平滑掉噪声,而在变化较大的图像边界区域又能很好地保持边界特征<sup>[13]</sup>。基于均值漂移的这些优点,许多学者将该算法应用于海岸线的提取中,张宏伟<sup>[14]</sup>利用均值漂移的这种特点,先用均值漂移算法对图像进行处理,然后结合像元标记和区域生长法精准并快速的从高分辨率遥感影像中提取出了海岛的水边线。张毅飞等<sup>[15]</sup>利用均值漂移算法将海陆区域分成若干个同质区域,然后利用区域增长法和连通区域分析方法将海陆分离。实验证明,这种方法能从复杂背景的光学遥感影像中快速、准确、稳定地提取出海岸线。

## 4 水边线自动提取方法

由于遥感图像瞬时成像的特点,从遥感影像中直接提取的大多是瞬时水边线,即影像成像时海水与陆地的交界线而并非实际意义上的海岸线<sup>[16]</sup>。虽然水边线不是海岸线,但在许多提取海岸线的方法中,海岸线是在提取出水边线后对水边线进行一系列修正后得到的。因此,精确快速地提取水边线是提取海岸线的基础,提取水边线的各种方法也有其重要的现实意义。在提取水边线时,面对的主要问题是:如何从影像中准确、快速地获得连续的水陆分界线。针对这个问题,学者在不同的方向上做了许多积极地探索。本文详细梳理了各种方法并对其适用范围和优缺点进行了比较(表1)。

### 4.1 阈值分割法

阈值分割法是利用目标物与背景地物的像元灰度值不同,通过设置相应的阈值将二者分割的方法。常用的阈值法有:人工交互阈值分割法、密度分割法、Otsu法、最大期望算法(EM算法)等。人工交互阈值分割法是通过观察图像的灰度直方图,进而通过人为判断设置阈值进行分割的方法。密度分割法将具有连续色调的单色影像按一定密度范围分割成若干等级,然后根据等级再将地物分割。

阈值法在单波段图像上应用时,若图像的灰度直方图没有明显的双峰或者海陆背景对比不强烈时分割效果将会很差,在多波段遥感影像提取岸线时可以使用归一化差值水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)<sup>[17]</sup>或修正归一化差值水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)<sup>[18]</sup>来对图像进行归一化处理,进而提升水陆的对比度,使二者之间有明显区别。当图像经过归一化处理后,水体在影像上显示出较高亮度,而非水体地区则会显示较低的亮度,以此为基础并结合阈值分割法可以准确、快速地提取出水边线。Lin等<sup>[19]</sup>分别利用MNDWI和NDWI指数对图像进行归一化处理后,再用EM阈值分割法对图像进行分割,结果显示利用MNDWI指数和NDWI指数都能很好地从图像中提取出水边线,MNDWI的结果在部分情况下要好于NDWI的效果。Lu等<sup>[20]</sup>通过将NDVI和NDWI相结合的方法将水体和周围地物的对比度增强,进而利用Otsu阈值分割法将水陆分离,得到了很好的效果。总体来说,阈值分割法是一种较为高效的算法,它的方法简单、运算速度快,但其对于海陆对比度还是有一定要求,提取精度一般。

### 4.2 边缘检测法

边缘检测是进行图像分割、提取边界线的经典方法。传统的各种边缘检测算子有Sobel算子、Canny算子、Roberts算子等。除此之外,学者们也不断综合其他技术提出新的方法。张朝阳等<sup>[21]</sup>在Canny算法的基础上结合色差理论,针对彩色遥感影像提出了基于色差Canny算子的形态学自适应性算法提取水边线,这种算法具有较高信噪比,能达到比较理想的海岸线检测效果。马小峰等<sup>[22]</sup>在提取人工和基岩岸线时为了使图像的边缘特征更突出,先采用锐化滤波器对图像进行增强处理,然后使用Canny算子进行提取。另外,其在提取砂质海岸时为了去除不同像元灰度不同的干扰,先采用中值滤波和灰度拉伸对图像处理后用Canny算子进行提取,这2种尝试都得到了很好的结果。庄翠蓉<sup>[23]</sup>对不同类型的海岸采用了不同的提取算子。在处理基岩和人工海岸时,先用阈值分割的方法将水体和非水体分离,然后利用Roberts算子进行提取。处理砂质海岸时,先对图像进行监督和非监督分类以将图像中的砂质海岸图斑提取出来,然后用Sobel算子进行提取。庄翠蓉的方法提取结果不太理想,

表1 各种方法综合比较

Tab. 1 General comparison among these methods

方法	适用范围	抗噪能力	复杂度	精度
目视解译法	研究区较小,且精度要求较高时	十分强	非常高	非常高
阈值分割法	大范围,精度要求不高,海陆差异明显时	较强	低	较低
边缘检测法	研究区较大,且岸线情况不复杂时,对基岩质和人造海岸效果不错	易受图像上噪声影响,检测的岸线容易中断,通常需要后续处理	较低	一般
面向对象法	适用于研究区内海岸类型复杂,且精度要求较高时	较强	较高	较高
活动轮廓法	仅能检测简单的图像,处理范围小	较强	很高,需人工给定处理轮廓	较高
区域生长法	适用范围广,能获得连续岸线	较弱	较低	一般
元胞自动机	检测淤泥质海岸时有明显优势,不适合大范围的应用	一般	复杂度较高,需多次尝试确定最佳阈值	较高
支持向量机	适用于海岸地形起伏较小的地区,自动化程度较高	较强	一般	较高

利用Roberts算子提取基岩和人工海岸时由于该算法的抗噪性差导致提取的边缘不连续,用sobel算子时由于算法的平滑作用导致提取砂质海岸时对边缘的定位不是很准确。

#### 4.3 面向对象的提取方法

每种海岸类型都有其独特的特征,每种方法海岸线自动提取方法也有较为实用的海岸类型,很难用一种方法将所有类型的海岸线精确无误地提取出来,这给海岸线的自动提取增加了难度。基于这种情况,有学者提出了面向对象的提取方法。面向对象的提取方法是一种分类提取的方法,这种方法先用遥感图像中的光谱信息、空间信息和纹理信息对海岸进行分割,然后再根据分割结果针对每种类型的特点建立解译标识,再对海岸线进行自动提取。王常颖等<sup>[24]</sup>利用数据挖掘算法中的C4.5决策树算法得出了海岸所包含地物诸如海水、沙滩、陆地和淤泥等的识别规则,然后利用不同海岸类型所包含的地物差异建立了4种海岸类型的自动解译标识,有效地对海岸类型进行了分类。然后,在对海岸类型分类的基础上,针对各海岸类型的特征对初步提取出来的水边线进行修正,如将砂质海岸的水边线修正到沙子与其他地物的分界线,将淤泥质海岸的水边线修正到淤泥与耐盐植物的分界线,使修正后的结果能更接近真实海岸线。Ge等<sup>[25]</sup>基于面向对象的思想对珠江海岸线进行了提取,利用多尺度分割的方法先将海岸分割为4种类型即人工海岸、基岩海岸、砂质海岸和淤泥质海岸,然后结合归一化水体指数(NDWI)和近红外波段、绿光波段信息对这4种海

岸类型建立不同的海岸线提取标准,进而提取出海岸线。实验结果显示,面向对象的方法能得到很好的效果,人工海岸和基岩海岸的提取精度分别达98%和94%,较难精确提取的砂质海岸和淤泥质海岸的提取精度也都在90%以上。面向对象的方法虽然较为繁琐耗时,但这种方法的精度能都得到很好的保障。

#### 4.4 基于活动轮廓模型的方法

Kass等<sup>[26]</sup>提出了活动轮廓模型,将图像分割问题转换为求解能量泛函最小值问题,为图像分割提供一种全新的思路,成为研究的重点和热点。活动轮廓模型的主要原理通过构造能量泛函,在能量函数最小值驱动下,轮廓曲线逐渐向待检测物体的边缘逼近,最终分割出目标。由于活动轮廓模型利用曲线演化定位目标的边缘,因此也称为Snake模型。活动轮廓模型是当前应用最多的利用变分思想求解的图像分割方法。其最大优点是在高噪声的情况下,也能得到连续、光滑的闭合分割边界。Mason和Davenport<sup>[27]</sup>在利用SAR图像提取水边线的方法中引入多分辨率技术和活动轮廓法来提高海岸线定位精度和处理速度,其先在低分辨率图像上采用计算量较大的纹理分割得到初步轮廓线,再在高分辨率图像上采用活动轮廓模型对水边线位置进行修正,以提高算法的处理速度和提取精度。沈琦等<sup>[28]</sup>将几何活动轮廓法和数学形态学的方法相结合,提出了一种改进的方法,其用二维最大方差将图像进行阈值分割然后用形态学滤波大致确定水边线位置,然后用几何轮廓模型法对水边线进行精确提取。

#### 4.5 区域生长法

区域生长的基本思想是将具有相似性的像元集合起来构成区域。算法先对每个需要分割的区域找出一个种子像素作为生长点,然后将种子像元周围邻域中与种子有相同或相似性质的像元合并到种子像元所在的区域中。在使用区域生长法时,首先要在感兴趣区域中选择种子点并设置合适的阈值进行生长,阈值的选择不当会影响结果的准确度。然后,需要根据分割要求和数据类型等因素建立合适的生长规则,这也是区域生长法的关键。区域生长法作为一种经典的分割算法,在提取遥感影像提取水边线方面也有不少应用。Chen等<sup>[29]</sup>利用区域生长法在光学遥感影像中提取出了水边线。谢明鸿等<sup>[30]</sup>针对SAR图像提取海岸线时提出了一种改进的自动选择生长点的方法,该方法利用图像灰度值的统计特征自动搜索出一个适合进行生长的种子点区域,并且引入动态阈值法使得其可以有效检测到图像局部灰度信息的变化。区域生长法是一种较为成熟的图像分割方法,这种方法在提取水边线方面有着提取算法简单、速度快、结果稳定连续等优点,但区域生长法易受噪声影响,且在岸线周围地物背景复杂的情况下易造成水边线的变形。

#### 4.6 其他新方法

除了上文介绍的几种经典方法外,国内外学者也在不断尝试引入新的方法来进行水边线的提取。冯永玖等<sup>[31]</sup>将元胞自动机的方法引入到水边线提取中来,提出了基于元胞自动机和方向信息权重的岸线提取方法。这种方法先计算出一个邻域内各个方向的突变值,然后以此作为方向信息权重将海陆分离,进而利用海陆分离的二值化图像进行岸线目标跟踪并提取出海岸线。基于元胞自动机的提取方法在提取淤泥质海岸是精度上要明显优于传统的边缘检测方法,但同时其在淤泥质海岸的提取中需要进行多次迭代,算法耗时也相对较长。Wang等<sup>[32]</sup>、朱长明等<sup>[33]</sup>和Kalkan等<sup>[34]</sup>将支持向量机(SVM)应用到水边线的提取方法中,分别从SAR影像和光学遥感影像中提取出了水边线,该方法针对归一化水体指数和阈值分割提取岸线时易将部分近岸水体错分为陆地的的问题作出了一系列改进。首先,利用NDWI和阈值分割初步提取出水陆信息,再用已有信息对初始样本进行自动选择,然后通过训

练出的样本利用SVM对水体进行二次分割,将海陆分离并提取出边界线。这种方法结合了阈值分割和监督分类的优点,能明显提高岸线识别精度,但这种方法只考虑了光谱信息却没有关注空间信息和其他特征,还有进一步改进的空间。王鹏等<sup>[35]</sup>提出了一种面向对象的半自动提取方法,该方法通过人工区分出海陆后,通过地物光谱信息衡量对象间的相似性,然后将相似对象进行多阶段融合实现水边线的提取。这种方法能够提取出平滑连续的水边线,且在速度上明显优于面向对象法,但其需要使用者界定水陆边界使得用户需要具备一定的专业知识。

### 5 海岸线提取方法

上文谈到的是从光学遥感影像或者微波遥感影像中提取的水边线,虽然有一部分学者更进一步,从遥感影像中以海岸含水量的不同将干/湿线提取出来作为大潮痕迹线,如Wang等<sup>[36]</sup>利用数据挖掘的方法,将6个可见光波段结合,进而区分出砂质海岸与淤泥质海岸的干湿分界线。但无论是瞬时水边线还是大潮痕迹线都并非真正意义上的海岸线,而若要提取出海岸线则必须将海岸的地形信息与潮位信息相结合。显然,潮位信息无法从遥感影像中获取,那么提取海岸线的问题转化为如何从遥感影像上获取海岸的地形信息。为了解决这个问题,学者们也利用不同的方法和手段进行了尝试和探索。

#### 5.1 目视解译法

目视解译法是最直接的提取海岸线的方法。在大浪高潮不断拍打海岸的过程中,会在海岸上留下相应的痕迹,如砂质海岸上形成的沙脊、生物海岸线上一些耐盐碱植物的生长边界、人工海岸上的海水痕迹线,这些都是判断海岸线位置的重要依据。通过实地考察和不同地物在遥感影像上反映出的不同特点,建立相应的解译标志,进而通过这些标志来对海岸线进行判读,即可得到严格意义上的海岸线。

一般来说,目视解译法得到的海岸线精度较高,具有说服力,所以一些在研究海岸线变化时都会采用目视解译法进行提取。但目视解译法要将遥感影像与实地考察相结合,同时需要通过人工判读解译出岸线,工作量巨大。

## 5.2 水边线修正法

利用水边线修正来得到海岸线的思路一般有3种:①结合海滩坡度信息和潮位站信息,利用几何关系计算得出水边线与高潮线的位置关系;②基于验潮数据得出水边线高程值,然后插值得到DEM并以此获得海岸线;③根据水边线和海滩上的地物之间的距离简洁地判断海岸线的位置<sup>[37-38]</sup>。

马小峰等<sup>[22]</sup>利用边缘检测法提取出水边线后,根据从潮位站获取的潮位信息得到影像成像时的瞬时潮位高度,然后再利用平均大潮高潮位的潮水高度以及海岸坡度等信息计算出水边线偏移距离,进而得到海岸线的位置。该方法需要提取至少2幅遥感影像的水边线,测量两水边线的距离DL,并根据验潮数据得到2幅影像成像时刻的潮位高度差Dh,则可以根据三角函数关系确定海岸坡度,最后根据多年潮位观测资料确定的平均大潮的潮位高度,即可将水边线修正至真实海岸线的位置(图1)。

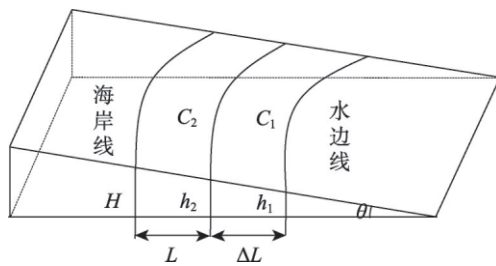


图1 海岸线位置计算原理

Fig. 1 Calculation principle of coastline position

图1中, $C_1$ 、 $C_2$ 分别为2景影像中水边线的位置,可以量出两线距离设为DL。根据潮位信息和影像的成像时间确定成像时的潮位高度,分别为 $h_1$ 与 $h_2$ 。得到海岸的坡度 $q = \arctan[(h_2 - h_1)/DL]$ ,然后利用确定的平均大潮高潮的潮位高度得到海岸线与水边线的距离 $L = (H - h_2)/\tan q$ 。

杨旭凯等<sup>[39]</sup>也利用这种方法并结合不同的海岸类型,提取了岸线从结果看拥有不错的精度。通过这种思路获取海岸线时对海岸的地形有一定要求,只能在地形起伏较小的海域适用,而且需要详细的潮位数据作为支撑。申家双等<sup>[40]</sup>根据多时相遥感影像中水边线位置存在差异的特点,提出了一种将多幅影像中提取的水边线与验潮数据相结合计算得出海岸线的方法。这种方法将影像中提取的水边线假设为等高线(等水位线)。在这一假设的前提下,提取多幅不同时相影像的水边线即可得

到多条海岸带上的等高线,将这些等高线与海图上海平面的位置结合插值得到潮间带的DEM,最后再根据潮汐模型计算平均大潮高潮面的高程,并以此为参考面与DEM横切可得到海岸线。

## 5.3 LiDAR 技术提取海岸线

激光雷达(LiDAR)一般是基于航空平台对地物进行观测的主动遥感手段。目前,LiDAR技术在大气研究、海平面测量和冰川研究方面有广泛应用,而它所具有的速度快、抗干扰能力强、精度高等特点也使其迅速成为海岸线提取的研究热点。

在LiDAR技术提取海岸线方面美国处于世界领先地位,从2002年开始美国的许多学者就开展了许多利用LiDAR技术对海岸带的研究<sup>[41-43]</sup>。这些研究的大致思路相同,基本都是利用高精度的LiDAR数据生成DEM,然后与某个定义潮位面的海岸线高程值结合,采用等值线追踪法(Contouring Method)或者交叉海岸剖面法CSP(Cross-Shore Profile Method)即可确定海岸线的具体位置。后续针对提取出的海岸线位置不连续,有零碎线段的情况,Liu等<sup>[43]</sup>利用目标跟踪、线平滑等手段去除错误的海岸线,进而得到一条平滑准确的海岸线。这种方法在Texas湾实验时取得了很好的效果。

国内对于LiDAR点云处理的研究起步较晚,之前的研究大多将重点放在对陆地地物的提取与测量上,近几年才出现了一些利用LiDAR手段进行海岸线提取的方法。董保根等<sup>[44]</sup>为了改变地形变化大的区域误差相对较大的情况,利用三角网替代内插规则格网,然后对点云高程进行地形修正,在此基础上利用加入动态阈值的张力样条函数内插生成海岸线。这种方法可以相对精确的在地形起伏地区获取平滑的海岸线。于彩霞等<sup>[45]</sup>提出了对LiDAR数据进行栅格化处理,然后提取出海岸线的方法。与等值线追踪法不同的是,这种方法没有构建海岸DEM而是将点云数据栅格化,进而从栅格化后的数据中提取海岸线。这种方法相比于等值线追踪法更为简单,效率较高,而且提取出的海岸线比较平滑,在实验中得到了良好的结果。

## 6 潮位数据不一致的解决方法

不管是使用水边线修正法还是LiDAR技术,在利用潮位数据提取海岸线时,往往会遇到多幅影像中潮位不一致,或者潮位点空间变化不平滑的问

题。这些问题会对后续海岸线的提取产生重大的影响。如何解决潮位数据相关的问题,是利用潮位信息提取海岸线的关键。

针对海岸各处潮位数据差异的问题,崔丹丹等<sup>[46]</sup>提出了潮汐分带校正的方法,这种方法利用影像成像时刻的控制站点潮高数据分带插值校正处理,完成离散点对的潮位赋值,进而推算出平均大潮高潮的所在位置。这种方法在一定程度上改善了潮位不一致所带来的误差,提高了海岸线遥感提取的准确度。

在利用多景影像进行海岸线提取时,常常会遇到潮位数据不一致、潮位数据不足等问题,导致计算出的平均大潮高潮面的空间变化不连续。目前,主要利用插值算法<sup>[47-49]</sup>或者统计算法<sup>[50]</sup>来对潮位数据进行处理,进而得到相对平滑的平均大潮高面。

## 7 数据源的选择及其适用性

现阶段,提取海岸线时所用的数据源主要有 Landsat、SPOT、SAR 影像,近年来也有一些高分辨影像,如我国高分系列卫星、IKONOS、WorldView 等用于海岸线提取。面对如此多种的数据源,掌握各种不同遥感影像的特点,针对这些特点,结合自身研究目标合理得选择数据源进行研究是十分重要的。Landsat 影像是最常用于提取海岸线的数据源之一,相比于其他数据源 Landsat 的优势在于其数据时间序列长并且图幅较宽。自 1972 年 Landsat 1 发射以来,Landsat 系列卫星已连续观测地球近 50 年,也正因这些特点,国内外长时间、大范围的海岸线变化的研究<sup>[51-53]</sup>都采用 Landsat 作为数据源来对海岸线进行提取。但 Landsat 有十分明显的缺点,其图像分辨率不高,导致提取海岸线时误差较大,一般提取出的海岸线绝对误差为 30 m,在精细的海岸线制图和检测方面有明显的不足。相较于 Landsat 影像,SPOT 影像具有更高的分辨率,提取出来的海岸线误差一般在 10 m 以内,也具有较长的时间序列(从 1986 年 SPOT-1 发射至今),但 SPOT 影像的图幅较小,在大范围研究海岸线变化时需要图像过多,处理过程繁琐,所以 SPOT 影像经常用于局部地区海岸线高精度提取的研究<sup>[54-56]</sup>。21 世纪以来,学者们逐渐接触到一些超高分辨率的卫星影像,如我国高分卫星影像<sup>[57]</sup>、IKONOS、Worldview<sup>[58]</sup>等,这些影像使提取海岸线的精度得以进一步的提高。利

用超高分辨率影像进行提取的海岸线与实测海岸线的绝对误差一般都在 5 m 以内,部分研究结果精度能够达到 2 m,可以很好地满足精细制图的要求,并且能观测到海岸线较为微小的变化。虽然超高分辨率影像拥有其他数据源无可比拟的精度,但在应用层面上始终受到图幅较小和价格较贵不易获取的限制,使其无法在较大时空尺度的研究中发挥作用。大部分利用超高分辨率影像进行海岸线提取的研究也只是实验性质,而没有利用其优点进行分析应用。除了光学遥感数据源,在海岸线提取的研究中也经常用到 SAR 数据。相较于光学遥感数据,雷达遥感最大的优势在于可以全天时、全天候对目标进行监测,并且可以穿透云雾,不受天气状况的影响。因此,SAR 影像适用于一些多云多雨的地区(如东南亚地区、北极地区),但同时 SAR 影像的噪声较大,在去噪过程中难免会损失一些边缘细节。

## 8 结论与展望

近年来,由于海平面的不断升高,海岸带的变化比以前更活跃,精确地提取出海岸线并实时监测其变化具有重要意义。相较于其他方法,遥感技术以其低成本、高效率、大面积等优势成为了海岸线提取的最佳选择。现阶段利用遥感影像提取海岸线的方法在不断发展进步,但仍然存在许多有待解决的问题。

(1)利用高分辨率数据对海岸线进行提取。高分辨率影像在提取岸线方面有诸多优势,其在提取岸线细节、监测海岸线变化和定量计算海岸侵蚀方面都有重要意义。近年来,随着 WORLDVIEW-2、高分 2 号等高分辨率遥感卫星的应用,国际上已经有许多学者开展了在高分辨率影像上提取海岸线的研究<sup>[59-61]</sup>。国内基于高分辨率影像提取海岸线的研究并不多见,特别是精细连续海岸线提取方面还没有见到相关研究。

(2)多种手段叠加提高准确率。在自动提取海岸线的研究中,大部分学者都将研究重点放在了利用各种算法高效地从图像的突变信息中提取出海岸线上,对图像中地物的大小、纹理、形状等信息没有充分考虑。海岸线归根结底是一种地理现象,在提取海岸线时不应该一味的从图像处理的角度去追寻,应该综合考虑图像光谱信息、纹理信息和几

何形状信息并与海岸带的地物特征、大潮的性质以及其他地理因素结合,这样才能更准确、科学地获得海岸线。

(3)面向对象有针对性的提取。目前许多方法在提取海岸线时都能达到很高精度,但是海岸类型复杂,很难能找到一种方法适用于所有的海岸类型,需要对海岸类型进行分类处理后再对不同的类型选择不同的方法进行处理,以期达到最优的精度。虽然已经有一些学者利用面向对象的方法进行了提取,但一些海岸类型(如淤泥质海岸与人工养殖类海岸)的提取精度不尽如人意,需要进行进一步改进与提高<sup>[62]</sup>。

(4)利用LiDAR技术进行岸线提取。LiDAR技术具有抗干扰能力强、精度高、外业劳动成本低、自动化程度高等诸多优势<sup>[63]</sup>。现阶段国内LiDAR技术在各个方面都还处于起步阶段,在海岸带方面的应用十分稀少,因此需要加强对LiDAR各方面技术的研究和应用,充分发挥LiDAR在海岸线提取方面的优势。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 欧阳越,种劲松. SAR图像海岸线检测算法综述[J]. 国土资源遥感,2006,18(2):1-3. [ Ouyang Y, Zhong J S. A review of coastline detection on SAR imagery[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2006,18(2):1-3. ]
- [ 2 ] 严海兵,李秉柏,陈敏东. 遥感技术提取海岸线的研究进展[J]. 地域研究与开发,2009,28(1):101-105. [ Yan H B, Li B B, Chen M D. Progress of researches in coastline extraction based on RS technique[J]. Areal Research And Development, 2009,28(1):101-105. ]
- [ 3 ] 于彩霞,王家耀,许军,等. 海岸线提取技术研究进展[J]. 测绘科学技术学报,2014(3):305-309. [ Yu C X, Wang J Y, Xu J, et al. Advance of coastline extraction technology[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014(3): 305-309. ]
- [ 4 ] 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. [ Sun W F, Ma Y, Zhang J, Liu S W. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011 (3):41-44. ]
- [ 5 ] 夏东兴,段焱,吴桑云. 现代海岸线划定方法研究[J]. 海洋学研究,2009,27(b07):28-33. [ Xia D X Duan Y, Wu S Y. Study on the methodology of recent coastline delimitation [J]. Journal of Marine Sciences, 2009,27(b07):28-33. ]
- [ 6 ] 国家质量技术监督局.GB/T 18190-2000 海洋学术语:海洋地质学[S]. 北京:中国标准出版社,2000. [State Bureau Quality and Technical Supervision.GB/T 18190- 2000 oceanographic terminology- marine geology[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000. ]
- [ 7 ] Tello M, Lopez-Martinez C, Mallorqui J, et al. Automatic detection of spots and extraction of frontiers in SAR images by means of the wavelet transform: Application to ship and coastline detection[C]// IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2007:383-386.
- [ 8 ] 王秋燕,陈仁喜.PALSAR影像滤波算法的适用性研究[J]. 测绘工程,2013,22(1):16-20. [ Wang Q Y, Chen R X. Research on the applicability of PLASAR image filtering methods[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013,22(1):16-20. ]
- [ 9 ] 柏延臣,王劲峰,朱彩英,等. 基于小波分析的 SAR 图像斑点滤波及其性能比较评价[J]. 遥感学报,2003,7(5):393-399. [ Bo Y C, Wang J F, Zhu C Y, et al. A wavelet-based filter for SAR speckle reduction and the comparative evaluation on its performance[J]. Journal of Remote sensing, 2003,7(5):393-399. ]
- [10] Fukunaga K, Hostetler L. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition[M]. IEEE Press, 1975.
- [11] Cheng Y. Mean shift, mode seeking and clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1995,17(8):790-799.
- [12] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002,24(5):603-619.
- [13] 王建,张建伟,陈仲恒. 一种基于均值漂移和遗传算法的图像分割算法[J]. 计算机技术与发展,2014(3):33-37. [ Wang J, Zhang J W, Chen Z H. An image segmentation algorithm based on mean shift and genetic algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2014(3):33-37. ]
- [14] 张宏伟. 基于遥感影像的海岛(礁)提取技术研究[D]. 郑州:信息工程大学,2011. [ Zhang H W. Research on the island extraction using remote sensing images[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011. ]
- [15] 张毅飞,吕科,代双凤,等. 基于均值漂移的遥感图像海陆边界分割算法[J]. 光学技术,2016,42(1):39-45. [ Zhang Y F, Lu K, Dai S F, et al. A sea-land segmentation algorithm for remote sensing images based on Mean-Shift[J]. Optical Technique, 2016,42(1):39-45. ]
- [16] 许家琨,刘雁春,许希启,等. 平均大潮高潮面的科学定位



- 和现实描述[J].海洋测绘,2007,27(6):19-24. [ Xu J, Liu Y C, Zhai G J, et al. Scientific locating and practical describing on mean high water springs[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007,27(6):19-24. ]
- [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] Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005(5):79-85.
- [19] Lin H, Xu J, Jiang D, et al. Sand dam dynamic monitoring in coastal areas based on time-series remote sensing images[C]// IGARSS 2016-2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016: 2838-2841.
- [20] Lu S, Wu B, Yan N, et al. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2011,13(3):428-434.
- [21] 张朝阳,冯伍法,张俊华.基于色差的遥感影像海岸线提取[J].测绘科学技术学报,2005,22(4):259-262. [ Zhang Z Y, Feng W F, Zhang J H. A coastline detection method based on the color difference for the RS image[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2005,22(4):259-262. ]
- [22] 马小峰,赵冬至,邢小罡,等.海岸线卫星遥感提取方法研究[J].海洋环境科学,2007,26(2):185-189. [ Ma X F, Zhao D Z, Xing X G, et al. Means of withdrawing coastline by remote sensing[J]. Marine Environmental Science, 2007,26(2):185-189. ]
- [23] 庄翠蓉.厦门海岸线遥感动态监测研究[J].海洋地质动态,2009,16(3):13-17. [ Zhuang C R. Study on dynamic remote sensing monitoring of xiamen coastline[J]. Marine Geology Letters, 2009,16(3):13-17. ]
- [24] 王常颖,王志锐,初佳兰,等.基于决策树与密度聚类的高分辨率影像海岸线提取方法[J].海洋环境科学,2017,36(4):590-595. [ Wang C Y, Wang Z R, Chu G L, et al. Coastline extraction from high-resolution image based on decision tree and density clustering algorithms[J]. Marine Environmental Science, 2017,36(4):590-595. ]
- [25] Ge X, Sun X, Liu Z. Object-oriented coastline classification and extraction from remote sensing imagery[J]. SPIE, 2014,9158(4):91580M.
- [26] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988,1(4):321-331.
- [27] Mason D C, Davenport I J. Accurate and efficient determination of the shoreline in ERS-1 SAR images[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 1996,34(5):1243-1253.
- [28] 沈琦,汪承义,赵斌.几何活动轮廓模型用于高分辨率遥感影像海岸线自动提取[J].复旦学报自然科学版,2012,51(1):77-82. [ Shen Q, Wang C Y, Zhao B. Automatic waterline extraction in VHR imagery using geometric active contour model[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2012,51(1):77-82. ]
- [29] Chen A J, Chen C F, Chen K S. Investigation of shoreline change and migration along Wai-San-Ding-Zou barrier island, Central Western Taiwan[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International. IEEE, 1995:2097-2099.
- [30] 谢明鸿,张亚飞,付琨.基于种子点增长的SAR图像海岸线自动提取算法[J].中国科学院大学学报,2007,24(1):93-98. [ Xie M H, Zhang Y F, Fu K. Algorithm of detection coastline from SAR images based on seeds growing. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007,24(1):93-98. ]
- [31] 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].中国图象图形学报,2012,17(3):441-446. [ Feng Y J, Han Z. Cellular automata approach to extract shoreline from remote sensing imageries and its application[J]. Journal of Image and Graphics, 2012,17(3):441-446. ]
- [32] Wang Y, Yu Q, Lv W, et al. Coastline detection in SAR images using multi-feature and SVM[C]// International Congress on Image and Signal Processing, IEEE, 2011: 1227-1230.
- [33] 朱长明,张新,骆剑承,等.基于样本自动选择与SVM结合的海岸线遥感自动提取[J].国土资源遥感,2013,25(2):69-74. [ Zhu C M, Zhang X, Luo J C, et al. Automatic extraction of coastline by remote sensing technology based on SVM and auto-selection of training samples[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013,25(2):69-74. ]
- [34] Kalkan K, Bayram B, Maktav D, et al. Comparison of support vector machine and object based classification methods for coastline detection[J]. ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Doi: 2013,XL-7/W2(24):125-127.
- [35] 王鹏,孙根云,王振杰.高分辨率遥感影像海岸线半自动提取方法[J].海洋测绘,2016,36(6):24-27. [ Wang P, Sun G Y, Wang Z J. Semi-automatic extraction of coastlines based on high-resolution remote sensing imagery[J]. Hy-

- drographic Surveying and Charting, 2016,36(6):24-27. ]
- [36] Wang C Y, Zhang J, Song P J, et al. An intelligent coastline interpretation of several types of seacoasts from TM/ETM+ images based on rules[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014,33(7):89-96.
- [37] 常军,刘高焕,刘庆生. 黄河三角洲海岸线遥感动态监测[J]. 地球信息科学学报,2004,6(1):94-98. [ Chang J, Liu G H, Liu Q S. Dynamic monitoring of coastline in the yellow river delta by remote sensing[J]. Journal of Geoinformation Science, 2004,6(1):94-98. ]
- [38] 吴春生,黄翀,刘高焕,等. 基于遥感的环渤海地区海岸线变化及驱动力分析[J]. 海洋开发与管理,2015,32(5):30-36. [ Wu C S, Huang C, Liu G H, et al. Analysis of coastal line change and driving force in bohai rim region based on remote sensing[J]. Ocean Development and Management, 2015,32(5):30-36. ]
- [39] 张旭凯,张霞,杨邦会,等. 结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取[J]. 国土资源遥感,2013,25(4):91-97. [ Zhang X K, Zhang X, Yang B H, et al. Coastline extraction using remote sensing based on coastal type and tidal correction[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2013,25(4):91-97. ]
- [40] 申家双,翟京生,郭海涛. 海岸线提取技术研究[J]. 海洋测绘,2009,29(6):74-77. [ Shen J S, Zhai J S, Guo H T. Study on coastline extraction technology[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009,29(6):74-77. ]
- [41] Stockdonf H F, Holman R A. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data[J]. Journal of Coastal Research, 2002,18(3):502-513.
- [42] Allan J C, Priest G R. Shoreline variability on the high-energy Oregon coast and its usefulness in erosion-hazard assessments[J]. Journal of Coastal Research, 2003,38:83-105.
- [43] Liu H, Sherman D, Gu S. Automated extraction of shorelines from airborne light detection and ranging data and accuracy assessment based on Monte Carlo Simulation [J]. Journal of Coastal Research, 2007,23(6):1359-1369.
- [44] 董保根,张良,张钢,等. 利用LiDAR点云提取有地形约束的光滑海岸线[J]. 测绘科学技术学报,2012,29(2):113-117. [ Dong B G, Zhang L, Zhang G, et al. Smooth shoreline extraction with topographic constraints using LiDAR point clouds[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2012,29(2):113-117. ]
- [45] 于彩霞,许军,许坚,等. 一种从LiDAR点云中提取海岸线的新方法[J]. 测绘通报,2015(5):66-68. [ Yu C X, Xu J, Xu J, et al. A new method of extracting coastlines from LiDAR point clouds[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(5):66-68. ]
- [46] 崔丹丹,张东,吕林,等. 基于潮汐分带校正的海岸线遥感推算研究[J]. 海洋测绘,2017(5):52-55. [ Cui D D, Zhang D, Lv L, et al. Coastline remote sensing prediction based on tide zoning correction[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017(5):52-55. ]
- [47] 黄辰虎,唐岩,郭海涛,等. 日潮特征海域回归潮平均高高潮位的计算方法[J]. 海洋测绘,2016,36(1):15-20. [ Huang C H, Tang Y, Guo H T, et al. Applicability of fictitious compress recovery method for downward continuation of airborne gravity data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016,36(1):15-20. ]
- [48] 于彩霞,许军,黄文骞,等. 海岸线及其测绘技术探讨[J]. 测绘工程,2015(7):1-5. [ Yu C X, Xu J, Huang W Q, et al. Discussion on the mapping of coastline[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015(7):1-5. ]
- [49] 暴景阳,许军,关海波. 平均大潮高潮面的计算方法与比较[J]. 海洋测绘,2013,33(4):1-5. [ Pu J Y, Xu J, Guan H B. The Algorithms for Calculation of the Mean High Water Spring and Their Comparison[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013,33(4):1-5. ]
- [50] 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[J]. 地理研究,2004,23(3):339-346. [ Chang J, Liu G H, Liu Q S. Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation[J]. Geographical Research, 2004,23(3):339-346. ]
- [51] Chen L. Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(17):3383-3397.
- [52] 徐进勇,张增祥,赵晓丽,等. 2000-2012年中国北方海岸线时空变化分析[J]. 地理学报,2013,68(5):651-660. [ Xu J Y, Zhang Z X, Zhao X L, et al. Spatial-temporal analysis of coastline changes in northern China from 2000 to 2012[J]. Acta Geographica Sinica, 2013,68(5):651-660. ]
- [53] 张明慧,孙昭晨,梁书秀,等. 基于高空间分辨率卫星遥感影像的砂质海岸空间整治效果分析——以营口月亮湾为例[J]. 海洋通报,2017,36(5):594-600. [ Zhang M H, Sun Z C, Liang S X, et al. Analysis of sandy coast regulation effects based on high resolution satellite remote sensing images: A case in Yueliangwan of Yingkou[J]. Marine Science Bulletin, 2017,36(5):594-600. ]
- [54] 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. [ Zhang X, Zhuang Z, Zhang X K, et al. Coastline extraction and change Monitoring by remote sensing technology in Qin-

- ghuangdao city[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014,29(4):625-630. ]
- [55] 涂晔昕,沈玉莲,卢艺,等.使用多源遥感影像监测深圳市海岸线变迁[J].海洋开发与管理,2016,33(10):83-88. [ Tu H X, Shen Y L, Lu Y, et al. Monitoring coastline changes of Shenzhen by using multi-source remote sensing images[J]. Ocean Development and Management, 2016,33(10):83-88. ]
- [56] 索安宁,曹可,初佳兰,等.基于GF-1卫星遥感影像的海岸线生态化监测与评价研究——以营口市为例[J].海洋学报, 2017,39(1):121-129. [ Suo A N, Cao K, Chu G L, et al. A study on monitoring and analysis of ecological coastline based on GF-1 satellite remote sensing image: A case study in Yingkou[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017,39(1):121-129. ]
- [57] 张海涛.珠海市海岸线变化高分辨率遥感监测分析[J].测绘通报,2016(11):55-59. [ Zhang H T. Monitoring of coastline change in Zhuhai based on high resolution remote sensing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(11):55-59. ]
- [58] Maglione P, Parente C, Vallario A. Coastline extraction using high resolution WorldView-2 satellite imagery[J]. European Journal of Remote Sensing, 2014,47(1):685-699.
- [59] Jawak S D, Luis A J. A rapid extraction of water body features from Antarctic Coastal Oasis using very high-resolution satellite remote sensing data[J]. Aquatic Procedia, 2015,4:125-132.
- [60] Collin A, Archambault P, Planes S. Bridging ridge-to-reef patches: Seamless classification of the coast using very high resolution satellite[J]. Remote Sensing, 2013,5(7): 3583-3610.
- [61] Zhang T, Yang X, Hu S, et al. Extraction of coastline in aquaculture coast from multispectral remote sensing images: Object-based region growing integrating edge detection[J]. Remote Sensing, 2013,5(9):4470-4487.
- [62] Sweungwon C, Kenneth C S, Hyun-chong C. Fusing landscape accuracy-dependent SRTM elevation data with NGDC and LiDAR data for the Florida coastline[J]. Remote Sensing Letters, 2012,3(8):687-696.