
密级:



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取方法

作者姓名: 张旭凯

指导教师 张霞 研究员 博士

中国科学院遥感与数字地球研究所

学位类别: 理学硕士

学科专业: 地图学与地理信息系统

培养单位: 中国科学院遥感与数字地球研究所

2013 年 5 月

Coastline extraction using remote sensing technology
based on coastal type and tidal correction

By
Zhang Xukai

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Philosophy

Institute of Remote Sensing and Digital Earth
May, 2013

原创性声明

郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经明确标注引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或研究成果。与本人合作并对本文研究做出过贡献的同志均已在论文中予以明确说明,并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：

日 期：2013 年 5 月

学位论文使用授权说明

本人完全了解中国科学院遥感应用研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定：

按照研究所要求提交学位论文的印刷本和电子版本；

研究所有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；

研究所可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；

在不以赢利为目的的前提下，研究所可以公布论文的部分或全部内容。

论文作者签名：

日期：2013年5月

导师签名：

日期：2013年5月

课题来源和经费支持

本研究（文）是国土资源部公益性行业科研专项课题“区域相对海平面变化信息提取关键技术”（201011019 - 07）的部分研究内容，并得到该课题的资助。

摘 要

海岸线位置的确定对海岸带综合管理具有重要意义，利用遥感技术进行海岸线提取受到越来越多的关注。目前海岸线遥感提取主要存在两方面问题：1) 海岸的类型有很多种，不同类型的海岸具有不同的地物特征，单一算法无法保证海岸线提取精度。2) 由于受潮汐等因素的影响，从遥感图像上直接提取的水陆交界线并不是真正意义上的海岸线，要想获取真正的海岸线，需要将水边线进行潮位校正至平均大潮高潮线。

本文针对现有研究多为利用遥感图像进行瞬时水边线提取、缺少潮位校正和精度验证的问题，提出一种结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取方法。以秦皇岛市的海岸为例，结合海岸类型对高分辨率 SPOT-4 和 SPOT-5 卫星图像进行瞬时水边线提取，提取方法包括最小噪声分离 (MNF) 变换、改进的归一化差异水体指数 (MNDWI)、数学形态学方法和改进的 Canny 边缘检测方法。

在精确提取瞬时水边线的基础上，分别采用基于验潮站数据和结合 DEM 数据的方法对水边线进行潮位校正。利用同时期海岸线现场 GPS 测量数据对提取的海岸线进行精度验证。GPS 测量点到校正后岸线的距离平均值分别为 3.48m 和 6.82m，比未校正的 9.54m 小，校正后的岸线提取精度比未校正高。基于验潮站数据的方法校正后岸线精度最高，82% 的 GPS 测量点到该方法校正后岸线的距离小于 5 m (1/2 个像素)。

最后，基于本文方法提取的多时相海岸线数据，对秦皇岛市北戴河砂质海岸进行岸线变化分析。2006 年至 2009 年间，区域内海岸线共向陆地方向移动 3.30m；2009 年至 2011 年间，区域内海岸线共向海洋方向移动 3.02m。

关键字：遥感；海岸线提取；海岸类型；潮位校正；精度验证

Abstract

The determination of the coastline position is of great significance to integrated coastal zone management, and the use of remote sensing technology to extract coastline attracts more and more attention. Recently, two problems which need to be solved when using remote sensing to extract coastline are as follows: 1) The accuracy of coastline extraction cannot be guaranteed by applying single algorithm, because there are many coastal types and different types of coasts consist of different characters. 2) Due to the influence of tide and other factors, the boundary of land and water, extracted from remote sensing image directly, is not the real coastline. To obtain the real coastline, tidal correction is needed to move instantaneous waterline to MHWS (Mean High Water Springs)

The existing researches are mostly focused on the extraction of instantaneous waterline, but lacking of tidal correction and verification of accuracy. This paper presented a method combining coastline extraction with coastal type and tidal correction. MNF rotation, MNDWI, morphology and edge detection were applied to SPOT-4 and SPOT-5 data acquired in Qinhuangdao coastal zone to extract instantaneous waterline.

Based on the accurate extraction of the instantaneous water line, this paper also adopted the methods of using tidal data, and DEM data to calculate the slope of shoal, respectively. Moreover, the verification of accuracy of coastline extraction was achieved by the GPS data obtained in the same period. The results show that the accuracy of coastline extraction using two methods is better than the uncorrected, as a result of comparing the mean distance between GPS point and coastline extracted. The mean distance by using tidal data and DEM data is 3.48m and 6.82m respectively, which is shorter than that without tidal correction, 9.54m. Besides, the

distance between the coastline extracted by using tidal data and eighty two percent of GPS points is shorter than 5m (half of a pixel), making this method more accurate.

Finally, this paper analyzed the coastline change by using multi-temporal sandy coastline data of Beidaihe which was extracted by this paper's method. The results show that the distance of coastline moving landward is 3.30m during the period of 2006-2009, and the distance of coastline moving seaward is 3.02m during the period of 2009-2011.

Key words: remote sensing technology; coastline extraction; coastal type; tidal correction; accuracy verification

目录

摘 要	I
Abstract.....	II
目录	IV
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究意义.....	2
1.3 国内外研究现状.....	2
1.3.1 水边线遥感提取研究现状.....	2
1.3.2 海岸线潮位校正研究现状.....	6
1.3.3 海岸线变化监测研究现状.....	6
1.4 研究内容与论文框架.....	7
1.4.1 研究内容.....	7
1.4.2 论文框架.....	7
1.5 本章小结.....	8
第二章 研究区介绍及数据收集与预处理.....	9
2.1 研究区介绍.....	9
2.2 遥感数据收集与预处理.....	10
2.3 秦皇岛海岸带调查试验.....	10
2.4 本章小结.....	14
第三章 结合海岸类型的水边线提取研究.....	15
3.1 水边线提取经典算法研究.....	15
3.1.1 水边线提取经典算法优缺点比较.....	15
3.1.2 边缘检测法.....	16
3.1.3 水体指数法.....	21
3.2 海岸线类型及特征.....	23
3.2.1 海岸类型.....	23
3.2.2 四种类型海岸线的特征.....	26
3.3 结合海岸类型的水边线提取方法.....	29
3.3.1 基岩海岸与人工海岸水边线提取.....	30
3.3.2 砂质海岸水边线提取.....	31
3.3.3 淤泥质海岸水边线提取.....	33
3.4 本章小结.....	35
第四章 海岸线潮位校正和变化分析研究.....	36
4.1 基于验潮站数据的潮位校正原理与实现.....	36
4.1.1 基于验潮站数据的潮位校正原理.....	36
4.1.2 基于验潮站数据的潮位校正实现.....	37

4.2 结合 DEM 数据的潮位校正原理与实现.....	38
4.2.1 结合 DEM 数据的潮位校正原理.....	38
4.2.2 结合 DEM 数据的潮位校正实现.....	40
4.3 海岸线提取精度验证与分析.....	42
4.4 海岸线变化分析.....	43
4.4.1 DSAS 简介	43
4.4.2 北戴河砂质岸线变化分析.....	48
4.5 本章小结.....	52
第五章 结论与展望.....	53
5.1 结论.....	53
5.2 展望.....	54
参考文献.....	55
发表文章.....	59
出版专著.....	59
致 谢	60

第一章 绪 论

1.1 研究背景

海岸带，作为陆地和海洋的交汇地带，它是人类认识陆地系统和海洋系统的重要窗口。海岸带是岩石圈、生物圈、水圈和大气圈相互作用下的产物，范围包括有沿岸陆地、潮间带和水下岸坡，并在浪、潮、流与入海河流动力的作用下不断演化。海岸带有丰富的水产、土地、石油与天然气等自然资源，并得到不同程度的开发利用，它是大陆架和深海资源开发的前沿基地，同时也是沿海国家对外交往的门户和国防前哨。所以，海岸带对国家经济建设、国防建设和国土资源管理都具有重要地位，特别是对于有志从海洋大国迈向海洋强国的我国来讲，海岸带的合理开发和利用将对海洋建设产生重大意义^[1]。

我国海岸带跨越温带、亚热带和热带三个气候带，总面积约为 28.5 万 km²，其中人口密集、开发程度较高，所以，合理开发利用海岸带对于我国可持续发展具有重要的战略意义。虽然海岸带具有丰富的宝贵资源，但由于海岸带是地质环境、生态环境敏感和脆弱的地带，经常受到海洋动力（波浪、潮流、潮汐）、入海河流和气候等一系列自然因素的作用，承受着侵蚀或淤积。同时，近期填海造陆、军事工程、港口建设和渔业养殖等人类活动也极大影响着海岸带的变化速度和方向^[2]。为保证海岸带的可持续发展，对其进行相应调查和监测显得尤其重要。海岸线是海岸带变化的一个重要标记，通过监测海岸线变化可以获取海岸的蚀淤情况，为海岸带综合管理提供数据支撑。

海岸线，顾名思义是海陆交界线，包括大陆海岸线和岛屿海岸线。基于不同学科的研究目的，海岸线具体定义有所不同：在测绘学中，海图上的海岸线为多年平均大潮高潮的水陆分界线，但航海图上的海岸线以最低低潮线为分界线，为了航海安全上的需要，实际绘制的航海图上的海岸线会比最低低潮线还略微低一些；在自然地理学中，通常是用海洋最高的暴风浪在陆地上所达到的位置来划定海岸线；在我国海域使用管理中，海岸线即指多年平均高潮位时海陆分界线，现有的海洋管理工作都是以海岸线为标准的^[3]。

海岸线是划分海洋与陆地行政管理区域的基准线，是确定领海内水和陆地的

分界线，也是区分海洋深度基准和陆地高程基准的分界线。海岸线探测是地图测绘、海道测量、海岸带调查、海岸演变研究、海岸和海域管理等的重要内容，也是重要的基础地理数据。快速准确测定海岸线的位置是人们研究海陆相互作用、沿海围垦、港口开发、城镇扩建等必须进行的一项技术活动^[4,5]。

1.2 研究意义

传统的海岸线探测手段一般包括实地测量法和摄影测量法。实地测量法通常采用光学测量仪器（如全站仪）或 GPS 在高潮潮位线附近每隔一定距离采集海岸线特征点，导入数字地形图并连接成线得到海岸线。摄影测量法利用摄影像片人工绘制海岸线，与实地测量法同样需要在野外采集海岸线特征点，而且要求影像清晰、细节突出，当影像缺乏明显高潮潮位线特征时，判读往往难以进行。传统手段探测海岸线虽然结果准确，但是必须做大量的野外工作，耗时费力，效率不高，工作周期长并且难以及时反映海岸线的动态变化^[4]。我国共有大陆海岸线 1.8 万 km，岛屿岸线 1.4 万 km，两者总长度位居世界第八位，利用传统手段对其进行探测显得捉襟见肘，结合现代科技的遥感探测技术受到越来越多的关注。

遥感是运用物理手段、数学方法及地学规律的一项现代化综合性探测技术，海岸线遥感提取技术建立在传感器可对不同地物分界线进行探测基础之上^[6]。随着传感器性能的提升，越来越多的专家学者开始利用遥感手段快速而准确地提取海岸线。相比较传统的海岸线探测手段，遥感以其高时效性，大范围，经济性等特点逐渐成为一种高效快捷的海岸线提取技术。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 水边线遥感提取研究现状

卫星难以获取恰好位于平均大潮高潮线的影像，我们获取的多为瞬时水边线影像，利用潮位对水边线进行校正可提取海岸线。水边线提取方法的好坏直接影响海岸线提取的精度，它是海岸线遥感提取的必要步骤，所以对其研究必不可少。由于受海岸线海陆边界特征的影响，提取海岸线特征实质是一个图像分割的过程，方法较多，目前较为常用的方法包括：阈值分割法，边缘检测法，主动轮廓模型法，区域生长提取法，神经网络分类法、和其它结合不同遥感数据源及图像处理新技术的方法。

(1) 阈值分割法

阈值分割法在图像分割领域中被广泛应用,它是根据图像灰度值将一幅数字图像 $F(x,y)$ 分割成不同的区域,如将分割后的图像记为 $G(x,y)$,则可表示为:

$$G(x,y) = K \quad (1-1)$$

$$K = 1, 2, 3, \dots, K(T_{K-1} < F(x,y) \leq T_K) \quad (1-2)$$

式中: T_0, T_1, \dots, T_K 是一系列分割阈值; K 为赋予分割后图像各区域的不同标号。

它的主要特点是原理简单、实现容易、计算量小,但是适用于要分割的物体与背景有强烈对比度的图像。在水陆背景对比较明显的情况下,影像直方图通常表现为较好的双峰形式,取直方图谷底作为阈值门限,可以将水体和陆地分割成 2 部分,然后将水陆边界连接起来,就可以得到海岸线^[7]。

Joo-Hyung Ryu 等^[8] (2002) 利用不同波段的 TM 图像进行波段运算,选择合适的阈值分开了单纯的淤泥质海岸和混浊的海水,但在近岸海水比较混浊的情况下,该方法误差较大;瞿继双^[9] (2003) 提出基于多阈值的形态分割方法,将阈值检测后的孤立区域划分为内陆、外海和沿海三种孤立区域,然后根据区域距离和最小路径的定义,利用形态学算子对沿海岸线的孤立区域进行处理;张永继等^[10] (2005) 提出了一种利用邻域相关信息快速提取人工岸线的方法,利用 IKONOS 的全色影像,使用二维类间方差最大阈值法实现对整幅影像的二值化,极大提高岸线提取的效率;王琳等^[11] (2005) 根据修正归一化水体指数 MNDWI,利用 1989、1995 和 2000 年三个时相的 TM/ETM+影像,选择合适阈值成功提取了水边线;崔步礼等^[12] (2007) 运用水体辐射反射率在近红外波段明显单一并低于其他地物的特性,运用阈值分割提取水边线并分析了海岸线的演变过程。

(2) 边缘检测法

边缘检测法主体思想是利用边缘检测算子找到图像中的边缘点,然后按照一定策略连接成水边线的边缘。边缘检测算子包括传统的边缘检测算子,如 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子、Robinsou 算子和 LOG 算子等;新兴的边缘检测算子,如 Canny 算子、小波边缘检测算子、广义模糊算子和形态学边缘检测算子等。

边缘检测法利用图像灰度梯度变化信息,不需要考虑岸线背景差异,因此获

得的海岸线位置一般较为准确。但其受遥感影像上噪声点的影响,检测的边缘容易中断,通常需要进行后续的边缘处理。Andreas Niedermeier^[13](2000)利用小波边缘检测算法对 SAR 影像水边线进行提取,并使用相同潮汐条件的多时相影像进行海岸线的动态监测;冯兰娣等^[14](2002)使用高斯函数的一阶导数作为小波变换函数的核函数,对 TM 影像做小波变换,通过检测小波变换模式的极值点得到图像水边线的候选边缘点,然后再经过滤波得到图像的边缘,研究表明基于小波变化的检测提取要优于传统边缘检测算子;H.LIU 等^[15](2004)结合 CANNY 边缘检测算子和局部自适应阈值,对雷达和光学影像进行水边线自动提取,提取精度较高;张朝阳等^[16](2005)采用 CDC 算子提取水边线,CDC 即 Color Difference Canny,基于色差的 Canny 算子。这种方法最大的突破就是利用彩色图像进行边缘提取,充分利用了彩色信息,取得了较好的效果;荆浩等^[17](2006)利用 Roberts 算子提取海岸带影像的梯度,并进行自动阈值分割,进而用轮廓跟踪法得到水边线的粗略位置;马小峰等^[3](2007)分别使用 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子和 Canny 算子对图像进行边缘检测,发现 Canny 算子的效果最好。

(3) 主动轮廓模型法

主动轮廓模型法的基本思想是定义一个能量函数,在 Snake 由初始位置向真实位置逐渐靠近,寻找能量函数的局部最小值,即通过对能量函数的动态优化来逼近目标的真实位置。一般在岸线提取时,Snake 算法常与边缘检测算法结合起来,以得到连续的岸线轮廓。然而,它需要重复初始化,导致检测过程相对复杂。

Lee 等^[18](1990)最早提出斑点平滑算法和轮廓跟踪算法,利用这两种算法,他们对美国切萨皮克湾地区的 SAR 影像进行了海岸线的快速提取;欧阳越等^[19](2004)改进了基于水平截集的主动轮廓模型,先在低分辨率图像中检测出海岸线的粗略位置,然后将轮廓线映射到高分辨率图像上,继续用水平截集进行检测,最后得到精确的结果;李林茹等^[20](2004)利用基于梯度矢量流的主动轮廓模型拟合水边线,避免出现传统主动轮廓模型在凹度较大的边缘处不能很好收敛的问题。该方法可以在较大噪声干扰下对 SAR 影像提取边缘,并且能拟合较曲折的边缘线。

(4) 区域生长提取法

区域生长提取法是将具有相似性质的像素集合起来构成区域,该方法需要先选取一个种子点,然后,依次将种子像素周围的相似像素合并到种子像素所在的

区域中。算法的关键在于选择合适的区域生长准则，常用的生长准则有基于区域的灰度差、基于区域内灰度分布统计性质以及基于区域形状等，同时，阈值选择得当与否直接对区域的大小、均匀性产生影响^[16]。

Chen 等^[21]（1995）采用区域生长算法在全色光谱图像中提取了海岸线。翟辉琴等^[22]（2005）针对水域的纹理比较细腻、灰度比较均匀的特点，提出了高、低帽变换区域生长法进行影像分割，实现对遥感影像上海洋的提取。利用区域生长法检测水边线，结果比较精确和稳定，但阈值比较难选择，抗噪性能较差。

（5）神经网络分类法

神经网络是以模拟人体神经系统的结构和功能为基础而建立的一种信息处理系统。神经网络的工作过程是：用户在输入层输入需要的参数后，网络的隐含层自动根据它对样本数据总结出来的规律和函数关系产生一定的输出，隐含层的功能类似于人脑的思考过程。然而，神经网络属于黑箱操作过程，输入层和隐含层处理较为复杂。

Ryan T W 等^[23]（1991）首先将神经网络分类法运用到海岸线提取。他将影像标准化，完成陆地与海洋的分类，然后再把影像分块输入到分类器中进行分类，这样水陆边界就转化成海岸带的条带，最后通过包容过滤器和阈值水平来确定海岸线。朱小鸽^[24]（2002）将 3 个时相影像的近红外波段作为输入，以水、1973 年以前的陆地、1992 年以前的陆地和 1992-1998 年增长的陆地作为输出，经过神经网络的数次训练并反复调整训练区、隐含层及隐含结点数，最终提取出各个时相的水边线。

（6）其它方法

除上述经典水边线提取算法之外，很多学者结合不同遥感数据源及图像处理新技术开发一系列水边线提取算法。张良等^[25]（2012）联合机载激光雷达（LiDAR）数据提取的海岸带数字表面模型（DSM）与验潮站数据提取的高、低潮面进行相交运算，生成“水陆二值图像”，然后对其以提取边缘的方式提取高、低潮线，该方法能在较少人工干预的情况下有效提取高、低潮线；冯永玖等^[26]（2012）利用基于“自下而上”演化的元胞自动机方法，结合遥感影像方向信息权重，构建了一种新的岸线提取算法，分别对人工海岸上海市长兴岛-横沙岛和淤泥质海岸上海市崇明东滩岸线进行了检测，获得较好的提取效果。

1.3.2 海岸线潮位校正研究现状

通过遥感影像提取的水边线需要经过校正才能成为海岸线,部分学者已经针对该问题展开研究,并取得了一定的成果。Rongxing Li 等^[27](2002)利用多时相水边线和海岸地形模型(CTM)、水表模型(WSM)分别获得经潮位校正的海岸线(DTS),结果精度较高;黄海军等^[28](1994)根据影像中水边线的位置和潮位高度计算出海岸的坡度,再根据平均大潮高潮的潮位对某一潮位影像的水边线进行校正,得到精度更高的海岸线位置,并使用三个时相的 TM 影像对黄河三角洲地区海岸线进行动态变化分析;韩震等^[29](2003)利用多时相遥感影像水边线高程反演技术,确定了大铲湾海岸线变化情况,并对不同部位潮滩坡度及淤积速度进行反演,他们在提取海岸线的过程中考虑潮位及季节因素的影像,提高淤泥质海岸线提取的精度;刘艳霞等^[30](2012)针对潮滩环境中潮汐和坡度变化对海岸线变化监测的影响,提出一种通过两景影像计算潮滩坡降进而准确获得海岸线的方法,并利用坡降值估算潮滩体积。

1.3.3 海岸线变化监测研究现状

近年来,海平面上升已经或行将成为海岸带的重大灾害,国家海洋局《2010年中国海平面公报》显示,2010年中国沿海海平面处于近30年最高位。比常年高出67mm,中国沿海海平面总体处于波动上升趋势,平均上升速率为2.6mm,高于全球水平。2010年,在全球气候变化和海平面上升累积效应作用下,长江口和珠江口遭遇多次咸潮入侵,给当地人民的生产生活和经济社会的可持续发展造成了一定的伤害。

考虑人为活动的影响下,海岸线的变化情况能在一定程度上反映当地海平面的升降情况。许多国内外学者开始将精力投入到海岸线变化检测的研究中,并取得了一定的成果。Faik Ahmet Sesli 等^[31](2009)利用1973年至2005年的航空影像与 Quickbird 影像对土耳其特拉布宗省海岸进行海岸线变化监测,通过研究他们发现在过去的30余年间,研究区海岸侵蚀达到12.2公顷;Sabyasachi Maiti 等^[32](2009)结合遥感影像和统计方法对印度东部的海岸线变化进行分析和预测,其中利用线性回归对海岸线的变化率进行估计,并且采用统计中的回归系数与均方根差对历史岸线进行交叉验证;Xuejie Li 等^[33](2010)利用多时相 TM 和 SPOT 影像,对中国珠江三角洲的海岸线变化进行监测,发现海岸线变化最大的部分为南沙开发区,淤积和土地开垦使得196-2000年间陆地面积的增大;H.M.El-Asmar

等^[34] (2011) 利用多时相的 MSS, TM 和 SPOT 影像对尼罗河三角洲海岸进行岸线变化监测, 其中不同岸段发生变化情况各不相同, 主要是由于洪水控制和土地利用等人类活动引起; NGUYEN Lam-Dao 等^[35] (2011) 通过采用先进的遥感技术, 基于光学和雷达时间序列卫星影像 (陆地卫星, SPOT 和雷达卫星), 对金瓯半岛 (位于湄公河三角洲南部) 土地覆被变化及湄公河河岸侵蚀情况进行了监测研究; 赖志坤等^[36] (2011) 利用灰色预测模型对海岸线变化趋势进行了预测, 最后建立海岸线变化趋势分析的基本工作流程; 赖志坤^[37] (2012) 对之前工作进行相关改进, 提出海岸线变化速率关联分析模式的基本步骤, 分析泉州古浮澳的海岸线变化情况。

1.4 研究内容与论文框架

1.4.1 研究内容

目前, 大部分关于海岸线遥感提取方法的研究都是提取遥感影像中的水边线, 即卫星过顶时刻的海陆分界线。这些方法多是利用数字图像处理技术来确定海陆分界线, 没有考虑其它因素的影响, 如不同类型的海岸在不同的季节、气候等条件下有不同的地物特征, 其海岸线在遥感影像中具有不同的纹理特征。此外, 遥感提取海岸线的精度验证较为困难, 大多数结果是同原始影像进行叠加比较, 并不能获取海岸线提取真实精度^[7]。

本文的研究内容主要分为以下 2 个方面: 1) 结合不同海岸类型进行相应水边线的提取; 2) 分别利用基于验潮站数据和结合 DEM 数据的方法, 将水边线校正至海岸线位置, 并结合海岸线实地 GPS 测量特征数据进行精度验证。此外, 利用多时相的海岸线提取结果进行岸线变化分析。

1.4.2 论文框架

基于研究内容, 本文设计论文框架大体如下 (图 1-1): 第一章绪论, 介绍研究背景、研究意义和国内外研究现状; 第二章介绍研究区概况和数据收集、预处理; 第三章和第四章是本文的重点, 其中, 第三章对结合海岸类型的水边线提取算法进行研究; 第四章实现基于验潮站数据和结合 DEM 数据两种潮位校正方法, 并对海岸线提取结果进行精度验证, 以及利用多时相海岸线提取结果进行岸线变化分析; 第五章对本文研究进行总结和展望。

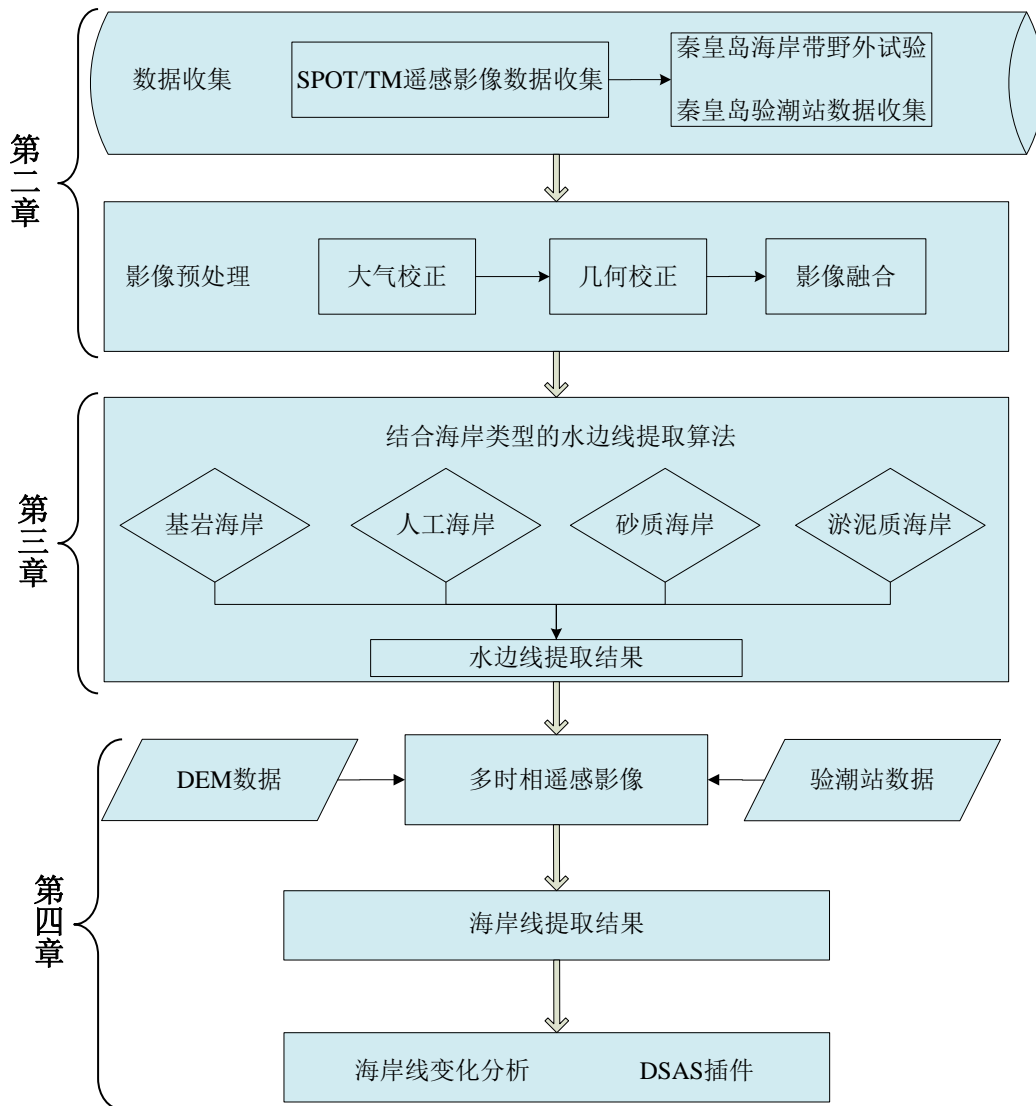


图 1-1 论文框架

1.5 本章小结

本章为论文的绪论部分，主要介绍海岸线遥感提取的研究背景及意义，在了解水边线提取方法、潮位校正和变化监测国内外研究状况的基础上，提出本文的研究内容和论文框架。

第二章 研究区介绍及数据收集与预处理

2.1 研究区介绍

本文研究区为河北省秦皇岛市海岸带地区，位于 $E119^{\circ}28' \sim 119^{\circ}44'$ ， $N 39^{\circ}48' \sim 39^{\circ}57'$ 之间（图 2-1）。秦皇岛市位于河北省东北部，北依燕山，南临渤海，东与辽宁省接壤，西与唐山市毗邻。秦皇岛市处于最具发展潜力的环渤海经济圈中心地带，是我国东北与华北两大经济区的结合部。

研究区内海岸类型丰富，主要包括自然海岸中的砂质海岸、基岩海岸和淤泥质海岸，以及人工海岸中的码头。这些海岸的开发与利用程度参差不齐，其中包括海岸港口，国家级的旅游度假区，自然保护区等。以秦皇岛港和秦皇岛煤、油码头为标志的岸段，以能源、运输为主，在局部岸段也有旅游景点；北戴河风景区海岸以及黄金海岸等岸段以旅游业为主，沿岸建筑相对密集；鸽子窝以北的北戴河鸟类自然保护区岸段都是自然保护区。



图 2-1 秦皇岛海岸带研究区

2.2 遥感数据收集与预处理

本文所用遥感数据为 SPOT-4 全色图像、多光谱图像以及 SPOT-5 多光谱图像，具体信息如表 2-1

表 2-1 SPOT 图像数据信息

卫星	SPOT-4	SPOT-5	SPOT-4
接收时间	2006.8.18	2009.10.10	2011.10.01
轨道号	287,269	287,270	287,269
分辨率	10m 全色+ 20m 多光谱	2.5m 全色+ 10m 多光谱	10m 全色+ 20m 多光谱
波段信息	SPOT-4 蓝: 0.43-0.47 μm 绿: 0.50-0.59 μm 红: 0.61-0.68 μm 近红 外: 0.79-0.89 μm 短波红外: 1.58-1.75 μm		SPOT-5 蓝: 0.43-0.47 μm 绿: 0.49-0.61 μm 红: 0.61-0.68 μm 近红 外: 0.78-0.89 μm 短波红外: 1.58-1.75 μm
处理级别	正射	正射	正射
投影方式	UTM	UTM	UTM

图像经过辐射校正和几何精纠正等预处理，几何纠正误差控制在 0.5 个像素以内。由于在提取影像水边线时需要用到光谱信息和空间信息，为提高海岸线提取的准确性，特将预处理后的 SPOT-4 全色图像和多光谱图像进行融合处理，以提高多光谱图像的空间分辨率。本文利用 Gram-Schmidt 正交化算法对 SPOT-4 全色图像和多光谱图像进行融合，该算法能较好地保持空间纹理信息，是一种高保真的遥感图像融合方法^[38]。经过融合的 SPOT-4 多光谱图像的空间分辨率达到 10m，和 SPOT-5 多光谱图像的空间分辨率相同。不同分辨率图像提取得到的海岸线精度会有所差异，为了保证海岸线变化分析的精度，多时相图像要达到相同的空间分辨率。

2.3 秦皇岛海岸带调查试验

为配合海岸线提取的精度验证，于 2011 年 9 月 13-15 日集中对秦皇岛海岸带地区展开了岸线特征点测量及海岸类型调查，具体调查区域涵盖秦皇岛腹地、山海关区、北戴河区，具体区域如图 2-2

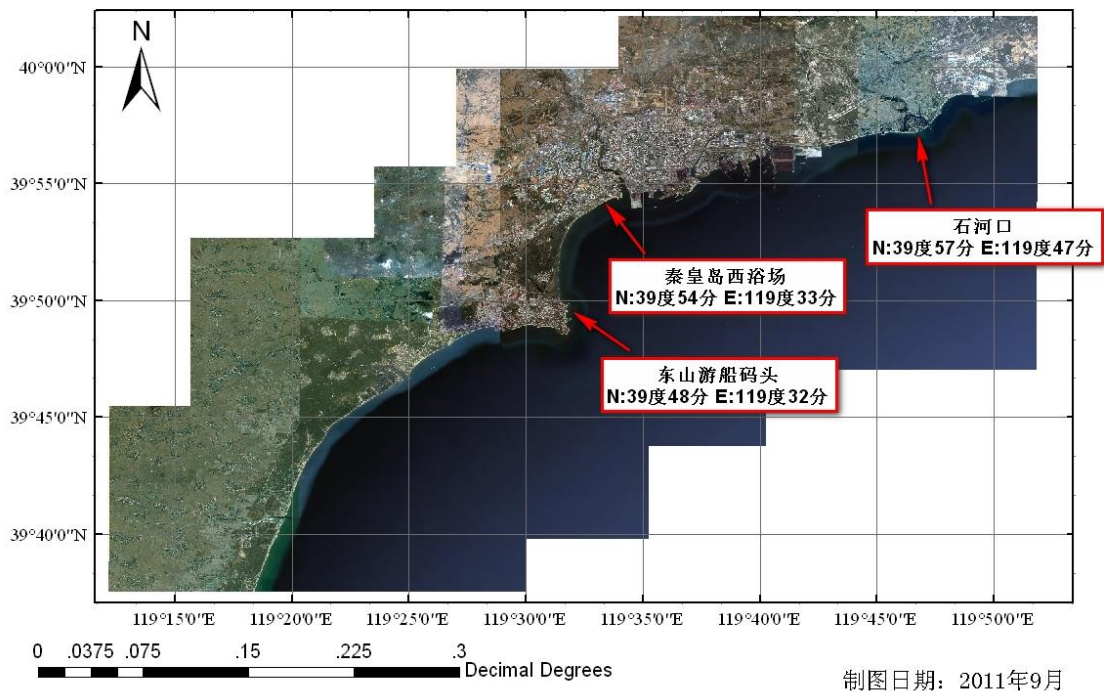


图 2-2 秦皇岛海岸带调查试验区域

试验中所用仪器如下:

- (1) 差分 GPS 用途: 用于砂质海岸线和基岩海岸线的特征点坐标测量, 以及地类考察定位。
- (2) 激光测距仪 用途: 用于测量海岸线两点间距离, 提高测量数据的完备性。
- (3) 数码相机 用途: 用于记录海岸线特征点和考察地类的实况, 为后续工作提供参考依据。

海岸线现场测量的标准参照夏东兴等^[39]的研究, 具体如下:

砂质海岸: 以海滩上部小砾石, 粗砂、贝壳碎片、流木或水草残体构成的堆积物痕迹线作为海岸线; 如果有多条痕迹线, 取最高的一条作为海岸线, 较低的作为较低潮日的水边痕迹线。如图 2-3, 红色线条为贝壳碎片和水草残体构成的堆积物痕迹线。



图 2-3 砂质海岸线现场测量
(红色线条为砂质海岸线位置)

基岩海岸：由于受波浪的反复冲击和海水浸泡而痕迹明显，岩石表面颜色存在明显差异。如图 2-4，红色线条为岩石表面颜色明显差异分界线，作为现场测量的基岩海岸线。



图 2-4 基岩海岸线现场测量
(红色线条为基岩海岸线位置)

人工海岸：为码头、防波堤、护岸等顶部靠海一侧的外边缘线，如图所示 2-5。



图 2-5 人工海岸线现场测量
(红色线条为人工海岸线位置)

淤泥质海岸：以陆生植物界限为界，同时海水作用痕迹线也较为明显，一般形成小型的波蚀陡坎或贝壳堤；海岸线为陆生植被的外边缘线或者浪蚀陡坎坡脚的最高痕迹线。如图，红色线条为陆生植物界限，即为淤泥质海岸线，但由于此处淤泥质海岸为湿地区域，无法直接进入测量，本文在湿地边缘采点作为测量点。



图 4-18 淤泥质海岸线现场测量
(红色线条为淤泥质海岸线位置)

2.4 本章小结

本章对研究区秦皇岛市海岸带概况以及数据的收集情况和预处理方法进行介绍，已收集到覆盖研究区的 SPOT-4 全色图像、多光谱图像以及 SPOT-5 多光谱图像，并对图像进行辐射校正和几何精纠正等预处理；此外，还通过秦皇岛海岸带调查试验采集到海岸线现场测量点，为精度验证提供数据支持。

第三章 结合海岸类型的水边线提取研究

由于受潮汐等因素的影响,从遥感图像上直接提取的水陆交界线并不是真正意义上的海岸线,只是卫星过顶时刻的瞬时水边线,而正好位于平均大潮高潮线的水边线则较难获取。所以,要想获取真正的海岸线,需要将水边线进行潮位校正至平均大潮高潮线。然而,提取水边线是海岸线提取非常关键的一步。

3.1 水边线提取经典算法研究

3.1.1 水边线提取经典算法优缺点比较

现有的水边线提取方法主要包括边缘检测法、主动轮廓模型法、CDC 算子提取法、神经网络分类法、马尔科夫场方法、面向对象法和水体指数法等。本文针对各种算法进行优缺点比较,如下表所示。

表 3-1 水边线提取算法优缺点比较

水边线提取方法	优点	缺点
边缘检测法	不需考虑岸线背景差异,获取水边线位置较为准确	易受遥感影像噪声点的影响,检测边缘容易中断
主动轮廓模型法	基于能量函数最小进行图像分割,方法成熟	重复初始化,检测过程复杂
CDC 算子提取法	充分利用彩色信息,准确求出符合人眼视觉的颜色差别	对地物复杂、边缘特征或线特征破碎的遥感影像噪声过于敏感
神经网络分类法	具有模拟人的部分形象思维的能力	输入层和隐含层处理过程复杂
马尔科夫场方法	模型成熟、一定程度上降低影像斑点噪声的影响	分类往往存在误差、计算量较大
面向对象法	以影像对象作为影像分析的基本单元,提升提取精度	利用专家知识指导影像分析,处理量大
水体指数法	利用影像波段间差异,提取精度高,计算量小	不同影像波段设置不同,水体指数要进行相应改进

如表 3-1 所示, 边缘检测法和水体指数法的优缺点更为均衡, 可以在较小计算量的前提下获得较高精度的水边线提取结果。本文将重点针对边缘检测法和水体指数法进行原理介绍和相关试验。

3.1.2 边缘检测法

图像边缘检测的本质是利用某种算法提取图像中研究对象和背景间的交界线以及对象与对象的分界线。由图像边缘的定义我们可以得知, 图像的边缘就是图像灰度函数的奇异点和突变点, 也就是图像灰度发生急剧变化的区域。这种变化可以用图像灰度函数的梯度来反映, 因此图像的边缘算法可以由局部微分技术得到。总体来说, 图像边缘检测可以划分为两类: 传统的边缘检测算法和新兴的边缘检测算法。传统的边缘检测算法主要是建立在梯度运算的基础上, 如常用的 Roberts 和 Sobel 边缘检测算子; 新兴的边缘检测算法主要是将数学和信号处理上的一些新方法引入到边缘检测领域, 比较典型的如 Canny 边缘检测算子。

3.1.2.1 Roberts 边缘检测算子

Roberts 边缘检测算子由 Roberts 于 1963 年提出^[40], 该算子先根据图像上任意一对垂直于水平方向上的差分来逼近梯度算子并计算梯度, 再采用对角线方向交叉差分求得相邻两像素的灰度值之差。

$$\Delta f(x, y) = [\sqrt{f(x, y) - f(x+1, y+1)}]^2 + [\sqrt{f(x+1, y) - f(x, y+1)}]^2 \quad (3-1)$$

公式 3-1, $f(x, y)$ 、 $f(x+1, y+1)$ 、 $f(x+1, y)$ 、 $f(x, y+1)$ 分别为四邻域坐标, 都是整数像素坐标的输入图像; 公式 3-1 在 x 和 y 方向上可以用模板表示为

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Roberts 边缘检测算子相当于在图像上移动一个 2×2 的窗口, 分别取 M_1 和 M_2 计算后绝对值并相加, 最后取此结果作为中心像元 (x, y) 的梯度值。该算子利用对角线方向相邻像素的差分来近似图像梯度, 对于水平方向、垂直方向特别是具有陡峭的低噪声图像效果较好, 边缘定位较准确。然而, 对于有一定倾角的斜边检测效果不太理想, 并且存在较多漏检情况。在噪声干扰的情况下, Roberts 边缘检测方法往往不能有效去除噪声并伴有一些伪边缘。

3.1.2.2 Sobel 边缘检测算子

Sobel 于 1970 年提出一种一阶微分算子^[41], 它利用像素点上下、左右相邻

点的灰度加权，根据在边缘点处达到极值进行边缘检测。**Sobel** 边缘检测算子定义为：

$$E(i, j) = |\Delta_x f| + |\Delta_y f| \quad (3-3)$$

$$= |f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1) - f(i+1, j-1) - 2f(i+1, j) - f(i+1, j+1)|$$

$$+ |f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1) - f(i-1, j+1) - 2f(i, j+1) - f(i+1, j+1)|$$

传统的 **Sobel** 算子只取水平方向和垂直方向的卷积和如下：

$$\Delta_x f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \Delta_y f = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

Sobel 边缘检测算子很容易在空间上实现，而且受噪声的影响也相对较小。当使用较大邻域时，它的抗噪声性能将会更好，但是这样做将会增加计算量，并且获得的边缘也比较粗。**Sobel** 边缘检测算子对噪声具有平滑作用，可以提供较为精确的边缘方向信息，但同时会提取出许多伪边缘，且边缘定位精度也不够高。

3.1.2.3 Canny 边缘检测算子

Canny 于 1986 年在对前人研究方法和应用总结的基础上，提出边缘检测的三条准则——**Canny** 边缘检测准则^[42]，并利用数学公式推导出确定图像边缘检测函数性能指标的三个数学表达式——信噪比 **SNR**、检测精度 **L** 和伪边界平均距离 **M**。

信噪比准则：意在提高信噪比，不漏检真实存在的边缘，降低边缘检测的错误率，使得输出的信噪比最大；

定位精度准则：检测到的边缘点位置距实际边缘点的位置最近，而提高定位的精度；

单边缘相应准则：每一个实际存在的边缘点和检测到的边缘点是一一对应的。

假设用于边缘检测的滤波器为 $f(x, y)$ ，边缘处 $x=0$ ，信号中的噪声是加性高斯白噪声 $n(x)$ ，方差为 n_0^2 ，则边缘检测函数的三个性能指标信噪比 **SNR**、定位精度 **L** 和伪边界平均距离 **M** 分别如下所示：

$$SNR = \left| \int_{-\infty}^0 f(x) dx \right| / \left[n_0 \sqrt{\int_{-\infty}^0 f^2(x) dx} \right] \quad (3-5)$$

$$L = |f'(0)| / \left[n_0 \sqrt{\int_{-\infty}^0 f^2(x) dx} \right] \quad (3-6)$$

$$M = \pi \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx / \int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x) dx} \quad (3-7)$$

信噪比 SNR 反映了真是边界和不出现伪边界的概率, SNR 越大, 检测到真实边界的可能性就越高; 定位精度 L 表示检测所得边界和真实边界之间倒数的数学期望, 定位精度 L 越高则测量误差越小; 伪边界平均距离 M 表示随机噪声和检测函数卷积后伪边界的平均距离, 伪边界平均距离越长则测量结果中出现伪边界的个数越少。

基于上述的 Canny 边缘检测准则基础, Canny 边缘检测算法具体实现步骤如下:

- (1) 利用二维高斯滤波模板进行卷积而消除噪声;
- (2) 采用导数算子得到图像灰度沿两个方向的偏导数 (F_x , F_y), 其梯度大小 $|F|$ 和方向 θ 如式所示:

$$|F| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3-8)$$

$$\theta = \text{Arc tan} \left(\frac{F_x}{F_y} \right) \quad (3-9)$$

- (3) 通过非最大值抑制定位边缘——对整幅图像进行统计, 如果某像素的灰度值和梯度方向上前后两个像素的灰度值相比不是最大值, 则此像素就不是真正边缘像素;
- (4) 双门限算法检测和连接目标边缘——高门限 h_2 和低门限 h_1 , 其中高门限 h_2 控制着梯度图中作边缘检测起始点的性质, h_2 值越小, 保留的边缘信息就越多, 获得的目标边缘就越精细, 但是混杂的伪边缘也会增多。低门限 h_1 控制着边缘检测终止点的性质, h_1 值越小, 保留的边缘信息就越多, 边缘就越连续。随着 h_1 的增加, 目标边缘特征越小, 边缘出现断裂。

3.1.2.4 边缘检测算子比较

Roberts 边缘检测算子提取的边界是一个像元的宽度, 但有时会因此导致边缘的不连续; Sobel 边缘检测算子提取的边界是两个像元的宽度, 但由于栅格影

像的宽度等效于一定的地面距离,为提高提取精度应尽量保证一个像元的提取宽度;Canny 边缘检测算子基于信噪比、定位精度和单边缘相应三个边缘提取准则,通过高低门限分别检测强边缘和弱边缘。相较于 Roberts 和 Sobel 算子,Canny 定位精度更高,提取结果无断点出现。本文利用三个算子对图像进行边缘提取,结果图 3-1 所示:



a. 原始图像



b. Roberts 边缘提取图像



c. Sobel 边缘提取图像



d. Canny 边缘提取图像

图 3-1 原始图像和三种边缘提取图像

和 Roberts 与 Sobel 边缘检测算子相比，Canny 算子的定位精度更高，而且可以记录更多细节信息，如原始图像中突堤部分在 Roberts 和 Sobel 提取图像中丢失严重，而在 Canny 提取图像中得到了最大程度的保留，这对岸线提取是十分关键的。所以，Canny 边缘检测算子是一种精度较高，保留信息较全的算子。

3.1.3 水体指数法

3.1.3.1 水体指数的构建

水体对太阳光具有强吸收性，在大部分波段范围内呈现较弱的反射率，并随着波长的增加而进一步减弱。当波长大于 740nm 时，几乎所有入射纯净水体的能量均被吸收。所以，通常采用可见光波段来研究水体，其中水体的蓝光发射率相对较强，具有明显的散射作用，绿光次之，红光相对较弱；由于水体在近红外和中红外波段内具有强吸收特点，所以，清澈水体在这一波长内几乎无反射率。

水体指数同其他指数一样，目的是为了突出目标信息（水体信息）而抑制背景信息（非水体信息）。比值型指数是一类比较典型的指数，它创建的基本原理是在多光谱波段内寻找所要研究地类的最强反射波段和最弱反射波段，通过比值运算进一步扩大二者的差距，而且比值型指数又会被进行归一化处理，使其数值范围归一到-1 至 1 之间，这类指数最典型的要属归一化植被指数 NDVI。

根据 NDVI 的原理，归一化水体指数 NDWI 被 Mcfeeters^[43]提出，它同样是利用波段间的运算突出显示水体区域，同时抑制显示非水体区域。NDWI 公式如下：

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (3-10)$$

式中，Green 代表绿光波段，NIR 代表近红外波段，在 TM 影像中分别为 2，4 波段。由于水体的反射从可见光到中红外波段逐渐减弱，在近红外和中红外波长范围内吸收性最强，几乎无反射，因此用可见光波段和近红外波段的反差构成 NDWI 可以突出影像中的水体信息。

然而，建筑物在中红外波段的反射率比近红外波段要高，同时水体在这两波段的反射率持续降低，徐涵秋^[44]根据此原理对 NDWI 作了修改，利用中红外波段代替 NDWI 中的近红外波段，创建了改进的归一化差异水体指数（MNDWI），公式如下：

$$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR) \quad (3-11)$$

利用 MNDWI 提取水体信息得到了比 NDWI 更精确的结果，此后很多学者利用 MNDWI 进行相关研究。

此后闫霏^[45]又创建了增强型水体指数（EWI），其公式如下：

$$EWI = (Green - NIR - MIR) / (Green + NIR + MIR) \quad (3-12)$$

然而其忽略了遥感影像未经大气校正绿波段的虚高，若考虑大气影响，则某

些水体 EWI 为负而被误检。所以，EWI 并未得到很好的应用。

3.1.3.2 水体指数的比较

在利用遥感图像进行海岸线提取时，通过水体指数计算突出遥感图像水体区域、抑制非水体区域，增大两者差异进而提高提取精度。为了比较两种最常用的水体指数（NDWI 和 MNDWI）的计算效果，本文对 TM 图像（已经过大气校正）分别进行 NDWI 和 MNDWI 的计算（图 3-2），



a. TM 波段 543 合成图像



b. NDWI 图像

c. MNDWI 图像

图 3-2. 原始 TM 图像及水体指数图像

图像经过水体指数计算后，水体区域得到增强显示，非水体区域得到抑制显示，两者差异增大。通过上图比较分析可知，在图像大部分区域 NDWI 和 MNDWI 都较好突出水体，抑制非水体。然而，图像部分区域 NDWI 抑制水体效果较差，如图 3-2(b)和图 3-2(c)红框区域，NDWI 抑制非水体的效果明显不如 MNDWI。从定性角度我们已看到 NDWI 突出水体的效果不如 MNDWI，下面我们从定量角度来做更进一步的分析。分别计算图像部分水体及非水体的反射率均值、NDWI 均值和 MNDWI 均值，结果如表 3-2 所示：

表 3-2 水体及非水体的反射率均值、NDWI 均值和 MNDWI 均值

	1 波段	2 波段	3 波段	4 波段	5 波段	7 波段	NDWI	MNDWI
水体	0.1877	0.1496	0.1154	0.0820	0.0243	0.0128	0.2919	0.7205
非水体	0.1921	0.1664	0.1494	0.1615	0.1302	0.1087	0.0149	0.1220

利用水体和非水体的反差值 M 进行对比评价, M 如下式表示:

$$M=W-I \quad (3-13)$$

其中: M 为反差值, W 为水体的 MNDWI 或 NDWI 均值, I 为非水体的 MNDWI 或 NDWI 均值。经计算, $M_{NDWI} = (0.2919 - 0.0149) = 0.2770$, $M_{MNDWI} = (0.7205 - 0.1220) = 0.5985$ 。 M_{NDWI} 比 M_{MNDWI} 大了一倍多, 反差值的增加, 使得水体和非水体的区分更加容易, 这也就在定量角度上证明 MNDWI 比 NDWI 的效果更好。

3.2 海岸线类型及特征

3.2.1 海岸类型

海岸是海洋水体和陆地相互接触、相互作用和相互影响的地带, 包括海岸线和海岸带。海岸的类型有很多种, 对其进行划分的标准并不统一。可按物质组分、外力成因、海岸地貌类型等进行划分^[1], 如:

1. 以物质组分划分为平原岸、基岩岸和生物岸;
2. 以海岸动态划分为堆积岸和侵蚀岸;
3. 以外力成因与形态特征划分为磨蚀-堆积原岩岸、堆积岸和生物岸;
4. 以海岸地貌类型划分为山地港湾岸、台地岸和平原岸。

本文依据《我国近海海洋综合调查与评价专项 海岸带调查技术规程》, 将海岸类型划分如下表所示。

表 3-3 海岸类型划分

一级类	二级类
自然海岸	基岩海岸
	砂质海岸
	淤泥质海岸
人工海岸	包括港口、码头等

3.2.1.1 基岩海岸

由于地壳的构造运动,一些海岸不断抬升,使基岩构造直逼海岸边界,形成基岩海岸和岩滩。基岩海岸一般是陆地山脉或丘陵延伸并且直接与海面相交,经海浸和波浪作用形成,主要分布在半角、岬角与岛屿。基岩海岸轮廓分明,线条强劲,常有突出的海岬,并且在海岬之间会形成深入陆地的海湾。

我国基岩海岸多由石灰岩、花岗岩、玄武岩和石英岩等组成。我国基岩海岸从北至南组成成分如下:辽东半岛突出于渤海和黄海中间,该处基岩海岸多由石英岩组成;山东半岛插入黄海中,该处基岩海岸多由花岗岩组成;杭州湾以南浙东、闽北等地基岩海岸多由火成岩组成;闽南、广东和海南的基岩海岸多由花岗岩和玄武岩组成。

由于基岩海岸坡度较大,所以潮位的高度变化对基岩海岸水陆分界线在水平位置上的变化影响很小;同时受遥感图像分辨率所限,这种水平位置的变化无法在图像中表现出来。所以,在遥感图像中,基岩海岸线的位置应在明显的水陆分界线上。

3.2.1.2 砂质海岸

砂质海岸由粒径大于 0.1mm 粒级的砂组成,由平原的堆积物被搬运到海岸边,又经波浪或风改造堆积而成。我国砂质岸线绵长,砂粒粒径多在 0.21~4.41mm 之间,属于中细砂。在海岛岸段,暴雨和溪流把地表的砂砾、岩屑等大量风化物携带至岸滨堆积,经风浪、水流等动力的长期作用,即形成砂质海岸,如海南岛的亚龙湾、浙江普陀山的百步沙和千步沙;在港湾岸段,如果入海河流带来大量砂砾,沿岸堆积,或将海湾淤平,即形成砂质海岸,如胶州湾和山海关一带。砂质海岸大体可分为一般砂质海岸和沙堤-泻湖海岸。

一般砂质海岸:泥沙在激浪带堆积而形成的海岸,其范围从波浪破碎开始点起到海岸陆地上波浪作用消失处,其海滩上常发育一些与岸平行的滩脊,这些滩脊可高出大潮平均高潮位 1-2m,滩脊向陆一侧有时为基岩台地,有时为滨海平原。

沙堤-泻湖海岸:在砂质海岸堆积体及其封闭或半封闭海湾形成泻湖构成的海岸,一般具有很窄的潮汐通道。泻湖内的海水与海洋的潮位变化具有直接关系,在潮差较小的砂质海岸,波浪作用比较稳定,易于形成离岸堤并且连续分布很长的距离;在潮差较大的砂质海岸,波浪作用不稳定,不易形成连续堆积的离岸堤,

激浪流经常越过堤顶甚至冲开离岸堤而使泻湖与外海相连，形成潮汐通道。

3.2.1.3 淤泥质海岸

淤泥质海岸由粒径小于 0.05mm 的粉砂和淤泥组成，主要分布在泥沙供应丰富而又比较掩蔽的堆积海岸段，其主要成分可以分为三种类型，

表 3-4 淤泥质海岸主要成分

成分名称	粉砂质粘土	粘土质粉砂	粘土-粉砂-砂
物质含量	粘土为主，含量在 51~60%之间。粉砂（0.004~0.063mm）含量在 37~49%之间，其中砂（0.063~2.0mm）含量小于 1%	粉砂为主，含量在 51~65%之间。粘土含量在 35~48%之间，不含砂粒或者不超过 5%，少数近砂质沉积区可达 5~10%	三个粒组均超过 20%，砂含量达到 65%左右，粉砂和粘土含量大多介于 15~20%。

淤泥质海岸潮滩可分为潮上带、潮间带和潮下带三个部分，潮间带是大潮高潮线和大潮低潮线之间的潮侵地带，一般有潮沟发育，一些潮沟的上端甚至可以延伸到河流入海口。随着潮汐的周期性变化和水位的升降，可以将潮间带分为高潮滩（大潮高潮位-小潮高潮位）、中潮滩（小潮高潮位-小潮低潮位）和低潮滩（小潮低潮位-大潮低潮位）三个亚区（图 3-3）

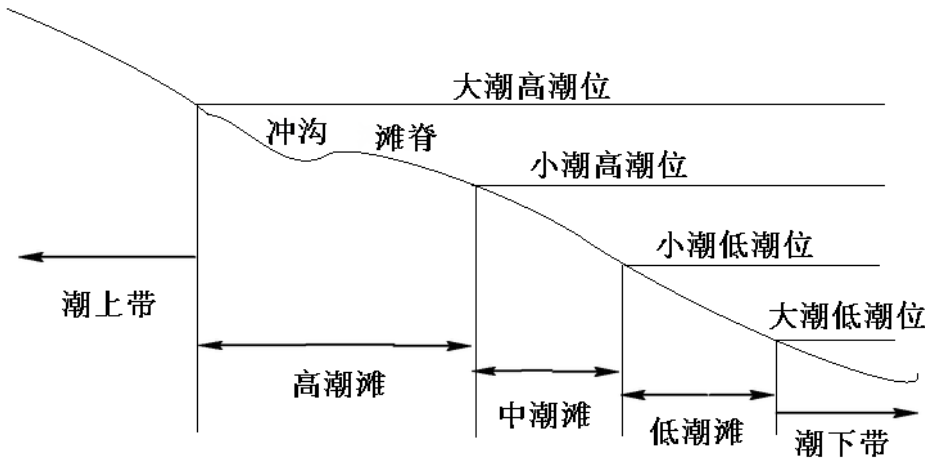


图 3-3 潮间带分区图

淤泥质海岸的岸线较平直，海滩宽广，海岸坡度很缓，潮流在岸坡的形成塑造过程中起着主导作用。当潮波进入浅水后，由于潮波的前坡变陡，涨潮流速大于落潮流速，掀沙力很强，挟沙力很大，在海底形成混浊层，这种混浊层在渤海

湾厚度可以达到 1m 左右。因此，在涨潮时底部泥沙都向岸推动一段距离，从而使海滩不断向外淤涨，岸坡也很缓。由于淤泥质海岸浅滩不断淤高并向海推进，浅滩逐渐脱离海水作用，形成湿地后成为海积平原，所以淤泥质海岸的潮间浅滩和潮上带无明显的地形界线。

3.2.1.4 人工海岸

人工海岸是为了满足人类日常活动而由人工建设的改变了原有自然状态的海岸，它主要由石块、混凝土、砖石等材料在海陆交界处修筑而成。常见的有用于停靠船舶的港口，用于生产养殖的盐田、虾池等。

3.2.2 四种类型海岸线的特征

海岸线是海洋与陆地的分界线，但海洋随着潮汐涨落不停进退，这条分界线在海洋和陆地之间不断地水平移动，并且具体位置有着随时间变化的不确定性。基于不同学科的研究及应用目的，海岸线位置划定有所不同，大致可分为以下 5 种^[47]：

1. 海水低潮面与海岸的交线，即低潮线；
2. 沿海岸滩与平均海平面的交线；
3. 平均高水位面与海岸的交线，即平均高潮线；
4. 多年平均大潮高潮线或痕迹线；
5. 后滨的后缘，即最大风暴潮向陆地所能达到的位置。

我国海域管理和测绘学中以平均大潮高潮线作为海岸线，如国家标准《海洋学术语 海洋地质学》（GB/T 18190-2000）给出的 海岸线的定义是“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”，本文所涉及遥感提取的海岸线也是以此为标准。

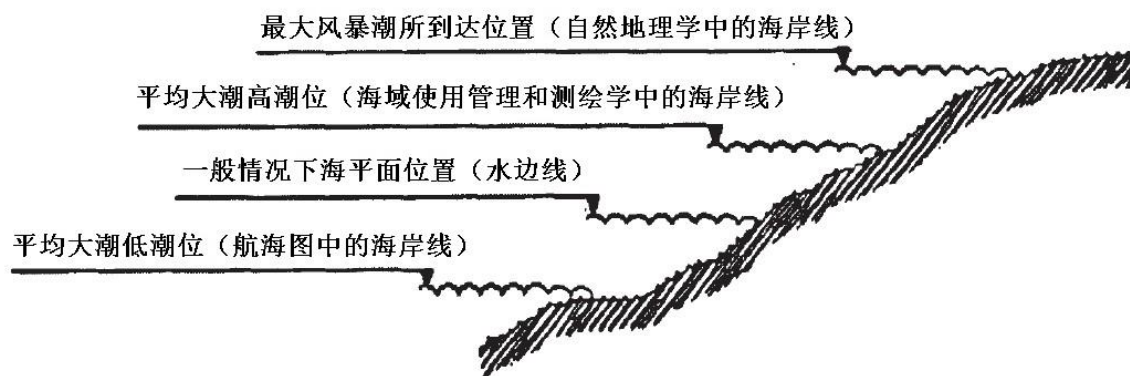


图 3-4 海岸线位置

3.2.3.1 基岩海岸线

基岩海岸具有明显的起伏状态和岩石构造^[48]。沿海地区是人口居住的密集区域，所以海边绿化程度较高的山体光谱反射率较低，表现为较粗糙的斑块状，能够和一般的岩石或者裸地进行区分；岩石山体面积比较大而植被覆盖较少，所以在图像中表现出较明显的凹凸感和山脉纹理特征，根据这两种特征可以判别出基岩海岸。

在多光谱遥感图像中，有些不可见光的波段，如近红外波段，不仅具有夜视功能，而且通过与其它波段进行组合，更易于区分地物。通过利用这些波段进行假彩色合成，可以从图像中获得更多的信息。本文利用基岩海岸 SPOT-5 多光谱图像（10m 空间分辨率，秦皇岛海岸区域，下同）的近红外波段、红波段和绿波段进行假彩色合成（图 3-5）

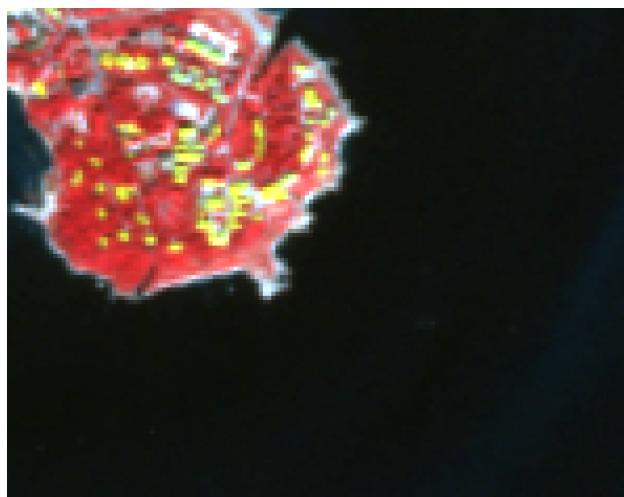


图 3-5 SPOT-5 基岩海岸假彩色合成图像

图 3-5 中，海岸植被根据不同的涨势呈浅红色至暗红色，建筑物呈黄色，海水呈蓝黑色，基岩部分呈灰白色。假彩色图像中的基岩和海水的区别变得更大，可见，基岩岸线的位置应在明显的海陆分界线上。

3.2.3.2 砂质海岸线

砂质海岸一般比较平直，由于大潮潮水的搬运，海滩上常常堆积成一条与海岸平行的脊状砂质沉积——滩脊。砂质海岸的干燥滩面由于含水量低，光谱反射率高，在影像上表现为白亮的区域，滩脊痕迹线处常常堆积有植物碎屑、贝壳等，亮度较低，而且含水量较高的潮湿滩面光谱反射率低，在影像上也表现为较暗的区域。所以，滩脊痕迹线是干燥沙滩和潮湿沙滩的分界线，可作为砂质海岸线的

位置。

对于高分辨率航空摄影图像，可以根据亮度差异对滩脊痕迹线进行定位。然而，对于 10m 空间分辨率的 SPOT-5 多光谱图像，无法直接从图像上获取滩脊痕迹线（图 3-6）。

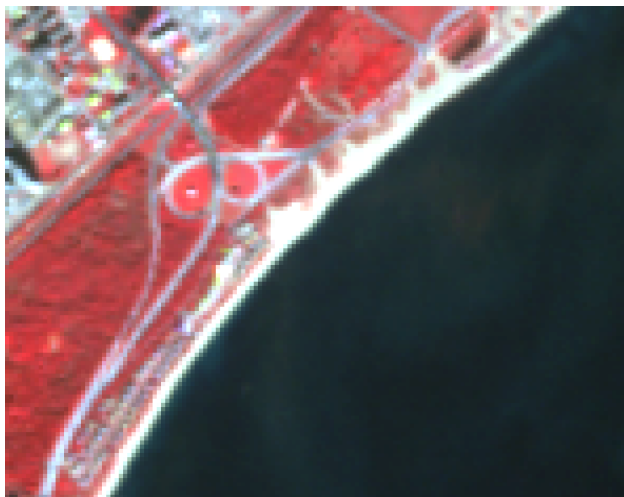
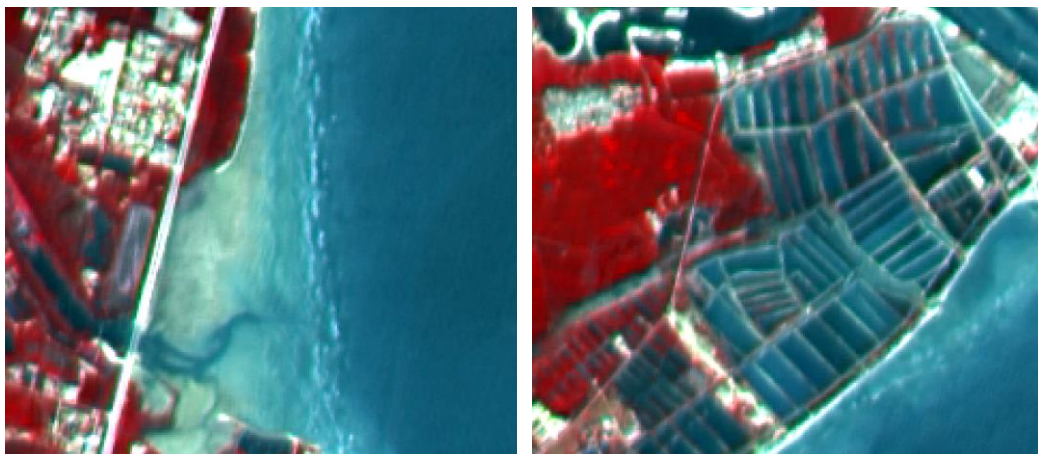


图 3-6 SPOT-5 砂质海岸假彩色合成图像

图 3-6 中，由于分辨率所限，海陆交界处仅有一个像素大小，所以我们无法从图像中确定滩脊痕迹线的位置，但是海陆分界线较为明显，可以通过图像获取瞬时水边线，然后通过验潮站数据将水边线校正到海岸线位置。

3.2.3.3 淤泥质海岸线

按照开发程度的不同，淤泥质海岸分为两种类型，一类是未经开发、保持自然状态的淤泥质海岸，这类海岸潮滩面积比较大，富含有机质而在影像上呈现青灰色或者青黑色；另一类是已开发的淤泥质海岸，在潮滩高潮位及附近的地理区域建成虾池和盐田。如图 3-7：



(a) 未开发淤泥质海岸

(b) 已开发淤泥质海岸

图 3-7 SPOT-5 淤泥质海岸假彩色合成图像

图 3-7(a)是未开发淤泥质海岸假彩色合成图像，由于此处淤泥质海岸并无大量植被生长，所以无法根据植被茂盛程度获取岸线。对于此类淤泥质海岸，单从假彩色合成图像中无法找到明显的岸线特征，需要通过其它图像增强技术提取岸线，并通过潮位数据进行相应校正获得淤泥质海岸线的准确位置。图 3-7(b)为大量养殖池，属于已开发的淤泥质海岸，为防止大潮高潮或风暴潮时海水灌入养殖池，此类海岸在近海一侧常修筑防浪堤坝。即使是大潮高潮时，海水也不能越过这些堤坝，所以这些防浪堤坝可被确定为海岸线。

3.2.3.4 人工海岸线

由于人工海岸由石块、混凝土所修筑，这类建筑材料比海水有更高的光谱反射率，在图像中易于和海水进行区分，而且人工海岸的几何形状一般较规则，例如图 3-8 中的煤码头，此处煤码头岸线即为建筑物的外边缘，当突堤横截宽度小于 20m 时，海岸线位置确定在突堤根部与陆地相连处。



图 3-8 SPOT-5 人工海岸假彩色合成图像

3.3 结合海岸类型的水边线提取方法

通过对不同类型海岸线进行特征分析，得出以下结论：1) 利用 SPOT 图像提取海岸线，无法准确获得砂质海岸线和淤泥质海岸线的位置，只能得到瞬时水边线的位置；2) 对于岸坡较大的基岩海岸线和人工海岸线，可将瞬时水边线确定为海岸线。所以，无法利用计算机技术一次直接提取四种类型海岸线。基于以上结论，本文根据不同海岸类型采取相应的水边线提取方法，具体技术流程如图 3-9 所示。

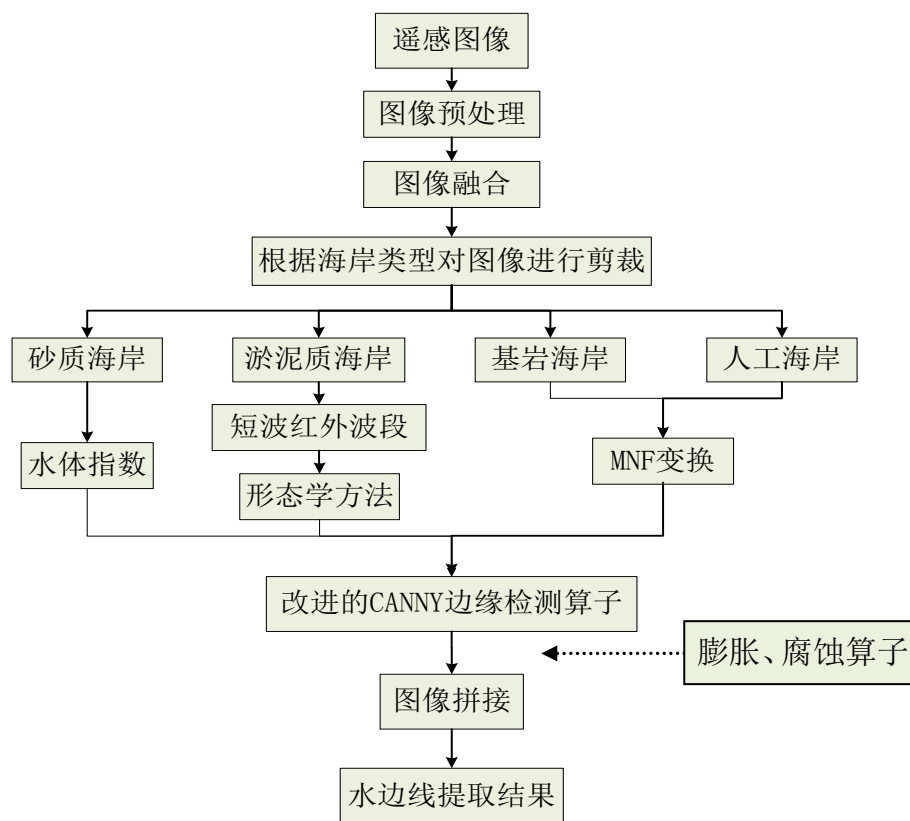


图 3-9 水边线提取技术流程

3.3.1 基岩海岸与人工海岸水边线提取

基岩海岸由坚硬的岩石组成，波浪作用是使其形成的主要动力。基岩海岸常有突出的海岬和深入陆地的海湾，海岸线较为曲折^[49]。研究区内基岩海岸具有较明显的曲折状态和岩石构造，在遥感图像中水陆分界明显。人工海岸是改变原有自然状态、完全由人工建设造成、并具有生产或生活功能的海岸。研究区内人工海岸重要组成之一是秦皇岛港煤码头，在遥感图像中形状规则，水陆分界明显。

正如基岩海岸和人工海岸的海岸线特征所示，其在遥感图像中都具有较明显的水陆分界，利用边缘检测便可提取水边线。边缘检测算子利用图像灰度梯度变化信息，不需要考虑海岸线的背景差异，因此获得的海岸线位置一般较为准确。但其受遥感图像中噪声点的影响，检测的边缘容易发生中断，所以在边缘检测之前要先对图像进行去噪。本文针对 SPOT-4 多波段图像，采用 MNF 变换选取噪声最小波段，结合改进的 Canny 边缘检测算子^[50]进行基岩海岸和人工海岸水边线的提取。MNF 变换在本质上是 2 次层叠的主成分变换——第 1 次变换利用估计的噪声协方差矩阵分离和重新调节数据中的噪声；第 2 次变换是对

噪声“白化”（均值为“0”、方差为“1”的线性变换）数据的标准主成分变换。改进的 Canny 边缘检测算子主要针对最后一步的双门限参数（低门限 t_1 和高门限 t_2 ），结合 Otsu^[51]提出的阈值选择算法进行高门限 t_2 的选择，利用式（3-14）确定 t_1 ，即

$$t_1 = 0.5 t_2 \quad (3-14)$$

改进的 Canny 边缘检测算子可以很好抑制虚假边缘的产生。基岩海岸和人工海岸的水边线提取效果（以 2011 年获取的 SPOT 图像为例，下同）分别如图 3-10 和图 3-11 所示，

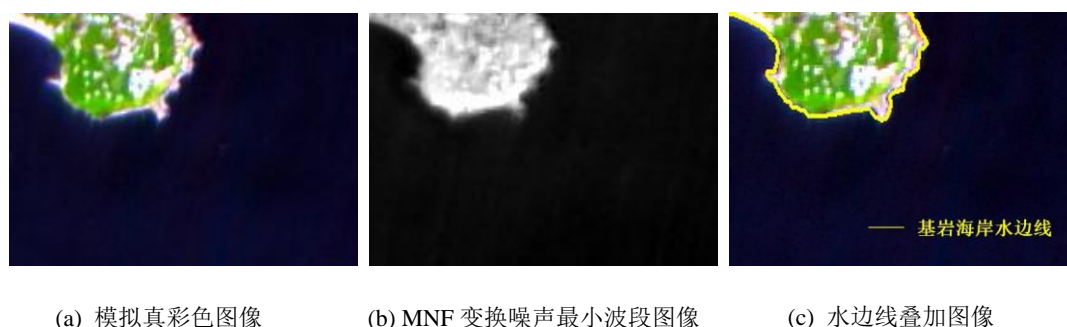


图 3-10 基岩海岸水边线提取效果

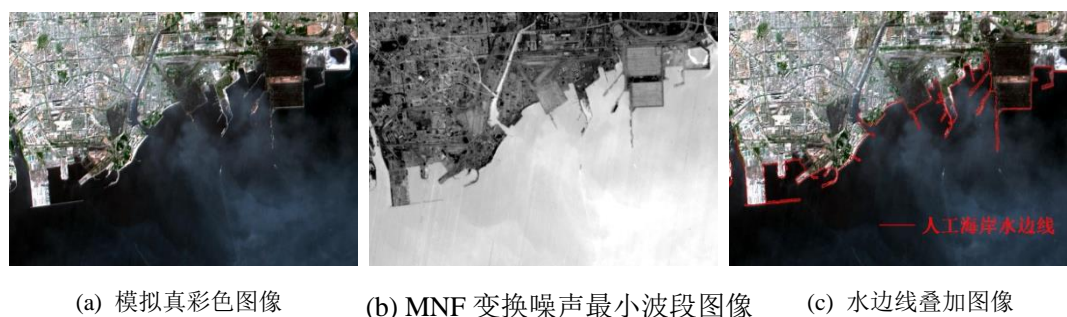


图 3-11 人工海岸水边线提取效果

由于 SPOT 图像数据没有蓝波段，不能直接合成真彩色图像。本文采用 SPOT 绿波段（B）、[（绿波段×3+近红外波段）/4]（G）、红波段（R）组合生成模拟真彩色图像（图 3-10（a）和图 3-11（a））。MNF 变换噪声最小波段图像（图 3-10（b）和图 3-11（b））可以很好地抑制噪声，同时更好地突出水陆边界。从基岩海岸和人工海岸水边线叠加图像（图 3-10（c）和图 3-11（c））中可以看出，用本文算法提取的水边线与原始图像叠加显示的效果较好。

3.3.2 砂质海岸水边线提取

砂质海岸是由粒径大于 0.1 mm 的砂组成的海岸，主要由波浪作用塑造而

成。砂质海岸的干燥滩面反射率较高，在遥感图像上表现为较亮区域；潮湿滩面反射率较低，在图像上表现为较暗区域；海水反射率最低，在图像上表现为最暗区域。遥感图像瞬时水边线应为潮湿滩面和干燥滩面的分界线，由于此分界线并不明显，直接进行提取精度不高。针对此问题，本文采用 MNDWI^[44]增大潮湿滩面和干燥滩面差异，其数学表达式为

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (3-15)$$

式中 *Green* 和 *MIR* 分别代表绿波段和中红外波段亮度值；在 SPOT4 图像中，分别为第 1, 4 波段，则式（3-15）可表达为

$$MNDWI = \frac{band1 - band4}{band1 + band4} \quad (3-16)$$

砂质海岸图像经 MNDWI 计算后的效果如图 3-12 所示。

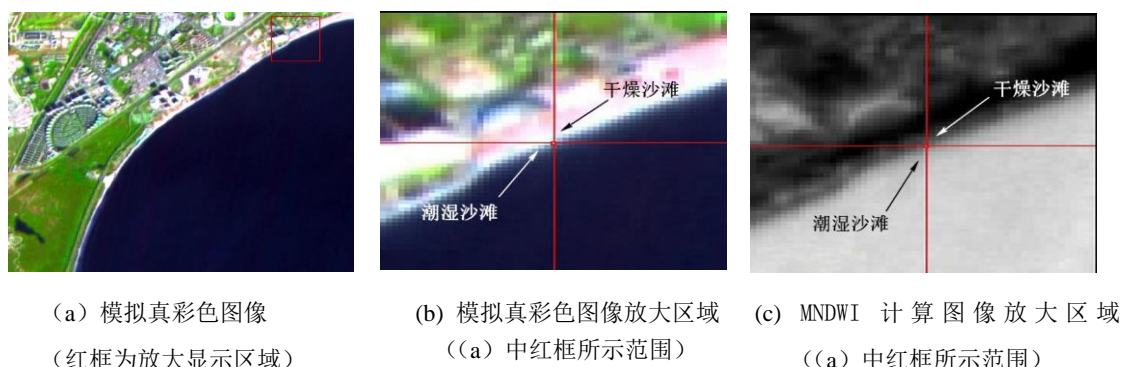


图 3-12 砂质海岸 MNDWI 计算图像效果

图 3-12 (b) 和图 3-12 (c) 中的红色叉丝位置相同，且位于水边线处；红色叉丝上方为干燥沙滩，下方为潮湿沙滩。对比 2 图可以看出，在经过 MNDWI 计算的图像中，干燥沙滩区域被抑制显示，潮湿沙滩区域被突出显示，两者分界线更加明显。

经过 MNDWI 计算，同样利用改进的 Canny 边缘检测算子可以有效地提取水边线（提取结果如图 3-13 所示）。对用本文算法提取的砂质海岸水边线与原始图像进行叠加显示，效果较好；结合 MNDWI 可使砂质海岸水边线更明显，水边线提取精度更高。

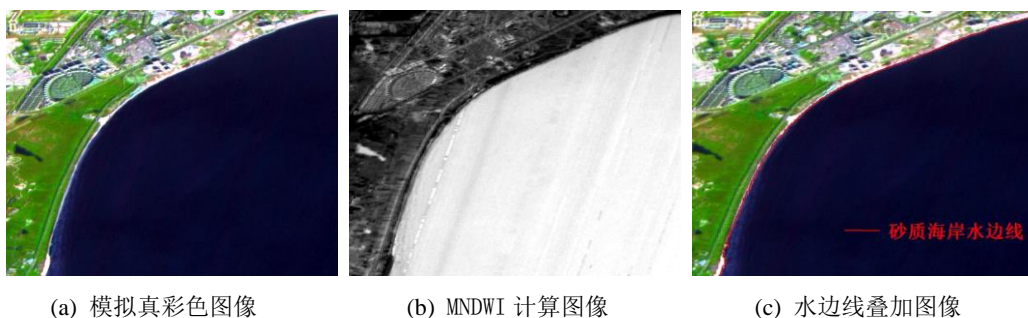


图 3-13 砂质海岸水边线提取效果

3.3.3 淤泥质海岸水边线提取

淤泥质海岸主要由平均颗粒只有 $0.001\sim 0.01\text{ mm}$ 的淤泥组成, 受上冲流的影响, 淤泥质海岸滩面坡度平缓, 滩面较宽。研究区内淤泥质海岸主要位于北戴河湿地, 并且未被开发利用。由于淤泥质海岸水沙混合, 边界比较模糊, 使水边线提取有一定难度。王李娟等^[52]分别利用 Sobel 算子和 MNDWI 对淤泥质海岸线进行了提取, 其中利用 Sobel 算子提取的结果准确度更高。潮滩含水量较高, 与海水的辐亮度在绿波段和中红外波段的变化趋势相似, 这是利用 MNDWI 提取淤泥质海岸水边线效果较差的主要原因。针对此问题, 本文在王李娟等^[52]工作的基础上, 首先利用形态学方法对 SPOT 短波红外波段图像进行处理。SPOT 短波红外波段具有较强的大气穿透能力, 使得图像上的地物、地貌更加清晰。相对于 SPOT 其他波段, 短波红外波段对土壤湿度的变化更加敏感, 可以更准确地反映淤泥质海岸地表水分含量; 但同时会产生更多的碎边缘, 从而影响边缘检测的效果。利用数学形态学方法可以很好地消除碎边缘而形成相对闭合的海陆轮廓^[53]。

基本的形态学算子包括膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。为了消除潮滩中一些较小的暗色区域, 本文首先对 SPOT 短波红外波段图像进行取反得到 S1, 将暗色区域突出显示; 然后利用腐蚀算子进行处理, 消除较小的暗色区域, 得到 S2; 将腐蚀后的图像 S2 和取反图像 S1 进行形态学重构得到 S3, 可以去除部分噪声且保持影像边缘信息不变; 最后对 S3 取反得到 S4, 并对 S4 进行闭运算(先膨胀、后腐蚀), 完成形态学处理过程。再利用改进的 Canny 边缘检测算子进行水边线提取, 提取结果如图 3-14 所示。

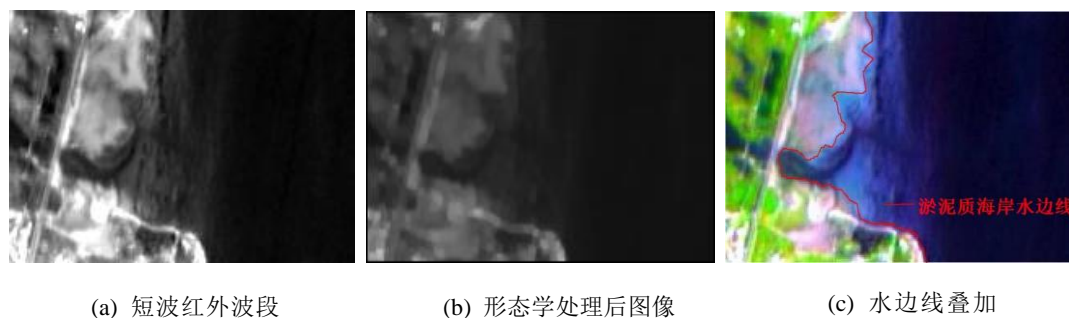


图 3-14 淤泥质海岸水边线提取效果

对比图 3-14 (a) 和图 3-14 (b) 可以看出，在形态学处理后的图像中破碎边缘减少，海陆轮廓相对闭合，更加有利于水边线的提取；图 3-14 (c) 中水边线提取结果与原始图像叠加显示的效果较好。Canny 边缘检测算子可以很好地避免海岸线断点的产生，但是当图像质量较差，或者需要提取宽度较窄的栈桥、突出岬角时，仍有可能存在断点。针对此问题，可利用形态学算子中的膨胀、腐蚀算子对相应区域进行处理，获取连续岸线。最后，将按不同海岸类型分别提取的水边线进行拼接，得到研究区整体水边线提取结果（图 3-15）。

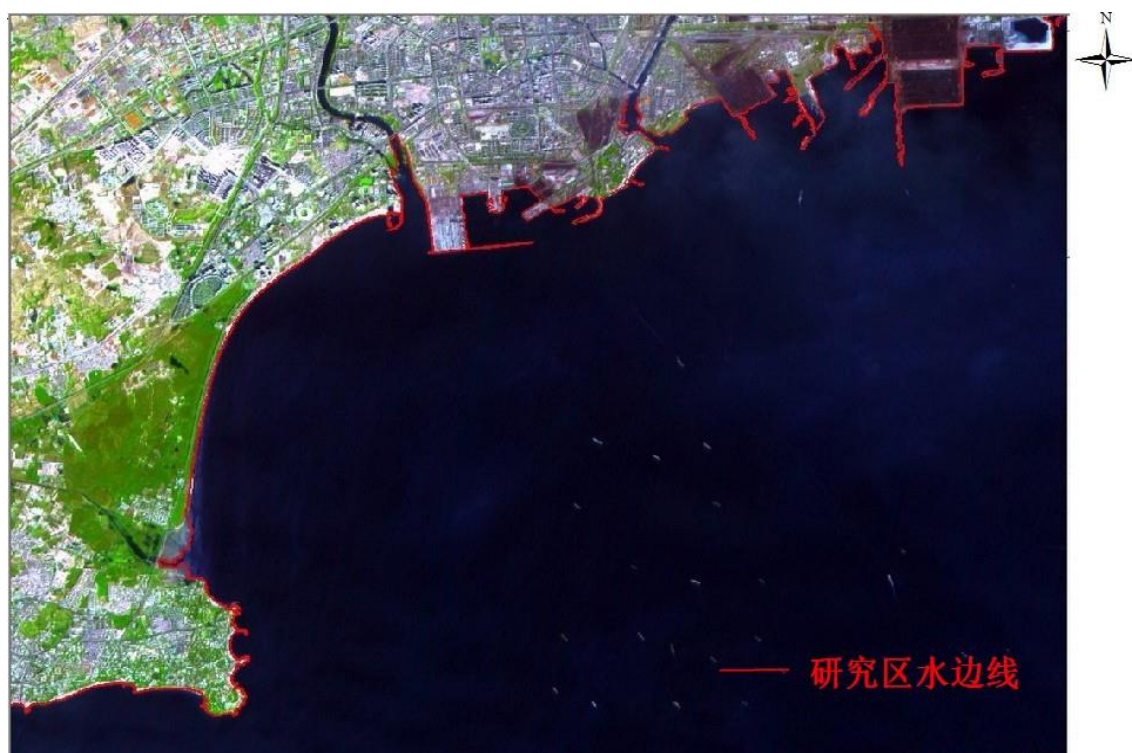


图 3-15 研究区水边线提取效果

如图 3-15，瞬时水边线提取结果与原始图像叠加显示的效果较好，而且基本上没有丢失的部分，从定性角度说明，本文结合海岸类型的水边线提取算法可以得到较好的水边线提取结果。

3.4 本章小结

本章首先对水边线提取经典算法进行研究,选取优缺点更为均衡的边缘检测法和水体指数法进行原理介绍和试验,并通过比较,确定 Canny 边缘检测算子和 MNDWI 水体指数提取效果最好,为结合海岸类型提取水边线提供方法支持。将研究区海岸类型划分为砂质海岸、基岩海岸、淤泥质海岸和人工海岸,,给出四种类型海岸线的特征。在此基础上, 提出结合海岸类型的水边线提取方法,进行试验获得较好的提取效果。

第四章 海岸线潮位校正和变化分析研究

本文已结合海岸类型成功提取出研究区内 4 种海岸类型水边线, 并从定性角度验证了其较好的提取效果。然而, 砂质海岸和淤泥质海岸的海岸线位置受潮位影响较大, 需要对水边线进行潮位校正而获得准确的海岸线。本文分别利用基于验潮站数据和结合 DEM 数据的方法对砂质海岸线和淤泥质海岸线进行潮位校正, 其中基于验潮站数据的潮位校正方法使用较为广泛, 然而由于验潮站数据为点数据, 不适宜大范围的潮位校正; 本文同时利用结合 DEM 数据的方法进行潮位校正, 比较结果精度。

4.1 基于验潮站数据的潮位校正原理与实现

4.1.1 基于验潮站数据的潮位校正原理

基于验潮站数据的潮位校正一般根据卫星成像时刻的潮位高度、平均大潮高潮位高度以及海岸坡度等信息计算出水边线至高潮线的水平距离, 从而确定海岸线的位置^[4]。其原理如图 4-1 所示。

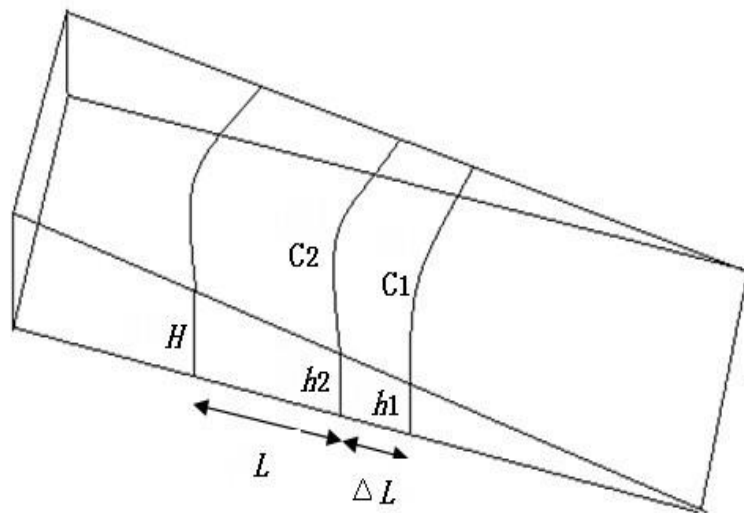


图 4-1 潮位校正原理

图 4-1 中的 C1 和 C2 为从 2 景不同时相卫星图像中提取的水边线, 在图像上量出 C1 和 C2 两水边线的距离, 设为 ΔL ; 同时确定 2 景图像中卫星过顶时刻的潮位高度, 分别设为 h_1 和 h_2 (假设 $h_2 > h_1$), 则岸滩的坡度为

$$\theta = \arctan[(h_2 - h_1)/\Delta L] \quad (4-1)$$

水边线至海岸线的距离为

$$L = (H - h_2) / \tan \theta \quad (4-2)$$

式中 H 为平均大潮高潮位高度，可根据多年潮位观测资料得到。

瞬时潮高（以 h_1 为例）为

$$h_1 = H_1 - h/2 \times [1 - \cos(t/T \times 180)] \quad (4-3)$$

式中： H_1 为当日高潮的高程； h 为当日的潮差； T 为落潮历时； t 为高潮时至遥感图像获取时的时间间隔。

4.1.2 基于验潮站数据的潮位校正实现

根据潮位校正原理，本文收集了位于研究区内的秦皇岛验潮站 2009 年 10 月 10 日和 2011 年 10 月 1 日的潮位数据（包括当日高潮位高度 H_1 ，高潮潮时 T_1 ，低潮位高度 H_2 ，低潮潮时 T_2 和 2005—2011 年平均大潮高潮位高度 H ）；通过遥感数据附带信息得到图像获取具体时刻 T_3 ；计算当日潮差

$$h = H_1 - H_2 \quad (4-4)$$

落潮历时

$$T = T_2 - T_1 \quad (4-5)$$

和高潮时至遥感图像获取的时间间隔

$$t = T_3 - T_1 \quad (4-6)$$

将式（4-4），（4-5），（4-6）代入式（4-3），即可得到 2 景 SPOT 图像获取时刻的瞬时潮高。经计算，2009 年 10 月 10 日的瞬时潮高为 $h_2 = 167.52$ cm，2011 年 10 月 1 日的瞬时潮高为 $h_1 = 138.39$ cm。

黄海军等^[28]和马小峰等^[54]均提出过潮位校正的思路，并且马小峰等^[53]还给出水边线至高潮线水平距离的计算过程。然而，现有的潮位校正研究尚有以下不足：①未给出 2 景图像上水边线距离 ΔL 的具体量测方法；②未给出潮位校正中水边线移动方向的确定方法。针对以上不足，本文以研究区内部分砂质海岸水边线为例，具体阐述潮位校正的方法和过程。

首先，分别提取 2009 年和 2011 年研究区内砂质海岸水边线，经量测总长均接近 6700 m；然后假设该段砂质海岸各处的坡度相同，在 2009 年砂质海岸水边线上每隔 100 m 取 1 个点，共取 67 个点；计算出这 67 个点到 2011 年水边线的平均距离为 $\Delta L = 5.29$ m，并连同先前所得的 h_1 ， h_2 和 H 代入式（4-1）和

(4-2)，得到 2011 年水边线至海岸线的距离为 $L=8.28$ m；最后，将 2011 年水边线向陆地方向移动 8.28 m，可获取 2011 年的海岸线位置。提取的海岸线是由多条线段组成的折线（图 4-2），陆地方向为每条线段的垂线方向（指向陆地一侧），将每条线段按其垂线方向分别移动 8.28 m，得到最终的 2011 年海岸线位置。

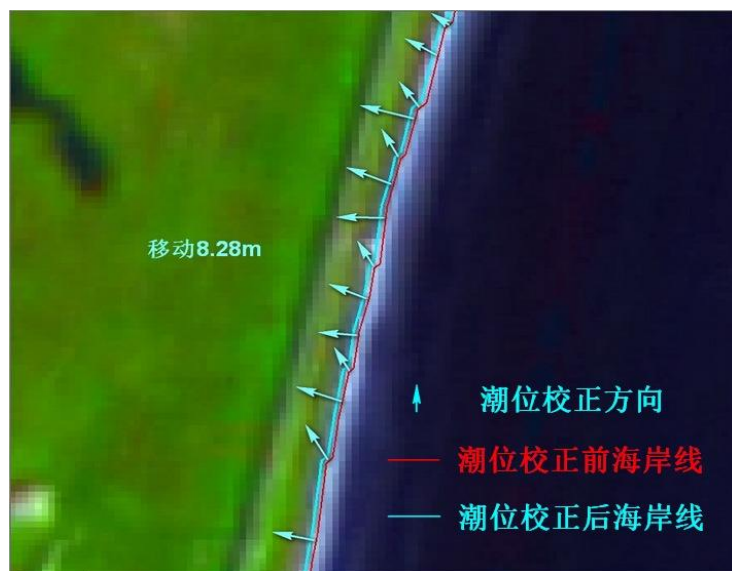


图 4-2 潮位校正方向示意图

4.2 结合 DEM 数据的潮位校正原理与实现

基于验潮站的潮位校正方法主体思路是根据多时相的遥感影像，计算其水边线间距并结合影像获取时刻的潮位高度获得海岸坡度，最后利用平均大潮高潮位高度将瞬时水边线校正到海岸线位置。其中，海岸坡度的获取需要利用多时相遥感影像和潮位高度，增加了潮位校正的数据获取难度。本文尝试结合 DEM 数据进行海岸坡度的获取，并利用平均大潮高潮位高度和影像获取时刻潮位高度，将瞬时水边线校正到海岸线位置。

4.2.1 结合 DEM 数据的潮位校正原理

DEM (Digital Elevation Model) 数字高程模型是地貌形态的虚拟表示，可派生出坡度信息，利用该坡度信息可进行相应海岸线的潮位校正。DEM 的获取方式分很多种，可利用现场测绘构建 DEM，可利用航空摄影提取 DEM，也可利用卫星遥感制作 DEM 等。当然，利用不同方式构建的 DEM 精度有所差异，与卫星遥感制作的 DEM 相比，现场测绘和航空摄影等构建的 DEM 精度更高，但是其获取较难，而且往往效率不高，覆盖范围有限。卫星遥感制作的 DEM 正在得

到越来越广泛的应用，相信随着遥感器性能的提升，DEM 的精度也会得到相应升高。本文利用分辨率相对较高的 ASTER GDEM 进行海岸线潮位校正。

ASTER GDEM 是美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的全球数字高程模型，ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)是 1999 年 12 月发射的 Terra 卫星上装载的一种高级光学传感器，包括从可见光到热红外共 14 个光谱通道，可以为地球环境、资源研究等领域提供科学、实用的数据，它是美国国家航空航天局(NASA)与日本经济产业省 (METI)和硕的项目，属于地球观测系统计划的一部分。ASTER GDEM 采用了从 Terra 卫星发射后到 2008 年 8 月获取的 150 万景近红外影像，利用同轨立体摄影测量原理生成，数据覆盖 99%地球陆地表面，是迄今为止可为用户免费提供的最完整的、最可靠的全球数字高程数据。

总体来说，ASTER GDEM 的水平精度达 30m，而且有些区域数据的精度已经远优于这个数值，其具体第一版数据的基本特征如下表：

表 4-1 ASTER GDEM V1 数据基本特征

项目	描述
分片尺寸	3601 像素×3601 像素
空间分辨率	1 弧度秒（约 30m）
地理坐标	地理经纬度坐标
DEM 格式	GeoTIFF
特殊 DN 值	无效像素值为-9999，海平面为 0
覆盖范围	北纬 83° 到南纬 83°
精度	水平精度 30m

利用 DEM 进行潮位校正的具体思路就是通过 DEM 计算得到坡度，研究区砂质海岸和淤泥质海岸沿海岸方向潮滩坡度变化较小，所以，本文认为 DEM 所得坡度即为海陆方向的潮滩坡度，忽略 DEM 坡向的影响，将 DEM 所得坡度直接应用于潮位校正。具体流程如图 4-3 所以：

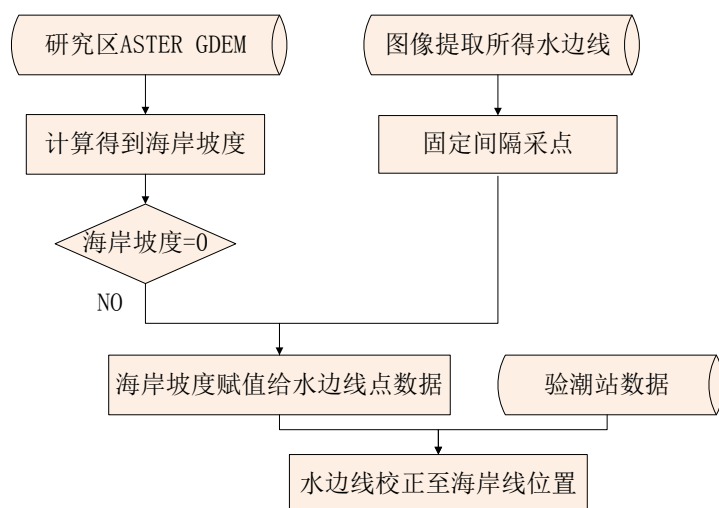


图 4-3 结合 DEM 的潮位校正流程

4.2.2 结合 DEM 数据的潮位校正实现

ASTER GDEM 可以在网上免费下载得到，而且提供数据下载的网站较多，如 NASA 网站和日本 ASTER GDEM 服务器等，本文从国际科学数据服务平台免费下载得到研究区 ASTER GDEM（图 4-4）。

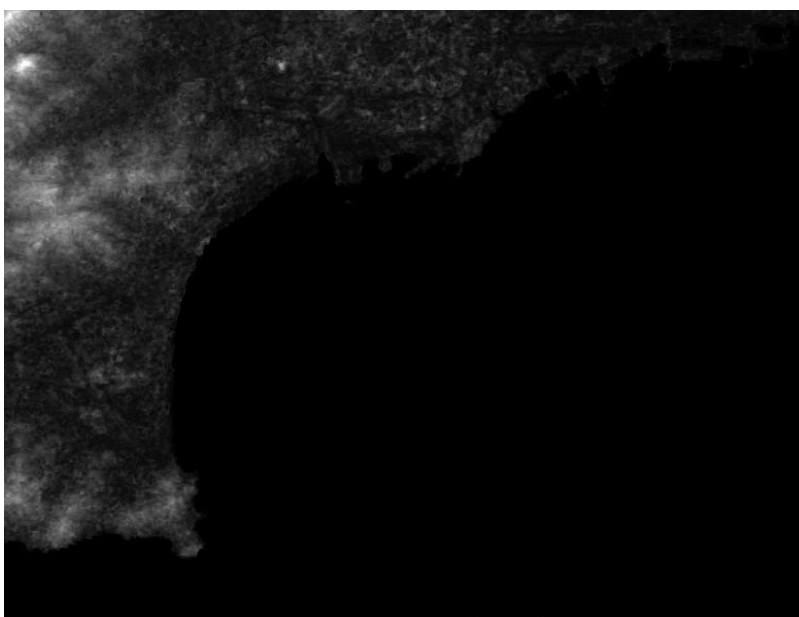


图 4-4 研究区 ASTER GDEM

地面坡度可以表述为过该点的切平面和水平地面的夹角，是高度变化的最大值比率。地表上某点的坡度 Slope 是地表曲面函数 $z=f(x,y)$ 东西、南北方向上的高程变化率的函数，其数学表达式为：

$$\text{Slope} = \arctan \sqrt{p^2 + q^2} \times 180 / \pi \quad (4-7)$$

式中 Slope 是坡度， p 是 x 方向高程变化率， q 是 y 方向高程变化率。因此，

求解坡面某一点的坡度，关键是要求解 p 和 q 。ASTER GDEM 是栅格 DEM，它以离散形式表示地面曲面，而且曲面函数一般无从获取，所以，在栅格 DEM 上对 p 和 q 求解，一般是在局部范围内（如 3×3 窗口），通过数值微分方法或局部曲面拟合进行计算。本文提取研究区 ASTER GDEM 坡度如图 4-5：



图 4-5 研究区 ASTER GDEM 提取坡度结果

以研究区砂质海岸为例，在 2011 年砂质海岸水边线上等间隔采点，采点间隔根据待校正水边线长度所定。然后，将这些点与坡度提取结果进行叠加，每个点所在栅格的坡度值便是该点的坡度 θ 。注意，DEM 获取时刻潮高可能高于影像获取时刻潮高，导致部分点的坡度值为 0，在进行下步处理之前要将这些值为 0 的点舍去。每个点水边线至海岸线的距离计算公式为

$$L = (H - h) / \tan \theta \quad (4-8)$$

式中 H 为平均大潮高潮位高度，可根据多年潮位观测资料得到； h 为影像获取时刻的潮位高度。

通过计算， n 个点得到 n 个校正距离 (L_1, L_2, \dots, L_n)，这 n 个点（包括起点和终点）将待校正水边线分为 $n-1$ 条线段。从起点开始，每条线段的校正距离为该条线段起始点计算所得校正距离，校正方向为该线段的垂线方向（指向陆地一侧）。最后，将每条校正好的线段连接便完成水边线的潮位校正，得到海岸线。

4.3 海岸线提取精度验证与分析

针对目前的研究大多缺乏对海岸线提取精度定量验证的问题, 本文利用与 2011 年遥感图像同期获取的海岸线实地 GPS 测量点进行精度验证, 海岸线实地测量点均匀分布于研究区中。精度验证的内容包括海岸线实地测量点与所提取海岸线的距离偏差最小值、最大值、平均值、标准差、距离偏差超过 5 m 以及 10m 的点数, 首先是两种潮位校正方法进行精度比较, 由于淤泥质海岸现场测量点精确度没有保证, 所以仅对砂质海岸线提取结果进行精度比较, 结果如表 4-2

表 4-2 海岸线提取精度验证结果

潮位校正方法	无校正	基于验潮站数据	结合 DEM 数据
验证点个数	50	50	50
最小值/m	2.28	0.46	0.39
最大值/m	16.08	5.84	10.26
平均值/m	9.54	3.48	6.82
标准差/m	3.45	1.52	3.00
超过 10m 的点数	30	0	5

如表 4-2 所示, 没有经过潮位校正的砂质海岸线提取精度较差, 最大偏差达到 16.08m, 而且共有 30 个点的距离偏差超过 10m (1 个像素); 结合 DEM 数据进行潮位校正后, 砂质海岸线的提取精度得到提高, 最大偏差为 10.26m, 并且仅有 5 个点的距离偏差超过 10m, 但是和基于验潮站的潮位校正方法相比, 该种潮位校正方法提取精度稍差。本文分析造成这种结果的原因主要是 DEM 精度所限, 虽然 ASTER GDEM 精度已达到 30m 的水平分辨率, 但其仍不能和 10m 分辨率的 SPOT 图像进行匹配, 导致利用 DEM 提取的岸坡精度不高, 影响海岸线校正的精度。随着 DEM 提取技术和精度的提升, 该方法进行岸线的潮位校正将会十分容易和准确。

最后, 本文对研究区四种类型海岸线的提取结果进行精度验证, 其中利用基于验潮站的方法对砂质海岸线和淤泥质海岸线进行潮位校正, 结果如表 4-3:

表 4-3 基于验潮站的海岸线提取精度验证结果

海岸类型	砂质海岸	基岩海岸	人工海岸	淤泥质海岸
验证点个数	50	20	20	10
最小值/m	0.46	0.79	0.46	4.72
最大值/m	5.84	7.69	5.97	6.34
平均值/m	3.48	3.56	2.78	5.42
标准差/m	1.52	2.28	1.44	0.58
超过 5 m 的点数	7	5	1	5

如表 4-3 所示, 4 种类型海岸线提取精度均较高, 距离偏差的最大值均小于 10 m (1 个像素)。经过潮位校正的砂质海岸线与实地测量点距离偏差的平均值和标准差都较小, 说明本文方法提取砂质海岸线精度较高并且提取结果较稳定。淤泥质海岸线虽然经过潮位校正, 但与实地测量点距离偏差的平均值却最大, 说明其提取精度在 4 种海岸类型中最低; 但其距离偏差的标准差最小, 说明距离偏差波动不大。这主要是因为研究区内淤泥质海岸分布于湿地保护区域, 而实地测量点位于湿地边缘, 难以深入湿地内部, 因此会在一定程度上影响整体验证精度。

本文对于基岩海岸和人工海岸采取相同的海岸线提取方法, 但是两者提取精度有差别, 基岩海岸距离偏差的平均值和标准差都大于人工海岸。这与研究区内基岩海岸实际特征有关, 虽然它和人工海岸都具有明显的水陆分界, 但是基岩海岸的岩石往往并不是呈 90° 的竖直面, 导致无法保证基岩海岸实地测量点全部位于水陆边缘, 验证精度略低于人工海岸。根据各种海岸分布范围均匀选取的 100 个实地测量点中, 共有 82 个点与所提取海岸线的距离偏差小于 5 m (1/2 个像素); 100 个实地测量点与所提取海岸线的距离偏差小于 10 m (1 个像素), 提取精度较高。

4.4 海岸线变化分析

4.4.1 DSAS 简介

DSAS^[55] (Digital Shoreline Analysis System) 数字化岸线分析系统, 是一款集成于 GIS 软件中用于计算多时相岸线变化率的插件, 它也可用于计算其它具有特征位置的边界变化率问题。DSAS 插件第一版自 90 年代面世以来, 得到了不断

的改进和升级，插件计算结果的稳定性获得了很大的提高。最新版本 4.3.4730 兼容于 Arcgis 10，DSAS 插件可以从 USGS（美国地质调查局）免费下载，具体网址为 <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>。

DSAS 插件的用户界面十分简单、友好，主要分为初始信息编辑、垂线设置和生成、垂线图层选择、计算设置、修剪垂线、帮助和 DSAS 相关信息 6 个相关按钮（图 4-6）。在初始信息编辑中，可对基线和垂线进行相关设置，如基线的位置方式、垂线的间距、长度等；在垂线设置和生成中，主要是设置生成垂线的名称、存储位置以及生成方式（简单和平滑）；在垂线图层选择中，主要是在计算之前需要选定需要的垂线图层；在修剪垂线中，是将指定垂线修剪至岸线变化边缘或者所有岸线的最大间隔距离处；在帮助和 DSAS 相关信息中，主要包括 DSAS 的帮助文档和相关信息；在计算设置中，需要我们选择相应的计算方法：SCE（Shoreline Change Envelope）、NSM(Net Shoreline Movement)、EPR(End Point Rate)、LRR(Linear Regression Rate)、WLR(Weighted Linear Regression)、LMS(Least Median of Squares)。

	初始信息编辑，包括基线和垂线的文件名和其它设置，如垂线的间距
	垂线设置和生成，根据用户设置生成垂线
	垂线图层选择，通过下拉菜单选择被添加的垂线
	计算设置，选择计算获取的结果形式
	修剪垂线，将指定垂线修剪至岸线变化边缘或者所有岸线的最大距离处
	DSAS 插件帮助
	DSAS 相关信息

图 4-6 DSAS 用户界面

SCE 等于最远岸线和最近岸线的距离，通过计算 SCE 可以获得所有岸线之间的最大间距，而和日期无关。如图 4-7，SCE 等于日期为 12/06/2005 和 02/21/1963

岸线间的距离 86.59m。

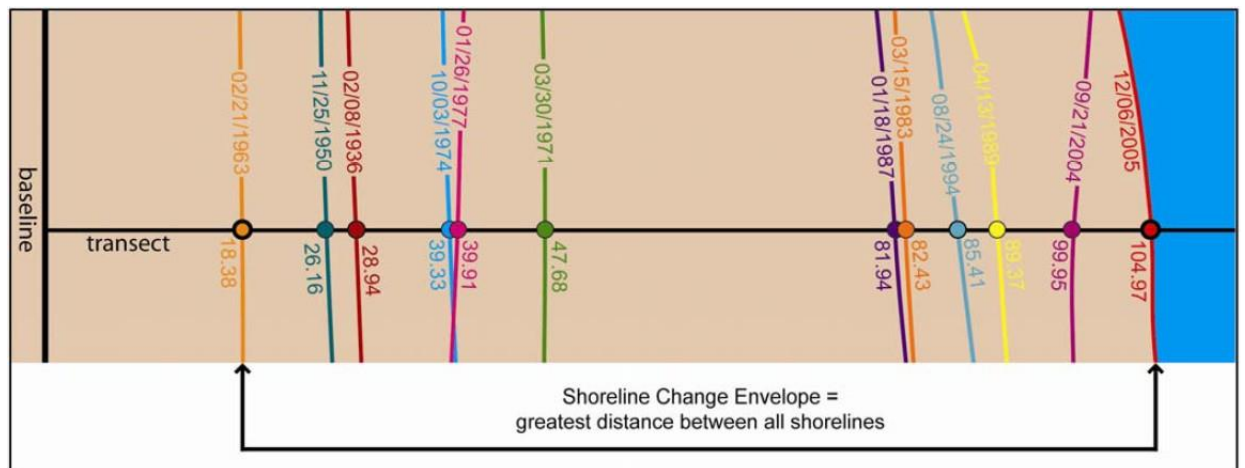


图 4-7 SCE 计算示例

NSM 等于日期间隔最大的两条岸线间的距离，也就是最新岸线与最老岸线间的距离，如图 4-8，NSM 等于日期为 02/08/1936 和 12/06/2005 岸线间的距离 76.03m。

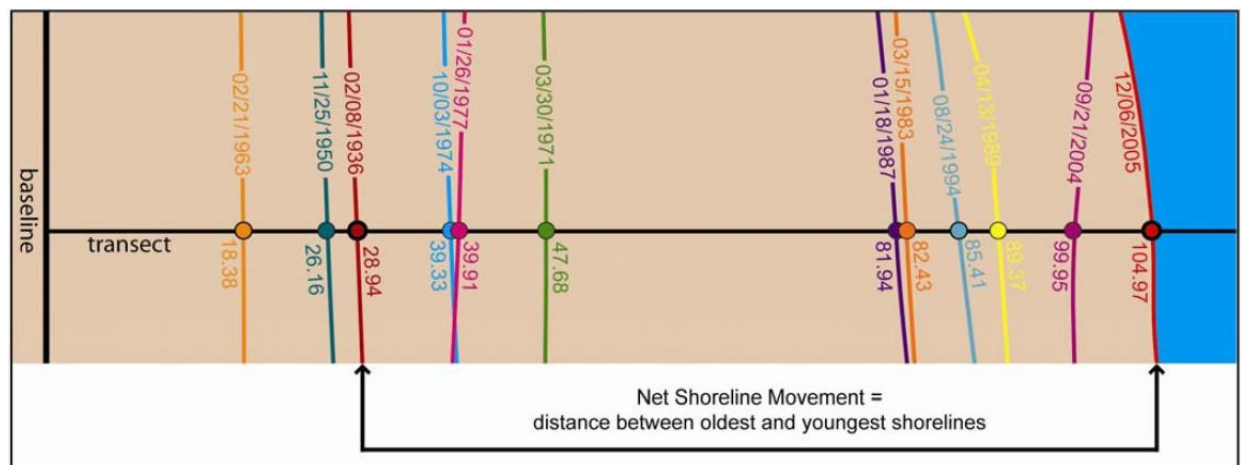


图 4-8 NSM 计算示例

EPR 是最老和最新岸线间距离的变化率，也就是最老岸线和最新岸线间的距离除以时间间隔。如图 4-9，EPR 为 02/08/1936 和 12/06/2005 岸线间的距离 76.03m 除以时间间隔 69.82 年，等于 1.09m/year。

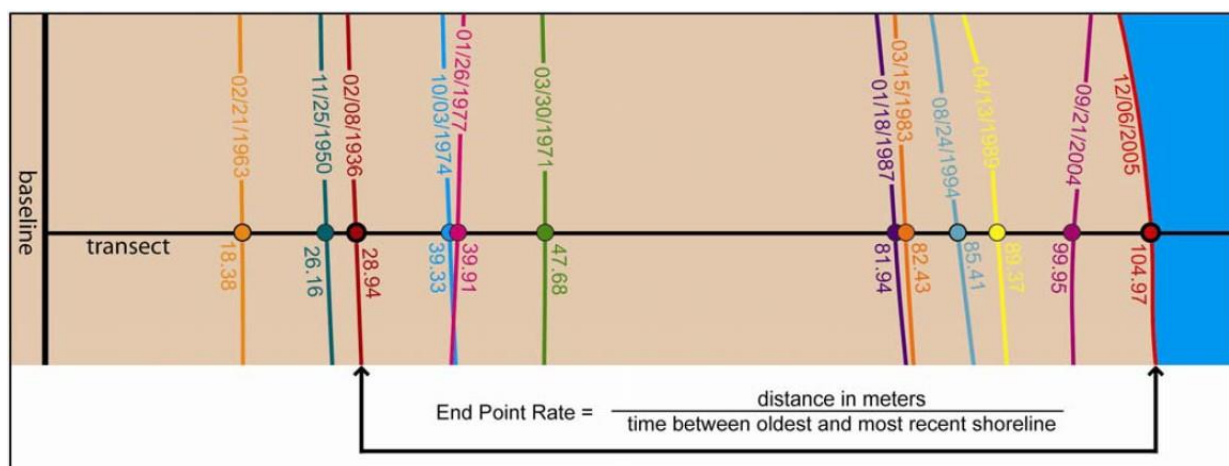


图 4-9 EPR 计算示例

LRR 是利用最小二乘线性回归方法，对所有交点（垂线和岸线）进行线性回归而获得变化率。如图 4-10，通过对所有交点进行线性回归，得到回归方程 $y=1.34x-2587.4$ ，直线斜率 1.34 就是岸线的变化率 1.34m/year。利用线性回归计算变化率具有以下特点：（1）利用到所有岸线数据，而 EPR 仅用到最新和最老时间的岸线数据；（2）该方法为纯数学计算；（3）计算基于成熟的统计方法；（4）该方法易于实现。

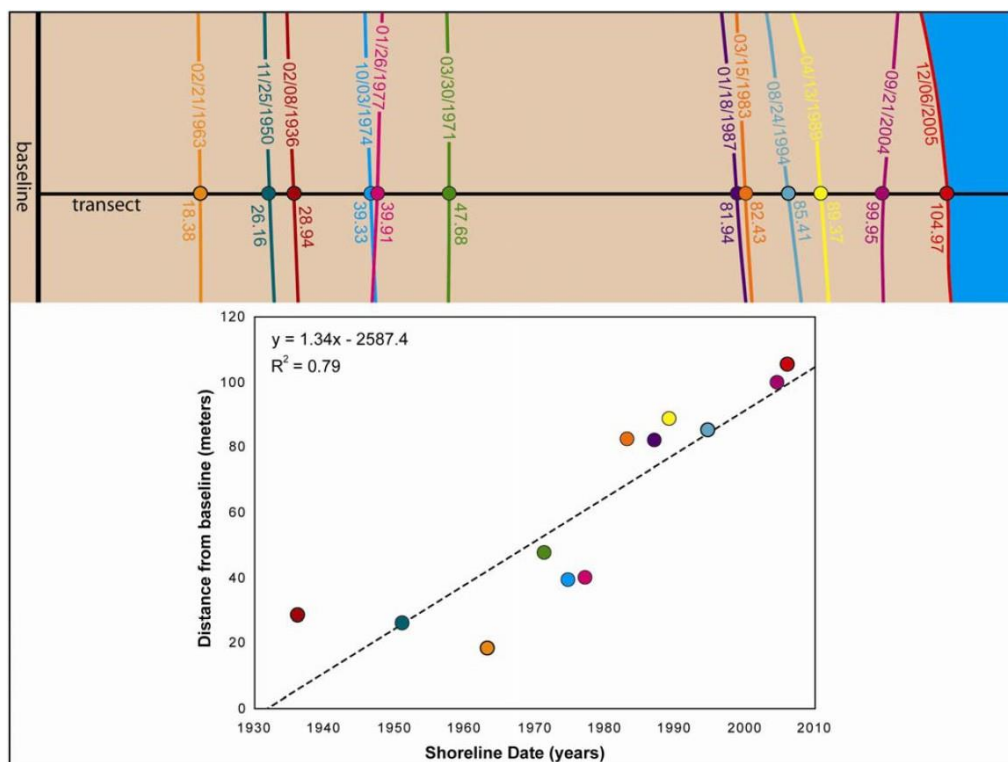


图 4-10 LRR 计算示例

WLR 是加权的岸线变化率线性回归，权重被定义为 $w = 1/(e^2)$ ，其中 e 代表岸线的位置不确定性。岸线位置不确定性越小， e 值越小，权重 w 越大。如图 4-11，回归线斜率 1.14 就是岸线的变化率 1.14m/year。

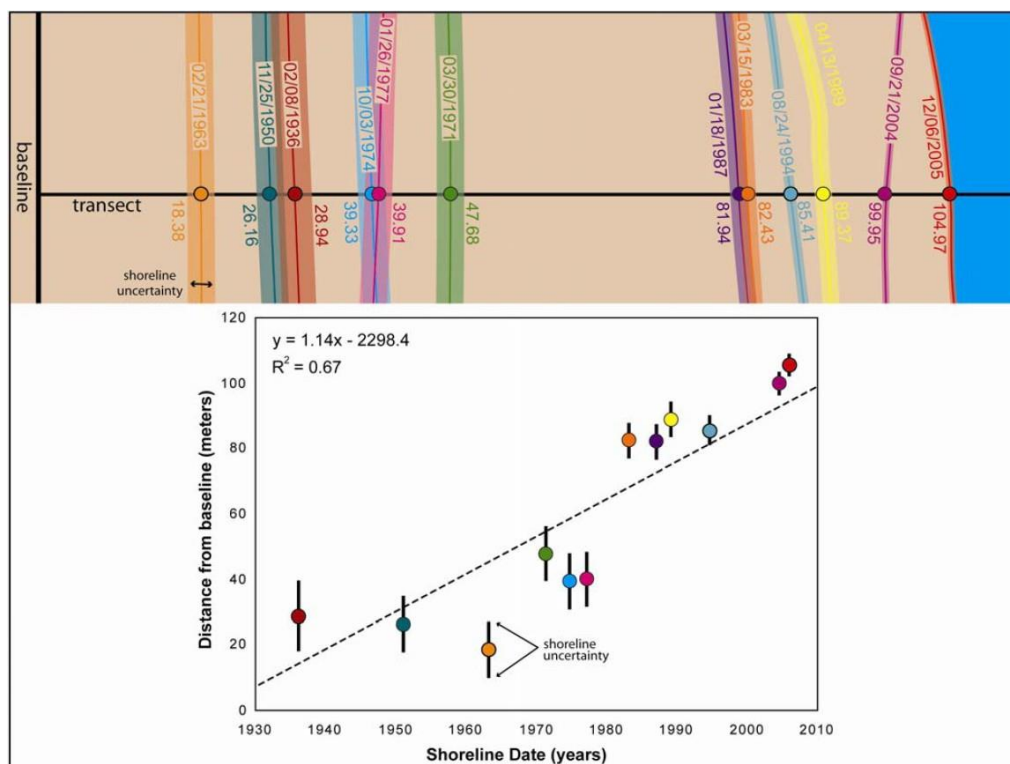


图 4-11 WLR 计算示例

LMS 是通过最小残差平方中数对多有交点进行线性回归，它利用残差平方中数代替 LRR 和 WLR 的残差平方均数来衡量回归优劣。LMS 的计算方式是，分为三轮残差平方中数的比较：第一轮，回归线从 -89° 到 89° 每次增长 1° ，利用已知 x (岸线日期) 可以获得预测的 y (岸线到基线的距离)，再计算预测的 y 与实际的 y 之间的残差平方，得到每 1° 的最小残差中数，取最小的那个角度即 56° ；第二轮，以 56° 为基础，每次增长 0.1° ，继续得到每 0.1° 的最小残差中数，取最小的那个角度即 56.1° ；第三轮，再以 56.1° 为基础，计算到 0.01° 。最后结果如图 4-12，下方左侧为 LMS 回归图，得到变化率 1.4865m/year；右侧为 LRR 回归图，得到变化率 1.33393m/year。

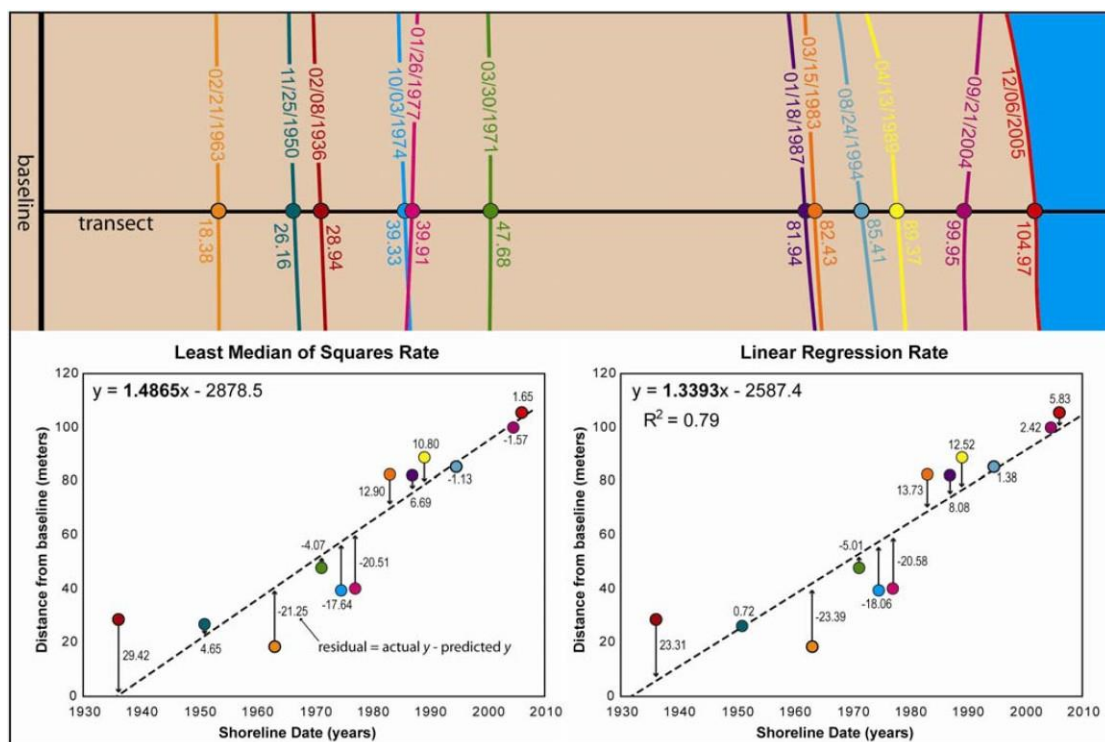


图 4-12 WLR 计算示例

4.4.2 北戴河砂质岸线变化分析

海岸线所处的海岸带是地质环境、生态环境敏感和脆弱的地带，经常受到海洋动力（波浪、潮流、潮汐）、入海河流和气候等一系列自然因素的作用，承受着侵蚀或淤积。同时，填海造陆、港口建设、军事工程和渔业养殖等人类活动也很大地影响着海岸线的变化速度和方向。多时相海岸线信息可以清晰地反映研究区海岸线的演变过程，通过获取海岸线的变化情况，可以及时发现可能破坏海岸带环境的不安全因素。

本文基于结合海岸类型和潮位校正的方法，提取得到秦皇岛市区 2006 年、2009 年和 2011 年三个时相的海岸线（图 4-13），为海岸线变化分析提供数据支持。

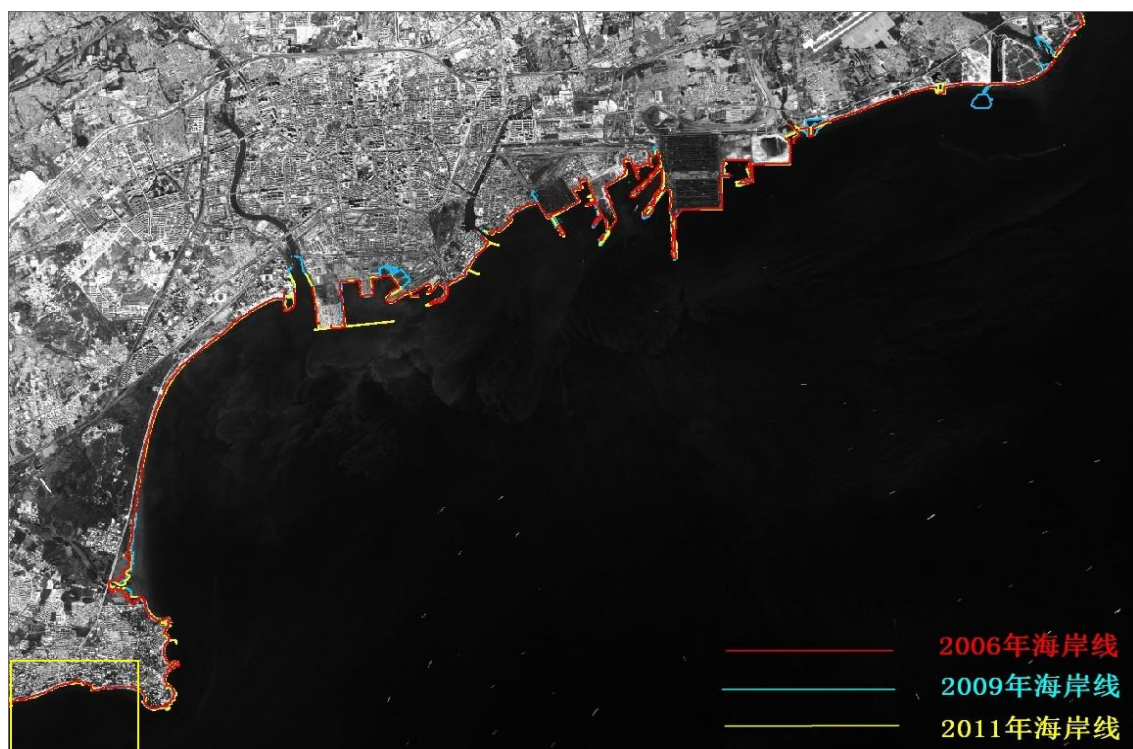


图 4-13 秦皇岛市区多时相海岸线叠加

北戴河海岸地处秦皇岛市中心的西部，海岸蜿蜒，沙软潮平，是我国著名的旅游度假区。在东起海岬角，西到戴河口的绵长海岸线上（图 4-13 黄框部分），分布着众多海滨浴场。但是，由于多方面原因，该段砂质岸线遭受着不同程度的侵蚀，本文重点对该区域岸线进行变化分析。

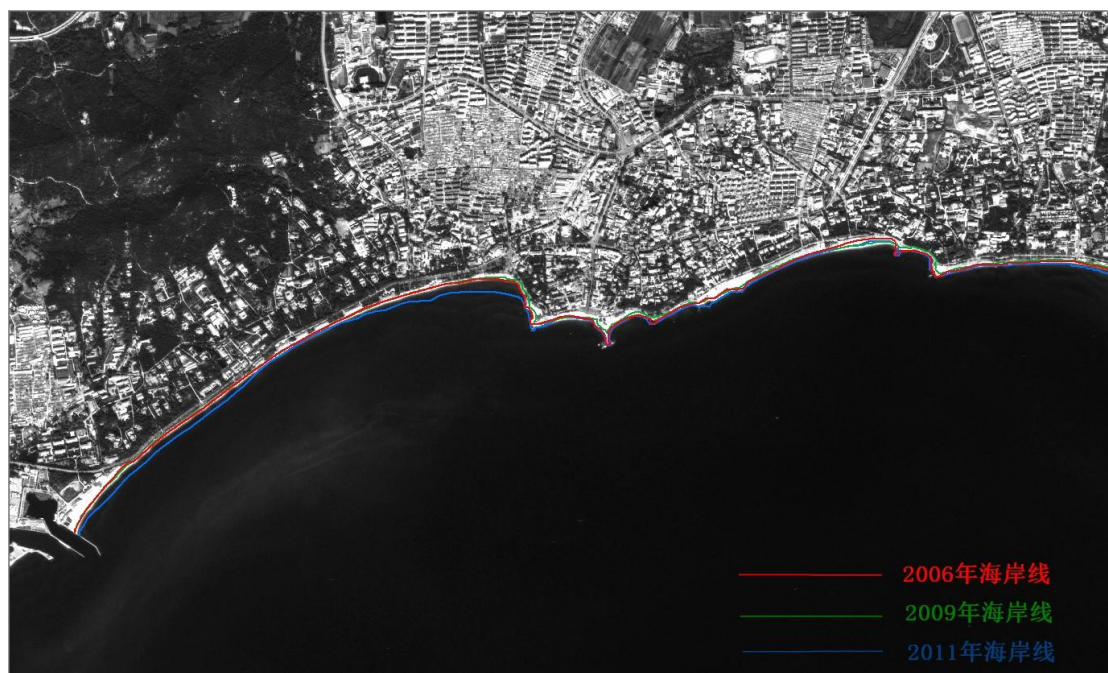


图 4-14 北戴河区域多时相海岸线叠加

在提取多时相海岸线的基础上，本文利用 DSAS 插件对其进行变化分析，上

文已对 DSAS 插件的原理进行了详细说明,通过 DSAS 生成垂线,利用垂线与海岸线的交点位置进行相应分析(图 4-15)。

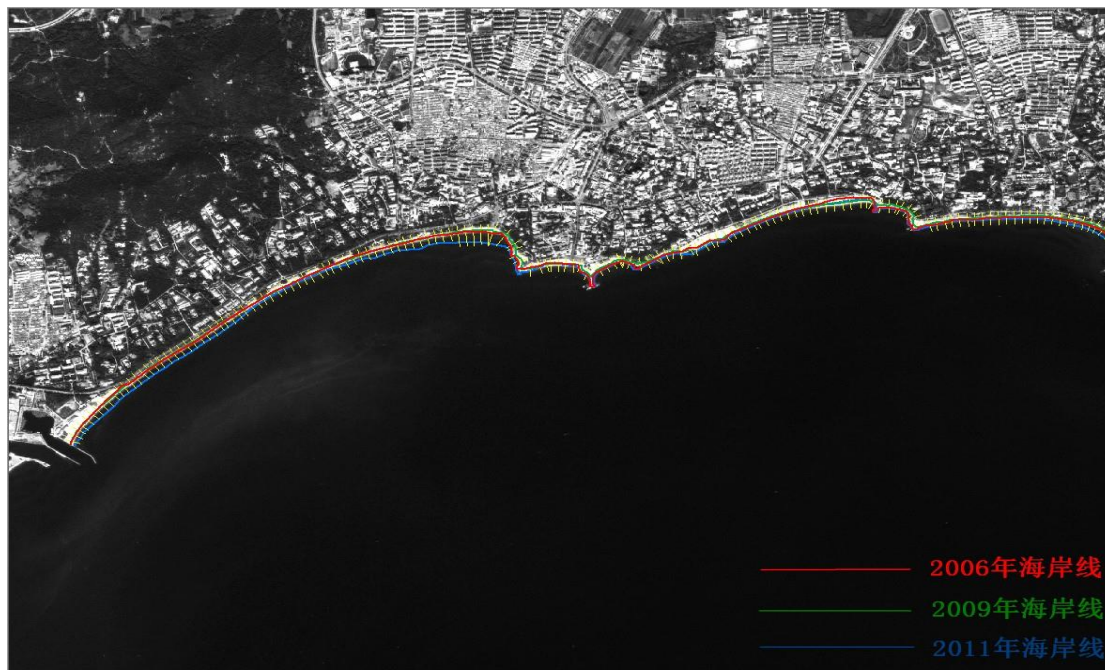


图 4-15 DSAS 生成垂线

由于本文采用三个时相的海岸线进行变化分析,时相数较少,不适宜用线性回归计算变化速率。本文利用 EPR(交点变化率)直接计算海岸线的变化速率,得到结果如表 4-4:

表 4-4 砂质海岸岸线变化信息

图像分辨率 (m)	10	2.5	10	10
时间	2006.8.18	2009.10.10	2009.10.10	2011.10.01
长度(m)	7950.43	8017.76	7831.88	7861.03
推移总距离 (m) 正为向海洋方向移动 负为向陆地方向移动	06 年-09 年 -3.30		09 年-11 年 3.02	

如果利用多源遥感图像进行岸线变化监测,应考虑图像分辨率对提取精度的影响问题。通常,海岸线提取的精度和图像的分辨率成正比,分辨率越高,提取精度越高,反之亦然。本文在进行岸线变化分析时,统一利用 10m 分辨率图像,

得到结果如表 4-4, 2006 年至 2009 年间, 区域内海岸线共向陆地方向移动 3.30m, 即侵蚀 3.30m; 2009 年至 2011 年间, 区域内海岸线共向海洋方向移动 3.02m, 即淤积 3.02m。这和实际情况比较吻合, 秦皇岛市政府与 2009 年至 2011 年间, 对此区域进行填沙养滩工程, 使得整体岸线在 2009 年至 2011 年间发生淤积; 虽然 2006 年至 2009 年间, 区域整体岸线发生侵蚀, 但是部分岸段也进行了填沙养滩工程, 岸线并未遭受严重侵蚀, 如北戴河中直六、九浴场 (图 4-16)。养滩工程于 2008 年 5 月 2 日至 2008 年 6 月 12 日, 2009 年遥感图像拍摄时间为 10 月 10 日, 已距养滩工程结束 1 年零 4 个月, 但是通过图 4-16 中, 我们可以看出, 2009 年岸线和 2006 年相比, 位置变化不大, 几乎属于重叠状态, 所以该段岸线在这段时间内并未发生程度较大的侵蚀, 养滩工程起到了一定的作用。

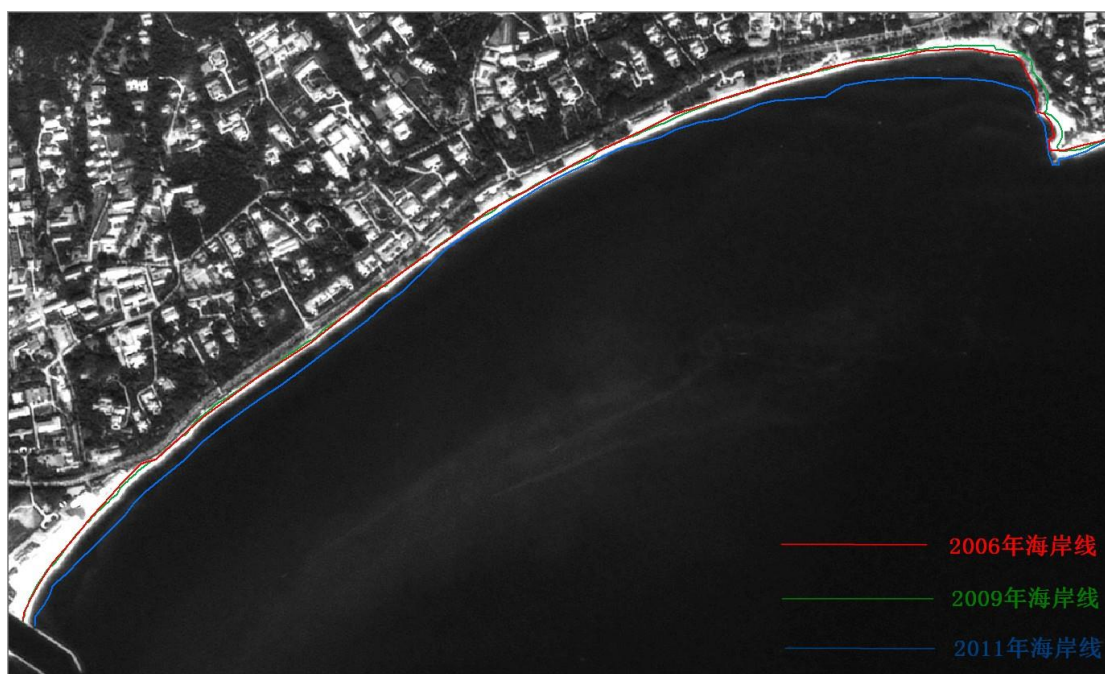


图 4-16 北戴河中直六、九浴场养滩工程位置

从遥感图像中提取的岸线是矢量, 其长度会随着图像分辨率的变化而改变, 因为图像分辨率越高, 岸线所能表达的细节便越多, 导致其长度也相应增长。本文同时利用 2009 年 2.5m 分辨率和 10m 分辨率图像进行岸线提取, 并计算岸线长度来验证此问题。2006 年至 2009 年间, 区域岸线发生 3.3m 的侵蚀, 岸线长度应该缩短, 但是 2009 年 2.5m 分辨率图像提取岸线长度和 2006 年 10m 分辨率提取岸线长度相比, 反而增长 67.33m, 与实际相反。此外, 2009 年 10m 分辨率图像岸线长度 7831.88m, 2.5m 分辨率图像岸线长度 8017.76m, 两者相差 185.88m, 占 10m 分辨率岸线长度的 2.4%, 可见影响还是比较大的。所以, 在利用不同分

分辨率图像进行岸线长度变化分析时,要考虑到图像分辨率对于岸线长度的影响问题。

4.5 本章小结

本章分别利用基于验潮站数据和结合 DEM 数据的方法,将本文方法提取的水边线校正到海岸线位置,并利用海岸线现场测量数据进行精度验证。结果表明,基于验潮站数据的方法校正精度更高,验证点与提取海岸线的距离偏差小于 5 m (1/2 个像素) 的个数占比为 82%。此外,基于 DSAS 插件对北戴河地区的提取岸线进行变化分析,2006 年至 2009 年间,区域内海岸线共向陆地方向移动 3.30m,即侵蚀 3.30m; 2009 年至 2011 年间,区域内海岸线共向海洋方向移动 3.02m,即淤积 3.02m。通过调查分析,该变化与实际情况吻合,主要由秦皇岛填沙工程所致。并且,通过比较同时相、不同分辨率图像岸线长度,证明图像分辨率对岸线长度产生较大影响。

第五章 结论与展望

5.1 结论

相比较传统的海岸线探测手段,遥感以其高时效性,大范围,经济性等特点逐渐成为一种高效快捷的海岸线提取技术。随着传感器性能的提升,越来越多的专家学者开始利用遥感手段快速而准确地提取海岸线。本文将海岸线遥感提取分为3个步骤:(1)瞬时水边线的提取;(2)海岸线的潮位校正;(3)海岸线提取的精度验证。

瞬时水边线提取是海岸线提取非常关键的一步,也是很多遥感专家都关注的领域,利用计算机技全自动、精确提取瞬时水边线是大家孜孜不倦追求的目标。然而,如果利用单一方法进行水边线提取,这样做显然是“顾此失彼”的,因为不同类型的海岸具有不同的特征,单一算法很难适用于所有类型海岸的水边线提取。本文首先针对这一步,根据不同类型海岸具有不同的地貌特征,提出结合海岸类型进行水边线的提取,利用多种图像处理技术提高水边线提取精度。

海岸线的潮位校正是提取真正海岸线不可缺少的一步,与海域管理和测绘学中海岸线的定义相同,本文也将海岸线定义为平均大潮高潮线。分别利用基于验潮站数据和结合DEM数据两种方法,将砂质海岸和淤泥质海岸的瞬时水边线校正到海岸线位置。其中,结合DEM数据的潮位校正方法有很大的发展前景。

在海岸线提取精度验证环节,本文利用同时期海岸线GPS测量点进行验证,验证结果主要分为以下2方面:

(1)两种方法校正后的海岸线提取精度都得到了提高,比原始海岸线精度高。其中结合DEM数据的潮位校正方法精度稍差一些,主要原因是DEM自身精度较低。

(2)结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取方法,对于研究区四种类型海岸线提取精度都较高,82%的验证点与提取岸线的距离小于半个像素。

最后,本文基于DSAS插件对北戴河地区的提取岸线进行变化分析:2006年至2009年间,区域内海岸线共向陆地方向移动3.30m,即侵蚀3.30m;2009年

至 2011 年间, 区域内海岸线共向海洋方向移动 3.02m, 即淤积 3.02m。通过调查分析, 该变化与实际情况吻合, 主要由秦皇岛填沙工程所致。

5.2 展望

由于海岸线现场测量耗时费力, 效率不高, 工作周期长并且难以及时反映海岸线的动态变化, 所以利用遥感技术提取海岸线是件很有意义的事情, 而且会有很大的应用价值。本文以秦皇岛市海岸为例, 采用高分辨率 SPOT 卫星图像进行瞬时水边线提取, 并分别利用基于验潮站数据和结合 DEM 数据两种方法进行潮位校正, 从而准确获取海岸线, 但在研究过程中, 还有一些问题有待进一步去思考和探索, 以提高海岸线遥感提取的精度:

(1) 本文根据海岸类型进行相应水边线的提取, 主要是根据先验知识进行图像裁剪, 在得到各海岸类型的图像上实现的。下一步研究可针对海岸带的自动分类问题, 利用分类技术自动获取海岸带分类图像, 从而提高海岸线提取的自动化程度。

(2) 本文尝试结合 DEM 数据进行海岸线的潮位校正, 和基于验潮站数据校正后的岸线相比, 精度还是偏低。主要原因是 DEM 的空间分辨率偏低以及获取时间和遥感影像获取时间不一致。下一步研究可利用先进技术如 LIDAR 获取高精度 DEM, 并且可以结合水下地形数据提高岸坡校正精度。

(3) 由于本文研究区淤泥质海岸属于湿地保护区域, 海岸线的实地测量存在困难, 验证中所取的 10 个海岸线测量点均位于湿地边缘, 因而影响了验证精度。下一步研究可尝试利用更高分辨率的遥感图像进行验证。

(4) 虽然遥感影像分辨率对于岸线提取精度有一定影响, 但是影响程度如何, 由于数据所限, 本文并未给出具体证明, 下一步研究可针对此问题展开验证。

参考文献

- [1] 杨晓梅,周成虎,杜云艳,等.海岸带遥感综合技术与实例研究[M]. 北京:海洋出版社,2005.
- [2] 李京,陈云浩,刘志刚,等.海岛与海岸带环境遥感[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 马小峰.海岸线卫星遥感提取方法研究[D].大连海事大学,2007.
- [4] 申家双,翟京生,郭海涛等.海岸线提取技术研究[J].海洋测绘,2009,29(6):74-77.
- [5] 林桂兰,郑勇玲.海岸线修测的若干技术问题探讨[J].海洋开发与管理,2008,25(7):61-67.
- [6] 刘鹏.海岸线影像特征提取方法与实证研究[D].福建师范大学,2008.
- [7] 张明,蒋雪中,张俊儒等.遥感影像海岸线特征提取研究进展[J].人民黄河,2008,30(6):7-9.
- [8] Joo-Hyung Ryu, Joong-Sun Won, Kyung Duck Min et al. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat a case study in Gomso bay, Korea[J].Remote Sensing of Environment,2002,83(3):442-456.
- [9] 瞿继双,王超,王正志等.一种基于多阈值的形态学提取遥感图象海岸线特征方法[J].中国图象图形学报 A 辑,2003,8(7):805-809.
- [10] 张永继, 闫冬梅, 曾峦等.基于邻域相关信息的海岸线提取方法[J].装备指挥技术学院学报, 2005,16(6):88-92.
- [11] 王琳,徐涵秋,李胜等.厦门岛及其邻域海岸线变化的遥感动态监测[J].遥感技术与应用, 2005,20(4): 404-410.
- [12] 崔步礼,常学礼,陈雅琳等.黄河口海岸线遥感动态监测[J].测绘科学,2007,32(3): 108-109.
- [13] Andreas Niedermeier, Edzard RomaneeBen, Susanne Lehner. Detection of Coastlines in SAR Images using Wavelet Methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2270-2281.
- [14] 冯兰娣,孙效功,胥可辉等.利用海岸带遥感图像提取岸线的小波变换方法[J].青岛海洋大学学报(自然科学版),2002,32(5):777-781.

- [15]H.LIU, K. C. JEZEK. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods[J].International Journal of Remote Sensing,2004,25(5):937-958.
- [16]张朝阳.遥感影像海岸线提取及其变化检测技术研究[D].中国人民解放军信息工程大学, 2006.
- [17]荆浩, 陈学俭, 顾志伟等.一种基于边缘特征的海岸线检测方法[J].计算机仿真, 2006, 23(8): 89-93.
- [18]LEE J S, Jurkevich I. Coastline Detection and Tracing in SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing,1990,28(4):662-668.
- [19]欧阳越, 种劲松.基于改进水平截集算法的 SAR 图像海岸线检测[J].遥感技术与应用, 2004, 19(6):456-460.
- [20]李林茹, 高双喜, 曹淑服等.基于小波变换和梯度矢量流 Snake 模型的 ERS-1 SAR 图像的海岸线探测[J].河北工业科技,2004,21(4):24-26.
- [21]Chen A J, Chen C F, Chen K S. Investigation of Shoreline change and Migration Along Wai-San-Ding-Zou Barrier Island, Central West Taiwan[J]. Geoscience and Remote Sensing symposium,1995,(3):2097-2099.
- [22]翟辉琴, 何乔, 王素敏等.基于数学形态学的遥感影像水域提取[J].海洋测绘, 2005, 25(2): 52-54.
- [23]Ryan T W, Semintilli P J, Yuen P, et al. Extraction of Shoreline Features by Neural Nets and Image Processing[J]. Photogrammetry and Remote Sensing,1991,57(7): 947-955.
- [24]朱小鸽. 珠江口海岸线变化的遥感监测[J].海洋环境科学,2002,21(2):19-22.
- [25]张良,马洪超,邬建伟.联合机载 LiDAR 和潮汐数据自动提取潮位线.遥感学报, 2012, 16(2): 405-416.
- [26]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.
- [27]Rongxing Li, Ruijin Ma, Kaichang Di. Digital Tide-Coordinated Shoreline[J]. Marine Geodesy,2002,25:1-2,27-36.
- [28]黄海军,李成治,郭建军.卫星影像在黄河三角洲岸线变化研究中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,1994,14(2):29-36.

- [29]韩震,恽才兴.伶仃洋大铲湾潮滩中淤遥感反演研究[J].海洋学报,2003,25(5):58-64.
- [30]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.
- [31] Faik Ahmet Sesli, Fevzi Karsli, Ismail Colkesen, Nihat Akyol. Monitoring the change position of coastlines using aerial and satellite image data: an example from the eastern coast of Trabzon, Turkey[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009,153:391-403.
- [32]Sabyasachi Maiti, Amit K. Bhattachaya. Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach[J]. Marine Geology, 2009,257:11-23.
- [33]Xuejie Li, Michiel C.j. Damen. Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental management of the Pearl River Estuary, China[J]. Journal of Marine Systems,2010,82:554-561.
- [34]H.M.El-Asmar, M.E.Herher. Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing[J]. Environmental Earth Sciences,2011,62:769-777.
- [35]NGUYEN Lam-Dao, VIET Pham-Bach, et al. Change Detection of Land Use and Riverbank in Mekong Delta, Vietnam Using Time Series Remotely Sensed Data[J]. Journal of Resources and Ecology,2011,2(4):370-374.
- [36]赖志坤,汪卫国,孙全等.海岸线变化速率及趋势定量分析研究[J].海洋测绘,2011, 31(2): 61-64.
- [37]赖志坤.海岸线变化速率的灰关联分析方法研究[J].海洋测绘,2012,32(1):42-44.
- [38]Laben. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening: 6 011 875 [P]. 2000-01-04.
- [39]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(增刊):28-32.
- [40]L.G.Roberts. Machine Perception of Three-Dimension Solids, in Optical and Electro-Optimal Information Processing, 1965, 99: 157-159.
- [41]L.Sobel. Camera Models and Machine Perception, Phd theses, Stanford University,

- Stanford. CA, 1970.
- [42]J.Canny. Acomputional Approach to Edge Detection [J], IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, 1986, (8): 679-698.
- [43]McFeeters S K. The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [44]徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005, 9(5):589-595.
- [45]闫霏, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J].遥感信息,2007, 6:62-67.
- [46]张汉女.基于SVM的海岸线提取方法研究[D].东北师范大学, 2010.
- [47]邵正强.某些海洋区域性专用名词的法律性定义问题[J].海洋与海岸带开发,1992,9(1):73-79.
- [48]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.
- [49]毕智宏. 海岸类型[J].地理教育,2008(3):78.
- [50]Zhang X K, Zhang X, Lan Q Q, et al. Automated detection of coastline using Landsat TM based on water index and edge detection methods[C] //Proceedings of the 2nd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, Shanghai, 2012: 153-156.
- [51]Otsu N A. Threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979(9):62-66.
- [52]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.
- [53]张 明.基于小波分析的淤泥质潮滩水边线提取[D].上海: 华东师范大学, 2008.
- [54]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.
- [55]Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan, 2009, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

发表文章

- 张霞, 张旭凯, 帅通. 北京一号小卫星 NDVI 时间序列重建方法研究[J]. 遥感信息, 2012,1:68-72
- Zhang Xu-kai, Zhang Xia, Lan Qiong-qiong, Ali Baig, Muhammad Hasan. Automated detection of coastline using Landsat TM based on water index and edge detection methods. Proceedings of the 2nd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, Shanghai, 2012, pp. 153-156. (EI: 20124015497375)
- Shang, Zhao Dong, Zhang Xiaohong, Zhang Xukai, Information extraction method on coastal wetland using TM data: A case study in Dongying, Shandong, China. Proceedings of the 2nd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, Shanghai, 2012, pp. 77-81. (EI: 20124015497359)
- 张旭凯, 张霞, 庄智, 尚坤. 结合海岸类型和潮位数据的海岸线遥感提取方法[J]. 国土资源遥感 (已接收)

出版专著

- 协助导师出版专著《北京一号小卫星数据处理技术及应用》, 第 15 作者。

致 谢

有些时岁，有些面孔，有些过往，一恍惚，一世间；
一碗水酒，一眼绯红，一抹湿痕，些许苦，些许咸；
过不悔，叹轻狂不再；
将而立，望吾辈趋才；
年年岁岁，碎碎念念；
三年、两年、一年，念年年。

——《唠叨》，张旭凯感于毕业前

感谢那些划过我生命轨迹的人们，尽管有些只是过客，但就是这样的碎片拼成一个又一个的故事，结结实实地塞进我的脑袋和心里。我不愿像电视剧片尾那般列出密密麻麻的致谢名单，那么就用心去拾起曾经感动我的记忆吧！

2009 年——那一年，遥感地球所还叫遥感所，国科大还叫中科院研究生院。保研联系了张立福老师，经过郑兰芬老师和方俊永老师的面试，阴差阳错地跟了张霞老师，这也许就是我和张霞老师的缘分。至今，仍收藏那几封和张立福老师往来的邮件，仍记得郑兰芬老师的那通沸腾我心的电话，仍留恋那段和方俊永老师打球的日子。

2010 年——那一年，我来到遥感所做毕设，第一次感受到张霞老师严谨的科研态度，内心由衷产生了敬爱之情。爸妈常告诉我“一日为师，终生为父”，所以，一直把张霞老师当作我严厉而又善良的父亲，在您的身上我学到了很多、很多，这将伴随我一生闯荡。来到所里见到的第一个师兄是黄长平师兄，您一直都是我们学习的榜样。做毕设的过程中得到了李儒师兄的鼎力相助，刘海霞师姐、宋鹏飞师兄、吴松师兄也都对我的生活给予了照顾。也是那一年，我进入研究生院，认识了很多朋友——一起打球、一起吃饭、一起喝醉，就是这些朋友让我收获了友谊，拥有了快乐。

2011 年——那一年，我回到所里，第一次见到了童庆禧院士，童先生的博学和高瞻远瞩伴着慈祥，我把这一切都当作科研的最高境界，可能是我一生都需要追求的目标。我和兰穹穹师兄做同一个课题，只要出差或者开会都和兰师兄住

一个房间，每天都会聊到好晚、好晚。秦皇岛试验那几天，虽然辛苦，但品尝到的更多是愉悦。此外，我大师兄帅通也不断地帮助我进步，姜海玲师姐也一直关心着我的生活，很感谢他们。

2012 年——那一年，做的事情真不少，印象最深的就是和尚坤师姐的出差。这一次出差只有尚坤师姐，蓝穹穹师兄、吴向楠师兄和我，每一天都是在车上度过的，开一段、下车、上车，再开一段、下车、上车，有时竟然在车上睡着了，但这次试验给我留下了很美好的回忆。6 月份的上海会议，让我送走了兰穹穹师兄和张明师兄——张明师兄，还记得我们在复旦大学看晚会的那天吗？后来，我大师弟庄智回所后，我开始和他一起工作，庄师弟对我给予了很多帮助。此外，Hasan 也是我认识的最好朋友之一，还记得我们一同赶公交车的夜晚吗？

2013 年——那一年，忙着论文，准备毕业。

我是个不会叙事的家伙，在高光谱实验室的这几年，以我为主角的故事远远没有这么少，给予我帮助的人也远远没有这么少。闭上眼，一个又一个的画面开始浮现，但是篇幅实在有限，只好在心里去默默感谢和祝福你们：胖胖的可爱谢一淞师兄、不胖的可爱覃还虎师兄、要生宝宝的陈小平师姐、相同母校的王倩师姐、很爱微笑的李晶宜师姐、爱打篮球的胡顺石师兄和岑奕师姐；古灵精怪的王晶师妹、敢唱王妃的李雪轲师妹、做事负责的余晓君师妹、为人真诚的张艮中师弟、爱打羽毛球的孙艳丽和王桂珍师妹、爱打篮球的李瑶师弟、标准的武汉女孩石婷婷师妹、爱说爱笑的毕景芝师妹、杨苏新师妹和王力彦师妹；还有那些随和的赵冬老师、刘学老师、张晓红老师、王潇老师、杨杭老师、王树东老师、吴太夏老师、刘佳老师；最后必须要感谢我们的实验室工作协调者——周丽萍、王畅和龚正。

和我相同年级的同学们，我已经不能一个一个地把你们列举出来了，因为你们在我心里占有了太多、太多，每天和你们经历了太多，我只想把你们牢牢地记在我的心里。最后，我要感谢我生命里最重要的三个人——爸妈和老婆，是你们永远支持着我，我不想说太多感谢的话，只想对你们说——我爱你们，直到永远。

有爱、故事和期待，幸福如此简单。