



热带海洋学报
Journal of Tropical Oceanography
ISSN 1009-5470, CN 44-1500/P

《热带海洋学报》网络首发论文

题目：平衡剖面模式下海岸线遥感提取中不同潮位校正方法对比研究
作者：巫统仁，刘培，于吉涛，文婷婷
收稿日期：2023-01-24
网络首发日期：2023-04-10
引用格式：巫统仁，刘培，于吉涛，文婷婷. 平衡剖面模式下海岸线遥感提取中不同潮位校正方法对比研究[J/OL]. 热带海洋学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1500.P.20230407.1853.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

平衡剖面模式下海岸线遥感提取中不同潮位校正方法对比研究*

巫统仁^{1,2}, 刘培^{2,3}, 于吉涛^{2,3}, 文婷婷^{1,2}

1. 河南理工大学 河南 焦作 454003;
2. 海南省海洋与渔业科学院 海南 海口 571126;
3. 海南热带海洋学院崖州湾创新研究院 海南 三亚 572025

摘要: 潮位校正是海岸线提取的重要步骤。针对当前基于遥感的海岸线提取多以瞬时水边线为主、潮位校正方法多样且精度低等问题, 本文在分析平衡剖面模式的基础上, 引入改进的 Bodge 平衡剖面潮位校正的高分辨率遥感海岸线潮位校正新方法, 并对常见潮位校正方法作对比分析。研究选取广东省典型砂质岸滩海门湾和平海湾, 协同归一化水体指数、大津算法、数学形态学、边缘检测算子, 实现瞬时水边线的快速、自动化提取, 然后利用不同潮位校正方法获取真实岸线数据, 最后结合 RTK(real-time kinematic)实测点位数据对基于平衡剖面模型的潮位校正、拟合线性潮位校正以及传统潮位校正方法提取结果进行对比分析。研究表明: (1)基于平衡剖面模式的潮位校正方法精度优于拟合线性潮位校正方法和传统潮位校正方法。(2)在同属基于平衡剖面模式的潮位校正方法中, 基于改进的 Bodge 平衡剖面模式的潮位校正方法相比较于 Bruun-Dean 平衡剖面模式潮位校正方法精度更高; 基于参考岸线数据, 利用断面法验证了所提取的岸线精度达到 2 米。研究结果可为海岸线精确提取和海岸规划提供参考案例和决策依据。

关键词: Bodge 平衡剖面模式; 潮位校正; 海岸线提取; 高分影像

Comparative study on different tide level correction methods in remote sensing extraction of coastline under balanced profile model

WU Tongren^{1, 2}, LIU Pei^{2, 3}, YU Jitao^{2, 3}, WEN Tingting^{1, 2}

1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China;
3. Yazhou Bay Innovation Institute, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572025, China

Abstract: Tide level correction is an important step in coastline extraction. In view of the current problems of remote sensing based coastline extraction, such as the predominance of instantaneous water boundary line, the diversity of tidal level correction methods, and low accuracy, this paper introduces a new high-resolution remote sensing coastline tidal level correction method based on the improved Bodge balanced profile tidal level correction, and makes a comparative analysis of common tidal level correction methods. The research selects typical sandy beaches, Haimen Bay and Pinghai Bay in Guangdong Province, and coordinates with normalized difference water index, Otsu algorithm, mathematical morphology and edge detection operator to realize fast and automatic extraction of instantaneous water boundary line, then, different tidal level correction methods are used to obtain real coastline data.

收稿日期: 2023-01-24; **修订日期:** 2023-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(42071007); 海南热带海洋学院崖州湾创新研究院开放课题重点项目(2022CXKFK T03); 海南省自然科学基金(423MS120); 海南省海洋与渔业科学院省本级课题(KYL-2023-01)

作者简介: 巫统仁(1999—), 男, 湖南省浏阳市人, 硕士研究生, 从事遥感影像处理与海岸带遥感观测研究。email: wtw2021yjs@163.com

通信作者: 刘培(1985—), 男, 河南省许昌市人, 博士, 副研究员, 主要从事资源环境遥感、数据挖掘与模式识别等方面的研究。email: cumtlp@qq.com

*论文在研究和写作过程中得到了海南省海洋与渔业科学院王道儒研究员的指导和帮助, 在此表示感谢! 感谢海南高分数据与应用中心提供高分辨率遥感数据支撑!

Received date: 2023-01-24; **Revised date:** 2023-03-23.

Foundation item: Supported by the Open project program of Yazhou Bay Innovation Research Institute of Hainan Tropical Ocean University (2022CXKFK T03); National Natural Science Foundation of China (42071007); Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (423MS120); Foundation of Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences (KYL-2023-01)

Corresponding author: LIU Pei. Email: cumtlp@qq.com

Finally, combined with real-time kinematic (RTK) measured point data, the results of tidal level correction based on the balanced profile model, fitting linear tidal level correction, and traditional tidal level correction methods are compared and analyzed. The results show that: (1) The accuracy of the tidal level correction method based on the balanced profile model is superior to the fitting linear tidal level correction method and the traditional tidal level correction method. (2) Among the tidal level correction methods that are both based on the balanced profile model, the tidal level correction method based on the improved Bodge balanced profile model has higher accuracy than the tidal level correction method based on the Bruun-Dean balanced profile model; based on the reference coastline data, the accuracy of the extracted shoreline is verified to be 2 meters using the cross-sectional method. The research results can provide reference cases and decision-making basis for accurate coastline extraction and coastal planning.

Key words: Bodge balanced profile model; tidal correction; coastline extraction; high resolution image

1 引言

海岸带是海洋与陆地的交汇地带(毋亭 等, 2016), 是全球气候变化的灵敏窗口, 也是人类活动较为频繁的区域。由于受到全球变暖、地质结构变化、人类活动、潮汐起伏等多种因素的影响, 海岸带处于不断的变化之中(Vos et al, 2019; 盛辉 等, 2021), 海岸线作为海岸带的边缘部分, 其位置变化是海岸带演变的直观体现(Li et al, 2018)。海岸线的测定, 对海岸带研究、海域管理、城市规划、环境保护均具有重要意义(Zhang et al, 2022)。

现有的水边线提取方法主要有阈值分割法(张翔 等, 2021)、活动轮廓模型法(沈琦 等, 2012)、面向对象法(贾明明 等, 2013)、数据挖掘法(朱长明 等, 2013)、边缘检测法(王常颖 等, 2017)等。阈值分割法是一种目前较为成熟的方法, 简单有效、易于实现, 但其最佳阈值确定易受到人为干扰且精度相对较低(Tang et al, 2022); 活动轮廓模型法虽精度相对较高, 但其模型本身较为复杂, 实现不易; 面向对象法以对象作为单元, 虽可减少内部信息干扰, 但也无法充分利用影像隐藏信息(吴一全 等, 2019), 需通过反复实验确定最佳分割参数且难以实现较高精度; 边缘检测法在边缘检测提取上精度较好, 但受噪声影响较大(林松 等, 2020)。采用单一方法提取水边线, 难以提高水边线提取效率。

而且由于受到全球气候变化、人类活动、周期性涨潮、落潮的动态影响, 卫星过境时刻的影像多数情况下获取的是水陆边界被称为瞬时水边线, 并不是真正意义上的海岸线。对研究和社会生产活动有实际意义的海岸线, 即平均大潮高潮线, 与瞬时水边线存在较大偏差。解决这一问题的主要途径是在瞬时水边线

提取的基础上进行潮位校正(马小峰 等, 2007)。Liu、张旭凯等人提出了基于岸滩坡度的传统线性潮位校正模型(Liu et al, 2004; 张旭凯 等, 2013), 该方法虽能算出校正距离, 却忽视了实际岸滩地形地貌的影响, 用该方法所校正的岸线精度相对较低; 刘善伟则提出通过数字高程模型数据来进行岸线校正(刘善伟 等, 2011), 该方法采集数据较为费时且不具备普适性; 王靖雯等人提出一种新的潮位校正方法来提取潮间带面积, 该方法具有一定的稳定性, 但其本质上并未考虑实际地形影响(王靖雯 等, 2017)。孙孟昊利用潮汐规律修正海岸线, 解决了部分年份缺少潮位数据的潮位校正问题, 但其精度有待进一步提高(孙孟昊 等, 2019)。尹航通过实测点位数据建立拟合剖面模型来进行潮位校正(尹航 等, 2022), 该方法提高了潮位校正精度, 但其所用的 Bruun-Dean 平衡剖面模式(李志强 等, 2002)仍存在局限性。

针对以上问题, 本研究在基于平衡剖面模式的基础上, 对比了基于平衡剖面模型的潮位校正、拟合线性潮位校正以及传统潮位校正三种方法, 验证不同潮位校正方法的精度。利用高分辨率遥感影像自动提取的瞬时水边线并引入基于 Bodge 平衡剖面模型的潮位校正新方法, 基于实测 RTK 点位数据进行验证, 以期真实岸线科学提取提供新的思路和借鉴。

2 研究区与数据源

研究选取粤东、粤南典型砂质海滩海门湾和平海湾作为实验验证区域。海门湾位于广东省汕头市东南部、潮阳县与惠来县东部交界处, $116^{\circ} 32' 28''$ — $116^{\circ} 35' 58''$ E, $23^{\circ} 06' 05''$ — $23^{\circ} 11' 28''$ N, 发源于五峰尖西麓杨梅坪的白水砾, 年径流量为 0.8 亿 m^3 。海门湾整体形状呈弧形, 剖面形态为上凹形, 湾口朝

东南，北起海门角，南至贝告角。地区属于亚热带海洋性气候，气候较为温和，平均气温为 21.6℃，年平均降雨量为 1727.2mm，常风最大风力 11 级，夏秋多台风，最大风力 12 级以上。平均潮差 0.7m，属弱潮海流。涨潮流向东北，最大流速为 1.3 km·h⁻¹，落潮流向西南，最大流速为 1.5km·h⁻¹。海门湾岸线类型以砂质岸线为主，泥沙底，两端岬角为岩岸。平海湾位于广

东省惠州市惠东县平海镇，114° 49′ 25″ —114° 53′ 33″ E，22° 36′ 04″ —22° 34′ 24″ N，东起城仔脚，西至葫芦坑，海岸背景复杂，附近建筑物较多。该湾剖面形态为上凹型，岸线类型为砂质岸线，砂质偏细，相比较于海门湾，坡度较缓，潮间带宽阔。两者均为典型砂质岸滩，基于以上特点，以上述地区作为研究区具有代表性，研究区地貌如图 1 所示。

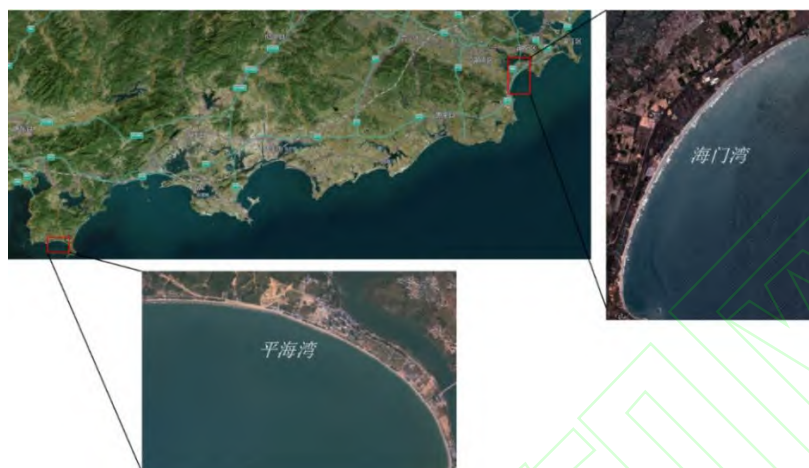


图 1 研究区地貌

Fig. 1 Geomorphology of study area

研究共获取 3 期高分二号遥感影像数据，其中海门湾的两期影像获取时间分别为 2017 年 4 月 5 日和 2017 年 12 月 31 日，平海湾的影像获取时间为 2017 年 1 月 26 日，影像幅宽为 45.3km，空间分辨率全色波段 1m、多光谱波段 4m。在进行水边线提取之前，对原始遥感影像进行先

辐射定标、大气校正等预处理，消除大气和光照等因素对地物反射的影响，再结合地面实测控制点进行几何精校正，控制均方根误差在 0.1 个像元以内，最后利用 NNDiffusePansharping 算法将多光谱波段的空间分辨率提高至 1m(Sun et al, 2014)。

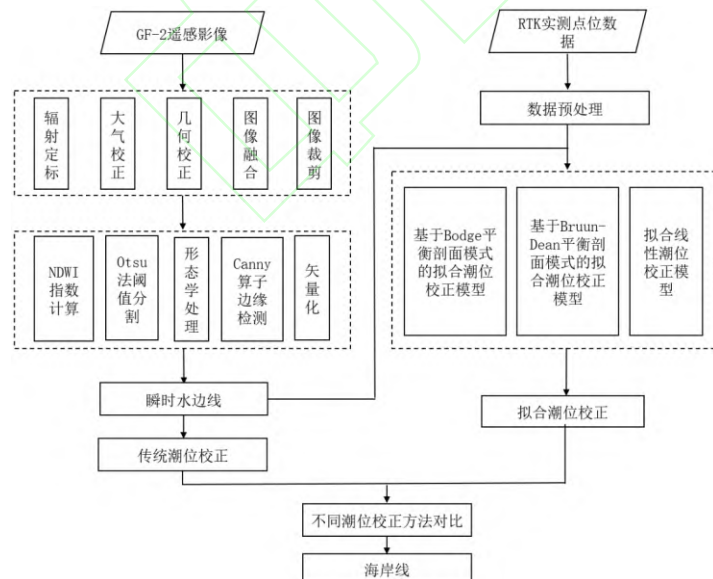


图 2 流程图

Fig. 2 Flow chart

实测研究区遥感影像获取时刻同步的剖面点位数

据和潮位数据。获取研究区 RTK 剖面点位数据共有 191

个,包括7条剖面点位数据以及海门湾局部岸线数据,其中平海湾3条剖面数据,海门湾4条剖面数据,测量时间为2017年,所使用仪器为合众思壮RTK-GPS,控制平面精度和高程精度均可达到厘米级,平面精度为-8~8mm,高程精度为-15~15mm。潮位数据来源于广东省海门港验潮站和马鞭洲提供的2017年农历每个月的大潮高潮数据。实测RTK剖面点位数据和潮位数据用于建立拟合剖面模型(伊航等,2022),而岸线数据用于生成参考海岸线,便于后续精度验证。研究总体流程如图2所示。

3 研究方法

首先利用遥感影像反演归一化水体指数突出水体信息,然后根据天津法自动确定最佳阈值进行分割、利用数学形态学去除噪声、孔洞,并结合Canny算子进行边缘检测,完成瞬时水边线的提取,通过改进平衡剖面模式潮位校正法获取精细岸线数据,最后结合RTK实测点位数据对提取结果进行精度分析。真实海岸线获取的整个处理流程通过编写程序自动化完成。

3.1 瞬时水边线自动提取

3.1.1 归一化水体指数反演

归一化水体指数NDWI(normalized difference water index)是由Mcfeeters提出的,并由徐涵秋修正为MNDWI(modified normalized difference water index)(徐涵秋,2005),但由于高分辨率遥感数据通常缺少近红外通道,因此研究采用NDWI,该指数通过对遥感影像的特定波段进行归一化差值处理,达到突出影像水体信息的效果。其表达式如下:

$$NDWI = \frac{\rho_G - \rho_{NIR}}{\rho_G + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

式中, ρ_G 为绿波段的反射率, ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率。

3.1.2 瞬时水边线提取

研究选择天津法、数学形态学、Canny算子进行瞬时水边线提取,该提取流程算法简单,但能够在确保提取精度的同时便于自动化处理。天津法是由日本学者天津提出的一种阈值分割方法,其基本原理是通过最小二乘法求出待分割图像的最佳阈值(袁欣智等,2016),利用分割图像的灰度直方图进行类间差分,并使得它们的类内方差最小和类间方差最大,以此对灰度不同的部分进行分割。

假设水体指数最佳阈值在A到B之间,其中 $-1 \leq A$

$< B \leq 1$ 。基于Otsu算法,阈值T可以将水体指数图像分为两类,非水类从A到T,水类从T到B。最佳阈值T*利用公式(2)~(5)确定:

$$\sigma^2 = P_{nw} \times (M_{nw} - M)^2 + P_w \times (M_w - M)^2 \quad (2)$$

$$P_{nw} + P_w = 1 \quad (3)$$

$$M = P_{nw} \times M_{nw} + P_w \times M_w \quad (4)$$

$$T^* = Arg \max_{A \leq T \leq B} [P_{nw} \times (M_{nw} - M)^2 + P_w \times (M_w - M)^2] \quad (5)$$

式中, σ 为水体和非水体的类间方差, P_{nw} 和 P_w 是表示任意像素属于非水体和水体的概率, M_{nw} 和 M_w 是非水体和水体的平均值,M是NDWI图像的平均值。

经过天津法进行阈值分割得到水陆分割图以后,陆地上难免会有小区域的水体存在,为填补这些孔洞,对其进行数学形态学(张锦等,2020)处理。数学形态学由膨胀(公式6)、腐蚀(公式7)、开启和闭合等运算构成。

$$A \ominus B = \{x, y | (B)_{xy} \subseteq A\} \quad (6)$$

$$A \oplus B = \{x, y | (B)_{xy} \cap A \neq \emptyset\} \quad (7)$$

Canny算子是由计算机科学家John F. Canny提出的一种边缘检测算子(邱志伟等,2021),主要包括高斯滤波、像素梯度计算、非极大值抑制、滞后阈值处理和孤立弱边缘抑制。对经过数学形态学处理后的影像,通过非极大值抑制处理,再应用双阈值检测,确定真实和潜在的边缘部分,最后进行孤立弱边缘抑制处理,完成边缘检测。

3.2 不同潮位校正模型

3.2.1 传统潮位校正方法

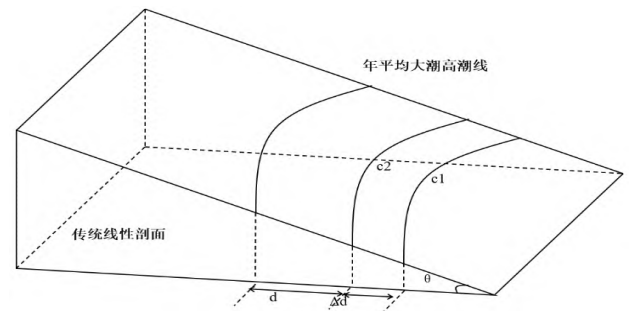


图3 传统线性潮位校正模型
Fig 3 Traditional linear tide level correction model

传统线性潮位校正原理如图3所示,该模型把海岸剖面假设为一角度不变的斜坡,利用遥感影像提取出同一区域不同时刻的瞬时水边线c1、c2,并计算c1、c2之间的水平距离,根据水平距离和潮位数据,推算出岸滩

坡度 θ ；同时统计出平均大潮高潮潮位数据，计算出任意一条水边线与平均大潮高潮面的高差，反算出水平距离，即校正距离。

该模型假设岸滩剖面为均匀斜坡，却忽略了岸滩地形、地貌起伏的影响，校正距离与实际应校正距离存在偏差(伊航 等, 2022)。同时，提取的两条瞬时水边线 $c1$ 、 $c2$ 理论上也存在偏差，通过这种途径进行改正难免存在遥感影像预处理误差。

3.2.2 线性拟合潮位校正方法

线性拟合潮位校正原理如图 4 所示，该模型是把海岸剖面假设为一角度不变的斜坡，利用实测的 RTK 剖面点位数据来拟合出最优岸滩坡度 θ ；同时统计出平均大潮高潮潮位数据，根据岸滩坡度反算出水平距离，即校正距离。拟合线性潮位校正模型表达式为 $h(x) = kx$ 。

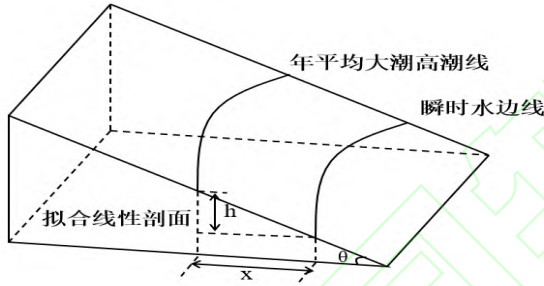


图 4 线性拟合潮位校正模型
Fig. 4 Linear fitting tidal correction model

3.2.3 基于平衡剖面模式的潮位校正方法

海滩剖面是指垂直于海岸线的海滩形态，一般会通过破碎带延伸到近海区，向陆地延伸至背岸处附近结束。正常情况下，砂质岸滩的平衡剖面形状通常呈上凹形，坡度随着离海距离的增加而变缓。关于海滩平衡剖面形态模式，国外学者 Bruun 最早指出，海滩剖面可用幂函数形式的表达式来表示(Bodge et al, 1992)，而 Dean 将这一表达式理论化，具体公式如下：

$$h(x) = Ax^m \quad (8)$$

式中： h 为当地水深， x 为距海岸线的水平距离， A 为剖面尺度参数，与当地海滩砂质径粒和波周期有关。

Bruun-Dean 模式虽简单实用，但也存在以下缺陷：第一个缺陷是参数 A 的物理意义不明确，第二个就是对方程求导得到的坡度在岸线处无穷大，不符合实际情况(陈子桑, 1977)。Bodge 平衡剖面模式是由国外学者 Bodge 按照 Ball 对边缘波分析的思路于 1992 年提出的一种海滩平衡剖面模式(Bodge et al, 1992)，该模式提出

用指数表达式来表达海滩剖面模式，具体公式如下：

$$h(x) = B(1 - e^{-kx}) \quad (9)$$

式中： h 为当地水深， x 为距海岸线的水平距离， B 、 K 为经验系数， K 决定了海滩剖面的上凹程度。Bodge 通过对 Hayden 剖面数据集做分析后，认为这一表达式比 Bruun-Dean 平衡剖面模式能更好拟合的实测剖面数据。于吉涛等人通过对比 Bruun-Dean 平衡剖面形态、Bodge 平衡剖面形态以及 Lee 平衡剖面形态(Yu et al, 2016)，发现 Bodge 平衡剖面形态相比于其他两种剖面形态，在切向或过渡段的海滩剖面具有更好的拟合能力。

基于以上分析，并结合海滩地形地貌情况和潮位涨退变化，对基于平衡剖面模式的潮位校正模型进行潮位校正，其原理图如图 5 所示。为对比 Bruun-Dean 平衡剖面模式和 Bodge 平衡剖面模式两种海滩平衡剖面模式，分别建立了基于 Bruun-Dean 平衡剖面模式的潮位校正模型和基于 Bodge 平衡剖面模式的潮位校正模型。在进行潮位校正时，需用到研究区年平均大潮高潮数据和遥感影像过境时刻的瞬时潮位值，由于遥感影像所用的时间系统为世界协调时，在计算遥感影像瞬时潮位值之前，将世界协调时转换为北京时间。

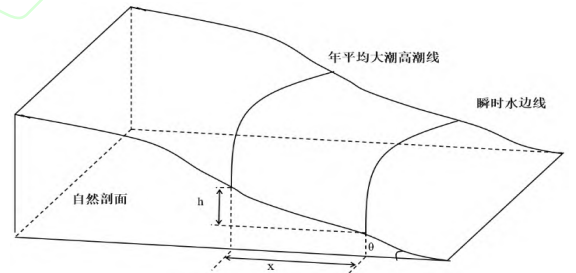


图 5 拟合平衡剖面潮位校正模型
Fig. 5 Fitting tide level correction model of balanced profile

同时在进行数据拟合之前，对实测剖面点数据进行数据转换，将其所在的高程面作为基准面并计算所有实测点数据的水深 h ，而后分别基于 Bruun-Dean 平衡剖面模式和 Bodge 平衡剖面模式，根据实测剖面数据进行模型拟合，相应公式如下：

$$h(x) = Ax^m \quad (10)$$

$$h(x) = B(1 - e^{-kx}) \quad (11)$$

式中： h 为当地水深， x 为距海岸线的水平距离， A 为剖面尺度参数， B 、 K 为经验系数，参数 A 、 B 、 K 、 m 由数据拟合得到。根据实测点位数据，利用最小二乘原理求出平衡剖面模式的最佳参数。其原理是指依据实测的点位深度数据和预测的点位深度数据，按照最小二乘

公式,使得误差 δ 最小,具体公式如下:

$$\delta = \frac{\sum(h_i - h_{pi})^2}{\sum(h_i)^2} \quad (12)$$

式中: h_i 为实测点的实际深度, h_{pi} 为实测点的预测深度。通过遥感影像瞬时潮位数据求出瞬时水边线与平均大潮高潮线的水深 h ,代入相应的模型求出瞬时水边线至海岸线的潮位校正距离。基于平衡剖面模式的潮位校正模型来进行潮位校正,考虑了实际的海滩地形起伏情况,相比较于传统的线性潮位校正模型,实现了从线性到非线性的突破。

4 实验结果与分析

4.1 水边线提取与矢量化

将 GF-2 遥感影像依次输入模型,自动输出预处理结果、归一化水体指数结果、Otsu 法最佳阈值水陆分割结果、数学形态学水陆分割孔洞填补结果、Canny 边缘检测算子提取瞬时水边线结果,再利用 Arc-Scan 矢量化方法将栅格线转化为矢量水边线。海门湾和平海湾结果分别如图 6、图 7 所示。

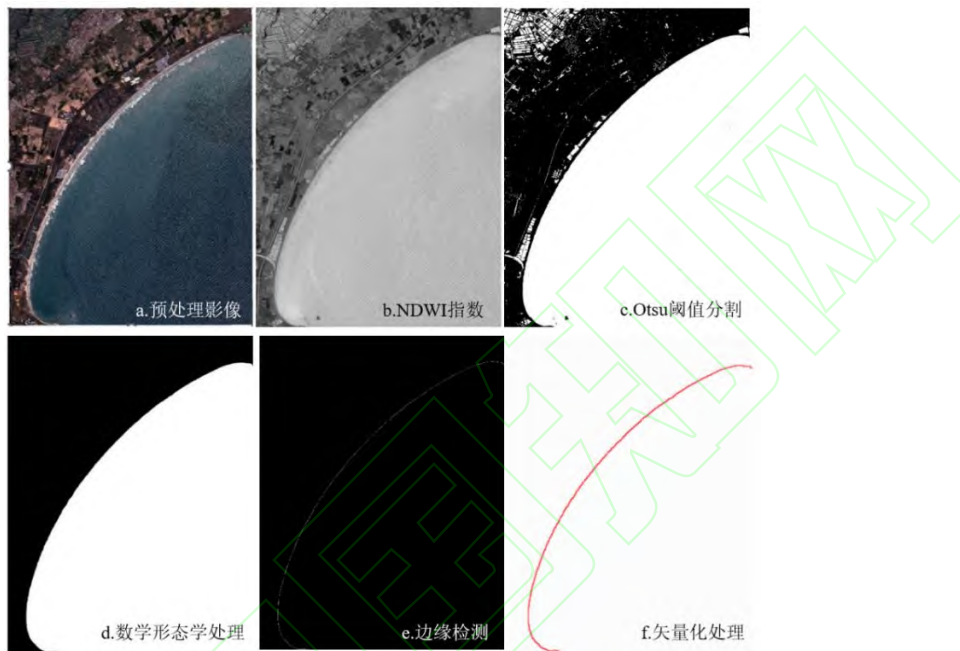


图 6 海门湾水边线提取结果

Figure. 6 Water boundary line extraction result in Haimen Bay

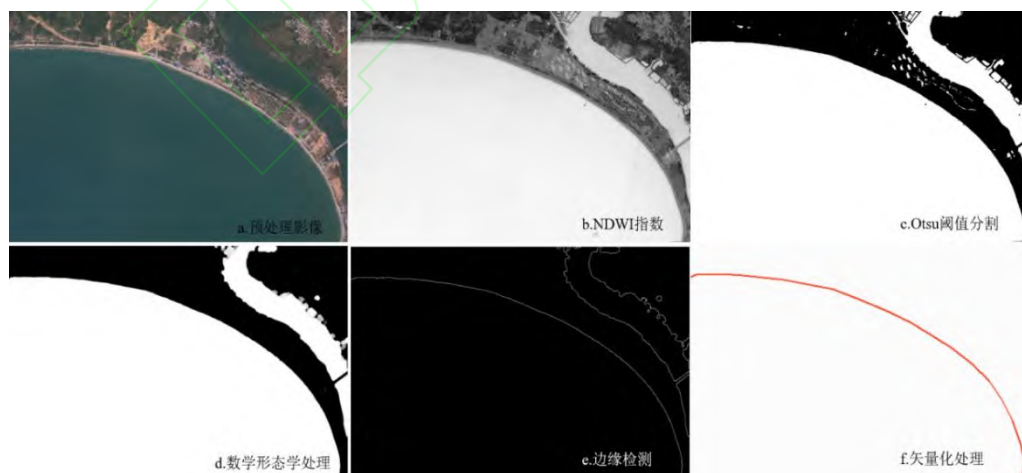


图 7 平海湾水边线提取结果

Figure. 7 Water boundary line extraction result in Pinghai Bay

4.2 传统潮位校正方法结果

选取与遥感影像同期的 2017 年农历每个月的大潮

高潮期间的连续三天的大潮高潮数据(图 8),统计全年数据取平均值,得年平均大潮高潮数据(郑修诚等,

2022), 2017 年海门湾和平海湾的年平均大潮高潮值分别为 1.85m 和 2.20m。研究所选海门湾两景 2017 年 4 月 5 日和 2017 年 12 月 31 日的 GF-2 遥感影像瞬时潮位值分别为 1.12m 和 1.37m, 平海湾 2017 年 1 月 16 日的遥感影

像瞬时潮位值为 0.73m, 利用瞬时水边线提取方法获取两期水边线数据, 根据传统潮位校正模型反算出坡度和瞬时水边线与平均大潮高潮线的水平距离 x , 后按照水平距离将水边线移动, 获取海岸线数据。

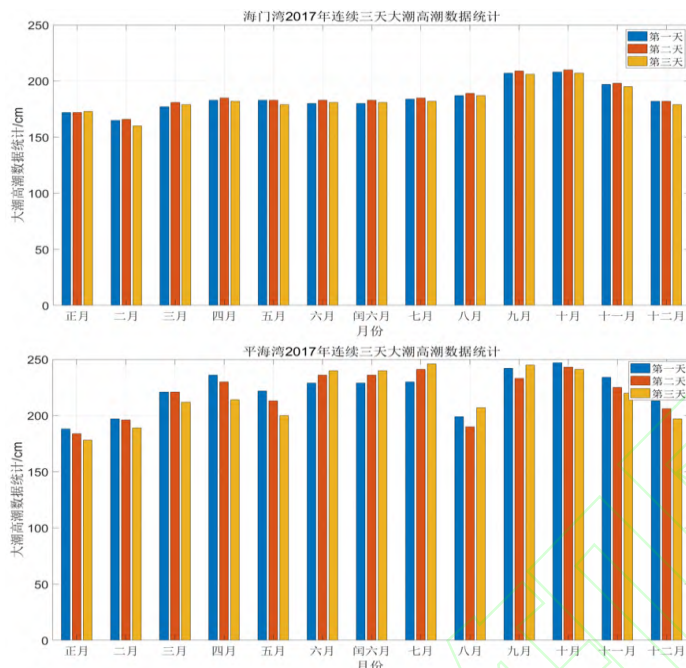


图 8 年平均大潮高潮数据
Fig. 8 Annual average high tide data

4.3 基于平衡剖面模型和线性拟合潮位校正方法

利用 RTK 实测剖面点位数据, 分别建立了基于 Bodge 平衡剖面模型的潮位校正方法、基于 Bruun-Dean 平衡剖面模型的潮位校正方法以及拟合线性潮位校正方法 $h(x) = kx$ 。先对实测剖面点位数据进行预处理, 把经纬度坐标数据转换为水平距离 x 和水深 h , 便于后续模型拟合。实测剖面点位数据经转换后, 依据最小二乘原理对其进行拟合, 海门湾和平海湾各模型拟合结果如

图 9 和图 10 所示, 其中海门湾 Bodge 平衡剖面模式中系数 B 的结果为 3.989, 参数 k 的结果为 0.092; 海门湾 Bruun-Dean 平衡剖面模式中系数 A 的结果为 0.524, 参数 m 的结果为 0.605; 海门湾拟合线性模型参数 k 的拟合结果为 0.148。平海湾 Bodge 平衡剖面模式中系数 B 的结果为 2.840, 参数 k 的结果为 0.037; 平海湾 Bruun-Dean 平衡剖面模式中系数 A 的结果为 0.211, 参数 m 的结果为 0.647; 平海湾拟合线性模型参数 k 的拟合结果为 0.052。

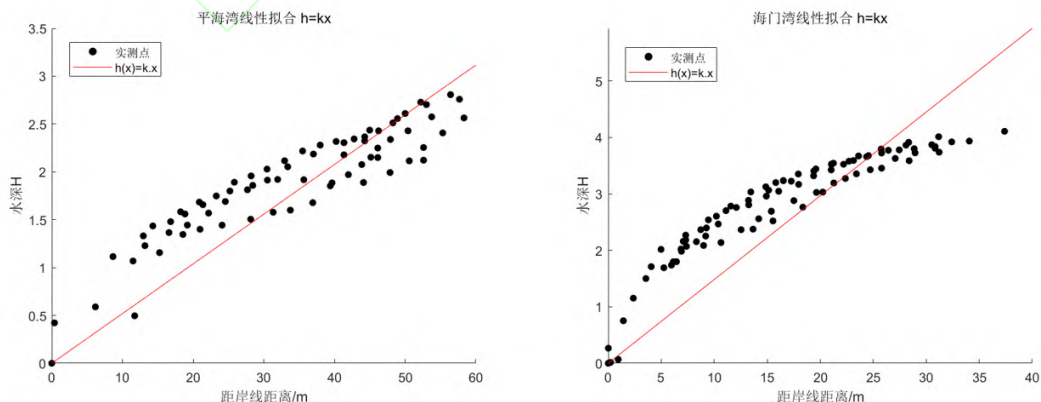


图 9 线性拟合结果
Fig. 9 Linear fitting results

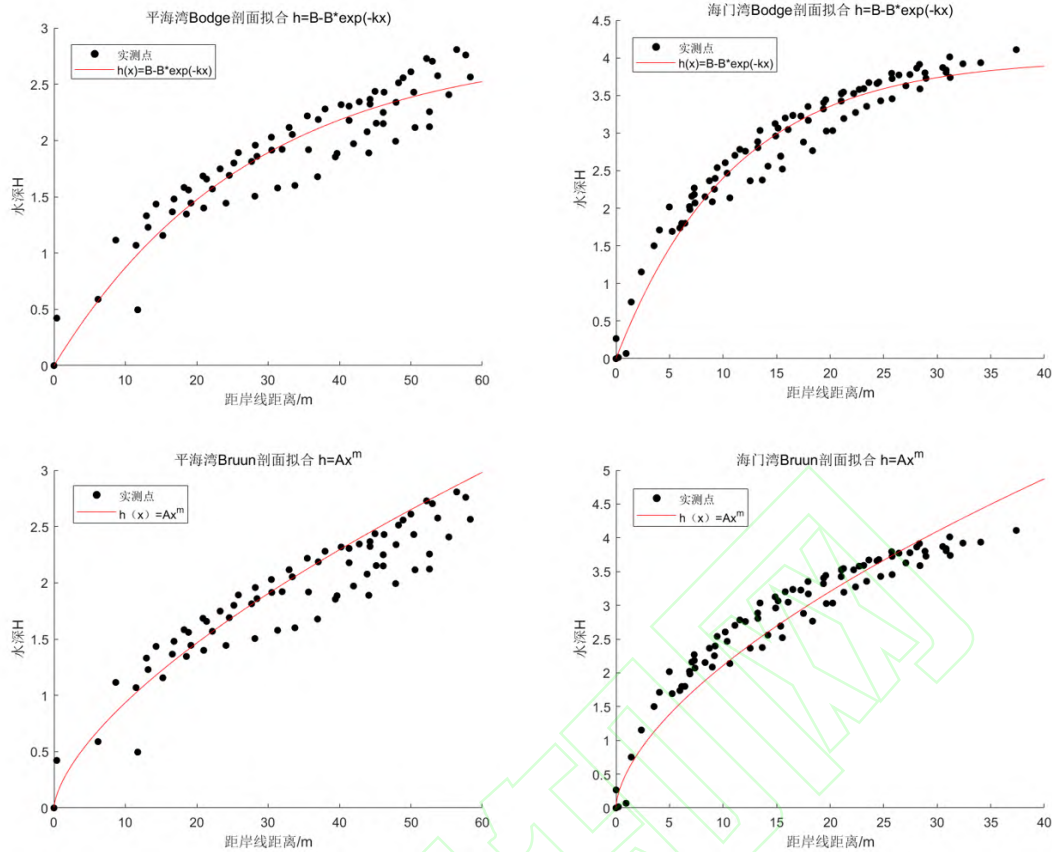


图 10 基于平衡剖面模型拟合结果
Fig. 10 Fitting results based on balanced profile model

选取确定系数、相关系数、误差平方和三种评价指标，分别计算非线性模型和线性模型的评价指标参数(表 1)。结果显示，海门湾 Bodge 平衡剖面模型的确定系数为 0.95，海门湾 Bruun-Dean 平衡剖面模型的确定系数为 0.90，海门湾线性模型的确定系数为 0.43；平海湾 Bodge 平衡剖面模型的确定系数为 0.93，平海湾 Bruun-Dean 平衡剖面模型的确定系数为 0.92，平海湾线性模型的确定系数为 0.90，对比发现海门湾和平海湾的 Bodge 模型均比另外两种模型的确定系数要高，表明基于 Bodge 平衡剖面模式的拟合潮位校正模型的拟合度更好，更加逼近实测点位数据。相关系数和误差平方和指标同样表明，Bodge 平衡剖面模型的结果值也优于 Bruun-Dean 平衡剖面

表 1 拟合模型评价指标

Tab. 1 Evaluation metric for fitting model

地区	拟合模型	确定系数	相关系数	误差平方和
海门湾	Bodge 剖面模型	0.95	0.98	3.95
海门湾	Bruun-Dean 剖面模型	0.90	0.97	8.05
海门湾	线性拟合模型	0.43	0.92	45.16
平海湾	Bodge 剖面模型	0.93	0.87	3.02
平海湾	Bruun-Dean 剖面模型	0.92	0.80	4.72
平海湾	线性拟合模型	0.90	0.71	9.76

面模型、线性拟合模型，其中海门湾相关系数分别为 0.98、0.97、0.92，误差平方和分别为 3.95、8.05、45.16；平海湾相关系数分别为 0.87、0.80、0.71，误差平方和分别为 3.02、4.02、9.76，验证了使用基于平衡剖面模型的潮位校正方法来进行潮位校正，比线性拟合潮位校正方法预测精度更高。基于平衡剖面模型的潮位校正方法考虑了实际的海滩地形地貌情况，相比较于线性拟合潮位校正模型，实现了从线性到非线性的突破，提高了海岸线提取精度。再利用基于平衡剖面的潮位校正方法和拟合线性潮位校正反算出瞬时水边线与平均大潮高潮线的水平距离 x ，按照水平距离 x 将水边线向海岸线方向移动，获取不同潮位校正方法下的真实岸线数据。

4.4 精度验证与适用性分析

研究区海岸线全长约 14km, 以海门湾为例, 利用断面法和参考海岸线对其局部海岸线进行定量分析并结合数字岸线分析系统(朱萝云 等, 2022), 长度约为 2km, 以表 2 精度验证结果

Tab. 2 Accuracy assessment

潮位校正方法	最大偏移量/m	最小偏移量/m	平均偏移量/m	标准差/m
Bodge 模型潮位校正	6.7	0.1	2.0	1.2
Bruun-Dean 模型潮位校正	8.2	0	2.6	1.8
线性模型潮位校正	9.6	2.6	3.9	2.1
传统潮位校正	8.9	1.0	3.1	2.0

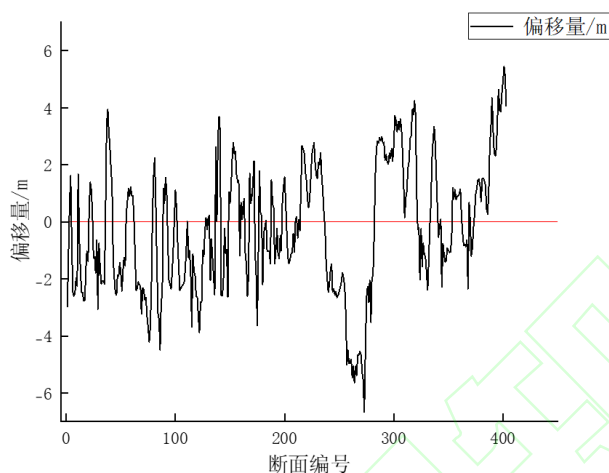


图 11 Bodge 潮位校正下海门湾岸线断面偏移量统计显示

Fig. 11 Statistical of coastline of Haimen bay coastline section offset under Bodge tide correction

该图中的红色实线代表提取岸线相对参考岸线偏移为 0, 当偏移量为正数时, 表明提取岸线相对参考岸线向陆地偏移, 当偏移量为负数时, 表明提取岸线相对参考岸线向海洋偏移。经统计, 基于 Bodge 平衡剖面模式的潮位校正方法提取的岸线精度最高, 平均偏移量为 2.0m, 最大偏移量为 6.7m; 基于 Bruun-Dean 平衡剖面模式的潮位校正方法提取的岸线平均偏移量为 2.6m, 最大偏移量为 8.2m; 拟合线性潮位校正方法提取的岸线平均偏移量为 3.9m, 最大偏移量为 9.6m, 传统潮位校正方法提取的岸线平均偏移量为 3.1m, 最大偏移量为 8.9m。由此可见, 基于平衡剖面模型潮位校正方法比传统潮位校正方法和拟合线性潮位校正方法精度高, 解决了潮位校正精度低的问题。基于 Bodge 平衡剖面模式的潮位校正方法获取的岸线按照我国地形图制图标准(毋亭 等, 2016), 可满足海岸制图需求。本文所利用的 Bodge 平衡剖面模式是一种沙滩平衡剖面形态模型, 该模型所涉及参数的物理意义均与当地的波况和泥沙特征有关(李志强 等, 2009), 因此更加适用于砂质岸线提

5m 为间隔生成 403 个断面, 以参考岸线为基线, 计算不同潮位校正方法下的海岸线与参考岸线的偏移量, 结果如表 2 和图 11 所示。

取; 淤泥海岸主要由粉砂和淤泥组成, 相比较于砂质海岸, 其潮间带宽阔且径粒相对较小(陈玮彤 等, 2017); 生物岸线主要包括珊瑚礁岸线、红树林岸线和芦苇岸线, 其潮间带是由某种生物特别发育而形成的, 通常以植物碎屑、贝壳碎片等分布的痕迹线作为岸线(刘百桥 等, 2015)。因此, 在提取淤泥岸线和生物岸线时, 本文方法的适用性仍需进一步探讨。

5 结论

应用遥感手段科学提取岸线数据是海岸带领域的研究热点。本研究在多期高分二号遥感影像数据、RTK 剖面点位数据以及潮位数据的支撑下, 对比了不同潮位校正方法并引入改进的 Bodge 平衡剖面潮位校正的高分辨率遥感海岸线潮位校正新方法。结论如下:

(1) 经对比, 三种潮位校正方法中, 基于平衡剖面模式的潮位校正方法优于拟合线性潮位校正方法和传统潮位校正方法, 精度最高。

(2) 针对潮位校正精度低这一问题, 在同属基于平

衡剖面模式的潮位校正方法中,改进的 Bodge 平衡剖面模式的潮位校正新方法比基于 Bruun-Dean 平衡剖面模式的潮位校正方法精度更高,基于参考岸线数据,验证

了所提取的砂质岸线平均偏移量为 2m,进一步提高了潮位校正精度。

参考文献 References

- 陈子燊, 1997. 海滩剖面形态与地形动态研究的进展[J]. 海洋通报, (1): 86-91. CHEN ZISHEN, 1997. Research progress on beach profile morphology and topographic dynamics[J]. Marine Science Bulletin, (1): 86-91.
- 陈玮彤,张东,施顺杰,等,2017. 江苏中部淤泥质海岸线变化遥感监测研究[J]. 海洋学报, 39(5): 138-148. CHEN WEITONG, ZHANG DONG, SHI SHUNJIE, et al,2017. Remote sensing monitoring of shoreline changes along the muddy coast of central Jiangsu Province[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 39(5): 138-148.
- 董昭顷,付东洋,刘大召,等,2019. 基于 ZY-3 遥感影像的不同地貌水边线提取方法[J]. 海洋测绘, 39(2): 34-39. DONG ZHAOQIN, FU DONGYANG, LIU DA ZHAO, et al, 2019. Water boundary extraction method for different landforms based on ZY-3 remote sensing Images[J]. Marine Surveying and Mapping, 39(2): 34-39.
- 贾明明,刘殿伟,王宗明,等,2013. 面向对象方法和多源遥感数据的杭州湾海岸线提取分析[J]. 地球信息科学学报, 15(2): 262-269. JIA MINGMNG, LIU DIANWEI, WANG ZONGMING, et al,2013. Coastline extraction and analysis of Hangzhou Bay using object-oriented method and multi-source remote sensing data[J]. Journal of Geo-information Science, 15(2): 262-269.
- 刘善伟,张杰,马毅,等,2011. 遥感与 DEM 相结合的海岸线高精度提取方法[J]. 遥感技术与应用, 26(5): 613-618. LIU SHUANWEI, Zhang JIE, Ma YI, et al,2011. Coastline extraction with high accuracy based on remote sensing and DEM[J]. Remote sensing technology and application, 26(5): 613-618.
- 刘百桥,孟伟庆,赵建华,等,2015. 中国大陆 1990—2013 年海岸线资源开发利用特征变化[J]. 自然资源学报, 30(12): 2033-2044. LIU BAIQIAO, MENG WEIQING, ZHAO JIANHUA, et al, 2015. Characteristics of coastal resources development and utilization in Chinese Mainland from 1990 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 30(12): 2033-2044.
- 林松,俞晓华,庄小冰,等,2020. 厦门岛海岸线分形特性演变规律的研究[J]. 海洋科学进展, 38(1): 121-129. LIN SONG, YU XIAOJIAN, Zhuang XIAOBING, et al, 2020. The xiamen island off the coast of the study of the evolution law of fractal characteristics[J]. Advances in Marine Science, 38(1): 121-129.
- 李志强,陈子燊,2002. 海滩平衡剖面形态研究进展[J]. 海洋通报, (5): 82-89. LI ZHIQIANG, CHEN ZISHEN, 2002. Research progress on beach equilibrium profile morphology[J]. Marine Science Bulletin, (5): 82-89.
- 李志强,陈子燊,2009. 海滩平衡剖面模型中参数意义及相互关系探讨[J]. 海洋工程, 27(04):108-115. LI ZHIQIANG, CHEN ZISHEN, 2009. Discussion on the significance and correlation of parameters in beach equilibrium profile model[J]. marine engineering, 27(4): 108-115.
- 马小峰,赵冬至,张丰收,等,2007. 海岸线卫星遥感提取方法研究进展[J]. 遥感技术与应用, (4): 575-580. Ma XIAOFENG, ZHAO DONGZHI, ZHANG FENGSHOU, et al, 2007. Research progress of coastline remote sensing methods[J]. Remote sensing Technology and Application, (4): 575-580.
- 邱志伟,刘晓霞,章铭诚,2021. 基于星载 SAR 影像的苏北地区海岸线提取研究[J].地理空间信息, 19(1): 4-7, 141. QIU ZHIWEI, LIU XIAOXIA, ZHANG MINGCHENG, 2021. Shoreline extraction in northern Jiangsu based on spaceborne SAR images[J]. Geospatial Information, 19(1): 4-7, 141.
- 盛辉,张驰,万剑华,2021. 基于多时相遥感数据的海岸线自动提取方法[J].海洋科学, 45(05): 16-22. SHENG HUI, ZHANG CHI, WAN JIANHUA, 2021. Automatic coastline extraction method based on multi-temporal remote sensing data[J]. Marine Science, 45(05): 16-22.
- 沈琦,汪承义,赵斌,2012. 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), 51(1): 77-82, 104. SHEN QI, WANG CHENGYI, ZHAO BIN, 2012. Automatic coastline extraction from high-resolution remote sensing images using geometric active contour model[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 51(1): 77-82.
- 孙孟昊,蔡玉林,顾晓鹤,等,2019. 基于潮汐规律修正的海岸线遥感监测[J]. 遥感信息, 34(06): 105-112. SUN MENGHAO, CAI YULIN, GU XIAOHE, et al,2019. Coastal remote sensing monitoring based on tidal law correction. remote sensing information[J], 34(06): 105-112.
- 毋亭,侯西勇,2016. 海岸线变化研究综述[J]. 生态学报, 36(4): 1170-1182. WU TING, HOU XIYONG, 2016. Review of coastline change studies[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(4): 1170-1182.
- 王常颖,王志锐,初佳兰,等,2017. 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, 36(4): 590-

595. WANG CHANGYI, WANG ZHIRUI, CHU JIALAN, et al, 2017. Coastline Extraction from high-resolution image Based on Decision Tree and Density Clustering[J]. *marine environmental science*, 36(4): 590-595.
- 王靖雯, 牛振国, 2017. 基于潮位校正的盐城滨海潮间带遥感监测及变化分析[J]. *海洋学报*, 39(05): 149-160. WANG JINGWEN, NIU ZHENGUO, 2017. Remote sensing monitoring and change analysis of coastal intertidal zone based on tide correction in Yancheng city[J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 39(05): 149-160.
- 吴一全, 刘忠林, 2019. 遥感影像的海岸线自动提取方法研究进展[J]. *遥感学报*, 23(4): 582-602. WU YIQUAN, LIU ZHONGLIN, 2019. Research progress in automatic coastline extraction from remote sensing images. *Journal of Remote Sensing*, 23(4): 582-602.
- 徐涵秋, 2005. 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*, (5): 589-595. XU HANQIU, 2005. Study on water information extraction using improved Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, (5): 589-595.
- 尹航, 戚洪帅, 蔡锋, 等, 2022. 高分影像砂质海岸线精细提取及校正方法[J]. *海洋学报*, 44(4): 143-152. YI HANG, QI HONGSHUAI, CAI FENG, et al, 2022. Fine extraction and correction method of high-resolution image sandy coastline[J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 44(4): 143-152.
- 袁欣智, 江洪, 陈芸芝, 等, 2016. 一种应用大津法的自适应阈值水体提取方法[J]. *遥感信息*, 31(5): 36-42. YUAN XINZHI, JIANG HONG, CHEN YUNZHI, et al, 2016. An adaptive threshold water extraction method using Otsu method[J]. *Remote Sensing Information*, 31(5): 36-42.
- 张翔, 王霄鹏, 黄安齐, 等, 2021. 基于遥感影像提取山东半岛复杂海岸线及海岸线多年变迁研究[J]. *海洋湖沼通报*, 43(2): 171-181. ZHANG XIANG, WANG XIAOPENG, HUANG ANQI, et al, 2021. Study on the complex coastline of Shandong Peninsula Based on Remote Sensing image extraction and its changes over the years[J]. *Bulletin of Ocean and limnology*, 43(2): 171-181.
- 朱长明, 张新, 骆剑承, 等, 2013. 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*, 25(2): 69-74. ZHU CHANGMING, ZHANG XIN, LUO JIANCHENG, et al, 2013. Coastline remote sensing automatic extraction based on automatic sample selection and SVM[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*. 25(2): 69-74.
- 张旭凯, 张霞, 杨邦会, 等, 2013. 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*, 25(4): 91-97. ZHANG XUKAI, ZHANG XIA, YANG BANGHUI, 2013. Coastline remote sensing extraction combined with coastal type and tide level correction[J]. *Remote sensing of land resources*, 25(4): 91-97.
- 张锦, 赖祖龙, 孙杰, 2020. Otsu 法、区域生长法及形态学相结合的遥感图像海岸线提取[J]. *测绘通报*, (10): 89-92. ZHANG JIN, LAI ZULONG, SUN JIE. 2020. Coastline extraction from remote sensing images based on Otsu method, regional growth method and morphology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (10): 89-92.
- 郑修诚, 周斌, 雷惠, 等, 2022. 基于 GEE 的杭州湾慈溪段潮滩提取及时空变化分析[J]. *自然资源遥感*, 34(1): 18-26. ZHENG XIUCHENG, ZHOU BIN, LEI HUI, 2022. Extraction and spatial-temporal variation of tidal flat in Cixi section of Hangzhou Bay based on GEE[J]. *Remote Sensing of Natural Resources*, 34(1): 18-26.
- 朱萝云, 刘婷婷, 凡仁福, 等, 2022. 1986-2019 年粤东企望湾砂质海岸线演变过程与驱动机制研究[J]. *海洋学报*, 44(7): 20-32. ZHU LUOYUN, LIU TINGTING, FAN RENFU, et al, 2022. Evolution process and driving mechanism of sandy shoreline in Qiwang Bay, Eastern Guangdong from 1986 to 2019[J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 44(7): 20-32
- BODGE K R, 1992. Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression[J]. *Journal of coastal research*, (8): 47-55.
- LI J, YE M, PU R, et al, 2018. Spatiotemporal change patterns of coastlines in Zhejiang Province, China, over the last twenty-five years[J]. *Sustainability*, 10(2): 477.
- LIU, H, JEZEK K C, 2004. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(5): 937-958.
- SUN W, CHEN B, MESSINGER D W, 2014. Nearest-neighbor diffusion-based pan-sharpening algorithm for spectral images[J]. *Optical Engineering*, 53(1): 013107-013108.
- TANG W, ZHAO C, LIN J, et al, 2022. Improved Spectral Water Index Combined with Otsu Algorithm to Extract Muddy Coastline Data[J]. *Water*, 14(6): 855.
- VOS K, HARLEY M D, Splinter K D, et al, 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery[J]. *Coastal Engineering*, 150: 160-174.
- YU J, DING Y, CHENG H, et al, 2016. Typical equilibrium beach profile models and their significances from different segments of a headland-bay beach[J]. *China Ocean Engineering*, 30(4): 637-650.