



学 号: 11120103002  
密 级: 公 开  
中图分类号: P208  
学科分类号: 170.4599  
学 校 代 码: \_\_\_\_\_

# 解放军信息工程大学

## 博士学位论文

### 基于 LiDAR 数据的海岸线提取技术研究

论文作者: 于彩霞  
指导教师: 王家耀 教授  
申请学位: 工学博士  
学科名称: 地图制图学与地理信息工程  
研究方向: 海洋地理信息数据处理  
论文提交日期: 2015 年 4 月 20 日  
论文答辩日期: 2015 年 5 月 25 日

解放军信息工程大学  
地理空间信息学院

二〇一五年四月



学 号: 11120103002  
密 级: 公 开  
中图分类号: P208  
学科分类号: 170.4599  
学 校 代 码: \_\_\_\_\_

# 解放军信息工程大学

## 博士学位论文

### 基于 LiDAR 数据的海岸线提取技术研究

论文作者: 于彩霞  
指导教师: 王家耀 教授  
申请学位: 工学博士  
学科名称: 地图制图学与地理信息工程  
研究方向: 海洋地理信息数据处理  
论文提交日期: 2015 年 4 月 20 日  
论文答辩日期: 2015 年 5 月 25 日

解放军信息工程大学  
地理空间信息学院

二〇一五年四月

**A Dissertation Submitted to  
PLA Information Engineering University  
for the Degree of Doctor of Science**

**Study on Technologies for Shoreline  
Abstraction based on LiDAR**

Candidate: Yu Caixia

Supervisor: Prof. Wang Jiayao

**Apr. 2015**

## 原创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得信息工程大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并标示谢意。

学位论文题目：基于 LiDAR 数据的海岸线提取技术研究

学位论文作者签名：于彩霞 日期：2015年 4月 15日

作者指导教师签名：王承斌 日期：2015年 4月 15日

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权信息工程大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密学位论文在解密后适用本授权书。）

学位论文题目：基于 LiDAR 数据的海岸线提取技术研究

学位论文作者签名：于彩霞 日期：2015年 4月 15日

作者指导教师签名：王承斌 日期：2015年 4月 15日

保密级别： 保密年限： 年 月至 年 月

## 目 录

目 录.....	I
图目录.....	V
表目录.....	IX
摘 要.....	XI
Abstract.....	XIII
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 LiDAR 技术的发展与现状.....	2
1.2.2 海岸线定义的研究进展.....	3
1.2.3 海岸线测绘技术的发展与现状.....	4
1.2.4 现状分析.....	6
1.3 研究目标与研究内容.....	6
1.3.1 研究目标.....	6
1.3.2 研究内容.....	7
第二章 LiDAR 技术及其数据预处理.....	9
2.1 LiDAR 系统概述.....	9
2.1.1 LiDAR 系统的分类.....	9
2.1.2 LiDAR 的系统组成与工作原理.....	9
2.2 标准 LAS 数据格式.....	11
2.2.1 LAS 1.0 的结构.....	11
2.2.2 最新版本 LAS 1.4.....	11
2.3 点云数据预处理.....	12
2.3.1 粗差剔除.....	13
2.3.2 滤波.....	14
2.4 本章小结.....	17
第三章 基于潮汐基准面的海岸线定义论证及其计算.....	18
3.1 引言.....	18
3.2 海岸线定义的不确定性.....	18
3.2.1 定义的多样性.....	18
3.2.2 定义的分类.....	19

3.3 海岸线定义及位置确定的问题.....	20
3.3.1 痕迹岸线.....	20
3.3.2 特征潮汐基准线.....	25
3.4 测绘学范畴下我国海岸线定义的完善.....	25
3.4.1 标准与规范中的相关规定.....	26
3.4.2 现行定义存在的问题.....	26
3.4.3 科学严谨的海岸线定义完善.....	27
3.5 大潮概念的局限性及其扩展.....	29
3.5.1 潮汐类型及潮汐类型数.....	29
3.5.2 大潮概念的局限性.....	31
3.5.3 大潮概念的扩展.....	31
3.6 平均大潮高潮面的算法设计.....	32
3.6.1 算法设计要求与可选方案.....	32
3.6.2 基于潮汐类型的特征值算法.....	34
3.6.3 覆盖全潮汐类型的统计算法.....	36
3.6.4 算法的论证.....	37
3.6.5 我国沿岸部分验潮站算例.....	41
3.7 本章小结.....	43
<b>第四章 海岸线提取常用方法及其改进.....</b>	<b>45</b>
4.1 引言.....	45
4.2 海岸剖面法与等值线追踪法.....	45
4.2.1 海岸剖面法.....	45
4.2.2 等值线追踪法.....	46
4.3 图像分割法及其改进.....	48
4.3.1 图像分割法基本原理.....	48
4.3.2 对图像分割法的改进.....	49
4.4 实例分析.....	52
4.4.1 实验区域数据.....	52
4.4.2 实例一.....	55
4.4.3 实例二.....	59
4.4.4 实例三.....	63
4.4.5 实例四.....	67
4.5 本章小结.....	70
<b>第五章 点云栅格化提取海岸线方法.....</b>	<b>72</b>

5.1 引言.....	72
5.2 点云栅格化法的设计思路.....	72
5.3 点云的栅格化.....	73
5.3.1 栅格单元大小的确定.....	73
5.3.2 栅格单元属性值的确定.....	74
5.3.3 栅格化算法.....	74
5.4 等值线提取.....	76
5.5 实例分析.....	76
5.5.1 实例一.....	77
5.5.2 实例二.....	79
5.5.3 实例三.....	82
5.5.4 实例四.....	85
5.6 海岸线的综合判绘.....	88
5.6.1 多源数据辅助判绘.....	88
5.6.2 海岸线化简的形态判绘.....	89
5.7 本章小结.....	90
<b>第六章 海岸线提取软件的设计与实现.....</b>	<b>92</b>
6.1 引言.....	92
6.2 LiDAR 数据处理软件现状.....	92
6.2.1 TerraSolid.....	92
6.2.2 Quick Terrain Reader/Modeler.....	94
6.2.3 RealWorks Survey.....	94
6.2.4 ENVI LiDAR.....	95
6.2.5 ArcGIS.....	96
6.2.6 ERDAS LPS.....	97
6.2.7 其他软件或模块.....	97
6.2.8 目前点云处理软件或模块存在的问题.....	97
6.3 海岸线提取软件的设计.....	97
6.3.1 开发平台.....	97
6.3.2 功能模块的设计.....	98
6.4 海岸线提取软件的功能实现.....	99
6.4.1 平均大潮高潮面计算模块.....	99
6.4.2 基于 ArcGIS Engine 的海岸线提取模块.....	99
6.5 本章小结.....	101

第七章 总结与展望.....	103
7.1 结论.....	103
7.2 创新点.....	104
7.3 展望.....	104
参考文献.....	106
作者简介 攻读博士学位期间完成的主要工作.....	115
致 谢.....	117

## 图目录

图 1.1 论文的组织结构.....	8
图 2.1 机载 LiDAR 示意图.....	10
图 2.2 LAS 1.0 的结构图.....	12
图 2.3 点云中局外点示例.....	13
图 2.4 船载 LiDAR 的孤立点云示例.....	14
图 2.5 基于坡度的滤波算法原理示意.....	15
图 2.6 基于平面/曲面拟合的滤波算法原理示意.....	15
图 2.7 基于聚类/分割的滤波算法原理示意.....	16
图 2.8 基于 TIN 的渐进加密滤波法原理示意.....	16
图 3.1 多种海岸线划分位置示意图.....	19
图 3.2 淤泥(粉砂)质海岸.....	21
图 3.3 砂(砾)质海岸.....	21
图 3.4 基岩海岸.....	22
图 3.5 生物海岸.....	22
图 3.6 淤泥(粉砂)质海岸影像.....	23
图 3.7 砂(砾)质海岸影像.....	23
图 3.8 基岩海岸影像.....	23
图 3.9 生物海岸影像.....	24
图 3.10 四种潮汐类型长期验潮站某月同步水位变化曲线.....	32
图 3.11 仿真站点及区域潮汐类型数分布图.....	37
图 3.12 仿真站点各潮位的变化曲线.....	39
图 3.13 平均大潮高潮面相关占比统计.....	40
图 3.14 验潮站算例分布.....	41
图 4.1 拟合某个剖面并截取与 MHW 交点的示意图.....	46
图 4.2 等值线追踪法的流程.....	47
图 4.3 等值线追踪提取海岸线的成果示例.....	47
图 4.4 图像分割法实施流程.....	49
图 4.5 实施流程.....	50
图 4.6 猴矶岛的 LiDAR 点云.....	53
图 4.7 猴矶岛的遥感影像.....	53
图 4.8 实验区域二的真彩色点云数据.....	53

图 4.9 实验区域二的遥感影像.....	54
图 4.10 实验区域三的遥感影像.....	54
图 4.11 实验区域三的 LiDAR 点云数据.....	55
图 4.12 实验区域四的痕迹线选择位置示意.....	55
图 4.13 实验区域四的 LiDAR 点云.....	55
图 4.14 由 DEM 数据提取的海岸线.....	56
图 4.15 图像分割法提取海岸线的主要步骤.....	56
图 4.16 图像分割改进法提取海岸线的主要步骤.....	57
图 4.17 岸线提取结果.....	58
图 4.18 DEM 岸线、分割岸线和改进岸线叠加显示的局部放大图.....	59
图 4.19 图像分割法提取海岸线.....	60
图 4.20 图像分割改进方法提取海岸线的主要步骤截图.....	60
图 4.21 改进岸线、等值岸线、分割岸线和痕迹岸线的叠加显示.....	61
图 4.22 痕迹岸线的测量点分布.....	62
图 4.23 平面距离.....	63
图 4.24 垂直差异.....	63
图 4.25 图像分割法提取海岸线.....	64
图 4.26 图像分割改进法提取海岸线.....	65
图 4.27 改进岸线、等值岸线、分割岸线和痕迹岸线的叠加显示.....	66
图 4.28 提取的海岸线与痕迹岸线采样点.....	66
图 4.29 LiDAR 岸线至采样点的平面距离.....	66
图 4.30 LiDAR 岸线至采样点的垂直距离.....	66
图 4.31 图像分割法提取海岸线.....	67
图 4.32 图像分割改进法提取海岸线.....	68
图 4.33 改进岸线、等值岸线、分割岸线和痕迹岸线的叠加显示.....	69
图 4.34 改进岸线、分割岸线与痕迹采样点分布.....	69
图 4.35 LiDAR 岸线至采样点的平面距离.....	70
图 4.36 LiDAR 岸线至采样点的垂直距离.....	70
图 5.1 栅格化提取海岸线的流程.....	73
图 5.2 稀疏采样点及其栅格化示意.....	75
图 5.3 LiDAR 点云栅格化示意.....	75
图 5.4 由 DEM 数据提取的海岸线.....	77
图 5.5 由点云数据栅格化法提取的海岸线.....	78
图 5.6 岸线提取结果.....	78

图 5.7 DEM 岸线、改进岸线与栅格岸线的局部放大图.....	79
图 5.8 点云栅格化处理数据.....	80
图 5.9 提取的海岸线.....	80
图 5.10 四种岸线叠加显示截图.....	80
图 5.11 岸线成果局部放大.....	81
图 5.12 痕迹岸线的测量点分布.....	81
图 5.13 平面距离.....	81
图 5.14 垂直距离.....	81
图 5.15 栅格化法提取海岸线.....	83
图 5.16 岸线提取成果对比.....	83
图 5.17 实地多条痕迹线示意.....	84
图 5.18 提取的海岸线与痕迹岸线采样点.....	84
图 5.19 提取的岸线至采样点的平面距离.....	84
图 5.20 提取的岸线至采样点的垂直距离.....	84
图 5.21 栅格化法提取海岸线.....	86
图 5.22 岸线提取成果.....	86
图 5.23 岸线提取成果局部放大图.....	87
图 5.24 栅格岸线、改进岸线与痕迹采样点分布.....	87
图 5.25 提取的岸线至采样点的平面距离.....	87
图 5.26 提取的岸线至采样点的垂直距离.....	87
图 5.27 由于阻挡产生的数据空白.....	88
图 6.1 TerraScan 的显示界面.....	93
图 6.2 TerraModeler 加载模块.....	93
图 6.3 TerraPhoto 加载模块.....	93
图 6.4 Quick Terrain Reader/Modeler 的显示界面.....	94
图 6.5 RealWorks Survey 的显示界面.....	95
图 6.6 ENVI LiDAR 的显示界面.....	95
图 6.7 precess 菜单设置界面.....	96
图 6.8 ArcGIS 10.2 的显示界面.....	96
图 6.9 软件功能模块设计.....	98
图 6.10 数据录入界面.....	99
图 6.11 点云数据的三维显示.....	100
图 6.12 快速滤波后的点云数据显示.....	101
图 6.13 栅格化法提取海岸线.....	101

## 表目录

表 3.1 潮汐类型的分类法.....	30
表 3.2 潮汐特征值算法与统计算法结果.....	38
表 3.3 验潮站计算结果.....	41
表 4.1 采用不同算法所用时间的统计 (单位: 分钟) .....	61
表 4.2 改进岸线、分割岸线与痕迹岸线的比较 (单位: m) .....	63
表 4.3 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m) .....	67
表 4.4 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m) .....	70
表 5.1 四种栅格化方法的精度与耗时统计.....	76
表 5.2 栅格岸线、改进岸线与痕迹岸线的比较 (单位: m) .....	82
表 5.3 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m) .....	85
表 5.4 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m) .....	88

## 摘要

海岸线是陆海分界线,是海图与地形图中均不可或缺的重要线状地形要素。全面、快速、准确地测定海岸线位置、性质及其动态变化,是地形图测图、海道测量、海岸带调查与海岸演变研究等的重要内容。LiDAR 是海岸带与海岛礁测绘的一种新兴技术和手段,代表着海岸带测绘发展的新方向,其能够快速获取高密度、高精度的三维点云数据,为海岸线的精确测绘提供了数据基础。与人工实地测量、遥感影像判绘等海岸线测量手段相比,LiDAR 技术条件下的海岸线确定方式无论从理论上或是从技术方法上均存在本质的差异。目前国内相关的研究刚处于起步阶段,但仅限于应用国外学者提出的算法从 LiDAR 点云中提取海岸线,很少或没有涉及基于潮汐基准面海岸线定义的全面扩展及针对中国复杂潮汐情况下海岸线高程的计算,同时也没有对海岸线提取方法进行更深入的研究。本文将以海岸线定义、海岸线提取方法及海岸线提取实践为主线,构建基于 LiDAR 数据的海岸线提取的理论与技术方法体系。主要工作和创新如下:

1、简要介绍了 LiDAR 技术与标准 LAS 数据格式,以机载或船载 LiDAR 点云数据为例,叙述其粗差剔除与滤波等预处理方法。

2、针对目前我国海岸线定义及位置确定不明确的问题,在总结分析海岸线定义的多样性及其分类的基础上,探讨了我国海岸线定义存在的问题,指出以痕迹岸线为主的定义方式,是受限于测绘技术和手段不得以而为之,但该定义方式使得岸线测定受主观因素影响大,且不满足测绘学对地形要素几何和物理意义准确唯一表示的基本要求。同时通过研究国外海岸线测绘的发展历程,总结出海岸线的定义必定经历由基于可视可辨认的主观确定到基于潮汐面的客观确定,并结合我国海域的潮汐情况,认为海岸线应为平均大潮高潮面与海岸的交接线,即平均大潮高潮线。这也与 LiDAR 技术条件下海岸线应采用基于潮汐基准面的定义方式相统一。

3、针对平均大潮高潮面概念只存在于半日潮类型海域的问题,从潮差变化规律角度,将“大潮”概念由海洋潮汐学上局限于半日潮类型的朔望大潮,扩展包含日潮类型的回归大潮。据此实现了“平均大潮高潮面”概念的完善。设计了基于实测水位数据的统计算法,通过潮汐最复杂的无潮点附近的仿真站点,以特征潮位面空间连续平滑变化为基本要求,选择确定平均大潮高潮面为统计算法中的大潮平均高高潮位。我国沿岸 50 个长期验潮站实测水位数据的计算与统计表明,平均 97%的水位在平均大潮高潮面下,这符合海岸线最基本的内涵“海岸线是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线”。

4、针对国外的等值线追踪法与图像分割法等海岸线提取方法对点云滤波分类要求高,且易受 DEM 误差影响的缺点,提出了图像分割改进方法,实例分析表明,提出的改进方法省略海岸 DEM/海岸 DSM 的构建,避免了其在构建过程中误差的影响,既提

高了岸线提取的效率,也使得提取的海岸线更可靠、形态更平滑,而且在较大程度上减少了海岸线后期编辑处理的工作量。通过四个不同类型海岸的实例,证明了图像分割改进法的通用性与普适性。

5、针对图像分割法及其改进算法无法同时提取其他辅助岸线要素的缺点,在继承图像分割改进法中对于滤波分类以及直接对 LiDAR 点云数据处理思想的基础上,提出了点云栅格化法,直接对点云进行数据处理,通过点云栅格化步骤将点云转为以灰度描述高程的栅格数据,再矢量化跟踪等高线实现海岸线的提取。实例表明,栅格化法提取的海岸线形态合理、可靠,且只需极少的人工编辑处理,在精度上与图像分割改进方法相当。但在提取多种辅助岸线要素时,效率上更优异。通过四个不同类型海岸的实例,证明了点云栅格化法的通用性与普适性。

6、针对目前 LiDAR 点云数据处理软件较为落后,且缺少海岸线提取功能等缺点,基于 ArcGIS Engine,设计了海岸线提取模块,基于本文在平均大潮高潮面概念完善与算法设计的研究成果,实现了由水位数据统计计算平均大潮高潮面的功能,以及基于等值线追踪法、图像分割改进法与栅格化法等海岸线提取功能。基本实现了 LiDAR 点云数据的读取与显示、预处理、DEM 和栅格数据的构建、海岸线的提取等功能。

关键词: LiDAR; 海岸线; 平均大潮高潮面; 海岸线定义; 海岸线提取

## Abstract

Shoreline, the boundary of land and sea, is the vital linear feature both on chart and topographic map, so it is important for topographic mapping, hydrographic survey, and coast zone survey and evolution study, to measure shoreline's position, character, and variety fully, speedily, and accurately. LiDAR is the new technology and means for mapping and surveying coast zone, islands and reefs, and represent the new way, and it cans quickly acquire high density, and high precise 3D point clouds. Compared to field survey and remote sensing interpretation, the shoreline measurement under LiDAR is different both on theory and technology. At present, the correlative study is starting, applying the methods abroad to abstract shoreline from point clouds, the study on shoreline definition based tide datum, and how to calculate shoreline height in national tide, and the methods to abstract shoreline is little. So taking shoreline definition, abstracting method and module, the theory and technology system for shoreline abstraction based on LiDAR data is founded. The main work and innovation are as follows:

1. LiDAR and standard data format LAS are produced briefly, and take the airborne and boat-based data for example, data pretreatment that are noise elimination and filter are specified.
2. Aimed at the ambiguous of national shoreline definition and position, the problems of definition are discussed based on the variable shoreline and its classification. Trace line is pointed out to be limit to mapping technology and means, and it is influenced by subjective factor, and it dissatisfied the main demand that features are represented in the only way of geometry and physics in Topography. By the history of shoreline mapping and surveying in abroad, it is found that definition based on visually discernible coastal feature must be to that based on specific tidal datum, and according to national tide, shoreline is the boundary of Mean High Water Surface and coast, that is Mean High Water Surface Line. It is unified to the definition based on tide datum under LiDAR.
3. Aimed at that MHWS is only in semidiurnal tide, in the view of tidal range change, the spring tide is spread including regression tide in diurnal tide from syzygy tide in semidiurnal tide, and then the concept of MHWS is perfect. Statistical arithmetic based on factual water level data is designed, by simulation station near the complex tide, and the tide datum is demanded continuously and changing flatly in space, the mean higher high water surface of statistical arithmetic is determined. Then factual water level data of 50 coastal tidal stations are calculated, and it is tested that about 97% water level are under MHWS, and it is fit to the basic meaning – Shoreline is the boundary of halophile and freshwater circumstance

biology.

4. Aimed at that demands of point clouds filters is too high by both the contouring method and image segmentation method, and it can be easily effected by DEM error, improved image segmentation method is advanced. It is tested by example that by omitting constructing coastal DEM/DSM, and avoiding the effect of error, efficiency is improved, and the shoreline is more reliable, smoother, and the work is reduced by the improved method. Besides, by the four different examples, improved image segmentation method is proved to be current and universal.
5. Aimed at that other proxy shorelines can't be abstracted by features image segmentation method and the improved methods at the same time, point cloud rasterization method is put forward based on the thought of filter and point cloud processing directly. Firstly, point cloud is processed directly, then it is transformed to raster data by the procedure of point cloud rasterization, and shoreline is abstracted by tracking contour. It is tested the shoreline by rasterization is reasonable, reliable, and less work, and the shoreline's precise is equal to that by improved image segmentation method. But in the way of abstracting other proxy shorelines, the new method is more efficiency. Besides, by the four different examples, point cloud rasterization method is proved to be current and universal.
6. Aimed at that the current software of LiDAR point cloud is behind, and lack of abstracting shoreline function, shoreline abstracting module is designed based on ArcGIS Engine, combining the work of MHWS concept and arithmetic, the heights of MHWS is calculated by water level statistics, and shoreline can be abstracted by contouring, improved image segmentation method and point cloud rasterization method. The functions of reading and displaying LiDAR point cloud, data preprocessing, constructing DEM and raster data, and abstracting shoreline are realized.

**Key Words:** LiDAR; Shoreline; Mean High Water Springs; Shoreline Definition; Shoreline Abstraction

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

我国拥有近 300 万平方公里的蓝色国土, 连接这片蔚蓝色海洋国土和陆地国土的是蜿蜒曲折的海岸线。我国海岸线总长约 32 000 多公里, 其中, 大陆岸线约 18 000 多公里, 岛屿岸线约 14 000 多公里。海岸线是陆海分界线, 对舰船航海、海岸带资源管理, 及海岸防御等具有重要的指示作用。海岸线是海岛礁形状描绘与面积量算的依据, 是海图和地形图上不可或缺的重要地形要素。因此, 全面、快速、准确地测定海岸线位置、性质及其动态变化, 是地形图绘图、海道测量、海岸带调查与海岸演变研究等的重要内容<sup>[1-3]</sup>。

长期以来, 测绘海岸线都采用最原始、传统的野外人工实地测量方法, 测量手段由光学仪器发展至全站仪、DGPS、RTK 等, 测量依据是滩涂上干湿线、沙砾的堆积、植物分界线、岩石上的痕迹线等各种可见的特征痕迹线<sup>[3-4]</sup>。这些痕迹线在许多海岸并不明显、不连续、有一定宽度, 难以辨认, 随海岸类型、走向的不同而存在差异。在进行测量时受人为的影响较大, 不同的测量人员对于相同岸段的痕迹线位置的判断有所不同, 即便是同一人, 在测量相同性质的不同岸段时测取的痕迹线也会不同。另外, 测量人员难以到达或需要采取特殊措施才能到达部分海岸, 特别是进行岩石陡岸测量时, 费时费力, 也存在着极大的危险性。因此, 该测量方法实地性强, 但效率低下, 安全系数低, 时效性差, 获取的数据不统一。

航天航空遥感由于其多时相、多平台的特征, 且具有宏观、快速、综合、动态和低成本等突出优势, 已成为监测海岸线动态变化的重要方法。但由于受到遥感资料成像时间和分辨率的限制, 一般提取的是成像时刻的瞬时水涯线, 或者利用滩涂上沙砾的堆积或植物的分布情况进行人为的修正。从本质上, 该方式是人工实地测量方法在遥感影像上的一种实现。因此, 通过该方式提取的海岸线一般不具有明确的精度指标, 且受人为主观因素影响。目前大多用于海洋调查目的, 快速高效地查明大范围内的海岸线基本情况, 主要关注海岸线的分类及各类型的变化。

自 20 世纪 70 年代起, 激光雷达测量 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 技术的出现和飞速发展, 为海岸线的严谨、客观测绘提供了一个契机。对于海岸带与海岛礁等传统人工测绘困难的地区, 机载或船载 LiDAR 具备快速获取高分辨率、高精度的三维空间信息的能力。因此, 机载或船载 LiDAR 是海岸带与海岛地理信息获取的重要手段与发展方向, 为以附加明确精度指标的地理信息来测绘海岸线提供了技术支撑。同时, 新技术的应用也对海岸线精确测绘提出了新的研究课题:

### (1) 必须改变海岸线测量的依据

人工实地测量与遥感影像判绘都是以各种痕迹线为海岸线测量依据, 但这种受主观

因素影响大的测定方式显然不符合现代精确测绘的需求,需转变为基于特征潮汐基准面的客观方式。海岸线的提取将转化为特定潮汐基准线的提取。

### (2) 平均大潮高潮面的计算及传递技术等理论和算法急需发展

为支撑严谨客观的海岸线定义及测绘工作,平均大潮高潮面作为一种潮汐基准面,其定义及传递技术应覆盖所有潮汐类型海域,参照平均海面、深度基准面等潮汐基准面,建立较完备的理论和算法体系。

### (3) 海岸线提取技术急需发展

点云数据密度高、数据量大的特点以及水陆交界处相对复杂的地形,是海岸线提取面对的难点。研究和新的海岸线提取算法,快速提取客观、合理的海岸线是海岸线提取技术的发展目标。

综上所述,为实现将海岸线作为地形要素进行精确测绘与表示的目的,面临海岸线的严密定义、平均大潮高潮面的扩展及传递技术、海岸线提取方法与手段等全方位的理论和技术问题,而这些均是当前海岸带、海岛礁测绘中无法回避的重要课题。这也是本文的选题依据,随着 LiDAR 技术的发展与应用的拓展,从不规则的离散三维点云中快速、准确、客观地提取海岸线是一项非常重要且实用的研究工作。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 LiDAR技术的发展与现状

LiDAR 技术是近 30 多年来摄影测量与遥感领域具革命性的成就之一<sup>[5-7]</sup>,作为一种直接、主动式测量系统,其不受时间和天气条件的限制,可全天候对地观测;能够快速获取精确的高分辨率数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM)以及地面物体的三维坐标<sup>[5-6]</sup>;能进行危险地区的测图作业;并且还可以同传统的航空相机、CCD 相机、红外传感器以及高光谱传感器等结合<sup>[5-6]</sup>,组成功能更强的多传感器遥感系统。

激光作为遥感设备可追溯到 20 世纪 70 年代,美国在阿波罗登月计划中利用激光雷达技术进行激光测月和卫星激光测距,显示出了利用激光进行遥感测量的巨大潜力<sup>[6-7]</sup>;从 80 年代末期开始,其他发达国家开始展开 LiDAR 技术的研究并在实际的工作中进行检验,直到上世纪 90 年代初才趋向成熟;进入 21 世纪,随着多传感器的集成与融合技术的发展, LiDAR 技术的自动化和实时性不断提高,稳定性和可靠性也有了重大的进展,点云精度逐渐由米级提高到厘米级,甚至毫米级,而 LiDAR 技术也从空中发展到地面,乃至海洋<sup>[7]</sup>,因此 LiDAR 作为一项成熟的高新技术手段得到了市场采纳和认可。目前,在欧美等发达国家, LiDAR 技术已经得到了广泛的应用,应用范围也扩大至大范围三维地形测量、水下地形测量、林业生产、灾害监测等领域<sup>[7]</sup>,几乎囊括了经济建设的各个方面。

我国对 LiDAR 技术的研究起步较晚,一直到 21 世纪初期,仍一直处于对激光测距

技术理论的探索和研究阶段，还未形成商品化研究成果。自 2010 年起开始研制开发 LiDAR 系统，如武汉大学、山东科技大学、中国测绘科学研究院等推出的车载移动测量系统，以及中海达于 2013 年自主研发的一体化移动三维测量系统——iScan，使得我国的 LiDAR 技术逐渐从理论走向实际应用。

## 1.2.2 海岸线定义的研究进展

海岸线通常被认为是海洋与陆地的分界线，由于受自然作用例如潮汐、风浪、气候等影响，海平面并不是固定不变，而是不断地升降、变化的，从而导致这条海陆交界线也是在不断的变化，具有动态性和不确定性。因此，有人认为不应该存在海岸线的概念，也有人认为海岸线是一条虚拟的动态线；同时，出于不同学科、不同研究目的，以及不同国家和地区的地理位置或潮汐情况不同，对海岸线的定义及其具体位置的测定也有所不同。海岸线的定义存在着很大的人为因素和行政因素。

### 1.2.2.1 国外研究进展

Moore<sup>[8]</sup>、Ruggiero<sup>[9]</sup>，及 O'Connell<sup>[10-11]</sup>等学者均指出，从过去到现在乃至将来都会存在多种海岸线指标或海岸线参考特征 (shoreline reference features, SRFs) 来替代海岸线的“真实”位置。Elizabeth H.B<sup>[12]</sup>通过全面分析比较，也指出目前已有超过 40 种海岸线指标描述其位置。其中，35 个为基于视觉可分辨特征，如基于人工建筑物的边界，基于形态特征如侵蚀陡坡等，以及明显可辨认特征如高水位线、干/湿线、沙丘植被线等；5 个为基于潮汐基准面，如 MHW 或平均低低潮面 (Mean Lower Low Water, MLLW) 等。

Pajak, M.J.<sup>[13]</sup>指出，确定海岸线的依据需满足两个要求：一是可重复性，即保证不同的测绘员解译要一致；二是可靠性，即海岸线的位置描述要一致。事实上，基于视觉可分辨特征显然不符合上述两个要求。Shalowitz A.L<sup>[14]</sup>通过实地勘察及历史地形图确定以高潮线 (High Water Line) 为地图上海岸线，其近似于平均高潮面 (Mean High Water, MHW) 但又不是 MHW，同时 Shalowitz A.L 指出该条线最大误差可达 10m；也有诸多学者<sup>[15-18]</sup>选择高潮线为海岸线，但指出这条线可能不清晰，易受到风/浪/潮汐的影响；Moore, L.J.<sup>[19]</sup>和 Priest, G R.<sup>[20]</sup>人工判读航空相片时均选择沙丘植被的靠海边缘为海岸线，但其依据只适合于存在沙丘植被的海岸，并且无法确定其是否为长期的海洋及气象作用而形成的。

因此，众多海岸管理者和测量者指出必须选择一个一致的、客观的海岸线定义，而基于潮汐基准面无疑是描述海岸线的最好选择<sup>[21]</sup>。潮汐基准面包括平均低潮面 (Mean Low Water, MLW)、平均低低潮面 (Mean Lower Low Water, MLLW)、平均高潮面 (Mean High Water, MHW)、平均大潮高潮面 (Mean High Water Springs, MHWS)、平均海平面 (Mean Sea Level, MSL) 等。例如，在美国，海岸线的绘制由国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 负责，采用平均高潮面和平均低低潮面为潮汐基准面确定海岸线<sup>[22]</sup>，分别对应于高潮线与低潮线，用于界定陆海

交界和领海边界参照线；而位于地中海区域的西班牙则采用平均海平面<sup>[23]</sup>。

Fisher, J.S.<sup>[24]</sup>和 Parker, B.<sup>[25]</sup>通过立体相对采集到真正的基于 MLLW 和 MHW 的海岸线，并叠加于海滩的数字地形模型上。Hess, K. W.<sup>[26]</sup>在预期特征潮位时刻拍摄航空相片，然后通过人工判读方式提取 MHW 海岸线，但该方法没有考虑到水动力（包括波浪和涨潮）的短期变化。Stockdon, H. F.<sup>[27]</sup>等学者则利用 LiDAR 技术数字化提取基于潮汐基准面 MHW 的海岸线。相对于判绘干湿线、高潮线、植物生长线等痕迹岸线，MHW 岸线在分析岸线变化方面更有优势：一是消除了由于波浪或潮汐的短期不稳定性<sup>[28]</sup>；二是岸线提取不需要判读，并且可重复操作；三是可靠性强，岸线的不确定性比像片判读要相对小些<sup>[29]</sup>，真正实现了海岸线的客观、快速测绘。

#### 1.2.2.2 国内研究进展

同国外的海岸线定义发展进程相似，我国的海岸线定义及位置确定同样经历了由主观到客观，由可视可分辨特征到基于潮汐基准面的发展历程。

许家琨等<sup>[30]</sup>基于三个国家标准和沿海五省的法律条例，以及东海部分岛屿的理论最高潮面与平均大潮高潮面的计算比对，认为海岸线在当前采用平均大潮高潮面是科学的，澄清了以理论最高潮面作为海岸线的异议和模糊认识。杨玉娣等<sup>[31]</sup>与夏东兴等<sup>[32]</sup>指出“海岸线是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线，这是海岸线最基本的内涵”，并给出各地貌类型海岸线（痕迹岸线）的划定原则。王义刚等<sup>[33]</sup>认为：海岸线的定义存在着很大的人为因素和行政因素，其位置是很难确定的。王长海等<sup>[34]</sup>指出：目前所指的海岸线是人为界定的海陆分界线，存在平均大潮高潮的定义与痕迹线的辨别等问题，平均大潮高潮是界定海岸线广义上的基本准则，痕迹仅仅是界定海岸线的近似方法，不能混同。党亚民等<sup>[35]</sup>提出“兼顾已有国家标准对海岸线的理论定义，将海岸线规定为平均大潮高潮面与海岸的交接线，即平均大潮高潮线（摒弃痕迹岸线概念）”、“海岸线测量内容包括平均大潮高潮线、平均水位线和零米等深线测量”。暴景阳等<sup>[36]</sup>讨论了平均大潮高潮面的定义问题，指出平均大潮高潮面概念在海洋潮汐学中局限于半日潮类型，并尝试在日潮海域将回归潮高高潮位应用为平均大潮高潮位；分析比较了统计方法与潮汐特征值算法的符合度，计算了平均大潮高潮位与理论最高潮位的比率；认为平均大潮高潮位计算的相关问题需深入系统论证。

总之，目前对海岸线定义的研究成果主要集中于各地貌类型的痕迹岸线划定原则，部分学者已认识到痕迹岸线存在诸多问题，而平均大潮高潮面的概念不能覆盖所有潮汐类型，且只存在近似的潮汐特征值算法，在概念上和算法上都需完善。

### 1.2.3 海岸线测绘技术的发展与现状

#### 1.2.3.1 国外研究进展

国际上，海岸线确定及其变化的研究大多基于遥感技术。早期受限于遥感资料的分辨率，基本都直接将瞬时水边线作为海岸线<sup>[37-39]</sup>，通过人工目视解译或自动解译的方式

提取水边线；然后发展至将干湿线、植物生长分界线等作为海岸线<sup>[40-44]</sup>；也有学者选择高潮线<sup>[15-18]</sup>，其是指测量时刻前一次高潮向陆地延伸的范围，静态的依附于海滩<sup>[45]</sup>，不随着潮汐周期的变化而变化<sup>[46]</sup>。通常在岸滩剖面上，高潮线比干湿线更高些<sup>[9,47]</sup>。但干湿线和高潮线的不稳定性给海岸线位置带来了更大不确定性，这是因为其表示的是海洋短期变化而不是真正岸线的变化<sup>[47]</sup>；同时，不同作业人员从航空像片判读的高潮线或干湿线并不一致<sup>[8-9,41,48]</sup>；RUGGIERO 等<sup>[9]</sup>和 MOORE 等<sup>[47]</sup>发现从同一组相片上判读的高潮线高程不同，平均差异达到 4.7m 和 19.4m；高潮线与干湿线经常不是一条清楚的边线，有时显示为一模糊的条带<sup>[41]</sup>。

随着高精度的 LiDAR 在海岸带测量中的应用，利用 LiDAR 点云数据提取海岸线的研究越来越多。利用 LiDAR 点云数据提取海岸线的方法基本分为两种：一是海岸剖面法（CSP, cross-shore profile）<sup>[27]</sup>，它是基于线性回归模型，沿海岸按一定间隔拟合海岸剖面，内插出与特定潮汐基准面的交点，交点连接生成海岸线，该方法被美国地质勘探局（United States Geological Survey, USGS）官方使用，缺点是运算量较大；二是等值线追踪法（contouring method）<sup>[49]</sup>，由 LiDAR 衍生的 DEM 模型（DEM 或网格），直接生成特定潮汐基准面高程所在的等值线，被美国国家海洋与大气管理局 NOAA 官方使用。Liu<sup>[50]</sup>于 2006 年提出了一种基于分割的图像处理方法，能够在人为干预少的情况下，自动地从 LiDAR 数据中提取海岸线。上述方法的前提都是由 VDatum（美国垂直基准转换软件系统）获得对应坐标处平均高潮面在 DEM 所采用基准面上的高程。美国的实践表明上述方法提取的海岸线已能满足中大比例尺的测图要求。

### 1.2.3.2 国内研究进展

我国学者在运用遥感技术确定海岸线及其变化方面取得了诸多成果，大部分是关于目视、自动解译海岸线的算法方面，应用的技术主要是提取卫星图像中的水边线，即卫星过顶时刻所记录的瞬时水边线<sup>[51-57]</sup>。部分根据海岸的类型，由可视的痕迹对提取的水边线进行了人工调整<sup>[58-63]</sup>。孙美仙等<sup>[64]</sup>使用海水大潮高潮时刻的卫星图像，以提高海岸线提取的准确度，但大潮时刻摄制图像的时间要求过于苛刻。黄海军等<sup>[65]</sup>、韩震等<sup>[66]</sup>、王忠蕾等<sup>[67]</sup>、张旭凯等<sup>[68]</sup>利用卫星图像对部分地区海岸线的变化进行了研究，考虑了季节、卫星过顶时潮位与坡度的影响。刘善伟等<sup>[69]</sup>以遥感影像与 LiDAR 数据相结合的方法提取海岸线。孙伟富等<sup>[70]</sup>分析了各种海岸类型在遥感影像中的特征，并建立了五类海岸的遥感解译标志，提出了相应的海岸线（痕迹岸线）提取原则。以上研究基本都是基于海洋资源调查的目的，并且从本质上都是痕迹岸线的成果。

从测绘角度，申家双等<sup>[4,71]</sup>提出了基于潮间带 DEM 和潮汐模型的海岸线提取方法。利用数字摄影技术与多波束测深技术构建了某岛屿的陆海 DEM，由潮汐模型计算了平均大潮高潮面在 1985 国家高程基准中的高程，以等值线追踪法提取了海岛岸线，与人工野外实地测量海岸线结果相比，在人工岸线区域具有较好的吻合度。党亚民等<sup>[35]</sup>设计了

潮位辅助的海岛岸线测量方法,认为岸线测量在理论上是一个面临诸多挑战的新课题。张良等<sup>[72]</sup>利用机载 LiDAR 生成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,生成二值化“水陆图”,然后以提取边缘的方式提取高低潮线。董保根等<sup>[73]</sup>通过 LiDAR 点云数据构建约束的三角网,以平均大潮高潮面高程跟踪等高线,最后由自适应地形的动态张力样条函数法对海岸线进行平滑。李杰等<sup>[74]</sup>利用地面激光扫描仪构建三维模型,结合潮汐数据计算海岸线高程,通过高程平面横切三维模型而提取海岸线,与 RTK 人工实测岸线相比,两者具有较好的一致性。倪绍起等<sup>[75]</sup>利用机载 LiDAR 数据生成 DEM,由瞬时水边线高程与潮汐模型推算高程实现 DEM 的高程系统转换,再由多年平均大潮面高程实现海岸线的提取。上述研究中,算例都为半日潮类型海域,平均大潮高潮面的统计计算方法都没有涉及,只作为一个已知高程的等位面来处理。

暴景阳等<sup>[76-77]</sup>讨论了航空摄影测量模式下海岸线综合推算技术,分析了目前可能达到的精度指标;认为岸线定义与算法需完善,岸线推算技术还不能满足海岸线的实际应用需求,相关研究工作目前处于起步阶段。

#### 1.2.4 现状分析

通过如上分析发现,海岸线的定义经历由主观至客观,由基于可视可分辨的痕迹确定方式发展为基于潮汐基准面的确定方式,这一点从美国等发达国家的海岸线确定发展历程得到了充分的证明,同时在基于潮汐基准面海岸线定义的理论支持下,从 LiDAR 点云中提取海岸线的研究在国外发展迅速,已能满足大中比例尺的测图要求。

国内在利用航天航空遥感影像提取海岸线方面的研究相对比较成熟,海岸线的提取依据以水位线、沙脊、植物线等痕迹为主,而利用 LiDAR 技术提取海岸线方面的研究仍处于起步阶段,主要体现在:我国海岸线定义不明确,未建立由可视痕迹线转为潮汐基准线的海岸线科学定义;平均大潮高潮面仅局限于半日潮占优海域,未覆盖我国全部潮汐类型;采用国外现有的简单的等值线方法或图像分割法从点云中提取海岸线,未发展和研究新的提取方法,且缺乏对方法的可靠性与适用性的系统研究。

综上所述,为实现海岸线快速、全面、精确的测绘,发展和研究 LiDAR 技术条件下海岸线的精确测绘理论和技术,必须解决海岸线的严密定义、平均大潮高潮面的扩展、海岸线提取方法与手段等全方位的理论和技术问题,而这些均是当前海岸带、海岛礁测绘中无法回避的重要课题。

### 1.3 研究目标与研究内容

#### 1.3.1 研究目标

LiDAR 技术是海岸带与海岛礁测绘的发展方向,可快速获取海岸线附近的高密度、高精度的点云数据,为海岸线的精确测绘提供了数据基础。LiDAR 点云数据的特点使得海岸线的确定方式由可视痕迹线转为潮汐基准线,因此,由 LiDAR 点云数据精确测绘

海岸线需满足两个技术基础：一是基于潮汐基准面的海岸线定义及相应算法；二是提取潮汐基准线的技术方法。目前，国内对这两个方面的研究都不完善或不系统，本文将针对这两个方面的问题开展研究，具体研究目标为：

(1) 探讨我国海岸线的定义问题，提出基于潮汐基准面的海岸线定义，并完善平均大潮高潮面的概念，论证平均大潮高潮面的算法，使概念与算法覆盖所有潮汐类型。

(2) 在分析现有海岸线提取方法的基础上，提出改进算法或新的方法，实现海岸线的可靠提取，过程只需极少的人工编辑处理，海岸线在形态上合理。通过多个实例及多源数据，验证方法的普遍适用性与可靠性。

(3) 基于 ArcGIS Engine，设计与编制海岸线提取模块，实现 LiDAR 数据的读取与显示、预处理、DEM 和栅格数据的构建、海岸线的提取以及其它辅助岸线要素的提取等功能。

本文将以海岸线定义、海岸线提取方法至海岸线提取工具为主线，构建由 LiDAR 数据精确测绘海岸线的理论与技术方法体系。

### 1.3.2 研究内容

本文的研究内容为：

第二章：简要介绍了 LiDAR 技术与标准 LAS 数据格式，以机载或船载 LiDAR 点云数据为例，叙述其粗差剔除与滤波等预处理方法。

第三章：总结分析了海岸线定义的多样性及其分类，指出 LiDAR 技术条件下应采用基于潮汐基准面的定义方式。探讨了我国的海岸线定义，指出现行定义在科学性上并不严谨，分析认为海岸线应为平均大潮高潮面与海岸的交接线，即平均大潮高潮线。提出了完善平均大潮高潮面概念的基本思路；以空间连续平滑变化为基本标准，由仿真算例论证了平均大潮高潮面的算法，提出了基于长期水位数据的统计算法。平均大潮高潮面的概念与算法能覆盖所有潮汐类型。

第四章：对国际上常用的海岸剖面法、等值线追踪法与图像分割法进行了分析，并提出了图像分割改进法。四个实例表明，图像分割改进法能可靠提取海岸线，在效率上高于图像分割法。

第五章：在能可靠提取海岸线的基础上，为便于提取多种海岸要素，提出了点云栅格化法。四个实例表明，点云栅格化法与图像分割改进法提取的岸线基本一致，并通过实例对比分析了提取的海岸线与痕迹岸线的相互关系。

第六章：介绍了目前 LiDAR 软件存在的问题，并基于 ArcGIS Engine，设计与编制了海岸线提取模块，实例表明该模块能实现平均大潮高潮面计算、多种方法的海岸线提取等功能。

第七章：总结了本文的研究成果、结论与创新点，提出了进一步研究的思路。

论文的组织结构如图 1.1 所示。

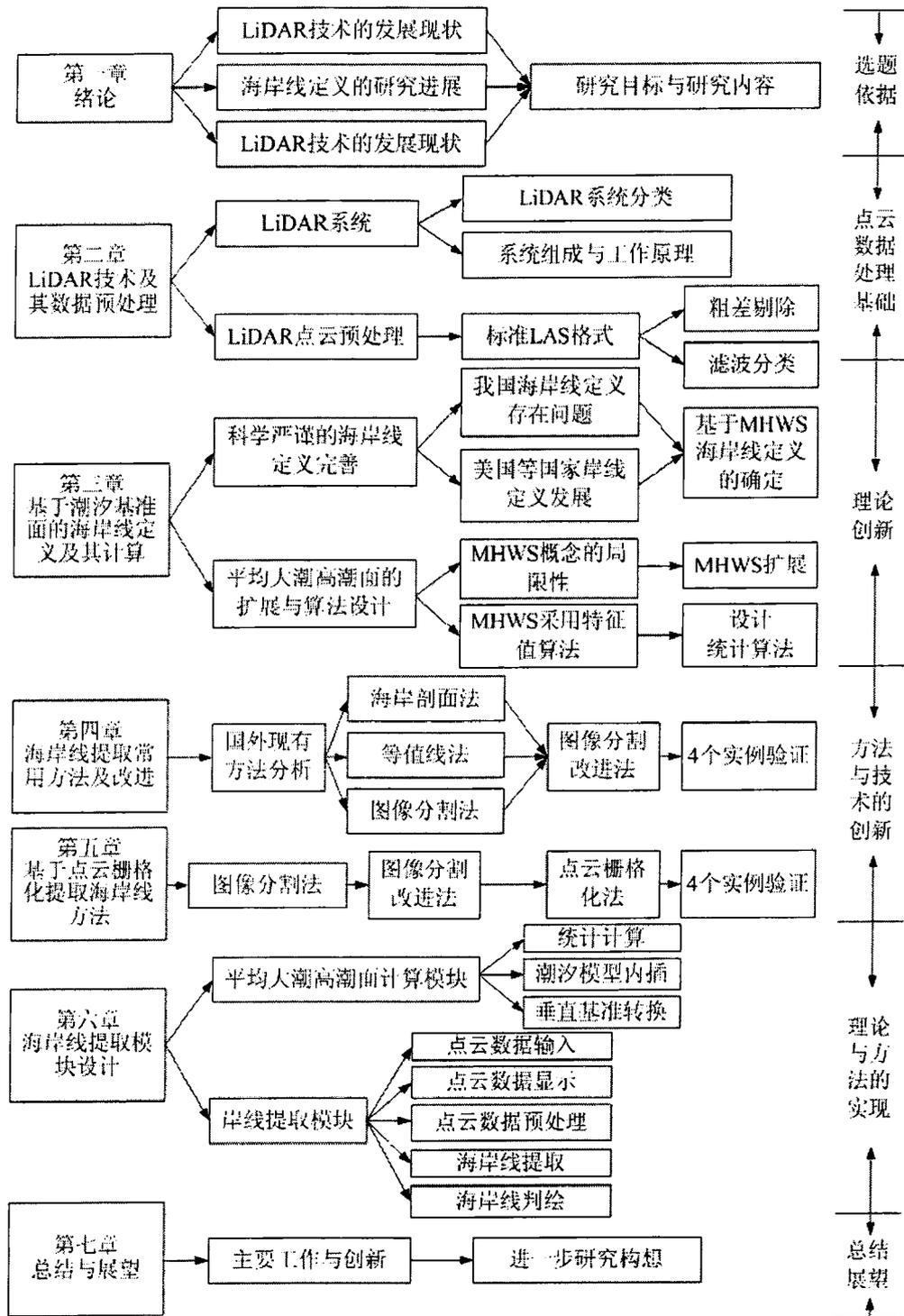


图 1.1 论文的组织结构

## 第二章 LiDAR技术及其数据预处理

LiDAR 测量的点云数据是本文研究工作的数据基础,点云数据的预处理是后续研究工作的必要步骤。本章将简要介绍 LiDAR 技术、标准 LAS 数据格式,以及点云数据的粗差别除与滤波等预处理方法。

### 2.1 LiDAR系统概述

#### 2.1.1 LiDAR系统的分类

激光雷达测量系统在发展过程中出现过多种名称,主要有:激光成像(Laser Imaging, LI)、激光扫描(Laser Scanning, LS)、激光雷达测量(Light Detection And Ranging/Light Infrared Detection And Ranging, LiDAR)、激光测高(Laser Altimetry, LA)、机载激光测高(Airborne Laser Altimetry, ALA)、机载激光测量系统(Airborne Laser Mapping, ALM)、机载激光地形测绘(Airborne Laser Topographic Mapping/Airborne Laser Terrain Mapping, ALTM)、机载激光扫描测量系统(Airborne Laser Scanning, ALS)等<sup>[78-79]</sup>。总体上系统组成与原理是基本一致的,都是指将激光雷达测距系统、全球定位系统和惯性测量系统等集成,装载在不同的承载设备平台上,对地球表面形态或所关注的物体进行扫描,获取三维坐标及影像、强度等信息<sup>[79]</sup>。目前命名已统一为激光雷达测量/LiDAR,因此本文将统一采用该命名。

随着 LiDAR 技术的逐步成熟与完善,激光雷达测量系统的体积越来越小,越来越轻便,可根据测量任务的需求和测量物标的不同装载在多种平台上。激光扫描系统按承载平台可分为两大类:

##### (1) 空载激光扫描系统(Flying-borne Laser Scanner)

按平台可进一步分为星载激光扫描系统(Galaxy Laser Scanning, GLS)和机载激光扫描系统(Airborne Laser Scanning, ALS)。在海岸带与海岛测绘中常用的是机载 LiDAR,需注意的是对于一些特殊地形,如近似 $90^\circ$ 或大于 $90^\circ$ 的陡坡或悬崖,机载 LiDAR 采集的数据非常稀少或者根本无法扫描。

##### (2) 地面激光扫描系统(Terrestrial Laser Scanner, TLS)

地面激光扫描系统包括移动激光扫描仪(Mobile Laser Scanner, MLS)和静态激光扫描仪(Static Laser Scanner, SLS)。移动激光扫描仪是基于移动承载平台,又分为船载 LiDAR(Boat-based Laser Scanning)、车载 LiDAR(Vehicle-based Laser Scanning)和人工便携式 LiDAR(Manual Portable Laser Scanning)。对于海岸线测绘,船载 LiDAR 具有最佳的适用性,可近距离测量陆海交界处高分辨率的点云数据。

#### 2.1.2 LiDAR系统的组成与工作原理

本文的研究对象为海岸线，因此后续的工作将采用机载 LiDAR 数据和船载 LiDAR 数据共同完成研究任务。事实上，无论采用何种承载设备进行扫描，其系统组成与工作原理是大同小异的，所以本节将以机载 LiDAR 为例介绍 LiDAR 系统的组成与工作原理，图 2.1 为其示意图。

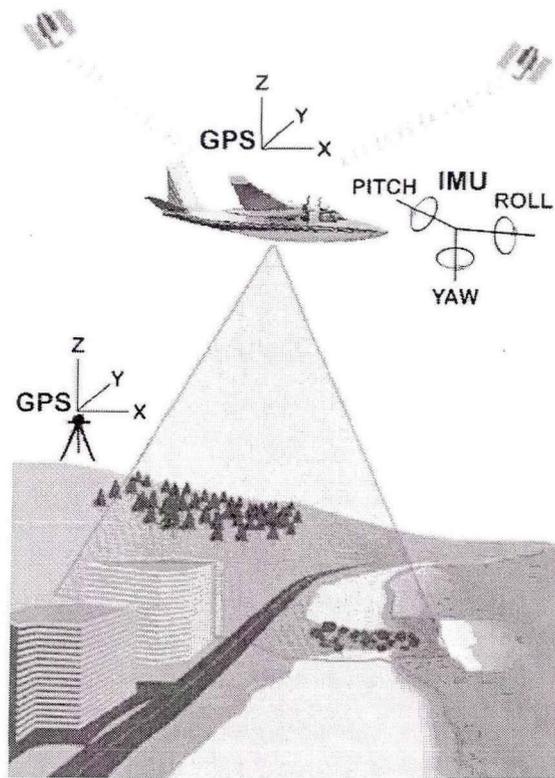


图 2.1 机载 LiDAR 示意图

机载 LiDAR 一般由定位与姿态测量系统、激光扫描测距仪、数码相机和中心控制单元等组成。

#### (1) 定位与姿态测量系统

定位与姿态测量通常是由差分 GPS 系统与惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 组合实现，即 DGPS/INS 组合系统。

#### (2) 激光扫描测距仪

激光扫描测距仪是 LiDAR 的核心，以脉冲激光器为辐射源，通过扫描光学系统改变激光束的输出方向，实现激光束的横向扫描<sup>[80]</sup>，得到飞机到地面之间的一系列离散的距离观测值。激光扫描测距技术是空间点阵扫描技术和激光无反射棱镜长距离快速测距技术的组合<sup>[81]</sup>。

#### (3) 数码相机

高分辨率数码相机可辅助实现目标的分类识别，或作为点云数据的纹理，通过点云数据与影像的匹配而达到高精度虚拟现实的目的。

#### (4) 中心控制单元

中心控制单元控制 DGPS/INS、激光扫描测距仪、数码相机等部件协同工作,记录相关测量数据,为操作人员提供实时信息,如各部件的工作状态、飞行轨迹等。

机载 LiDAR 的工作原理是:激光扫描测距仪沿着飞机的飞行方向对地物发射激光束,沿航线方向纵向扫描,再通过扫描转镜实现横向扫描;同时,通过 GPS 定位系统提供的飞机精确方位数据和惯性导航系统 INS 提供的飞机姿态数据(航向、侧滚、俯仰和加速度),从而获得大范围带状区域的地物点云数据<sup>[7,82]</sup>。

## 2.2 标准LAS数据格式

LiDAR 技术采集的离散激光点数据量大且信息丰富,常称之为三维激光点云。不同的硬件/软件商均设计和开发了适合自身的数据文件格式,常见的数据格式可分为四类:①硬/软件自定义格式,如 Rieg1 仪器的 3DD 格式、Leica 的 X-function DBX format 格式、Optech 的 IXF 格式等;②ASCII 文件格式,如 ASC、DAT、PTS、PTX、RAW、TXT、WRL 和 XYZ 等;③二进制文件格式,如 BIN、LAS、LDA、TEW、TS、ZFC、PTC 和 ZFS 等;④栅格格式,如 ArcInfo Grid 格式等。

繁多的数据格式给 LiDAR 数据的交换和共享造成了困扰,不利于 LiDAR 技术的应用和发展。为此,美国摄影测量与遥感(The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ASPRS) LiDAR 协会研究和制定了 LiDAR 数据交换标准格式 LAS (the file extension of the ASPRS LiDAR data exchange format)。

### 2.2.1 LAS 1.0 的结构

2003 年 9 月通过了 LiDAR 数据交换标准格式 LAS 1.0 版<sup>[81]</sup>,且被主要的硬件/软件商和广大的用户所接受,其后所推出的 LAS 1.x 版本均是在此基础上进行的改进或补充,所以需要充分地认识和了解 LAS 1.0。LAS 1.0 包括三部分,分别为公共头文件、变长记录和点数据,其结构如图 2.2 所示。

### 2.2.2 最新版本 LAS 1.4

随着 LiDAR 技术的发展,原先设计的格式逐渐暴露出缺陷,因此需要不断对其进行改进和优化<sup>[83-89]</sup>,平均约两年更新一次版本,目前最新版本为 2013 年 7 月发布的 LAS 1.4。

LAS 1.4 格式文件由四部分组成,分别为文件头区块(File Header Block)、变化记录(VLR, Variable Length Records)、扩展变长记录(EVLR, Extended Variable Length Records)与点数据(Point Data Records)<sup>[90-91]</sup>。各部分简要介绍如下:

#### (1) 文件头区块

记录文件的基本信息,如点数据的格式与数量、到点数据的偏移量、地物分类标准、变长记录的数量、扩展变长记录的数量以及 X、Y、Z 坐标的比例因子、偏移量、范围等。

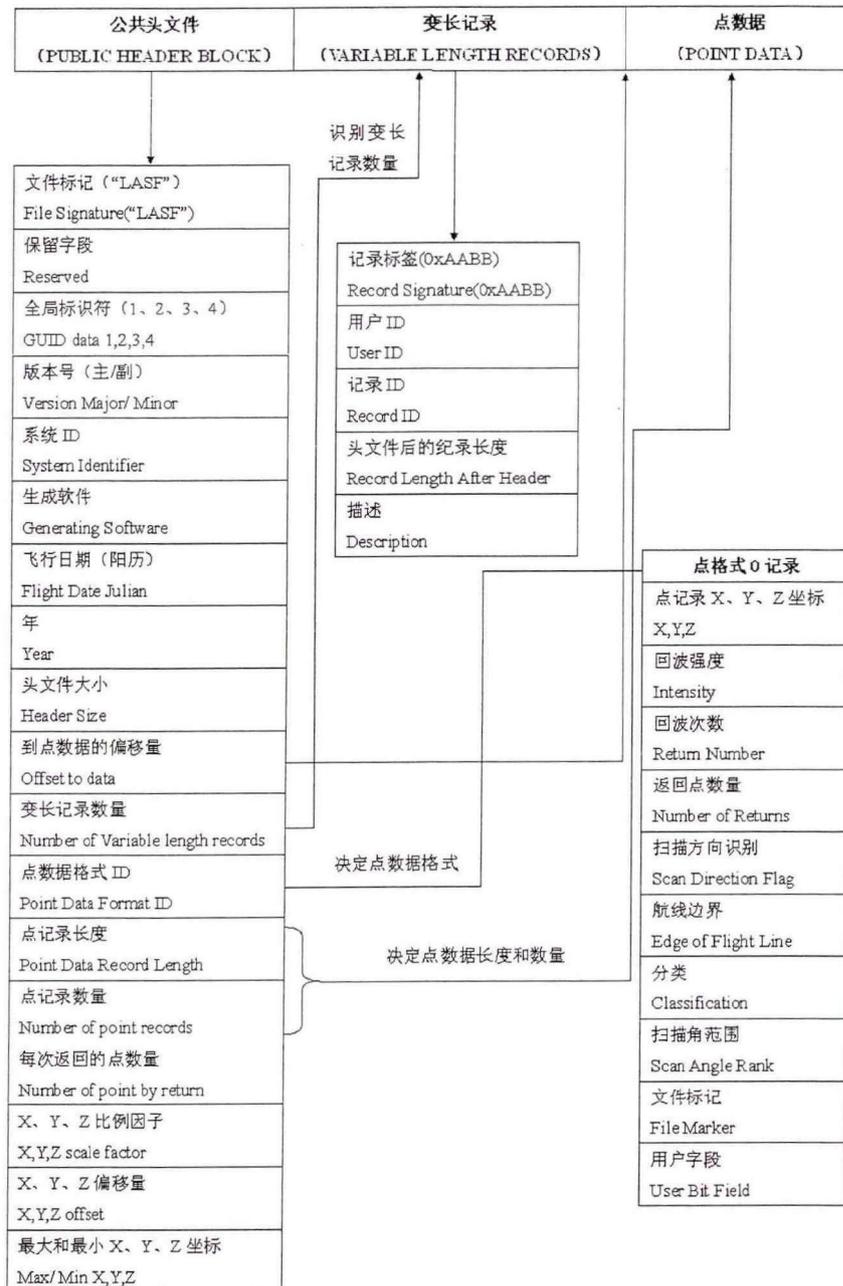


图 2.2 LAS 1.0 的结构图

(2) 变长记录与扩展变长记录

变长记录记录数据的投影信息、元数据信息以及用户自定义信息等，是 LAS 格式中最灵活的部分，可能存在一个或多个变长数据记录。EVLRS 比 VLR 有效载荷大，并且添加在文件的末端，可以增加任何信息而不需要重新更改整个文件。

(3) 点数据

记录每个离散点云的 X、Y、Z 坐标和相关属性，如回波次数与强度、反射脉冲波形、返回点数量、点的色彩、扫描方向与扫描角范围等。

2.3 点云数据预处理

当 LiDAR 向目标发射激光脉冲时，可能会落在任何物体上，有的激光脚点位于真实的地形表面上，称之为地面点；有的脚点位于人工地物（如建筑物、桥梁、车辆等）或自然地物（如树木、灌木等）上，称之为非地面点。点云数据滤波是将地面点从点云数据中分离出来，实质是采取某种算法和过程将非地面点去除<sup>[79]</sup>。本节重点关注如何对 LiDAR 点云进行滤波处理（包括粗差别除和滤波分类），这是目前 LiDAR 数据处理的关键问题之一，也是机载 LiDAR 数据处理的难点和热点问题。

### 2.3.1 粗差别除

机载 LiDAR 利用脉冲信号扫描地球表面时，大量反射信号被接受，可能产生较大的噪声<sup>[7]</sup>；当激光脉冲信号遇到飞鸟等时，会产生异常误差；当脉冲信号被水体吸收或镜面反射时，无法接受回波信号，将产生数据空白或异常值；仪器设备自身也不可避免地产生各种噪声。这些噪声和异常值都对机载 LiDAR 的精度产生影响，扭曲其所表达的地形表面，导致其衍生的产品失真甚至完全错误，因此在进行滤波分类前必须将这些粗差别除。LiDAR 点云的粗差基本上可分为两大类<sup>[72]</sup>：

#### (1) 局外点

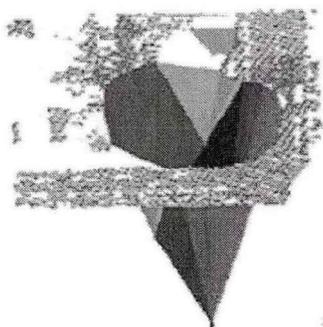


图 2.3a 地面低点

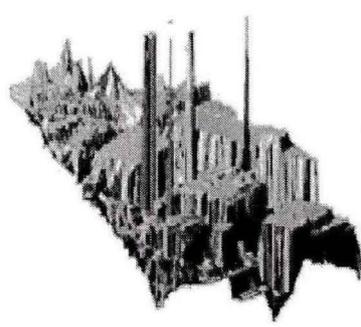


图 2.3b 空中高点

图 2.3 点云中局外点示例

高程明显异于周围的点，分为地面低点和空中高点。高程明显低于周围的点云为地面低点，可能由于激光脉冲的返回时间过长或是系统误差而产生。这些点不属于地形表面，但有些算法将这些低点视为地面种子点，将造成局部地形低陷，从而产生误差，如图 2.3a 所示。高程明显高于周围 LiDAR 数据的点云是空中高点，可能是由于脉冲遇到空中悬浮物，如灰层、飞鸟等而产生的，如图 2.3b 所示。显然这两种类型的点均不是地面点，因此需要剔除。

局外点的判定可采取差值法，设定搜索半径（即窗口大小）与阈值（可通过高程均值和方差来确定），阈值代表了高程的合理范围，当点的高程超限时，该点判定为局外点，应被剔除。

#### (2) 孤立点

孤立存在的点，点密度明显低于周围点云密度。对于机载 LiDAR，孤立点可能是激

光脉冲打到云层后返回的点；对于船载 LiDAR，孤立点可能是脉冲打在船只与目标之间的障碍物返回的点，如图 2.4 为船载 LiDAR 测量长江航道时孤立点云示例。

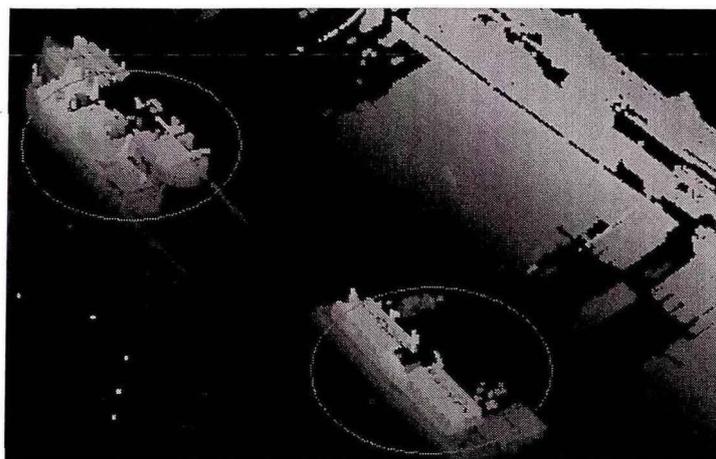


图 2.4 船载 LiDAR 的孤立点云示例

孤立点的判定可采用区域搜寻的方式，以被判断点为中心，设定搜索半径与阈值，若该搜索范围内的点数少于阈值，则该被判断点为孤立点。也可在了解区域地形特征后，利用高程特征进行数据分选，将设定高程范围内的数据判定为孤立点。以机载 LiDAR 为例，若航飞高度为 600m，则测距大于 900m 和小于 100m 的点云都可以删除。

### 2.3.2 滤波

一般意义下，测量数据的滤波是指对数据进行平滑，去除或保留特定频谱结构。而 LiDAR 数据的滤波是指去除点云中的非地面点，保留真实的地面点。LiDAR 数据的滤波算法比较多，从原理上基本可分为两类<sup>[79]</sup>：

(1) 依据回波强度信息。不同地物因反射系数不同而回波强度也不同，将回波强度信息转换为灰度图像，通过分析灰度的分布形态，确定地面点的灰度范围，据此范围区分地面点和非地面点<sup>[92]</sup>；

(2) 依据高程突变原理。不同地物具有不同的高度，当点间高程突变时，少数情况是由地形突变（如陡崖）引起的，大多情况是地物变化造成的，如较高的点位于植被上，而较低的点位于地面上<sup>[80]</sup>。

第一类滤波算法的有效性建立在一个基本前提上：相似地面构造下回波强度应相对稳定，或者说地面点的灰度范围是相对狭窄的。但目前机载或船载 LiDAR 系统获取的回波强度信息中噪声较大，这造成第一类滤波算法的实用性较差，算法也比较少，而现阶段滤波算法大都属于第二类<sup>[92]</sup>。

第二类滤波算法是基于高程突变原理，实质是判断相邻点位的高差是否大于阈值。该滤波算法都基于两个假设条件：一是，在临近区域内非地面点高于地面点，即在经过粗差别除后，区域内的最低点是真实的地面点。大多数滤波算法寻找起始地面种子点都基于该假设<sup>[92]</sup>。二是，区域内的地形坡度变化不大，无比较剧烈的起伏变化。判断种子

点临近区域内激光脚点是否为地面点，通常都基于该假设。两临近激光脚点间的距离越近、高差越大，较高激光脚点位于地面的可能性就越小。本文将介绍四种应用较广泛的滤波算法，都属于第二类，且隐含上述两个假设条件。

### 2.3.2.1 基于坡度的滤波方法

基于坡度的滤波方法是由德国斯图加特大学 Lindenberger<sup>[93]</sup>于 1993 年提出，是一种普遍使用的经典滤波方法。基本思路是：量测两点间的高差或者倾角，如果大于给定的阈值，则高的点属于其它地物，如图 2.5 所示。

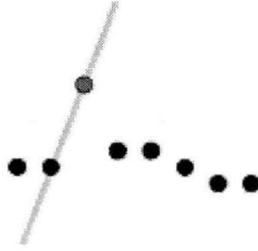


图 2.5 基于坡度的滤波算法原理示意

对所有点云数据进行处理，提取窗口数据，搜寻窗口内的最低点，接着进行开运算和闭运算处理。这种算法的难点在于窗口的选取，窗口的大小决定了 DEM 的细节程度。窗口越大，地形越平滑；反之，则有可能保留过多的地物点<sup>[94]</sup>。为了解决这个问题，Kilian 等<sup>[95]</sup>于 1996 年提出利用不同尺寸的窗口对机载 LiDAR 数据进行多次形态学操作，每次操作的结果点都给予一定的权重，权重的大小由操作时所使用的窗口尺寸来决定，根据各点的权重来判别其是否属于地面点集合。Zhang<sup>[96]</sup>等人详细讨论了根据地形倾斜情况和窗口尺寸动态设置相应阈值的改进算法。

该方法原理简单，易于实现，但不适合于地形变化复杂的区域，且受坡度阈值设置和滤波窗口大小的影响<sup>[97]</sup>。

### 2.3.2.2 基于平面/曲面拟合的滤波方法

先确定一个平面/曲面，再在平面/曲面上定义一个小的缓冲区域，判别点是否在这个缓冲区域内，是则为地面点，否则为非地面点。平面/曲面的位置确定了缓冲区的位置，缓冲区确定了点的属性，平面拟合如图 2.6a 所示，曲面拟合如图 2.6b 所示。

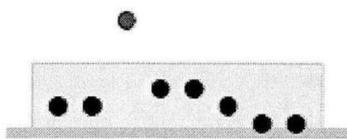


图 2.6a 平面拟合

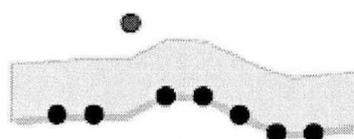


图 2.6b 曲面拟合

图 2.6 基于平面/曲面拟合的滤波算法原理示意

张小红<sup>[6]</sup>提出基于离散的激光点云数据进行移动曲面拟合滤波算法。首先选取三个初始地面点拟合一个平面，根据邻近点的高程与平面的高差是否小于预设的高差阈值来判断是其否为地面点。然后不断的加入新的地面点，并剔除最远的地面点，重新拟合曲面，依次类推，直至完成整个数据区域的滤波过程<sup>[5]</sup>。

该方法计算简单，具有抑制粗差的功能，但初始拟合平面/曲面时地面点的选取非常重要，且过于强调地形的平滑，不适于大面积的地形复杂区域。

### 2.3.2.3 基于聚类/分割的滤波方法

聚类方法是 Filin<sup>[98]</sup>和 Roggero<sup>[99]</sup>于 2002 年提出，分割方法则是由 Lee<sup>[100]</sup>和 Sithole<sup>[101]</sup>于 2002 年提出。原理<sup>[102]</sup>是认为聚集在一起的高于周围点云高程的点属于同类目标，分割成块，找出这些点的区域即可确定点的属性，然后获得这些区域的边界即可完成滤波。如图 2.7 所示。

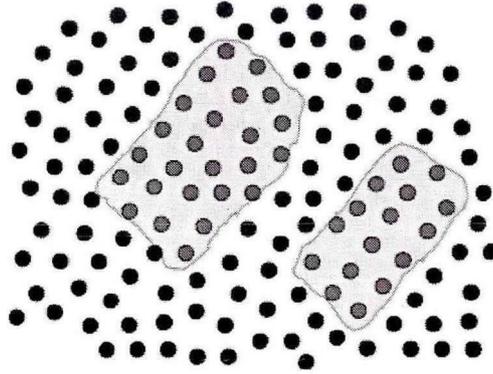


图 2.7 基于聚类/分割的滤波算法原理示意

该方法考虑了数据间的关系，适合于具有较大房屋群或植被的特殊地形，但易过度分割，且点云密度影响滤波效果。

### 2.3.2.4 基于 TIN 的渐进加密滤波法

该算法由 Axelsson<sup>[103]</sup>于 2000 年提出，先选取一定的地面种子点构建初始的稀疏不规则三角网 (TIN)，再对各个点进行判断，若该点到三角面的垂直距离及角度小于设定的阈值，将该点加入地面点，重新计算加密 TIN，如此不断迭代<sup>[78]</sup>，直到不再增加新的地面点或满足迭代条件为止。如图 2.8 所示。



图 2.8 基于 TIN 的渐进加密滤波法原理示意

该滤波算法属于较为成熟的滤波算法，能较好地处理城市地区，已被商业软件 TerraSolid 采用进行滤波分类。但该算法计算量大、算法复杂、耗时长，且受阈值影响大。

目前 LiDAR 点云滤波研究较多<sup>[92-108]</sup>，算法也比较多，并不限于上述四种。尽管一些较为成熟的算法已被某些商业软件所采用，但几乎每种方法都不完美，具有一定的局限性，无法做到完全通用。目前还没有一种滤波算法可完全有效应对复杂多变的地形数据，问题主要表现为以下两点：

(1) 目前的滤波算法在地形简单区域，效果较好，但对于地形复杂区域，特别是对地形变化较大的山区，无法做到有效地自动处理，还需大量的人工交互编辑。

(2) 现有滤波算法中的阈值一般是根据经验设定，或根据地形特征设定，没有考虑全局情况，缺乏通用性，从而直接影响整体滤波效果。

随着 LiDAR 技术的成熟，LiDAR 数据信息越来越丰富，可充分结合回波强度信息、多次回波信号数据，加强判读，辅助滤波算法；同时，可考虑融合多源数据，包括地形图信息、影像信息等进行滤波处理。

## 2.4 本章小结

本章概述了 LiDAR 的系统分类、系统组成与工作原理，介绍了 LiDAR 数据交换标准格式 LAS，重点介绍了点云数据的预处理方法。因海岸带和海岛礁测绘领域主要应用机载或船载 LiDAR 技术，本章的介绍与示例也是以此为主。

## 第三章 基于潮汐基准面的海岸线定义论证及其计算

### 3.1 引言

目前对海岸线的具体定义和位置划定,在行政管理、调查研究等相关部门都存在一定的随意性,给海岸线的科学划定带来很大的困扰。我国大多数地图上只画一条简单的曲线,但是在实地上却要复杂得多,显然在测绘和地图表示过程中丢失了大量的基础地理信息。随着海岸带、海岛在社会经济中地位的不断提高,这种简单测绘与表示已越来越不适应社会发展的需要<sup>[35]</sup>。在中大比例尺地图或海图中,海岸线应作为地形要素,以附加明确精度指标的地理信息来表示。机载或船载 LiDAR 可获取海岸线附近高分辨率、高精度的点云数据,为海岸线精确测绘与表示提供了技术支撑。同时,点云数据的特点也对海岸线位置的确定方式,即海岸线定义,提出了科学、严密的要求。

本章将在论述海岸线定义多样性的基础上,剖析测绘学范畴下我国海岸线定义存在的问题,尝试基于潮汐基准面给出更加科学、合理的定义,并给出相应的潮汐基准面算法,以保障 LiDAR 测量技术条件下的海岸线确定。

### 3.2 海岸线定义的不确定性

#### 3.2.1 定义的多样性

海岸带或海岛礁相关的研究或调查通常都涉及海岸线的概念,而海岸线是为了某种应用上的需要而人为定义的<sup>[35]</sup>。因此,基于不同学科的研究目的或应用需求,海岸线的具体定义和划分位置有所不同。

1、海洋地理学者对于岩石海岸的研究更关注侵蚀引起的海岸变迁,此时将侵蚀痕迹边缘线(erosion scarp 或 bluffline)称为海岸线,具体上可分为侵蚀痕迹上边缘线(bluff tops)与下边缘线(bluff toes)<sup>[40]</sup>。

2、在大范围海岸线资源调查中,通常关注的是海岸的分类(如人工、基岩、砂质、淤泥质等)、各类型海岸的概略长度及其变化情况,此时海岸线可能是瞬时水位线(instantaneous water line)、滩涂上沙砾的堆积或植物分界线(dune vegetation line)等<sup>[37,51-70,104]</sup>。

3、在海洋划界中,常以低潮线(零米等深线)为海岸线,这将涉及深度基准面的定义<sup>[26]</sup>,不同的国家或地区并不一致,如我国是指理论最低潮面,而美国是指平均低低潮面(WMean Lower Low Water, MLL)。

总之,海岸线在多个涉海学科中都是重要的名词与研究热点领域,这在证明海岸线研究重要性的同时,也因定义的多样性而使得研究者产生困惑,主要表现在文献检索与

参考过程中。

### 3.2.2 定义的分类

Elizabeth H. Boak<sup>[12]</sup>在分析诸多文献的基础上，整理列出 45 个海岸线确定依据或方式，并分为两大类：

1、可见可辨别的特征 (visually discernible coastal feature)，如瞬时水位线、干湿线 (wet/dry line)、沙砾堆积或植物分界线等。

2、特定潮汐基准面 (specific tidal datum) 与海岸的交线，如零米等高线 (似大地水准面乃至平均海面)、零米等深线 (深度基准面)、平均大潮高潮线、平均高潮线 (MHL, Mean High Line) 等，前提是海岸线附近存在数字地形模型 (DTM, Digital Terrain Model)、数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model) 等。

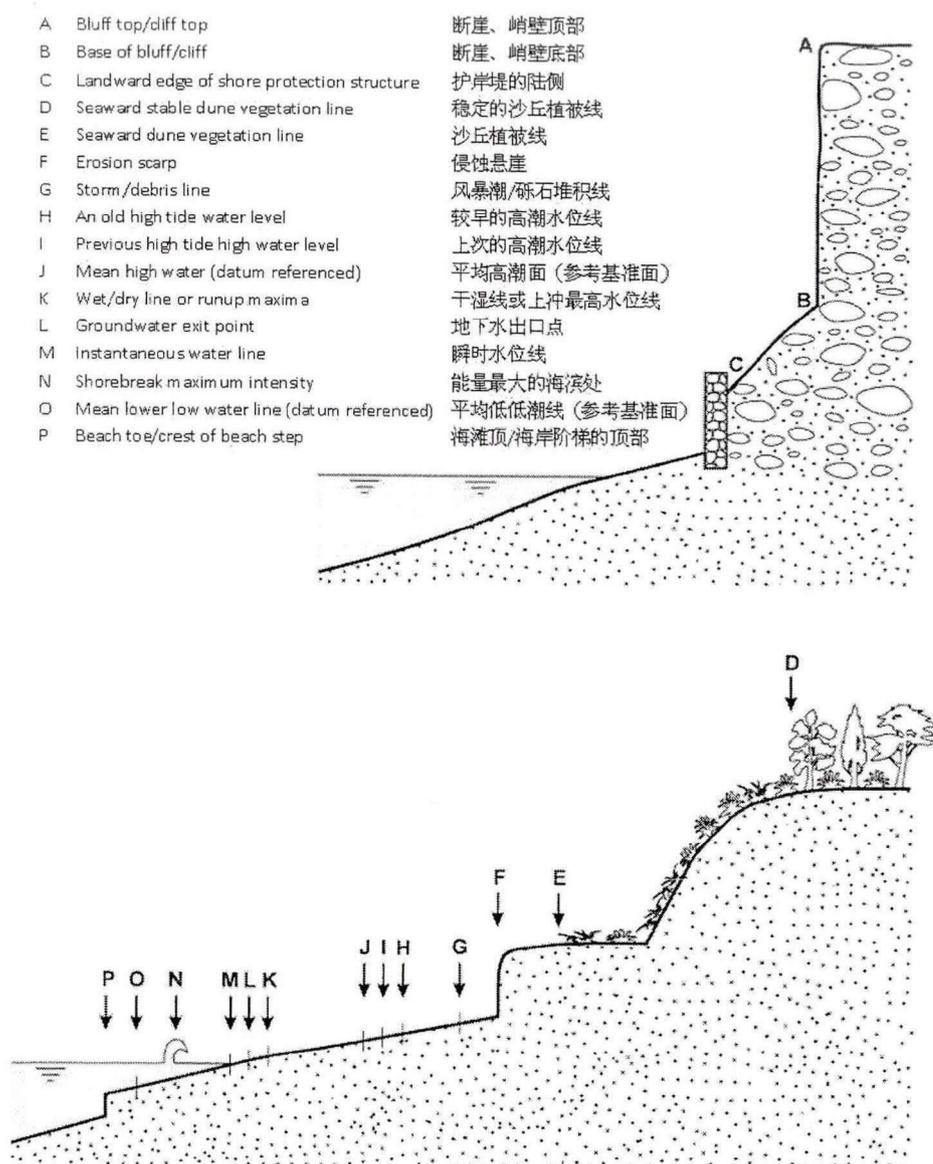


图 3.1 多种海岸线划分位置示意图

本文将以上两种定义分别称为：基于可视特征的定义与基于潮汐基准面的定义。图

3.1 为 Elizabeth H. Boak 整理的各种海岸线划分位置示意图<sup>[12]</sup>。

图 3.1 列出了 16 种海岸线确定依据, 但 Elizabeth H. Boak<sup>[12]</sup>也指出: 不同人对于干湿线、高潮水位线等的理解并不一致, 可能存在较大的差异, 因此海岸线确定依据实际存在数十种。需注意的是, 图中的“J 平均高潮线”与“O 平均低低潮线”是两种基于潮汐基准面的海岸线定义方式, 分别对应于美国的海岸线及零米等深线, 分别用于界定陆海分界和领海边界参照线。

### 3.3 海岸线定义及位置确定的问题

在海岸线调查与测绘的发展过程中, 海岸线的定义经历了由基于可视特征的定义发展至基于潮汐基准面的定义, 这与调查和测绘技术发展相关。最原始、传统的方法是野外人工实地探测, 测量手段由光学仪器发展至全站仪、差分全球定位系统 (Differential Global positioning System, DGPS)、实时动态差分技术 (Real-time kinematic, RTK) 等, 在现场的依据只能是各种可见可辨别的特征, 即痕迹岸线。随着遥感技术的发展, 航天航空遥感成为大范围、快速获取海岸线位置与类型等信息的重要手段。早期受限于资料的分辨率, 海岸线基本都直接取瞬时水边线, 然后发展至干湿线、植物分界线等, 或由潮位资料对水边线进行校正。而随着高分辨率的航空数字摄影测量 (特别是基于无人机平台) 与机载或船载 LiDAR 的发展与应用, 可依据特定潮汐基准面的高程, 基于等值线追踪方法生成海岸线。

本节将针对两类海岸线定义方式, 简要给出各种类型海岸的痕迹岸线选择原则, 分析以痕迹岸线作为海岸线定义存在的问题, 以及因海岸带与海岛测绘技术发展而采用基于潮汐基准面定义方式的必要性。

#### 3.3.1 痕迹岸线

在人工实地测量模式与较低分辨率的遥感影像判绘模式下, 通常依据痕迹岸线确定海岸线。人工实地测量模式下, 主要关注不同类型海岸痕迹的选择问题; 而遥感影像判绘模式下, 主要关注不同类型海岸判别地物信息的影像特征。长期以来, 海岸线测绘基本都是痕迹岸线成果, 故对痕迹岸线的研究成果较丰富。

##### 3.3.1.1 人工实地测量

不同类型的海岸, 痕迹线测量的判定原则不同<sup>[22,106]</sup>。海岸及其海岸线的类型很多, 同时也存在多种分类方式, 本文根据海岸的物质形成及海岸线的形态特征, 将其分为五大类: 淤泥 (粉砂) 质海岸、沙 (砾) 质海岸、基岩海岸、生物海岸和人工海岸等<sup>[31-32]</sup>。

###### (1) 淤泥 (粉砂) 质海岸

淤泥 (粉砂) 质海岸是由较细的粉沙和淤泥堆积的低缓平坦的海岸, 向陆一侧通常是辽阔的大平原。图 3.2 为淤泥 (粉砂) 质海岸类型的现场照片, 其中图 3.2a 位于长屿附近, 属于淤泥质海岸, 图 3.2b 位于防城港附近, 属于泥砂质海岸。该类海岸一般以陆

生植物的外边缘线或漂浮物上界为海岸线。



图 3.2a 长屿

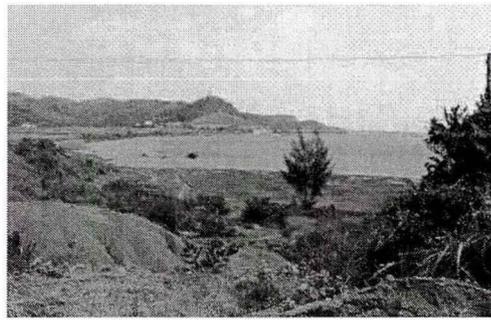


图 3.2b 防城港附近

图 3.2 淤泥（粉砂）质海岸

### (2) 砂（砾）质海岸

沙（砾）质海岸主要是由波浪塑造而成，其海滩物质为较粗的砾石和沙，其陆域多为丘陵或台地。图 3.3 为砂（砾）质海岸类型的现场照片，其中图 3.3a 位于大连石槽附近，属于沙砾质海岸，图 3.3b 位于养马岛附近，属于砾石质海岸。在上冲流或暴风浪作用下，海滩的上部通常会堆积形成一条或多条平行于岸的由砂（砾）石、贝壳碎片、水草残体等构成的脊状沉淀，称为滩脊，一般测量滩脊顶部向海一侧为海岸线。

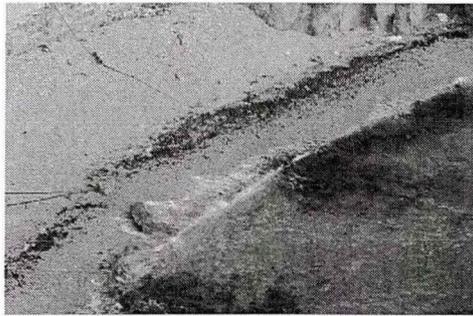


图 3.3a 大连石槽附近



图 3.3b 养马岛

图 3.3 砂（砾）质海岸

### (3) 基岩海岸

基岩海岸是由于波浪的长期冲刷侵蚀，再加上其本身的风化作用及各部位的岩石侵蚀而形成的。基岩海岸地势陡峭，岸线曲折，水深流急，强侵蚀海岸一般没有海滩沉积，岸外常遍布礁岩、巨石、海蚀平台、海蚀崖等地貌；弱侵蚀海岸一般有岩滩，存在较宽的泥沙沉积。海岸线曲折且曲率大，岬角（突入海中的尖形陆地）与海湾相间分布，岬角向海突出，海湾深入陆地，图 3.4 为基岩海岸类型的现场照片，其中图 3.4a 位于大连老虎滩附近，为强侵蚀海岸，图 3.4b 位于烟台芝罘岛附近，为弱侵蚀海岸。岩石表面受到波浪的反复冲击及海水浸泡，颜色存在差异，一般以痕迹顶部为海岸线。

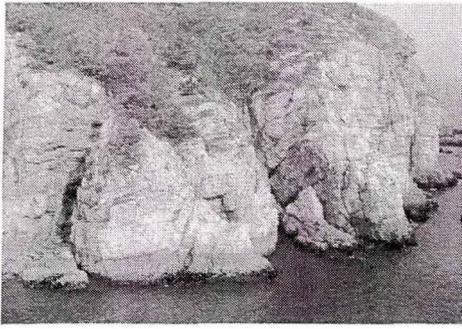


图 3.4a 大连老虎滩附近

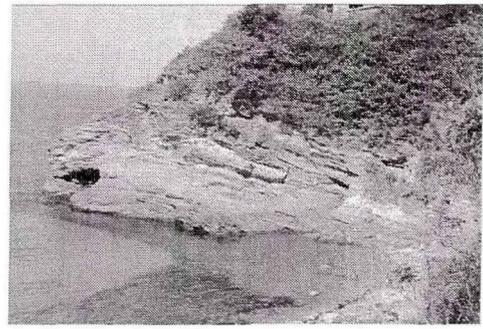


图 3.4b 烟台芝罘岛附近

图 3.4 基岩海岸

#### (4) 生物海岸

生物海岸是由某类海岸生物生长繁盛引起的，主要包括红树林海岸（一般生长在热带与亚热带）、海草海岸（包括大米草）、珊瑚礁海岸（珊瑚骨骼为主体，混合其他生物碎屑所组成）等，图 3.5 为生物海岸类型的现场照片，其中图 3.5a 为树木海岸，图 3.5b 为珊瑚礁海岸。红树林海岸和海草海岸以树林或海草植物的上界或参照淤泥（粉砂）质海岸来确定海岸线，珊瑚礁海岸则可参照基岩海岸来确定。

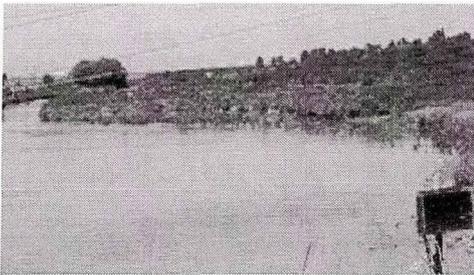


图 3.5a 海南儋州市附近

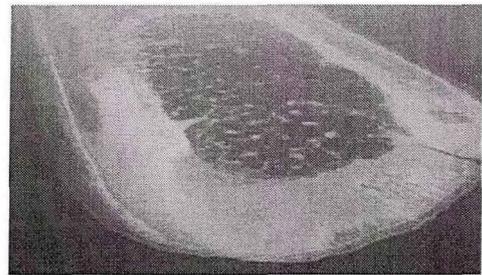


图 3.5b 西沙北礁珊瑚礁

图 3.5 生物海岸

#### (5) 人工海岸

人工海岸是人工建筑物形成的岸线，包括人为修建的堤坝、码头、养殖池等。一般以码头岸壁、岸防工程和填海工程的护岸堤等的海洋一侧外壁作为海岸线，而围海养殖池等作为海域处理，故以其靠近陆地的一侧分界作为海岸线。

##### 3.3.1.2 遥感影像判绘

由遥感影像提取海岸线，都涉及瞬时水边线的提取，甚至直接将瞬时水边线近似为海岸线。判绘方式分为人工目视解译和自动解译，但无论采用何种解译方式均需要建立遥感影像解译标志。所谓遥感影像解译标志，是指能直接反映判别地物信息的影像特征（也称为判读要素），通过这些标志可在图像上识别地物或现象的性质、类型，从而确保水边线判读的准确性。不同类型的海岸形成机理不同，在遥感影像上表现的纹理特征不同，因此也需结合不同海岸类型进行判读解译。

##### (1) 淤泥（粉砂）质海岸

在航空正射影像图上，该类海岸多数呈条带状，宽度不等，一般为数百米至数千米范围，且坡面平缓，无立体感。高潮时，水边线平滑，潮水淹没区呈非常明显的灰黑色条带，色调暗。有潮沟发育，潮沟多呈树枝状或蛇曲状，如图 3.6 所示。



图 3.6a 淤泥质海岸影像

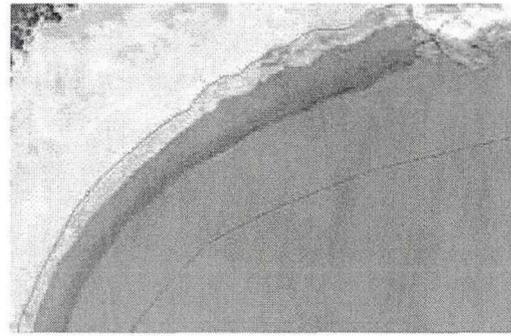


图 3.6b 泥沙质海岸影像

图 3.6 淤泥（粉砂）质海岸影像

### (2) 沙（砾）质海岸

在航空正射影像图上，该类海岸呈片状或条带状，宽度可达十余米至数十米，长度也可达数百米至数千米，水边线较为平滑，潮水未淹没区呈非常明显的土黄色或白色条带（亮度较高），潮水淹没区色调较暗，无立体感，可形成独特的沙丘、沙堤、沙坝和沙嘴景观，如图 3.7 所示。



图 3.7a 沙砾质海岸影像



图 3.7b 砾石质海岸影像

图 3.7 沙（砾）质海岸影像

### (3) 基岩海岸



图 3.8 基岩海岸影像

在航空影像图上, 该类海岸呈片状或条带状, 宽度不一, 宽度一般在数十米至数百米之间, 水边线不规则, 多呈锯齿状, 干岩滩为灰暗色调, 湿岩滩色调更暗, 且凹凸不平, 有立体感, 如图 3.8 所示。

#### (4) 生物海岸

在航空影像图上, 树木海岸呈片状或者零星分布, 有立体感, 由于滩上覆盖耐盐常绿植被, 故在影像上的色调多为绿色; 丛草海岸一般呈块状或条带状分布, 无立体感, 由于春季返青变绿, 入冬后逐渐变为紫褐色, 最后枯死, 因此, 不同季节影像上的色调有所不同; 珊瑚海岸主要通过航空影像并结合参考历史资料的方式进行识别, 如图 3.9 所示。



图 3.9a 树木海岸影像

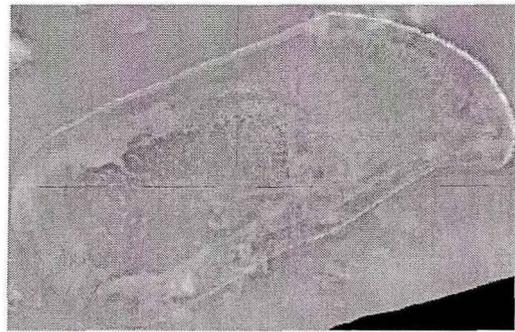


图 3.9b 珊瑚礁海岸影像

图 3.9 生物海岸影像

#### (5) 人工海岸

在影像图上地物形状比较规则, 水边线平直, 多呈灰白色, 有明显的人工痕迹。

##### 3.3.1.3 痕迹岸线的不确定性

因测量技术的局限, 如人工实地测量模式、遥感影像分辨率较低等, 海岸线的测量方式仍以痕迹岸线为主。以痕迹岸线为主的测量方式, 在海岸线测绘、大范围海岸线现状调查与动态变化研究等方面发挥了重要的作用。目前, 对于各种地貌类型中痕迹岸线的判别依据、划分原则等方面已积累了一定的研究成果与丰富的工程实践。

值得注意的是, 在潮汐、波浪等海洋动力作用以及海岸坡度、岸滩物质等因素影响下, 瞬时水位线、干湿线、冲积物等痕迹是随时间显著变化的, 而且不同的人对海岸线实地痕迹的判断会产生差异。结果反映在海岸线测量成果方面, 同一岸段在不同成果中的位置有一定的误差。以人工实地测量方式为例, 不同海岸类型下痕迹岸线的不确定性简要分析如下:

##### (1) 淤泥(粉砂)质海岸

该类海岸一般以陆生植物的外边缘线或漂浮物上界为海岸线。陆生植物的边缘是个很粗糙的分界, 且与季节具有很强的关系。漂浮物上界位置与最近一次的风暴潮或大潮时段的气象、海况以及海岸坡度等有关, 不同时间的位置可能显著不同。

##### (2) 砂(砾)质海岸

该类海岸一般以滩脊顶部向海一侧为海岸线。砾石、贝壳碎片、水草残体等构成的滩脊通常具有一定的宽度、边缘不明显或存在多个垄岗，因此，不同人确定的海岸线的位置通常并不一致。

### (3) 基岩海岸

该类海岸一般以岩石表面上痕迹线顶部为海岸线。颜色差异的痕迹线通常呈现波浪状，部分岩石上呈现零碎的斑点。人工近距离测量时，较难辨别上边缘线。

### (4) 生物海岸

该类海岸一般以树林或海草植物的上界或参照淤泥（粉砂）质海岸来确定海岸线。整体上，痕迹线存在与淤泥（粉砂）质海岸基本相似的不确定性。

### (5) 人工海岸

该类海岸一般以人工建筑、设施的海侧边缘为海岸线。不确定性主要来源于盐田、农业围垦、农田虾塘等的处理，海岸线是取外侧海边缘还是取内侧陆边缘。

## 3.3.2 特征潮汐基准线

低空无人机平台的数字摄影测量、机载或船载 LiDAR 是海岸带与海岛地理信息获取的重要手段与发展方向。相对于人工实地测量与航天遥感影像，优点主要体现于两个方面：一是分辨率显著提高，且在海岸线附近的有效实测数据也明显增多；二是易产出数字地面模型、数字高程模型等成果。

随着相应技术的发展与应用的拓展，海岸线的确定应由基于可见可分辨特征（痕迹岸线）转变为基于特定潮汐基准面（特征潮汐基准线）的方式。主要原因如下：

(1) 分辨率与精度的提高能保障产出大中比例尺的海岸带或海岛地形图，此时从测绘学与相应的地形要素精度指标要求的角度，痕迹岸线的不确定性或不唯一性将不能容忍。

(2) 数字地面模型、数字高程模型等产品为基于特定潮汐基准面的方式测绘海岸线提供了条件。对比于痕迹岸线，基于特定潮汐基准面的海岸线定义在理论上更严密。

(3) 从作业效率角度，基于等值线追踪等技术手段可快速高效的提取海岸线，效率明显高于判绘痕迹岸线的方式。

因此，技术手段的发展对确定海岸线提出了更高的要求，同时也创造了必要的条件。随着 LiDAR 应用的拓展，国外在海岸线提取方面的研究逐渐由水边线、干湿线等的判绘聚焦于提取平均高潮线的技术方法。利用 LiDAR 点云数据提取海岸线的方法基本分为两种：海岸剖面法（CSP, cross-shore profile）与等值线追踪法（contouring method）。实践表明该技术已能满足大中比例尺的测图要求。国内对于该方面的研究仍处于起步阶段，主要受限于海岸线定义问题。

## 3.4 测绘学范畴下我国海岸线定义的完善

本节是从(海洋)测绘学角度,讨论我国海岸线的定义以及定义存在的问题,然后提出完善海岸线定义的思路。

### 3.4.1 标准与规范中的相关规定

在测绘相关领域,我国的海岸线定义基本都采用潮汐基准面与可见可辨别特征相结合的方式:

1、《GB 12327-1998 海道测量规范》<sup>[115]</sup>:海岸线以平均大潮高潮时所形成的实际痕迹进行测绘。

2、《GB 12319-1998 中国海图图式》<sup>[116]</sup>:海岸线是指平均大潮高潮时水陆分界的痕迹线。一般可根据当地的海蚀阶地、海滩堆积物或海淀植物确定。

3、《海洋测绘词典》<sup>[117]</sup>:海水面和陆地的交界线。其位置随水位的涨落而变动,在平面位置上的变化大小因岸、滩坡度陡缓而不同。在海图上,有潮海的海岸线为多年平均大潮高潮面时的水陆分界线,常依海滩上的痕迹线进行测绘。测绘时可根据海岸的植物边线,土壤和植物的颜色、温度、硬度,贝壳、流木、水草等冲积物确定其位置<sup>[118]</sup>。

4、《CH/T 7001-1999 海岸带地形图测绘规范》<sup>[119]</sup>:海岸线以平均大潮高潮时所形成的实际痕迹线进行测绘。测绘时可根据海岸的植被边线、土壤和植被的颜色、温度、硬度,流木、水草、贝壳等冲积物确定其位置。海岸线应区分石质带、土质带、有滩陡岸和无滩陡带等。陡带应测注比高。海岸线的位置与其他地物的位置发生矛盾时,以平均大潮高潮线表示。

5、《GB/T 18190-2000 海洋学术语 海洋地质学》<sup>[120]</sup>: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。

6、《GB/T 20257.1-2007 地形图图式》<sup>[121]</sup>:海岸线指海面平均大潮高潮时的水陆分界线。一般可根据当地的海蚀阶地、海滩堆积物或海淀植物确定。

7、《JTS 131-2012 水运工程测量规范》<sup>[122]</sup>:海岸线按平均大潮高潮所形成的实际痕迹进行测绘。

上述规范或标准中,对海岸线的定义虽详细程度不同,但共同点是:潮汐基准面采用平均大潮高潮面,取平均大潮高潮线为海岸线;海滩上冲积物、植物线等痕迹可作为实地测量依据,即痕迹岸线。海岸线的定义都是潮汐基准面与痕迹相结合,因此,本文对我国海岸线定义的讨论都统一于《GB 12327-1998 海道测量规范》<sup>[115]</sup>:海岸线以平均大潮高潮时所形成的实际痕迹进行测绘。

### 3.4.2 现行定义存在的问题

针对“海岸线以平均大潮高潮时所形成的实际痕迹进行测绘”的定义,本文分析认为该定义不严谨,存在缺陷,主要体现在如下3个方面:

(1)“平均大潮高潮时”是指“平均大潮高潮”的“发生时刻”。但平均大潮高潮面

应为足够长时间尺度内所有大潮期间高潮面的平均,这与平均海面、平均高潮面、平均高高潮面、平均低潮面、平均低低潮面等特征潮位面的定义相似。显见,这些特征潮位面不存在“发生时刻”的概念,而通常是以历元来描述,即所用水位数据对应的时段。因此“平均大潮高潮时”的概念不准确。

(2) 痕迹岸线是滩涂上沙砾因海水冲积、岩石等因海水浸泡形成的痕迹,是实地测量的唯一可视依据,因此,目前地图与海图表示的海岸线基本都是痕迹岸线的测绘成果。但痕迹岸线在许多海岸并不明显、不连续、有一定宽度,难以辨识,随海岸类型、走向的不同而存在差异,小范围内岸线高程不一致现象普遍存在。不论是采用现场测量还是航空航天遥感影像判绘方法,不同的作业人员对同一岸段或同一作业人员对不同岸段所测取的痕迹岸线也存在差异,甚至同一作业人员不同次的量测结果也不相符<sup>[35]</sup>。结果反映在海岸线测绘成果方面:同一岸段在不同的测绘图件上,海岸线位置有一定的差异<sup>[123-124]</sup>。这违背了测绘学对地形要素几何和物理意义准确、唯一表示的基本要求,因此,在测绘学中,不能以痕迹岸线作为海岸线定义<sup>[35]</sup>。

(3) 以某个基准面(海域通常采用平均海面)为参考面,平均大潮高潮面的高度称为平均大潮高潮位,它决定于潮汐。据潮波运动理论,海洋潮汐现象实质上是一种长波运动<sup>[125-127]</sup>,故小范围内的潮汐变化一般较小,这意味着:在理论上平均大潮高潮面应保持小范围内高度一致,但痕迹岸线在小范围内高程通常并不一致,高程差异甚至达到米级。如夏东兴等<sup>[32]</sup>认为:“在一般沙质海岸,应以滩脊为海岸线测量依据,但滩脊可能会高出当地平均大潮高潮线 1~2m”。因此,痕迹线与平均大潮高潮线之间并不是简单的对应关系,即两者间关系存在疑义。

综合以上分析,现行定义在科学上不严谨,但目前一直沿用的根本原因是海岸线的测量方法仍以人工实地勘测或遥感影像判绘为主,对于海岸类型的关注度大于位置精度,且海图的比例尺通常较小。因此,定义中虽涉及了平均大潮高潮线,但实际中甚少采用,而是人为认定痕迹岸线近似于平均大潮高潮线,相应研究关注于不同类型海岸应选择的痕迹特征<sup>[31-32,124]</sup>。

### 3.4.3 科学严谨的海岸线定义完善

#### 3.4.3.1 定义方式的选择

前述对现行定义的分析表明,将痕迹岸线当作海岸线违背了测绘学的基本要求,在测绘学中,不能将痕迹岸线定义为海岸线。从理论上,采用基于潮汐基准面的定义方式将更加合理。但目前海岸线的测量仍以痕迹岸线为主,这意味着基于潮汐基准面的海岸线定义与测量实施之间存在着矛盾。为调和该矛盾,潮汐基准面与痕迹相结合的现行定义可能是较好的选择。因此,测绘学范畴下海岸线定义的完善需首先解决理论与现实间的矛盾。

美国的海岸线定义采用基于潮汐基准面的定义方式。《Tide and Current Glossary》

[128-129]中“海岸线”的解释如下：“shoreline (coastline) – The intersection of the land with the water surface. The shoreline shown on charts represents the line of contact between the land and a selected water elevation. In areas affected by tidal fluctuations, this line of contact is the mean high water line. In confined coastal waters of diminished tidal influence, the mean water level line may be used.”（海岸线——陆地和水面的交界线。海岸线在海图上表示为陆地和某特定高程水面的接触线，在受潮汐作用的水域，为平均高潮线；而在潮汐影响小的封闭水域，可为平均水位线）。由此解释可知，在有潮海域定义为平均高潮面（Mean High Water, MHW）与海岸的交线，即平均高潮线（Mean High Water Line, MHWL）。但据相关文献，海岸线测绘发展过程中，在人工实地测量、航空航天摄影测量等测量模式下，通常以痕迹岸线为测量或判绘依据，如干湿线、沙砾堆积或植物分界线等。这与定义并不严格吻合。只是在低空无人机高分辨率的摄影测量、机载或船载 LiDAR 的测量模式下，基于数字高程模型 DEM 及由 VDatum（美国垂直基准转换软件系统）获得对应坐标处 MHW 在 DEM 所采用基准面上的高程，获取海岸线定义中的 MHWL，主要采用海岸剖面法（CSP, cross-shore profile）与等值线追踪法（contouring method）。

据美国海岸线定义及其测绘发展过程可知，采用基于潮汐基准面的定义方式在理论上更加严谨，可不随测绘技术的发展而作改变，在法律上能保持严格唯一的分界线界定规则。若在部分测绘技术条件下（人工实地、航天摄影等）无法严格实现，此时可将痕迹岸线的判绘方法作为过渡性的技术支撑。而在新技术条件下（高分辨率的摄影测量、LiDAR 等），发展海岸线所采用潮汐基准面在垂直基准框架中的标定、相应交接线的提取等技术与方法。因此，建议我国海岸线的定义也采用潮汐基准面的定义方式。

#### 3.4.3.2 潮汐基准面的选择

许家琨等<sup>[30]</sup>基于三个国家标准和沿海五省的法律条例，以及东海部分岛屿的理论最高潮面与平均大潮高潮面的计算比对，认为海岸线在当前采用平均大潮高潮面是科学的，澄清了以理论最高潮面作为海岸线的异议和模糊认识。

杨玉娣等<sup>[31]</sup>与夏东兴等<sup>[32]</sup>指出“海岸线是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线，这是海岸线最基本的内涵”，并给出各种地貌类型海岸线（痕迹岸线）的划定原则。

王义刚等<sup>[33]</sup>指出：海岸线的定义存在着很大的人为因素和行政因素，其位置是很难确定的。长期以来，从国家到地方，我国涉海部门的各项管理工作，都至少包括了平均高潮线以下的海域，均将海岸线定为平均大潮高潮线。

王长海等<sup>[34]</sup>指出：目前所指的海岸线是人为界定的海陆分界线，存在平均大潮高潮的定义与痕迹线的辨别等问题。平均大潮高潮是界定海岸线广义上的基本准则，痕迹仅仅是界定海岸线的近似方法，不能混同。海岸线界定方法：一是多年平均大潮高潮位法，存在资料时长、统计方法、插值方法等问题；二是痕迹线法，存在受人为影响大、差异较大等问题。

党亚民等<sup>[35]</sup>认为：“对于陆海交界的海岸带，平均大潮高潮线、平均水位线、零米等深线的重要性相当，它们反映了不同海水动力特征下海岸带相应的状态，分别具有各自的应用价值。而且，客观上，陆海的分界不是一条线，而是一条“带”。传统的海岸线定义仅突显平均大潮高潮线是不全面的，不能满足人们对平均水位线和零米等深线的期望。因此，仅将平均大潮高潮线作为海岸线进行地图表达，显然不能满足人们对测绘学全面描述海岸带区域陆海基础地理信息的要求”，同时提出“兼顾已有国家标准对海岸线的理论定义，将海岸线规定为平均大潮高潮面与海岸的交接线，即平均大潮高潮线（摒弃痕迹岸线概念）”、“海岸线测量内容包括平均大潮高潮线、平均水位线和零米等深线测量”。

#### 3.4.3.3 科学严谨海岸线定义的确立

美国采用基于潮汐基准面的方式将平均高潮线定义为海岸线，虽然在实际海岸线测绘中仍可能采用痕迹岸线，但在法律上能保持严格唯一的分界线界定规则。理论定义是海岸线测绘的完美目标，现实的缺陷是测绘技术手段而造成的。LiDAR 技术为理论定义精确测绘海岸线提供了必要的条件。因此，我国采用基于潮汐基准面的方式定义海岸线是科学的选择。相比于国际上普遍采用平均高潮面，我国为兼顾已有国家标准以及保持海岸线定义的连续性、传统认知上的相容性，潮汐基准面应选择平均大潮高潮面，因此，将海岸线规定为平均大潮高潮面与海岸的交接线，即平均大潮高潮线。

相对于大多数海洋国家（包含美国）采用的平均高潮面而言，我国相关标准所规定的平均大潮高潮面在算法与概念适用范围上仍存在不完善或缺陷，主要体现在：平均高潮面在所有潮汐类型海域都可通过长期实测水位数据统计获得，短期站的传递算法也已成熟<sup>[112,128-130]</sup>；而平均大潮高潮面的概念只存在于半日潮为主的海域，且常采用由调和常数按特定模型近似计算的特征值方法。整体上，平均大潮高潮面的算法还需进一步完善。

### 3.5 大潮概念的局限性及其扩展

#### 3.5.1 潮汐类型及潮汐类型数

潮汐类型也称为潮汐性质。据海洋潮汐学理论，按在一个太阴日（24h50min）以及一个月高、低潮变化情况，将潮汐变化定性分为三大类：（规则）半日潮、混合潮与（规则）日潮。各类型的定性描述如下<sup>[125-127]</sup>：

1、（规则）半日潮（semidiurnal tide）：在一个太阴日内发生两次高潮和低潮，两相邻两高潮（或低潮）的高度基本相等，且时间间隔约为 12h25min。

2、混合潮（mixed tide），可细分为不规则半日潮与不规则日潮：①不规则半日潮：在一个太阴日内发生两次高潮和低潮，但相邻两高潮（或低潮）的高度不相等，且涨潮时间与落潮时间也不相等，这种潮汐日不等现象在一个月内每天变化。②不规则日潮：

在一个月的一部分日子里，一个太阴日内只发生一次高潮与一次低潮。

3、(规则)日潮 (diurnal tide): 在一个月的大多数日子里，一个太阴日内只发生一次高潮与一次低潮，少数日子里发生两次高潮与两次低潮。

上述定性分类标准在国际上基本是统一的(可参考:国际海道测量组织(International Hydrographic Organization, IHO)的《Manual on Hydrography》<sup>[131]</sup>、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的《Tide and Current Glossary》<sup>[128-129]</sup>与《Computational Techniques for Tidal Datums Handbook》<sup>[112]</sup>),如《Tide and Current Glossary》<sup>[128-129]</sup>中对“type of tide”的解释为:“Qualitatively, when the two high waters and two low waters of each tidal day are approximately equal in height, the tide is said to be semidiurnal; when there is a relatively large diurnal inequality in the high or low waters or both, it is said to be mixed; and when there is only one high water and one low water in each tidal day, it is said to be diurnal.”(从定性角度,若每太阴日的两次高潮或两次低潮的高度近似相等,则称为半日潮类型;若高潮或低潮或两者的日不等十分明显,则称为混合潮类型;当每太阴日只存在一次高潮和一次低潮,则称为日潮类型)。

任何一点的水位变化的主体是天文潮位,可分解为诸多谐波的叠加。每个谐波(或振动项)称为分潮。周期约一个或半个太阴日的分潮将引起水位呈现相应的日周期与半日周期的振动,这两部分振动的相对大小则决定潮汐类型。因此,在实际应用中,通常根据日分潮和半日分潮的振幅比来定量划分潮汐类型,称为潮汐类型数。而日分潮中最主要的分潮是  $K_1$  与  $O_1$ , 半日分潮中最主要的分潮是  $M_2$  与  $S_2$ , 潮汐类型数是以主要分潮的振幅比来计算的,一般有两种不同的计算方法:

$$C = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \quad (3.1)$$

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} \quad (3.2)$$

上两式中,  $H$  为其下标分潮对应的振幅。

各国采用的分类法并不一致,美国与我国的分类如表 3.1 所列。

表 3.1 潮汐类型的分类法

国家	(规则)半日潮	不规则半日潮	不规则日潮	(规则)日潮
中国	$C < 0.5$	$0.5 \leq C < 2.0$	$2.0 \leq C \leq 4.0$	$C > 4.0$
美国	$F < 0.25$	$0.25 \leq F < 1.5$	$1.5 \leq F \leq 3.0$	$F > 3.0$

空间分布连续的潮波系统通过潮汐类型数划分为了三大类,即半日潮、混合潮、日潮,这种人为地、相对粗糙的分类方式将决定潮汐不等现象的分类与分析、潮汐特征值的计算等。

### 3.5.2 大潮概念的局限性

在海洋潮汐学中,半日潮占优的海域在朔(初一)望(十五)后数日内,由于月球引起的潮和太阳引起的潮相加,达到半个月中的潮差最大,叫做大潮(spring tides)。大潮与月相相关,从朔望至大潮来临的时间间隔,称为半日潮龄,我国一般为2-3日。大潮的周期为从朔(望)至望(朔)的半个朔望月(the synodic month or one lunation),一个朔望月为29.5306平太阳日。一次大潮的时间可计为三天<sup>[119]</sup>。

由此可知,“大潮”概念只存在于半日潮占优的海域,通常是指潮汐类型为规则半日潮与不规则半日潮混合潮<sup>[125-126]</sup>。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的《Tide and Current Glossary》<sup>[128-129]</sup>中对“spring tides”的解释为:“Tides of increased range occurring semimonthly as the result of the Moon being new or full. The spring range of tide is larger than the mean range where the type of tide is either semi diurnal or mixed, and is of no practical significance where the type of tide is predominantly diurnal。”(因月相为朔望而使潮差增强的半月周期性潮汐现象。在规则或不规则半日潮海域,大潮潮差比平均潮差大;而在日潮占优海域无实际意义。)可知,“大潮”概念在日潮占优海域无实际意义。

### 3.5.3 大潮概念的扩展

虽然中国海域是以(规则与不规则)半日潮类型为主,但在秦皇岛、旧黄河海口、海门湾至三都澳、雷州半岛、广西沿岸、西沙群岛、南沙群岛等海域以及成山头外海与苏北外海半日潮波无潮点附近为不规则日潮与规则日潮<sup>[127]</sup>。而作为一种潮汐基准面,平均大潮高潮面的定义应覆盖所有潮汐类型的海域。因此,大潮概念(相应的平均大潮高潮面)应扩展至日潮海域。

在日潮占优海域(规则日潮与不规则日潮),潮差也存在规律性变化,只是该规律不再决定于月相,而是取决于月球赤纬。当月球达到南或北最大赤纬后数日内,达到半个月中的潮差最大,称为回归潮(tropic tides)。从月球最大赤纬至发生回归潮的时间间隔,称为日潮龄,在我国通常约两天。回归潮的周期为月球从北(南)赤纬最大至南(北)赤纬最大的半个回归月(the tropic month),一个回归月为27.3216平太阳日。

图3.10为我国沿岸四个长期验潮站的某月同步实测水位变化曲线,潮汐类型分别为(规则)半日潮、不规则半日潮混合潮、不规则日潮混合潮与(规则)日潮。水位的起算零点都为深度基准面;横轴为日期,纵轴为水位高度,单位为米;图上方图例指月相变化中的4个特征:朔、上弦、望与下弦;图下方字母表示月球赤纬与月地距离特征时刻:E为月球经过赤道面,N与S分别为月球北与南赤纬最大,A与P分别为月球经过近地点与远地点。

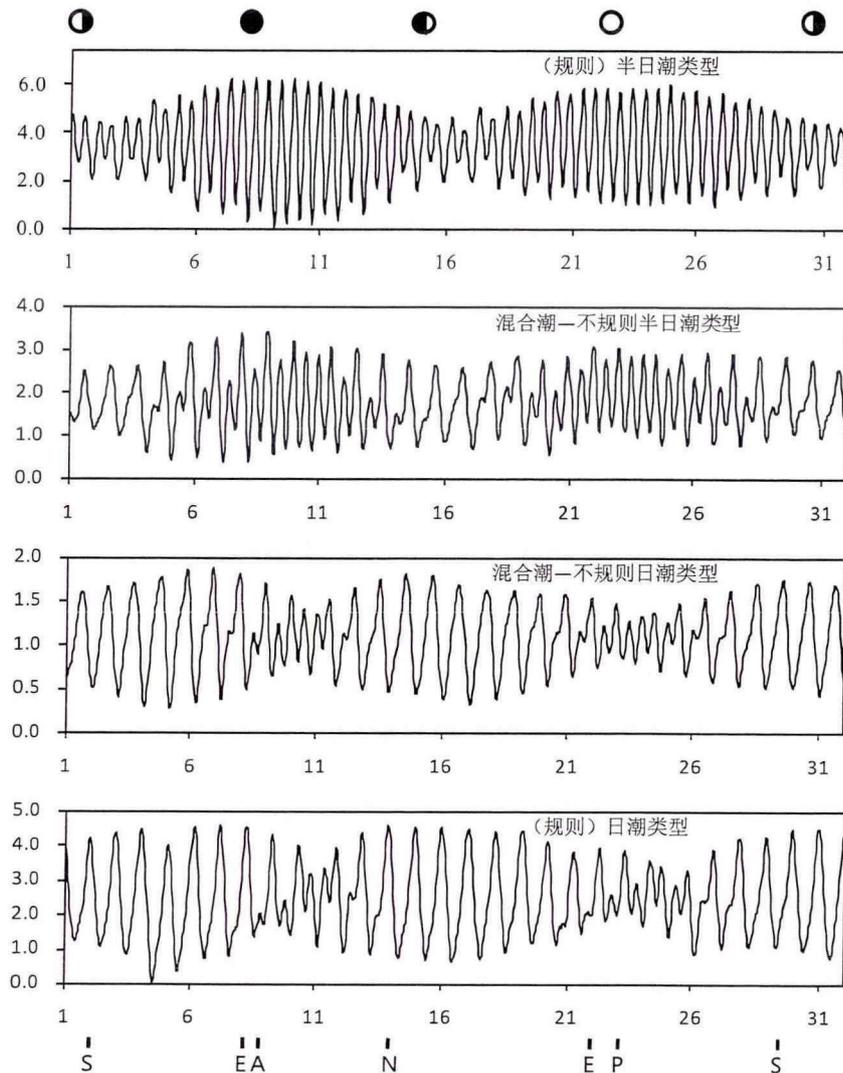


图 3.10 四种潮汐类型长期验潮站某月同步水位变化曲线

由图 3.10 可知，上侧两站是半日潮占优，在朔、望（●、○）后出现潮差最大，即大潮；而下侧两站是日潮占优，在月球赤纬南北最大（S、N）后出现潮差最大，即回归潮。从潮汐强弱变化或潮差大小变化上，日潮海域的回归潮与半日潮海域的大潮都是指潮汐的极值状态，故日潮海域的回归潮有时也称为回归大潮，而半日潮海域的大潮有时也称为朔望大潮。因此，在海洋测绘应用中，可将海洋潮汐学中的“大潮”概念从仅为半日潮类型下的朔望大潮扩展到包含日潮类型下的回归大潮，即“大潮”是指每月中规律性出现的潮差最大的现象。相应地，“平均大潮高潮面”将扩展到包含日潮类型下的平均回归潮高潮面，从而实现平均大潮高潮面概念的完善。

### 3.6 平均大潮高潮面的算法设计

#### 3.6.1 算法设计要求与可选方案

##### 3.6.1.1 算法设计要求

通过大潮概念的扩展, 平均大潮高潮面在半月潮类型海域是指传统上的平均大潮高潮面, 而在日潮类型海域则是指传统上的平均回归潮高潮面。这是理论分析上的扩展结果, 在设计平均大潮高潮面实用化的算法时, 还需考虑以下两个问题:

#### (1) 混合潮类型海域的潮汐特征面选择

在不规则半月潮类型海域, 高潮不等明显, 这就导致每次大潮是选择三日的全部高潮还是仅高高潮得问题, 即是取平均大潮高潮面还是取平均大潮高高潮面。在不规则日潮类型海域, 回归潮前后三天可能出现每日一次高潮与每日二次高潮混合的情况, 此时将涉及取平均回归潮高潮面还是取平均回归潮高高潮面的问题。总体上, 混合潮类型海域的潮汐特征面选择主要面对的是高潮不等现象的处理问题。

#### (2) 空间变化是否连续平滑

在不同潮汐类型海域, 平均大潮高潮面实际是由不同的特征潮位面替代, 而潮汐类型是以潮汐类型数人为地将连续的潮波系统划分为半月潮、混合潮与日潮等三个类型, 这将造成在潮汐类型变化复杂海域(如无潮点附近), 平均大潮高潮面的空间变化是否连续平滑的问题。

空间连续平滑变化可作为平均大潮高潮面算法设计的基本要求, 也是解决混合潮类型海域的潮汐特征面选择问题的依据。本文将以精密潮汐模型仿真潮汐类型数连续快速变化的情况, 对算法的空间平滑性进行检核。

### 3.6.1.2 可选算法方案

在海域, 潮汐基准面的计算通常是指确定该面相对某个基准面的垂直距离, 且这个参考基准面通常是指当地长期平均海面, 如深度基准面的计算是指确定理论最低潮面在当地平均海面下的垂直距离, 也称为 L 值。相应地, 平均大潮高潮面的计算是指在各潮汐类型下所取特征潮汐面在当地平均海面上的垂直距离。算法有如下两个方案:

#### (1) 潮汐特征值算法

潮汐特征值也称为潮汐非调和常数 (nonharmonic constants of tide; tidal nonharmonic), 是利用调和常数按一定的公式计算或利用实际观测资料统计得出, 对某一固定地点来说亦是常数。一般情况下, 潮汐特征值由公式计算, 而且不同潮汐类型下可以计算的潮汐特征值不同或公式不同。潮汐类型按 3.5.1 中潮汐类型数及其划分标准进行确定。

#### (2) 统计算法

基于长期实测水位数据或根据潮汐参数预报的长期天文潮位, 按潮差变化判断出每次大潮, 再取每次大潮前后共三天的高潮或高高潮, 多年长期数据的平均值即为计算结果。

下面将给出两种算法的具体原理, 以平均大潮高潮面的空间连续平滑变化为评判标准, 分析对比两种算法。

### 3.6.2 基于潮汐类型的特征值算法

潮汐特征值的计算公式是利用调和常数由海洋潮汐理论推导出的近似公式，近似之处体现再两个方面：

一是，只考虑了起主要作用的分潮，部分分潮间的关系采用经验性或平衡潮理论上的关系；

二是，部分特征值的推导是基于某种假设条件，且这种假设条件可能只在某种潮汐类型下才能满足，即部分特征值只对于特定潮汐类型才有意义。如平均大潮高潮面，在海洋潮汐学中习称大潮平均高潮位，其计算公式的假设条件是  $M_2$  为最大分潮，这与传统上平均大潮高潮面概念只存在于半日潮类型海域是相对应的。

本文只列出与平均大潮高潮面相关的潮汐特征值，如大潮平均高潮位、回归潮平均高高潮位、回归潮平均高潮位等，将忽略推导过程，只列出主要公式，给出假设条件与推导中采取的近似处理。本部分的理论与公式参考《潮汐和潮流的分析和预报》<sup>[125]</sup>。公式将涉及分潮的调和常数，以  $M_2$  分潮为例，其振幅与迟角分别以  $M_2$ 、 $g_{M_2}$  表示。

#### 3.6.2.1 大潮平均高潮位

##### (1) 计算公式

相对当地长期平均海面的大潮平均高潮位  $SZ_0$  由下式计算：

$$SZ_0 = 1.007(M_2 + S_2) + 0.025 \frac{(K_1 + O_1)^2}{M_2} - 0.020 \frac{(K_1 + O_1)^2}{M_2} \cos(g_{K_1} + g_{O_1} - g_{M_2}) + M_4 \left(1 + 2 \frac{S_2}{M_2}\right) \cos(g_{M_4} - 2g_{M_2}) + M_6 \left(1 + 3 \frac{S_2}{M_2}\right) \cos(g_{M_6} - 3g_{M_2}) \quad (3.3)$$

##### (2) 推导中的近似处理

公式推导过程中的近似处理是主要日分潮调和常数间的关系取平衡潮理论关系，具体如下：

$$\begin{cases} g_{J_1} + g_{O_1} = g_{K_1} + g_{O_1} \\ Q_1 = 0.194O_1 \\ J_1 = 0.056K_1 \\ O_1 = 0.711K_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

##### (3) 假设条件

$M_2$  分潮为最大分潮，且能决定潮汐变化的主要特征，也就是半日潮占优，潮汐类型为规则半日潮或不规则半日潮。

#### 3.6.2.2 回归潮平均高潮位

对于混合潮类型，回归潮前后 3 天内可能出现每天二次高潮或低潮的情况，即存在

回归潮平均高潮位与回归潮平均高高潮位。对于规则日潮类型，回归潮前后3天内每天只出现一次高潮或低潮，即只存在回归潮平均高潮位。因此，两种潮汐类型下的计算公式不同，下面分别整理列出必要的计算流程及公式。

1) 混合潮类型

对于不规则半日潮与不规则日潮类型，半日分潮与全日分潮在振幅上都不绝对占优，两者都对潮汐特征具有较大的影响。因此，需将半日潮与日潮处于同等位置。

半日潮最大的分潮为  $M_2$ 、 $S_2$ ，日潮最大的分潮为  $K_1$ 、 $O_1$ ，据海洋潮汐理论，可推导得半日潮、日潮在回归潮时的平均振幅，分别记为  $A$ 、 $B$ ，由下式计算：

$$\begin{cases} A = 0.89M_2 + 0.31\frac{S_2^2}{M_2} \\ B = 1.028(K_1 + O_1) \end{cases} \quad (3.5)$$

若设  $C$  为回归潮时日潮和半日潮的振幅比，则

$$C = B/A \quad (3.6)$$

半日潮在其位相分别为  $0$ 、 $\pi$ 、 $2\pi$ 、 $3\pi$  时发生极值，当半日潮发生极值时，如果依次以半日潮发生四个极值时刻为时间原点，则日潮相对半日潮的位相差  $c$  可由下式计算：

$$c_k = \frac{1}{2}g_{M_2} - (g_{K_1} + g_{O_1}) - \frac{\pi}{2}k \quad (k = 0,1,2,3) \quad (3.7)$$

因日潮的作用，半日潮发生极值时，半日潮与日潮的组合潮位并不发生极值。若设半日潮位相为  $\varepsilon$  时组合发生极值，顾及时间原点取为半日潮发生极值的时刻，故  $\varepsilon$  是半日潮在组合潮位发生极值时的位相与半日潮在其本身发生极值时的位相之差，则  $\varepsilon$  存在四个值，可由下式计算

$$\sin \varepsilon_k = -0.5C \sin\left(\frac{\varepsilon_k}{2} + c_k\right) \quad (k = 0,1,2,3) \quad (3.8)$$

文献[125]以查表形式实现上式的求解，使用极不方便。在推导解析解困难时，可采用试算的方式：在  $\pm 90^\circ$  间以足够小间隔取角度值，代入 (3.8) 式，两端差异的绝对值最小时的角度值即为  $\varepsilon$ 。

回归潮的高高潮、低高潮、低低潮和高低潮的平均潮位  $Z$  可由下式计算

$$Z_k = A[\cos \varepsilon_k + C \cos\left(\frac{\varepsilon_k}{2} + c_k\right)] \quad (k = 0,1,2,3) \quad (3.9)$$

回归潮的平均高潮位为平均高高潮位与平均低高潮位的平均值。

## 2) 日潮类型

对于规则日潮类型，日潮已成为潮位变化的主导因素，半日潮与日潮的组合潮位的极值将发生在日潮的极值附近，因此，将时间原点置于日潮的高潮时刻，设组合潮位发生高潮的时刻为  $T_0$ ，由下式计算

$$\sin \sigma_1 T_0 [B + 4A \cos(\sigma_1 T_0 + \eta)] = -2A \sin \eta \quad (3.10)$$

式中， $\sigma_1$  为日潮的平均角速率， $\eta$  为日潮与半日潮的迟角差，由下式计算

$$\begin{cases} \sigma_1 = (\sigma_{K_1} + \sigma_{O_1}) / 2 \\ \eta = g_{K_1} + g_{O_1} - g_{M_2} \end{cases} \quad (3.11)$$

$T_0$  无法由 (3.10) 式直接求解，但因日潮明显占优， $T_0$  是小量，故可采用迭代的近似求解方法。由 (3.10) 式取计算  $T_0$  的第一近似值，为

$$\sin \sigma_1 T_0^{(1)} = \frac{-\sin \eta}{2 \left( \frac{B}{4A} + \cos \eta \right)} \quad (3.12)$$

由上式求解出  $\sigma_1 T_0^{(1)}$ ，代入计算  $T_0$  的第二近似值求解公式

$$\sin \sigma_1 T_0^{(2)} = \frac{-\sin \eta}{2 \left( \frac{B}{4A} + \cos(\sigma_1 T_0^{(1)} + \eta) \right)} \quad (3.13)$$

可由 (3.13) 式多次迭代，最终计算出  $T_0$ 。

回归潮的平均高潮位由下式计算

$$TcMHW = A \cos(2\sigma_1 T_0 + \eta) + B \cos \sigma_1 T_0 \quad (3.14)$$

这里，有两点说明：

一是，全日分潮中只顾及了  $O_1$  与  $K_1$  分潮，且利用  $O_1 = 0.711K_1$  进行简化处理。

二是，在混合潮类型中，只顾及了  $M_2$  与  $S_2$  这两个半日分潮，而在日潮类型中，只顾及了  $M_2$  这一个半日分潮。且半日潮族的迟角与角速率以  $M_2$  分潮近似代替，即  $g_2 = g_{M_2}$ 、 $\sigma_2 = \sigma_{M_2}$ 。

### 3.6.3 覆盖全潮汐类型的统计算法

从潮汐强弱变化或潮差大小变化上，日潮海域的回归潮与半日潮海域的大潮都是指潮汐的极值状态。这是大潮概念扩展的基本出发点与依据。因此，统计算法从最根本的潮差大小变化出发，基于长期实测水位数据，按潮差变化判断出每次大潮，再取每次大

潮前后共三天的高潮（或高高潮），多年长期数据的平均值即为结果。具体步骤如下：

第一步，搜索确定每月中出现潮差最大的两个日期，并按天体运动方程计算朔望、月球赤纬极值的日期；

第二步，两类日期相比较，由多年数据确定大潮的类型（朔望大潮或回归大潮），并统计相应的潮龄（半日潮龄、日潮龄）；

第三步，按天文时刻与潮龄统计确定每次大潮日期，取前后共计三天的高潮（或高高潮），即为平均大潮高潮面。

该统计算法消除了以潮汐类型数人为分类的问题，且能保证只将天文大潮纳入统计。现在存在的主要问题是高潮不等的处理，即什么情况下取全部高潮或只取高高潮，特别是混合潮类型时。这将通过平均大潮高潮面在空间连续平滑变化为判断标准，提出具体的处理方案。

### 3.6.4 算法的论证

海洋潮汐实际是一个长波运动，因海底地形的摩擦与海岸线的阻碍、反射等综合作用下而呈现复杂的变化。我国近海，特别是渤海与黄海，是世界上潮汐最复杂的海域之一，半日分潮波与全日分潮波都存在无潮点。但潮汐基准面在空间上的分布必须是连续平滑的。如对理论最低潮面的研究表明，深度基准面  $L$  值（理论最低潮面在当地长期平均海面下的垂直距离）在空间上的变化是连续平滑的。因此空间连续平滑变化是检测平均大潮高潮面算法的基本要求。再顾及平均大潮高潮面涉及的两个大潮概念（朔望大潮与回归大潮）、高潮不等现象、与潮汐类型相关等因素，空间连续平滑变化将是算法合理性检测的主要手段。

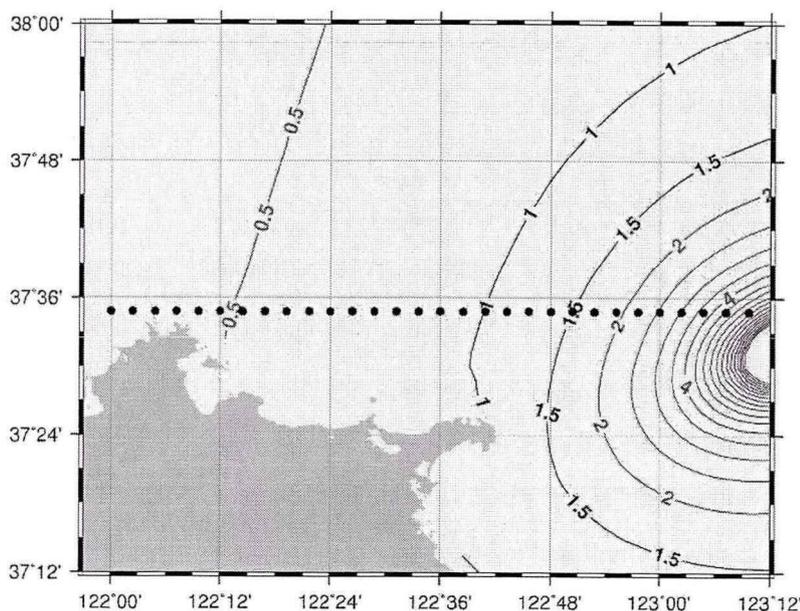


图 3.11 仿真站点及区域潮汐类型数分布图

为了充分论证各种因素影响下的空间变化,最理想的算例是在无潮点附近沿着潮汐类型数梯度方向密集布设验潮站,通过长期水位观测,计算各站点的平均大潮高潮面,统计其空间变化。但这种理想状态很难实现。因此,本文采用仿真手段,由精密潮汐模型仿真成山头外无潮点附近的验潮站点,该精密潮汐模型的空间分辨率为 $1.2' \times 1.2'$ ,在我国近海的9个主分潮的综合预报误差约为 $12.5\text{cm}^{[77,132]}$ ,预报的天文潮位可作为站点水位数据的可靠仿真。站点分布如图3.11所示。

图3.11中共计30个站点,按地理位置从西向东(图中从左向右)依次计为1至30站点,潮汐类型数由小增大,潮汐类型逐渐依规则半日潮、混合潮—不规则半日潮、混合潮—不规则日潮、规则日潮的顺序过渡,平均潮差由大逐渐减小。相邻站点间的距离约为4km,这对于潮波系统或潮汐变化来说,可认为验潮站分布是十分密集的。平均大潮高潮面从1至30站点的变化应是连续平滑的,这是算法检测的标准。

由精密潮汐模型内插出图3.11中各站点的主要分潮调和常数,据前述的潮汐特征值算法计算大潮平均高潮位、回归潮平均高潮位与回归潮平均高高潮位;并由调和常数预报各站点的长期天文潮位作为各仿真站点的水位,再据此水位数据由前述的统计算法计算大潮平均高潮位与大潮平均高高潮位。各站点的计算结果列于表3.2。表中:HNHW为理论最高潮位(Highest Normal High Water),计算方法参考《潮汐和潮流的分析和预报》<sup>[125]</sup>;MHWS为大潮平均高潮位(Mean High Water Springs),表中特指统计算法结果,而MHWSnt指潮汐特征值算法的结果;TcMHW为回归潮平均高潮位(Tropic Mean High Water);TcMHHW为回归潮平均高高潮位(Tropic Mean Higher High Water);MHHWS为大潮平均高高潮位(Mean Higher High Water Springs),是指统计算法中对于大潮前后3天只取高高潮的结果。表中各潮位的起算面都为平均海面,单位都为米。

表3.2 潮汐特征值算法与统计算法结果

站 点	潮汐类 型数	HNHW	特征值算法			统计算法		
			MHWSnt	TcMHW	TcMHHW	大潮	MHWS	MHHWS
1	0.38	1.521	1.006	0.703	0.881	朔望	1.011	1.159
2	0.40	1.509	0.991	0.693	0.878	朔望	0.995	1.148
3	0.41	1.495	0.977	0.685	0.872	朔望	0.981	1.137
4	0.43	1.477	0.955	0.671	0.866	朔望	0.959	1.122
5	0.46	1.448	0.920	0.649	0.855	朔望	0.922	1.099
6	0.49	1.425	0.890	0.630	0.847	朔望	0.893	1.078
7	0.51	1.403	0.864	0.612	0.838	朔望	0.866	1.059
8	0.53	1.380	0.838	0.595	0.828	朔望	0.839	1.038
9	0.56	1.357	0.811	0.578	0.816	朔望	0.813	1.017
10	0.58	1.333	0.784	0.560	0.803	朔望	0.785	0.994
11	0.61	1.308	0.754	0.540	0.789	朔望	0.754	0.970

12	0.65	1.280	0.722	0.520	0.773	朔望	0.723	0.942
13	0.69	1.249	0.688	0.498	0.755	朔望	0.689	0.913
14	0.73	1.216	0.651	0.474	0.735	朔望	0.652	0.880
15	0.79	1.182	0.614	0.450	0.715	朔望	0.612	0.847
16	0.85	1.147	0.575	0.425	0.694	朔望	0.573	0.814
17	0.92	1.112	0.536	0.401	0.673	朔望	0.534	0.779
18	1.00	1.078	0.498	0.376	0.652	朔望	0.494	0.745
19	1.10	1.045	0.459	0.353	0.632	朔望	0.456	0.712
20	1.21	1.013	0.421	0.330	0.612	朔望	0.421	0.680
21	1.34	0.983	0.383	0.308	0.594	朔望	0.392	0.650
22	1.50	0.954	0.346	0.288	0.577	朔望	0.380	0.618
23	1.68	0.925	0.311	0.270	0.561	朔望	0.390	0.593
24	1.90	0.904	0.277	0.257	0.546	朔望	0.409	0.569
25	2.19	0.882	—	0.245	0.532	回归	0.475	0.549
26	2.55	0.862	—	0.231	0.520	回归	0.498	0.535
27	3.04	0.846	—	0.213	0.509	回归	0.512	0.524
28	3.68	0.835	—	0.501	0.501	回归	0.512	0.517
29	4.58	0.831	—	0.496	0.496	回归	0.511	0.511
30	5.80	0.832	—	0.494	0.494	回归	0.510	0.510

为了更清晰地描述各潮位结果间的差异及空间变化，以曲线形式显示各潮位随地点的变化情况，如图 3.12 所示。图中横坐标表示 1 至 30 站点。

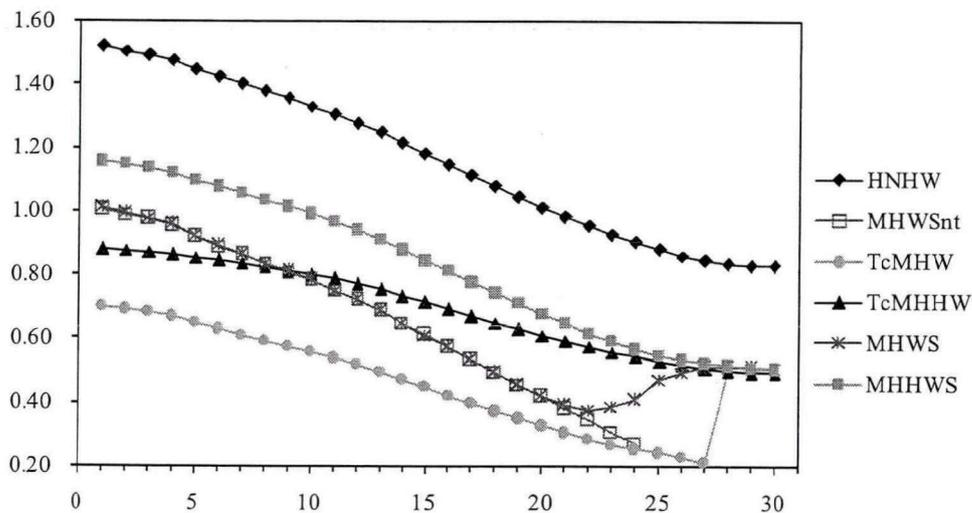


图 3.12 仿真站点各潮位的变化曲线

结合表 3.2，对图 3.12 的分析如下：

(1) 考察表 3.2 中各站点的潮汐类型数与统计算法中确定的大潮类型，1 至 24 的大

潮类型都为朔望大潮，而 25 至 30 的大潮类型都为回归大潮。24 点与 25 点的潮汐类型数刚好在 2.0 左右，即由混合潮—不规则半日潮转变为混合潮—不规则日潮。这证明统计算法确定的大潮类型是正确的。

(2)大潮平均高潮位的特征值算法(对应于  $MHWS_{nt}$ )与统计算法(对应于  $MHWS$ )的结果，在 1 至 21 点可认为是一致的，经统计两者的差异都在 1cm 内。而在 22 至 24 点，虽然统计的大潮类型仍为朔望大潮，但特征值算法的假设条件 ( $M_2$  为能决定潮汐变化主要特征的最大分潮) 已不满足，即特征值算法公式已不适用，故两者的偏差较大。

(3)从变化连续平滑的角度看，只有理论最高潮位(对应于  $HNHW$ )、特征值算法的回归潮平均高高潮位(对应于  $TcMHHW$ )与统计算法的大潮平均高高潮位(对应于  $MHHWS$ )满足“在空间上的连续平滑变化”的基本要求。理论最高潮位代表了潮位可能达到的极限。图 3.12 表示了潮汐变化的强度从 1 至 30 逐渐减弱。

特征值算法的回归潮平均高高潮位在半日潮类型时的计算值比统计算法的大潮平均高高潮位小，在日潮类型时与统计算法的大潮平均高高潮位基本一致。在半日潮类型时，潮差的极限实际取决于月相，半日潮占明显优势，此时不满足计算回归潮平均高高潮位的假设条件(半日潮与日潮相当)。随着日潮相对占优，月球赤纬决定潮差极限时，特征值算法与统计算法趋于一致。总之，特征值算法的回归潮平均高高潮位在半日潮占优海域，因大潮类型与现实不符，理论公式的假设条件不满足，故不适用。

统计算法的大潮平均高高潮位与理论最高潮位保持很好的变化趋势一致性，即随着潮汐强度的减弱而减小。同时，前述(1)表明统计算法确定的大潮类型与潮汐类型数确定的大潮类型是基本对应的。因此，以统计算法的大潮平均高高潮位作为平均大潮高潮面的算法是最合理的，即本文后续的平均大潮高潮位是指统计算法的大潮平均高高潮位。

由图 3.12 知，平均大潮高潮位(对应于  $MHHWS$ )与理论最高潮面(对应于  $HNHW$ )的变化趋势具有很强的相似性，故统计平均大潮高潮位相对理论最高潮面的百分比。同时统计水位在平均大潮高潮面下的占比，以潮位累积频率与高潮累积频率<sup>[25]</sup>为统计参数。30 个站点的统计结果如图 3.13 所示，图中“占比”是指相对理论最高潮面的百分比。

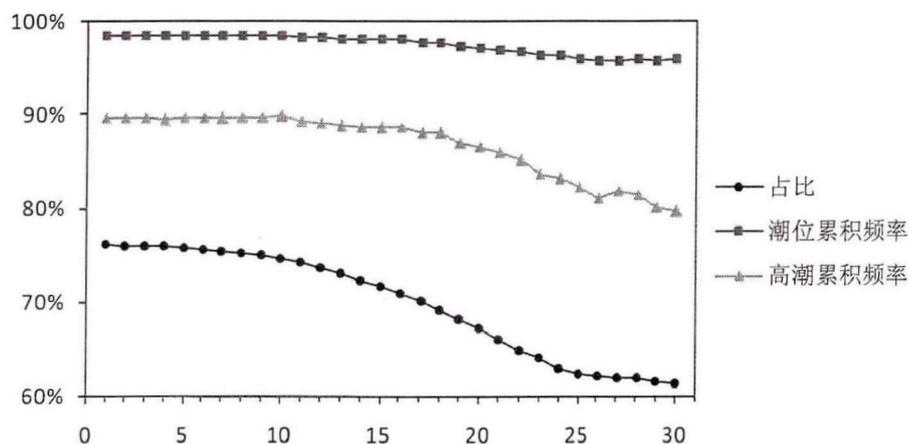


图 3.13 平均大潮高潮面相关占比统计

经统计相对理论最高潮面的百分比、潮位累积频率与高潮累积频率的平均值分别为 69.7%、97.5%与 86.8%。97.5%的平均潮位累积频率表明水位很少能达到平均大潮高潮面上,这与“海岸线是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线,这是海岸线最基本的内涵”<sup>[32]</sup>相符合。

### 3.6.5 我国沿岸部分验潮站算例

图 3.14 为我国沿岸 50 个长期验潮站,实测水位数据时长都在 1 年以上,按半日潮类型、混合潮类型与日潮类型分别以▲、●、★表示。

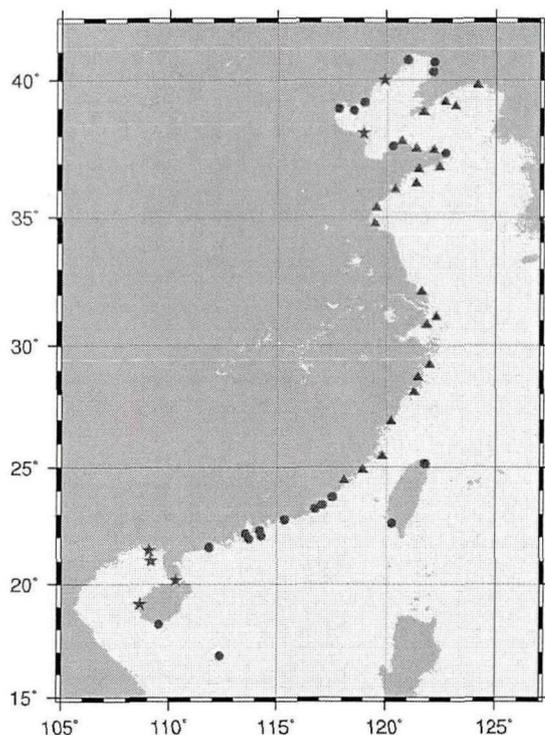


图 3.14 验潮站算例分布

以各站的实测水位数据,用统计算法计算平均大潮高潮面(在平均海面上的垂直距离),并统计其相对理论最高潮面的百分比、潮位累积频率与高潮累积频率,结果列于表 3.3。表中验潮站按潮汐类型数从小到大的顺序排列;HNHW 为理论最高潮面;MHWS 为平均大潮高潮面;大潮类型是指统计算法中确定的大潮类型,分为朔望大潮与回归大潮;占比是指平均大潮高潮面相对理论最高潮面的百分比。HNHW 与 MHWS 的单位都为米。

表 3.3 验潮站计算结果

站名	潮汐类型数	HNHW	大潮类型	MHWS	占比	潮位累积频率	高潮累积频率
吕泗	0.18	3.213	朔望	2.576	80.2%	98.4%	89.7%
三沙	0.27	3.361	朔望	2.703	80.4%	98.4%	88.9%
平潭	0.27	3.415	朔望	2.671	78.2%	98.3%	87.6%

椒江	0.28	3.198	朔望	2.713	84.8%	98.7%	89.3%
坎门	0.28	3.234	朔望	2.625	81.2%	98.5%	89.7%
崇武	0.28	3.495	朔望	2.731	78.1%	98.3%	87.1%
东港	0.31	4.239	朔望	3.307	78.0%	98.9%	91.5%
连云港	0.31	3.051	朔望	2.346	76.9%	98.3%	87.9%
烟台	0.32	1.491	朔望	1.100	73.8%	97.1%	83.9%
芦潮港	0.32	3.063	朔望	2.291	74.8%	98.3%	89.6%
日照	0.33	2.674	朔望	1.991	74.5%	97.9%	86.8%
牛皮礁	0.33	2.610	朔望	2.142	82.1%	99.0%	91.6%
厦门	0.33	3.221	朔望	2.694	83.6%	98.9%	88.2%
石浦	0.34	2.858	朔望	2.322	81.2%	98.7%	90.5%
蓬莱	0.35	1.083	朔望	0.707	65.3%	94.2%	77.3%
小麦岛	0.38	2.189	朔望	1.656	75.7%	98.1%	85.4%
乳山口	0.39	2.214	朔望	1.730	78.1%	98.2%	87.5%
千里岩	0.40	1.957	朔望	1.438	73.5%	97.4%	85.3%
小长山	0.41	2.823	朔望	2.133	75.6%	98.5%	90.6%
海洋岛	0.42	2.785	朔望	2.160	77.6%	98.7%	91.6%
老虎滩	0.43	2.153	朔望	1.596	74.1%	98.3%	90.0%
威海	0.48	1.540	朔望	1.102	71.6%	98.0%	86.3%
石岛	0.50	1.585	朔望	1.181	74.5%	97.4%	85.1%
营口	0.54	2.940	朔望	2.158	73.4%	98.1%	89.0%
鲅鱼圈	0.56	2.693	朔望	1.907	70.8%	97.7%	88.2%
东山	0.56	1.877	朔望	1.520	81.0%	97.8%	87.6%
塘沽	0.60	1.948	朔望	1.338	68.7%	95.0%	76.1%
葫芦岛	0.68	2.424	朔望	1.717	70.8%	97.6%	87.4%
曹妃甸	0.85	1.380	朔望	0.865	62.7%	92.1%	67.9%
南澳岛	0.98	1.082	朔望	0.926	85.6%	97.9%	90.0%
闸坡	1.17	1.875	朔望	1.534	81.8%	98.9%	91.7%
成山头	1.23	0.936	朔望	0.612	65.4%	94.8%	79.9%
龙口	1.29	1.000	朔望	0.625	62.5%	93.4%	80.4%
京唐港	1.35	0.924	朔望	0.489	52.9%	85.1%	60.0%
澳门	1.44	1.468	朔望	1.033	70.4%	98.2%	91.0%
基隆	1.56	0.635	朔望	0.387	60.9%	93.6%	77.8%
大万山	1.60	1.404	朔望	1.007	71.7%	97.4%	90.8%
汕头	1.61	0.846	朔望	0.723	85.5%	97.6%	89.6%

香 港	1.66	1.362	朔望	0.957	70.3%	97.4%	90.5%
担杆岛	1.83	1.253	朔望	0.871	69.5%	95.9%	89.2%
高 雄	1.88	0.741	朔望	0.515	69.5%	97.5%	89.5%
汕 尾	2.17	1.029	朔望	0.805	78.2%	97.4%	89.4%
三 亚	2.81	1.132	回归	0.771	68.1%	97.4%	86.5%
永 兴	3.32	0.940	回归	0.676	71.9%	96.5%	86.4%
海 口	4.12	1.332	回归	0.935	70.2%	98.3%	88.4%
北 海	4.16	3.230	回归	2.326	72.0%	99.0%	88.3%
东营港	4.49	0.624	回归	0.403	64.6%	87.1%	70.6%
濶 洲	4.66	3.038	回归	2.178	71.7%	99.1%	88.4%
东 方	6.54	1.964	回归	1.354	68.9%	98.5%	86.0%
芷锚湾	9.49	0.801	回归	0.591	73.8%	93.1%	78.7%
平均值					73.7%	97.0%	86.0%

由表 3.3 知, 平均大潮高潮面相对理论最高潮面的百分比、潮位累积频率、高潮累积频率与前述 30 个仿真站点的统计结果相当。相对理论最高潮面的百分比与暴景阳等<sup>[36]</sup>以 15 个验潮站统计的平均值 70% 相符合。

### 3.7 本章小结

本章在我国海岸线定义的完善、平均大潮高潮面概念完善与算法设计方面的工作是探索性的研究成果, 也是 LiDAR 技术条件下提取海岸线的必要条件。

1、简要介绍了海岸线定义的多样性, 并可分为两类: 基于可视特征的定义与基于潮汐基准面的定义。定义的选择与海岸线测绘技术的发展相关, 人工实地测量与较低分辨率遥感影像判绘等测绘技术条件下, 都采用基于可视特征的定义, 即痕迹岸线, 痕迹岸线受主观因素影响大, 具有一定的不确定性, 在测绘学角度不严密; 而 LiDAR 测量方式下, 采用基于潮汐基准面的定义, 即潮汐基准线, 在定义上更严密、在提取海岸线的效率上更高。

2、探讨了我国的海岸线定义, 指出现行定义在科学性上不严谨, 存在一定的缺陷: “平均大潮高潮时”的概念不准确、痕迹岸线不唯一、痕迹线与平均大潮高潮线之间关系不明确。提出在测绘学范畴下我国海岸线应采用基于潮汐基准面的定义方式, 并分析认为潮汐基准面应选择平均大潮高潮面, 而将海岸线规定为平均大潮高潮面与海岸的交接线, 即平均大潮高潮线。同时, 指出平均大潮高潮面在概念上不能覆盖所有潮汐类型、算法上也不完善。

3、从潮差变化规律角度, 将“大潮”概念由海洋潮汐学上局限于半日潮类型的朔望大潮, 扩展包含日潮类型的回归大潮。据此实现了“平均大潮高潮面”概念的完善。设计了基于实测水位数据的统计算法, 通过潮汐最复杂的无潮点附近的仿真站点, 以特征

潮位面空间连续平滑变化为基本要求，选择确定平均大潮高潮面的算法为统计算法中的大潮平均高高潮位。我国沿岸 50 个长期验潮站实测水位数据的计算与统计表明，平均 97% 的水位在平均大潮高潮面下，这符合海岸线最基本的内涵，即“海岸线是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线”。

## 第四章 海岸线提取常用方法及其改进

### 4.1 引言

机载或船载 LiDAR 可快速获取海岸线附近高分辨率、高精度的点云数据,为精确测绘海岸线及以附加明确精度指标的地理信息表示奠定了坚实的数据基础,但相对于传统的人工实地与遥感影像判绘等测量模式,海岸线的测量需相应转为基于潮汐基准面的方式,即海岸线的提取将转变为潮汐基准线的提取。整体上分为两个步骤:

第一,精确计算潮汐基准面的高程(与点云一致的高程系统下)。世界上大部分国家采用平均高潮面,相关算法十分成熟。本文上一章完成了平均大潮高潮面概念完善与算法设计工作,基于水位数据可计算平均大潮高潮面在平均海面上的垂直距离,再结合海域垂直基准数据或模型<sup>[133]</sup>,可实现平均大潮高潮面与点云数据的高程系统的统一。因此,该步骤所需的技术方法已较完备,已可实现。

第二,依据潮汐基准面的高程,从点云中提取对应的潮汐基准线。目前国际上普遍应用的方法主要有两种:一是海岸剖面法(Cross-Shore Profile Method, CSP)<sup>[27]</sup>,采用线性回归模型,从离散的 LiDAR 原始点云中定位特定潮汐基准面与海岸剖面的交点,顺序连接而生成海岸线;二是等值线追踪法(Contouring Method)<sup>[49, 113]</sup>,从 LiDAR 生成的 DEM(TIN 或 GRID)中生成对应高程的等值线。另外, Liu<sup>[50]</sup>于 2007 年提出了图像分割法,将 LiDAR DEM 分割成水陆二值图像,通过图像处理方法提取海岸线。国内相关研究处于起步阶段,主要引用国际上的等值线追踪法和图像分割法。

本章对海岸线提取方法的研究将聚焦于国外现有的从点云中提取潮汐基准线的方法及其改进上。首先,介绍并分析国际上常用的海岸剖面法、等值线追踪法,以及后来提出的图像分割法,并针对等值线追踪法与图像分割法等对点云滤波分类要求高且易受 DEM 误差影响的缺点,提出了图像分割改进方法,并利用实例对此方法进行验证。

## 4.2 海岸剖面法与等值线追踪法

### 4.2.1 海岸剖面法

海岸线是指特定潮汐基准面与海岸的交线。海岸剖面法的基本思路是通过确定潮汐基准面与离散海岸剖面的交点,以离散交点的连接线来近似代替该交线。具体原理为:从原始点云数据中沿岸每隔一定距离提取海岸剖面,然后利用线性回归模型拟合每个剖面,据潮汐基准面的高程内插出其与剖面的交点,最后依次连接各个剖面的交点即得海岸线。图 4.1 为线性回归模型拟合剖面并截取交点的示意图。图中 NAVD88 指高程系统, MHW 指海岸线定义所采用的潮汐基准面。

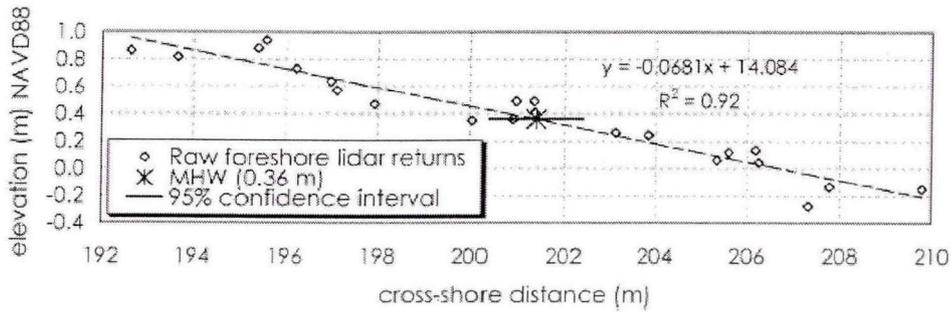


图 4.1 拟合某个剖面并截取与 MHW 交点的示意图 (来自参考文献[27])

海岸剖面法的精度主要取决于两个近似处理:

一是, 据微分思想可知, 离散交点间的距离越小, 以离散点连线代替曲线的精度就越高。这意味着应尽量减小海岸剖面间的距离, 增加剖面的个数。但每个剖面都需由原始点云数据历经提取、拟合与内插交点的过程, 运算量大。因此, 从效率角度, 剖面的个数需适中。两者的平衡点取决于海岸线的曲折变化程度, 在相对平直的岸段可选择较少的剖面, 而在曲折变化复杂的岸段应选择较多的剖面。该工作通常需人工完成, 这将降低海岸线提取的自动化程度, 且易受主观因素影响。

二是, 以线性回归模型拟合海岸剖面, 海岸地形越复杂, 拟合精度越低。因此, 该方法在淤泥(粉砂)质海岸与砂(砾)质海岸的适用性相对较好。

总之, 海岸剖面法直接根据 LiDAR 点云进行计算, 运算量大, 且剖面的取样和分析是一个单调的、耗时的过程, 受主观因素影响大。本文对该方法不作过多阐述。

#### 4.2.2 等值线追踪法

据潮波运动理论, 海洋潮汐现象实质上是一种长波运动, 故小范围内的潮汐变化一般较小, 这就意味着: 在理论上平均大潮高潮面、平均高潮面等潮汐基准面应保持小范围内高度一致。在测量实践中, 这里的“小范围”在一般海域是指公里或一个小岛。也就是在小范围内, 可视平均大潮高潮面、平均高潮面等潮汐基准面为等高面, 而与海岸的交线相应可视为等高线。这是等值线追踪法的假设前提与出发点。等值线追踪法的具体原理为: 首先, 由预处理后的点云数据, 生成数字高程模型 DEM (TIN 或 GRID); 再通过等值线跟踪法提取潮汐基准面所对应的等值线。流程如图 4.2 所示。

点云数据的坐标转换、粗差剔除与滤波分类等通常视为 LiDAR 数据的预处理过程。而由 DEM 提取等值线的算法已十分成熟, 是 GIS 软件的基本功能。因此, 等值法的关键是构建 DEM, 主要有不规则三角网 (TIN) 和规则格网 (GRID) 两种基本方法, 一般情况下, 当数据密度低时, 可通过插值生成 GRID; 当数据密度较高时, 一般采用 TIN 模型, 且 TIN 构建的 DEM 能真实地反映不规则区域的地形, 以及精细地描述地形的起伏程度。而 LiDAR 点云属于高密度、高精度的数据 (点云平均间距达米级, 甚至到毫米级), 且海岸地形复杂, 变化多样, 因此本文选择 TIN 构建高精度的海岸 DEM。采用

TIN 对点云数据进行建模时,相互连接最近的 LiDAR 点云生成三角形,并保证三角形的唯一性和独立性(不交叉、不重叠),且尽量保证接近等边三角形。

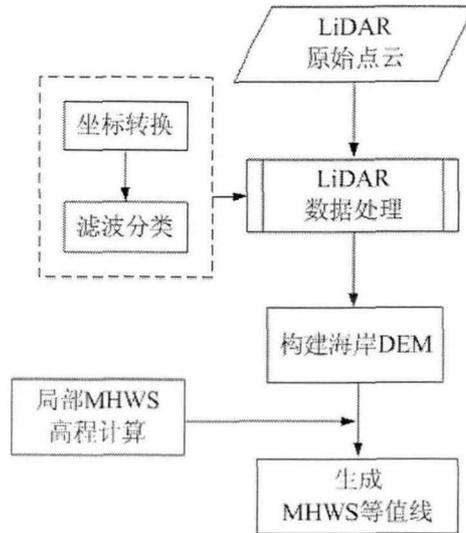


图 4.2 等值线追踪法的流程框图

等值线追踪法的突出优点是实现简单,但也有缺点。下面以一实例分析该方法的缺点。图 4.3 为等值法追踪法提取的海岸线与 DEM 叠加的成果。

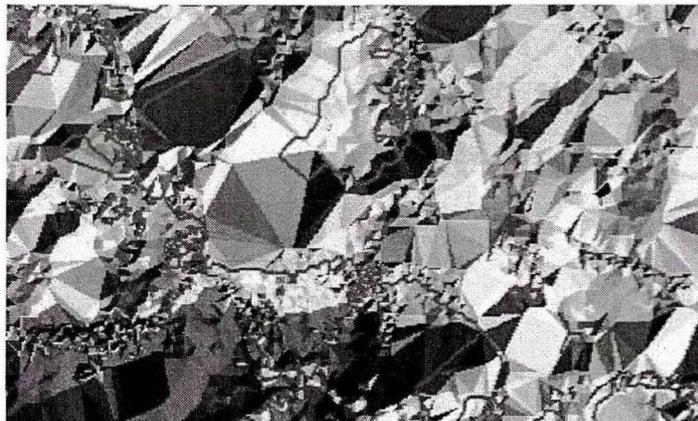


图 4.3 等值线追踪法提取海岸线的成果示例

由图 4.3 可知,等值线追踪法提取的海岸线过于曲折、抖动、破碎,且存在大量错误的线段(或封闭多边形),这也是等值线追踪法不可避免的缺陷。主要原因是水边线附近的 LiDAR 数据受到波浪和潮汐的影响以及浅滩的藻类海草沉积过厚、LiDAR 信号的噪声(粗差)以及海峡和洪水洼地的数据空缺等因素的影响。

事实上,通过等值线追踪法从传统数据源生成规范的等值线本身就十分困难,LiDAR 点云分布密度高与海岸地形复杂多样等特点,使得等值线的生成更加困难。显然,这不是理想的海岸线效果,还需大量后期的人工作业进行修订,因此该方法效率低、劳动强度大,且易受主观因素影响。但也有人持不同看法:

1、认为正是由于 LiDAR 数据的高密度、高精度特点才使得生成的海岸线曲折多。因为只要比例尺足够大，几乎任何地形表面都会看上去很粗糙。事实上，对于高密度、高精度的 LiDAR 点云数据来讲，其对海岸地形表达的可信度并不是一个主要的问题，反而是其中的高频噪声在很大程度上导致了海岸线的严重曲折抖动<sup>[135]</sup>。以本文的实验数据为例，点云数据间距为 10cm，高程精度也是 10cm 左右，虽然 LiDAR 数据的高程精度已经很高，但相对于仅有 10cm 或更小间距的点云来说，这样的高程差异仍非常明显，这种差异即为高频噪声。

2、认为等值线的提取就应该采用先构建 DEM (TIN) 再通过内插的方法才能较好地生成等值线。事实上，等值线追踪方法更适用于较稀疏的数据，通过插值方法增加数据密度，从而提高等值线生成的精度，而 LiDAR 点云非常密集、数据量大，采用该方法运算速度很慢，且点云采集时是随机性的，生成的 TIN 未经过专门筛选，同时由 TIN 描述的地形表面也不平滑，因此使得由 TIN 直接生成的海岸线曲折、零乱、破碎。

总之，在水陆交界处相对复杂的地形条件下，一方面应充分利用 LiDAR 点云数据的高密度、高精度的优点，另一方面应生成平滑、可靠的海岸线。等值线追踪法很难在这两方面间找到完美的平衡点。

### 4.3 图像分割法及其改进

#### 4.3.1 图像分割法基本原理

Liu<sup>[50]</sup>分析认为海岸剖面法需人工选择剖面且运算量大，而等值线追踪法未针对海岸线提取进行优化，岸线破碎且不准确，因此于 2007 年提出了图像分割法，以期能自动提取准确可靠的海岸线。该方法的基本思路是将等值线的提取转化为图像边缘线的提取，通过图像处理算法实现海岸线提取的优化。具体流程如图 4.4 所示，步骤为：

- 1、以中值滤波 (median filter) 或高斯滤波 (Gaussian filter) 法探测并剔除粗差，再以距离倒数加权法构建 LiDAR DEM。
- 2、以潮汐基准面为界，将高于该面的 DEM 标记为陆地，设置像元值为 255，而将低于该面的 DEM 标记为海水，设置像元值为 0。据此，DEM 转化为水陆二值图。
- 3、通过像元值，将 DEM 分割为陆域与海域。
- 4、水陆二值图像中存在许多小的、不连续的区域，可能是由低湿地、藻类海草残骸、波浪、小砾石、LiDAR 噪声等原因造成的，应视为“伪陆地区域”或“伪水域区域”。首先以区域内最小岛礁面积为阈值，面积小于该阈值的陆域标识为“伪陆地区域”，并合并至邻近海域。然后，再对海域进行类似检查，标识“伪水域区域”并合并至邻近陆域。
- 5、对二值图运用形态学算子 (mathematical morphologic operations)，先膨胀后腐蚀，实现对陆海边缘的平滑。
- 6、提取陆海边缘，边缘线即为海岸线。

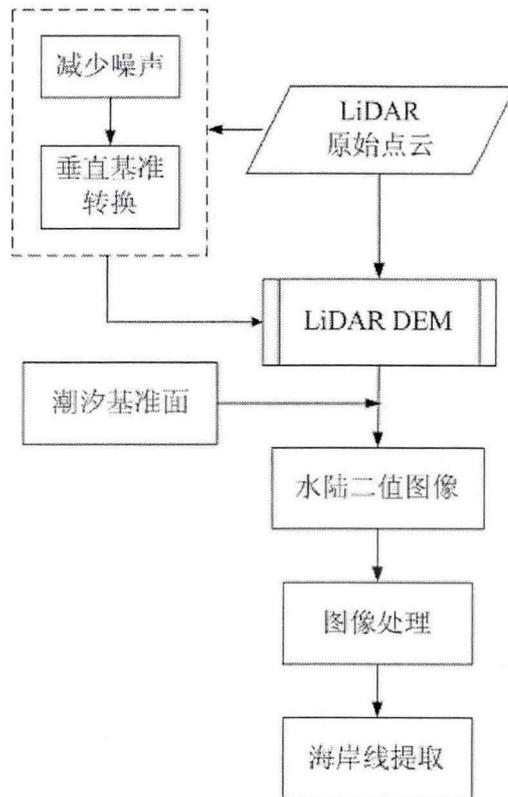


图 4.4 图像分割法实施流程

图像分割法从本质上仍是提取等值线，但与等值线追踪法相比，通过步骤 4 解决了海岸线零乱、破碎的问题；通过步骤 5 解决了海岸线曲折的问题；相关的算法都是采用图像处理相关算法，人工操作少。Liu<sup>[50]</sup>以 Texas gulf 的机载 LiDAR 数据对图像分割法进行了验证，提取的海岸线平滑可靠，过程自动化程度高且可重复性强，蒙特卡洛模拟法 (Monte Carlo simulation technique) 精度评估表明：95%置信度下海岸线平面位置精度为 4.5m。

张良等<sup>[72]</sup>利用图像分割法提取了烟台试验区的高潮线与低潮线，由蒙特卡洛模拟法估计提取精度，结果与 Liu<sup>[50]</sup>的示例相当，并指出：与其他基于 LiDAR 的提取算法相比，在保证精度的同时可省去大量的人工操作，自动化程度高，自动提取高、低潮线的精度明显优于摄影测量方式。

#### 4.3.2 对图像分割法的改进

图像分割法的第一步是滤波及构建 LiDAR DEM，再实施后续步骤。由格网化原理可知，格网化是对原始数据的重采样，并隐含一定的平滑作用。对于 LiDAR 点云数据来说，格网化是对其高密度、高精度的一种浪费，特别是比机载 LiDAR 的点云分布密度更高的船载 LiDAR 测量模式。本文对图像分割法的改进将针对滤波与 LiDAR DEM 构建步骤。

我国海岸线的定义为平均大潮高潮线，本文 3.6.5 利用我国沿岸 50 个验潮站水位数

据的统计表明,平均大潮高潮线 97%的时间是裸露的。海岸线最基本的内涵是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线<sup>[32]</sup>。海岸线附近不会存在喜盐生物与淡水生物,点云代表的是真实的地形数据或人工建筑,无需通过格网化对海岸线附近进行滤波平滑。基于此考虑,本文尝试省略点云的滤波与格网化过程,直接将 LiDAR 点云分割为水陆二值图像,既简化海岸线的提取过程,节省了时间,又减少因滤波和 LiDAR DEM 构建而产生的误差,提高海岸线提取的精度。具体流程如图 4.5 所示。

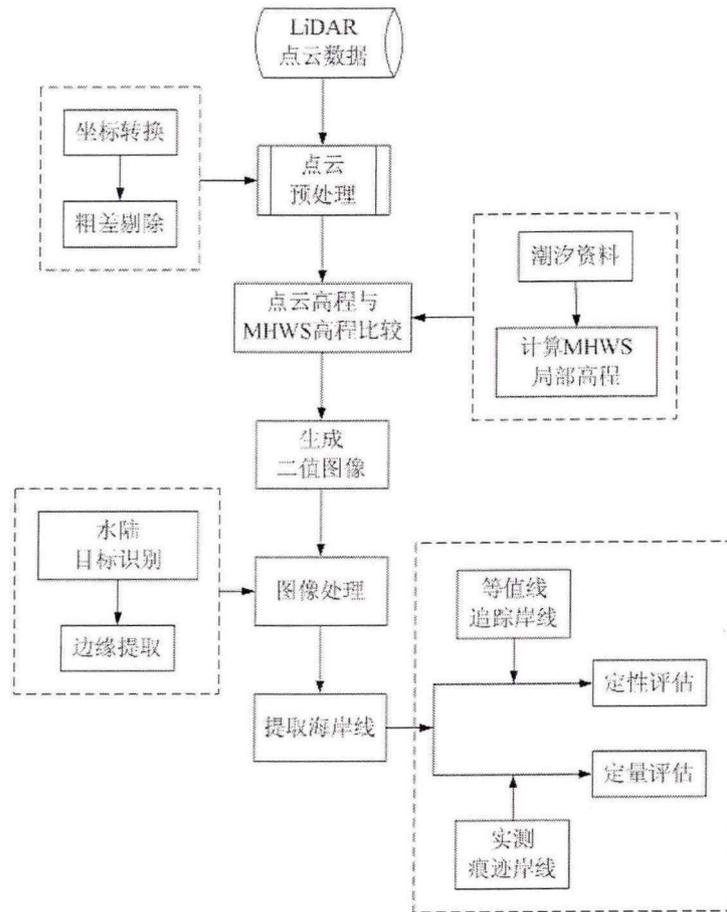


图 4.5 实施流程

图 4.5 的流程与图像分割法的差异主要体现在:一是省略了滤波与格网化过程;二是增加了精度的定性评估与定量评估过程。

### 1、LiDAR 点云数据处理

对 LiDAR 数据进行预处理,包括坐标转换和粗差剔除。

(1) 坐标转换是指将 LiDAR 点云数据转换为 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 和 1985 国家高程基准。

(2) 由 2.3 节可知,根据 LiDAR 的工作原理以及点云数据采集的流程,获取的 LiDAR 点云不可避免地存在诸多粗差,如高点、低点,以及孤立点云,这些粗差均为错误数据,必须剔除,从而确保点云数据的质量;

### 2、MHWS 局部高程计算

在局部范围内, LiDAR 点云经坐标转换可表达为 $(x, y, h)$ 或 $(B, L, h)$ , 其中,  $h$ 为被测点的大地高,  $(x, y)$ 和 $(B, L)$ 分别为目标点的平面坐标或地理坐标。

目标点的大地高通过式(4.1)转换为正常高:

$$H = h - N \quad (4.1)$$

式中,  $N$ 为大地水准面高, 因在海岸区域, 在本应用中视为高程异常, 为区别下式用到的海面地形, 采用符号 $N$ 。

通过潮汐资料计算得到该海域的平均大潮高, 即确定海岸线的高程(平均大潮高潮线), 在岸线高程已知情况下, 可由(4.2)式计算:

$$H_{MHWS} = \zeta + MHWS \quad (4.2)$$

其中:  $MHWS$ 表示自当地平均海面起算的平均大潮高,  $\zeta$ 为在国家高程基准中表达的海面地形高度<sup>[35,77]</sup>。

### 3、水陆二值图像生成

通过下式将激光扫描点云转换为水陆二值图像

$$f(i, j) = \begin{cases} 0 & f(i, j) \geq H_{MHWS} \\ 1 & f(i, j) \leq H_{MHWS} \end{cases} \quad (4.3)$$

式中:  $f(i, j)$ 表示 $(i, j)$ 处 LiDAR 点云的高程值,  $H_{MHWS}$ 为二值化阈值。

### 4、水陆二值图像处理

对生成的水陆二值图像进行处理, 包括两步: 扫描识别水陆目标, 删除伪目标; 二值图像的边缘提取。第一步是指水陆二值图像中存在许多小的、不连续的区域, 可能是由低湿地、藻类海草残骸、波浪, 数据空白等原因造成, 视为“伪水域目标”或“伪陆地目标”, 其边界线不是真正的海岸线, 这些伪目标需要删除。识别二值图像中的水域和陆地像素, 相对应地标记为水域或陆地目标, 并且分别计算每一目标的面积。设置面积阈值, 从而排除掉多余的伪目标, 可减少后续海岸线编辑处理的工作量。第二步是对删除伪目标后的二值图像进行图像形态, 先膨胀后腐蚀, 使得图像边界更平滑。最后, 对最终的水陆二值图像检测边缘, 提取海岸线。

### 5、可靠性分析

分别从定性和定量角度对采用二值图像化改进方法提取的岸线进行可靠性分析。

(1) 定性评估, 是指通过将图像分割改进方法、等值线追踪法和分割图像法提取的海岸线叠加显示分析, 定性分析提取岸线的形态。

(2) 定量分析, 是将基于 LiDAR 数据提取的海岸线(下文简称 LiDAR 岸线, 包括改进岸线和分割岸线)与实地测量的痕迹岸线进行高程比对和平面位置比对, 得到高程和岸线变化梯度方向的位置差异的均方根差和标准差, 以验证 LiDAR 岸线提取的可

靠性。

具体方法是在 LiDAR 岸线上每隔一定距离采样,并在岸线梯度方向上确定痕迹岸线的对应点。分别计算对应点的高差和平面位置差 $\Delta_{hi}$ 和 $\Delta_{di}$ ,并分别计算高程方向和水平方向差异的平均值、均方根差和标准差。而在局部范围内两类岸线高差差异的不一致性主要由实测岸线的高差不同所引起。

两类岸线高差的均值、均方根差和标准差可分别由(4.4)、(4.5)、(4.6)式估计:

$$mean_v = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{vi}}{n} \quad (4.4)$$

$$rms_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{vi}^2}{n}} \quad (4.5)$$

$$std_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_{vi}^2}{n-1}} \quad (4.6)$$

式中, $n$ 表示采样点的总数,对于平面位置, $\Delta_{vi}$ 表示第 $i$ 个采样点的平面距离 $\Delta d_i$ ,对于高程位置, $\Delta_{vi}$ 表示第 $i$ 个采样点的高程距离 $\Delta h_i$ , $v_{vi} = \Delta_{vi} - mean_v$ 。

## 4.4 实例分析

本节将以实例来验证本文提出的图像分割改进法的优势,并通过选择4个海岸类型不同、点云密度不同、海域潮汐不同的多个海岸或海岛,对该方法的普适性进行检验,通过LiDAR点云数据提取平均大潮高潮线,并以DEM数据、实测的痕迹岸线、遥感影像的干湿线和瞬时水边线以及海图、地形图、海岸带地形图等多种数据源进行辅助验证,明确潮汐基准线(平均大潮高潮线)与可视特征岸线(如痕迹岸线、干湿线,及水边线等)之间相近但不相同的关系,进一步确定基于平均大潮高潮面的海岸线的客观性和严谨性。

### 4.4.1 实验区域数据

共选取四个实验区域,地理位置不同、点云密度不同、海域潮汐不同、海岸类型也不同,其中前两个实验区为典型的“硬性岸”,后两个实验区为典型的“软性岸”,且由于我国海岸带或海岛礁的LiDAR数据较少,无法同时获取多种其它数据源进行辅助验证,因此每个实验区的其它数据源也不同,且分辨率、精度也存在差异。但从另一角度看,通过这样的数据集来进行实验分析更具说服力。

## 4.4.1.1 实验区域一

实验区域一为猴矶岛，位于山东省烟台市长山水道北侧，历有导航设置，具有重要的导航位置，又称为“航标岛”，潮汐类型为规则半日潮。该岛多为岩石陡岸，实地测量困难。

该实验区具有2种数据：一是平面分辨率为1m的DEM；二是船载LiDAR数据，如图4.6所示，数据格式为LAS 1.2版本，点云平均间距为2m，约6万点。图4.7为猴矶岛的遥感影像，其中红色线为布设三维扫描测线。

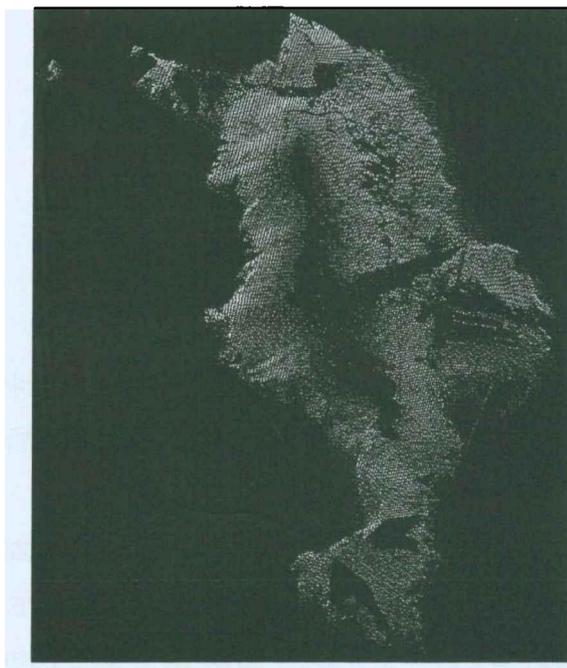


图4.6 猴矶岛的LiDAR点云

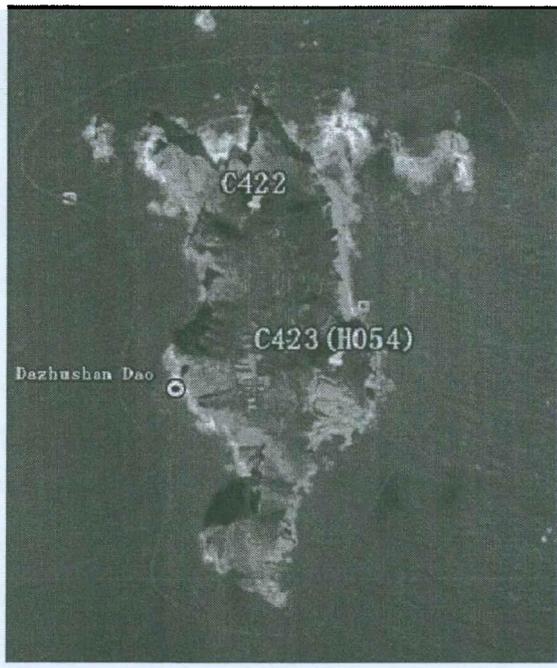


图4.7 猴矶岛的遥感影像

## 4.4.1.2 实验区域二

实验区域二选用大连市老虎滩附近海域，此海岸区域地形复杂，多为岩石陡岸，山体上覆盖着植被，实地测量困难。船载LiDAR数据，采用中海达激光扫描仪iScan于2013年8月采集，点云平均间距为0.1m，图4.8为截取的LiDAR点云数据，约40万点。



图4.8 实验区域二的真彩色点云数据

痕迹岸线实测于 2013 年 10 月，测量的是岩石上较为明显的痕迹岸线（图 4.8 红色框中可清晰地看出痕迹带），一般取痕迹带的中偏上部位的点测量，然后连接测量点可得痕迹岸线，其光滑程度取决于测量点的个数。图 4.9 为该实验区域的遥感影像。



图 4.9 实验区域二的遥感影像

#### 4.4.1.3 实验区域三

实验区域三位于山东省青岛市附近，濒临黄海，属于沙质海岸，潮汐类型为规则半日潮。该海岸存在诸多形状不一、大小不同的鲍鱼池，其由大石块、钢筋和水泥加固而成，池墙的最顶端在涨潮时与海面基本持平，落潮时则似“铁链锁”般显露出来<sup>[1]</sup>。

该实验区域具有 3 种数据：一是遥感影像，如图 4.10 所示；二是 RTK 人工实地测量的痕迹岸线数据，痕迹选取沙滩冲积的最上沿，测量点如图 4.10 中红色离散点所示；三是船载 LiDAR 数据，如图 4.11 所示，数据格式为 LAS 1.2 版本，点云平均间距为 1m，约 12 万点。



图 4.10 实验区域三的遥感影像

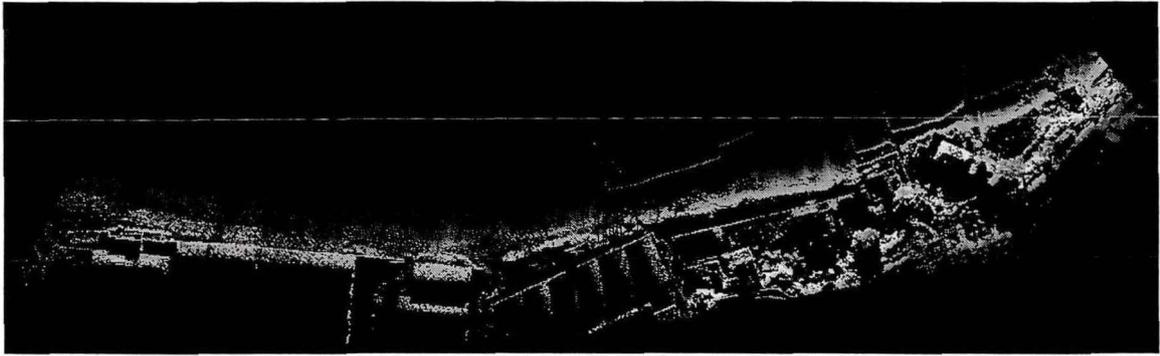


图 4.11 实验区域三的 LiDAR 点云数据

#### 4.4.1.4 实验区域四

实验区域四位于辽宁省大连市附近，潮汐类型为规则半日潮。从整体上看是基岩海岸中深入陆地的一小海湾，两侧都是岩石陡崖，中间为一段沙砾海岸。

该实验区域具有 2 种数据：一是人工实地测量的痕迹岸线数据，利用无反射棱镜的全站仪测量沙脊的上部，如图 4.12 中的黄色箭头所示；二是船载 LiDAR 数据，如图 4.13 所示，数据格式为 LAS 1.0 版本，点云平均间距为 0.1m，约 17 万点。



图 4.12 实验区域四的痕迹线选择位置示意

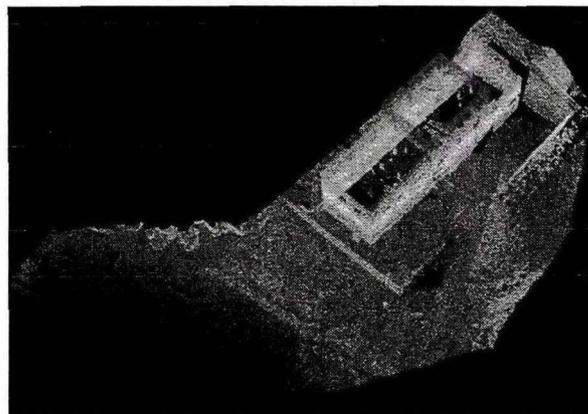


图 4.13 实验区域四的 LiDAR 点云

#### 4.4.2 实例一

本实验区为基岩海岛，有两种数据：1m 分辨率的 DEM（以栅格数据形式提供）和点云平均间距为 2m 的船载 LiDAR 点云，因此，本节将以基于 DEM 提取的海岸线为比

对岸线，分析基于 LiDAR 点云提取海岸线的可靠性，同时对图像分割改进方法的优越性进行验证。

由中国近海精密潮汐模型<sup>[77]</sup>计算该处的平均大潮高潮面在平均海面上的高度，再以似大地水准面模型<sup>[127]</sup>内插该处的高程异常，进而计算得到平均大潮高潮面的大地高为 6.30m（与点云数据的坐标系统相统一）。

#### 4.4.2.1 基于DEM提取的海岸线

采用等值线追踪法直接由 DEM 数据生成海岸线，提取的海岸线经过简单平滑修编后如图 4.14 所示。整个岸线提取时间约 12 分钟。

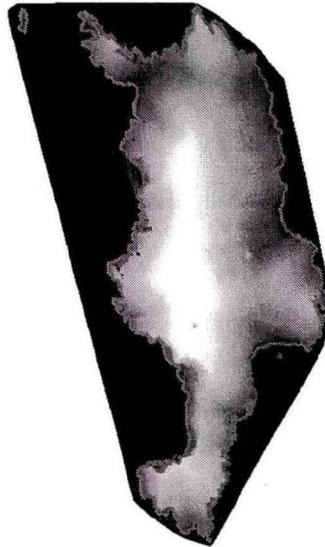


图 4.14 由 DEM 数据提取的海岸线

#### 4.4.2.2 基于LiDAR提取的海岸线

##### (1) 图像分割法



图 4.15a 构建的 DEM

图 4.15b 生成的水陆二值图像

图 4.15c 提取的海岸线

图 4.15 图像分割法提取海岸线的主要步骤

根据图像分割法的步骤（见 4.3.1 节），提取海岸线如图 4.15 所示，其中图 4.15a 为滤波后构建的海岸 DEM，图 4.15b 为以 MHWS 局部高程为阈值，将 DEM 转化为水陆二值图像，图 4.15c 为经过图像处理提取的海岸线。整个岸线提取时间约 44 分钟。

#### (2) 图像分割改进法

根据本节提取的图像分割改进方法（见 4.3.2 节），提取海岸线如图 4.16 所示，其中图 4.16a 为以 MHWS 局部高程为阈值，由 LiDAR 点云生成的水陆二值图像，图 4.16b 中的红色线为经过图像处理提取的海岸线。整个岸线提取时间约 14 分钟。



图 4.16a 生成的水陆二值图像

图 4.16b 提取的海岸线

图 4.16 图像分割改进法提取海岸线的主要步骤

### 4.4.2.3 结果分析

#### (1) 效率分析

显然，采用图像分割改进算法（下文简称“改进算法”）提取海岸线的时间（14min）明显少于图像分割算法（下文简称“分割算法”）所用时间（43min）。在整个实验过程发现，由于该实验区为岩石陡岸，要滤波分类得到合理、正确的海岸地形非常困难，需要反复地调整阈值，并人工辅助分类，因此在采用分割算法提取海岸线时，超过 1/3 的时间用于 LiDAR 原始点云的滤波分类，同时，构建海岸 DEM 及调整不合理 TIN 的过程花费时间也较多，接近 1/3 的时间；而采用改进算法时，由于省略了这些过程，作业人员的工作量明显减少，主要是在对水陆二值图像进行图像处理时花费时间，因此整体花费时间也大幅度的减少。显然，基于 DEM 数据与采用改进算法提取海岸线的时间相差不多，原因将在第五章阐明。

#### (2) 可靠性分析

将基于 DEM 数据提取的海岸线（下文简称“DEM 岸线”）、图像分割法提取的海岸

线（下文简称“分割岸线”）和图像分割改进法提取的岸线（下文简称“改进岸线”）同时加载在海岸 DEM 上，如图 4.17 所示，其中蓝色线为 DEM 岸线，黄色线为分割岸线，红色线为改进岸线。



图 4.17 岸线提取结果

从整体上看（图 4.17），基于两种不同数据源（DEM 数据和 LiDAR 点云数据）提取的海岸线走向趋势及形态特征基本一致。尽管 DEM 不是海岸地形的真实描述，但作为我国基础地理信息的重要数据之一，其重要性和可靠性得到了大家一致认可，因此通过其提取的 MHWS 海岸线也应是可靠的，而从图 4.17 可见，LiDAR 岸线与 DEM 岸线非常相似，从而证明基于 LiDAR 提取的海岸线是可行的，并且可靠性强。将图中的黑色虚线框部分放大如图 4.18 所示。

从放大图看（图 4.18），DEM 岸线（蓝色线）、分割岸线（黄色线）和改进岸线（红色线）在 TIN 较为合理的区域（如虚线框 1 和虚线框 2 处）更为相似，差别不大，但在 TIN 较为零乱的区域（如虚线框 3 处），很清楚地看到分割岸线与其它两种岸线的差异，这是因为分割岸线是先构建海岸 DEM（TIN），然后再将其转化为水陆二值图像提取海岸线，因此提取的岸线必定受到不合理 TIN 的影响。

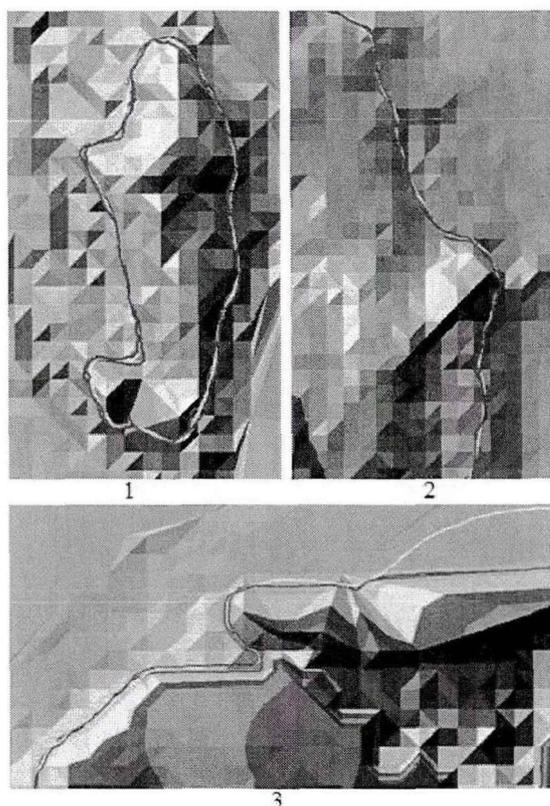


图 4.18 DEM 岸线、分割岸线和改进岸线叠加显示的局部放大图

总体上,对于基岩海岸类型,通过与基于 DEM 提取的海岸线相比,基于 LiDAR 点云提取海岸线是可行的,并且可靠性强;与已有的图像分割法相比,提出的图像分割改进法提取岸线花费的时间明显少于图像分割法所用时间,极大的提高了效率,且从整体上两者提取的岸线在平面位置和形态特征上相差不大。

#### 4.4.3 实例二

本实验区为基岩海岸,有两种数据:实地测量的痕迹岸线(离散采样点)和点云平均间距为 0.1m 的船载 LiDAR 点云,约 40 万点,因此,本实例中将以实测的痕迹岸线为比对岸线,分析基于 LiDAR 点云提取海岸线的可靠性,同时对图像分割改进方法的优越性进行证明。

以实例附近的长期验潮站实测水位数据计算平均大潮高潮面在平均海面上的高度,再据高程异常成果,计算得到平均大潮高潮面的大地高为 10.32m(与点云数据的坐标系统相统一)。

##### 4.4.3.1 图像分割法

图 4.19 为利用图像分割法提取海岸线的步骤,其中图 4.19a 为滤波后构建的海岸 DEM,图 4.19b 为以 MHWS 高程为阈值,将 DEM 转化为水陆二值图像,图 4.19c 为经过图像处理提取的海岸线。

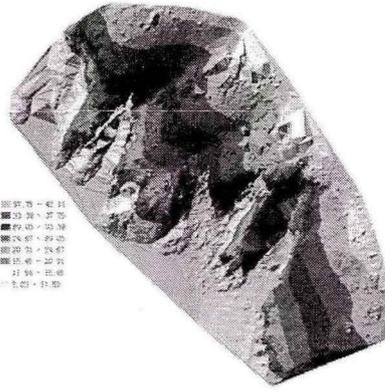


图 4.19a 海岸 DEM



图 4.19b 水陆二值图

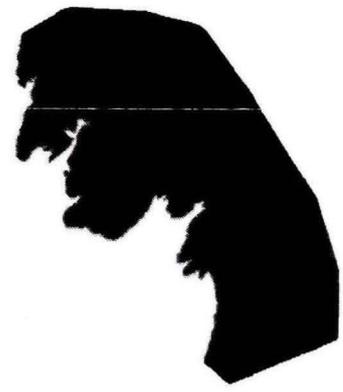


图 4.19c 提取的海岸线

图 4.19 图像分割法提取海岸线

#### 4.4.3.2 图像分割改进法

首先,对 LiDAR 点云进行二值化处理,得到初始的水陆二值图,如图 4.20a;其次,设置面积阈值,删除伪水域区域和伪陆域区域,如图 4.20b;最后,对二值化图像运用形态学算子,先膨胀后侵蚀,光滑锯齿形边界线,矢量化二值图像得到海岸线,如图 4.20c 中红线所示。



图 4.20a 初始水陆二值图像



图 4.20b 辨伪取真后结果



图 4.20c 提取的海岸线

图 4.20 图像分割改进方法提取海岸线的主要步骤截图

将改进岸线、分割岸线、等值线追踪法提取的海岸线(下文简称“等值岸线”)和实地测量的痕迹岸线叠加显示分析,如图 4.21a 所示,其中红色线为改进岸线,紫色线为分割岸线,黄色线为等值岸线,蓝色点为痕迹岸线实测的采样点。图 4.21b 和图 4.21c 分别为图 4.21a 中的蓝色框和黑色框的局部放大图。

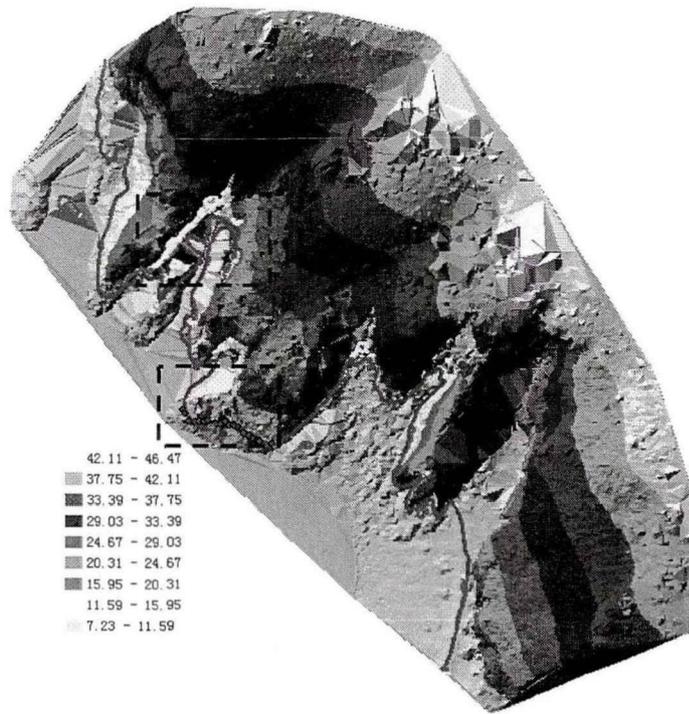


图 4.21a 全图显示



图 4.21b 蓝色方框的区域放大图

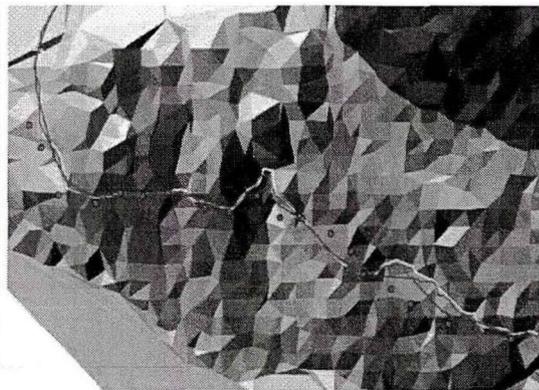


图 4.21c 黑色方框的区域放大图

图 4.21 改进岸线、等值岸线、分割岸线和痕迹岸线的叠加显示

#### 4.4.3.3 结果分析

下面从效率与可靠性角度分别对多种方法提取的海岸线进行比较。

##### (1) 效率对比分析

选择 3 名实验人员（具备初步的 LiDAR 数据处理能力）分别采用图像分割法（下文简称“分割算法”）和本文提出的图像分割改进法（下文简称“改进算法”）利用本实例的 LiDAR 点云提取海岸线，完成海岸线提取的时间如表 4.1 所示。

表 4.1 采用不同算法所用时间的统计（单位：分钟）

方法	实验员 1	实验员 2	实验员 3	平均时间
分割算法	30	37	42	37
改进算法	11	13	15	13

从表 4.1 可知,采用改进算法提取海岸线的时间明显少于分割算法所用时间。通过观察分析实验员的处理过程,在采用分割算法时,近 1/3 的时间应用在 LiDAR 点云的滤波分类,近 1/3 的时间应用在 DEM 的构建;而采用改进算法时,由于省略了这些过程,作业员的工作量明显减少,花费时间也大幅度的减少。

## (2) 可靠性分析

痕迹岸线是指滩涂上沙砾等堆积形成的痕迹、岩石等因海水浸泡形成的痕迹,是实地测量的唯一可视依据<sup>[12, 34-35]</sup>,在实地测量中,一般都以痕迹岸线为海岸线。本实验区是岩石陡崖,岩石上的痕迹线虽呈现一定的波浪状起伏,但整体上高程差异不大,以无棱镜全站仪实测痕迹线时,每个测量点都充分顾及周边数米内的整体变化情况,取上端的平均位置。痕迹岸线虽不能与平均大潮高潮线完全对应,但两者在曲折变化形态上应该是一致的。所以,各方法的可靠性都以痕迹岸线作对比,并分为定性分析与定量分析。

### 1) 定性分析

从海岸线的形态特征角度考察图 4.21,分割岸线(紫色线)和改进岸线(红色线)非常接近,明显好于等值岸线,形态较为平滑,这是因为都对水陆二值图进行了辨伪取真的处理。但相比于改进岸线,分割岸线与等值岸线的平面位置和岸线趋势更为相似,这是因为分割岸线与等值岸线均是从海岸 DEM 上提取岸线,当然海岸 DEM 中不合理的 TIN 及构建过程中产生的误差会传递到分割岸线中,而改进岸线则是直接将 LiDAR 点云转换为水陆二值图像,因此改进岸线更为合理。当海岸 DEM 中的不合理 TIN 较多时,改进岸线与其余两种岸线的形态差异较大(如图 4.21b 所示),当 TIN 较为规则合理时,这种差异明显减少(如图 4.21c 所示),由此可见,等值岸线和分割岸线受构建的海岸 DEM 影响较大。

图 4.21c 是痕迹岸线(以实地测量的采样点形式显示,蓝色)、改进岸线、分割岸线和等值岸线叠加的放大图。可清楚地看出,改进岸线、分割岸线非常接近,而痕迹岸线则与这两者在形态上有一定的差异,这是因为痕迹线并不是单纯的平均大潮高潮线,而是受到了波浪(涌浪)与滩涂相互作用的影响。

### 2) 定量分析

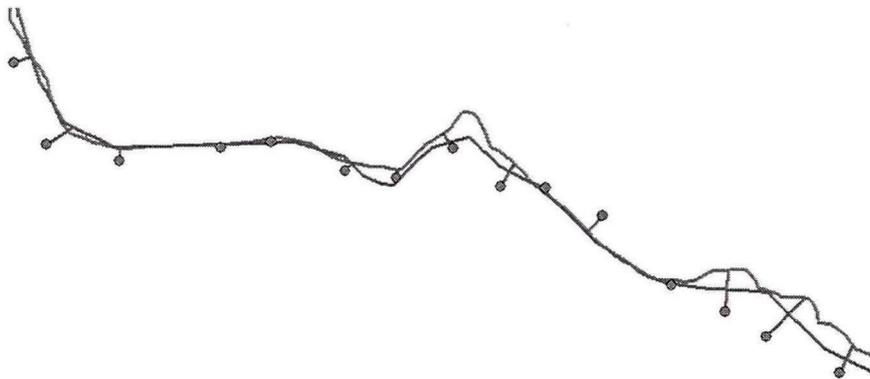


图 4.22 痕迹岸线的测量点分布

通过痕迹岸线上的 15 个测量点 (如图 4.22 所示), 分别作 LiDAR 岸线的垂线, 与改进岸线 (红色) 和分割岸线 (紫色) 相交。改进岸线和分割岸线到痕迹岸线的平面距离如图 4.23 所示, 垂直差异如图 4.24 所示。

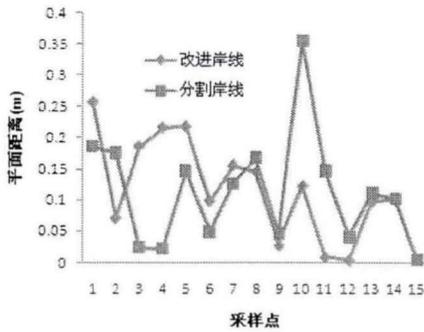


图 4.23 平面距离

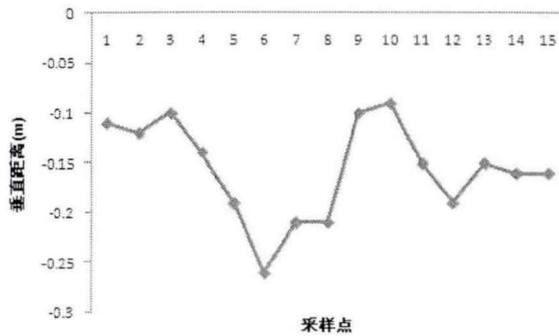


图 4.24 垂直差异

按 (4.4) 式、(4.5) 式与 (4.6) 式分别计算平面距离、垂直差异的平均值、均方根与标准差, 结果列于表 4.2。

表 4.2 改进岸线、分割岸线与痕迹岸线的比较 (单位: m)

项目	LiDAR 岸线	平均值	均方根	标准差
与痕迹岸线的平面距离	改进岸线	0.112	0.138	0.081
	分割岸线	0.114	0.143	0.091
与痕迹岸线的垂直差异	改进岸线	-0.156	0.163	0.049
	分割岸线	-0.156	0.163	0.049

从岸线的平面位置看 (考察图 4.23 与表 4.2), 改进岸线比分割岸线更接近痕迹岸线, 从岸线的垂直差异看 (考察图 4.24 与表 4.2), 由于改进岸线和分割岸线都是基于 LiDAR 点云和 MHWS 高程推算得到, 是固定值, 而痕迹岸线是岩石因海水浸泡形成的痕迹, 受一定的主观因素影响, 因此痕迹岸线的高程不一。但整体上, 分割岸线与改进岸线可认为在整体上与痕迹岸线是吻合的。

岸线平面位置的确定同时受到海岸带坡度的影响, 但对于本实验区域, 坡度变化不大 ( $1^\circ$  左右), 所以该指标对提取海岸线的影响不大, 不予考虑。

总体上, 图像分割法提取的海岸线平滑可靠, 本文提出的改进方法省略海岸 DEM/海岸 DSM 的构建, 避免了其在构建过程中误差的影响, 使得提取的海岸线更可靠、形态更平滑, 大大减少了海岸线后期编辑处理的工作量。

#### 4.4.4 实例三

本实验区为沙质海岸, 有两种数据, 实地测量的痕迹岸线 (离散采样点) 和点云平均间距为 1m 的船载 LiDAR 点云, 约 12 万点。因此, 本实例将以实测的痕迹岸线为比对岸线, 分析基于 LiDAR 点云提取海岸线的可靠性, 同时对图像分割改进方法的优越性进行证明。

由中国近海精密潮汐模型<sup>[77]</sup>计算该处的平均大潮高潮面在平均海面上的高度，再以似大地水准面模型<sup>[127]</sup>内插该处的高程异常，进而计算得到平均大潮高潮面的大地高为 8.63m（与点云数据的坐标系统相统一）。

#### 4.4.4.1 图像分割法

首先由 LiDAR 原始点云滤波分类出的真实地面点云构建海岸 DEM，如图 4.25a 所示；再以 MHWS 大地高为阈值，转化为水陆二值图，如图 4.25b 所示；然后对二值图进行“水陆目标判辨”及“闭运算”等图像处理运算，提取其边缘线即为海岸线，如图 4.25c 所示。整个岸线提取过程共花费 35 分钟。

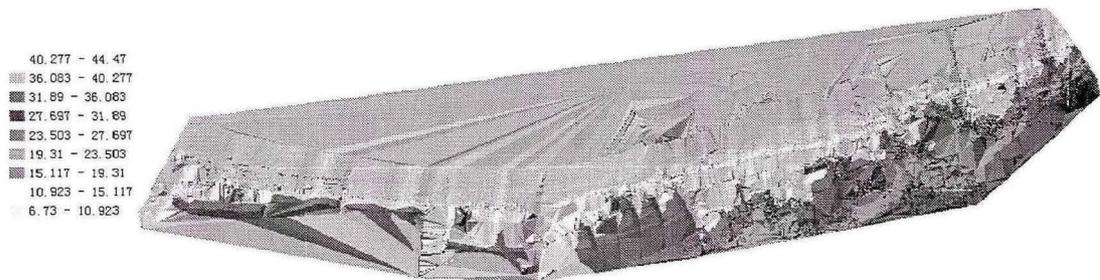


图 4.25a 构建的海岸 DEM

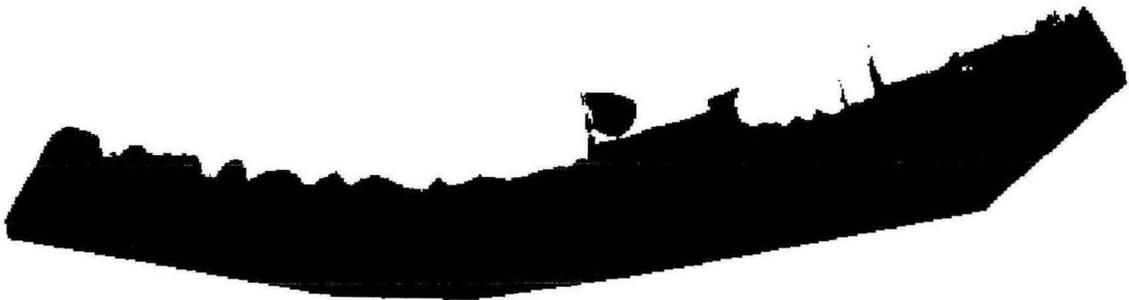


图 4.25b 生成水陆二值图像

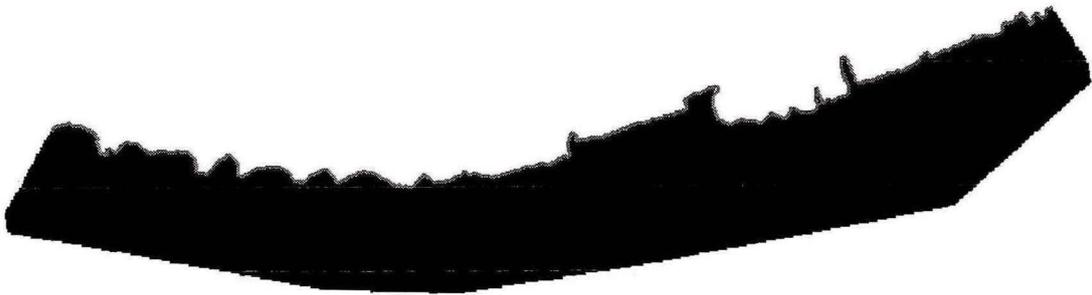


图 4.25c 提取的海岸线

图 4.25 图像分割法提取海岸线

#### 4.4.4.2 图像分割改进法

首先以 MHWS 大地高为阈值，将 LiDAR 点云转化为水陆二值图，如图 4.26a 所示；其次，对生成的二值图进行“水陆目标判辨”及“闭运算”等图像处理运算，如图 4.26b 所示；最后，提取二值图像的边缘即得海岸线，且进行简单的平滑，如图 4.26c 所示。整个岸线提取过程共花费时间 12 分钟。

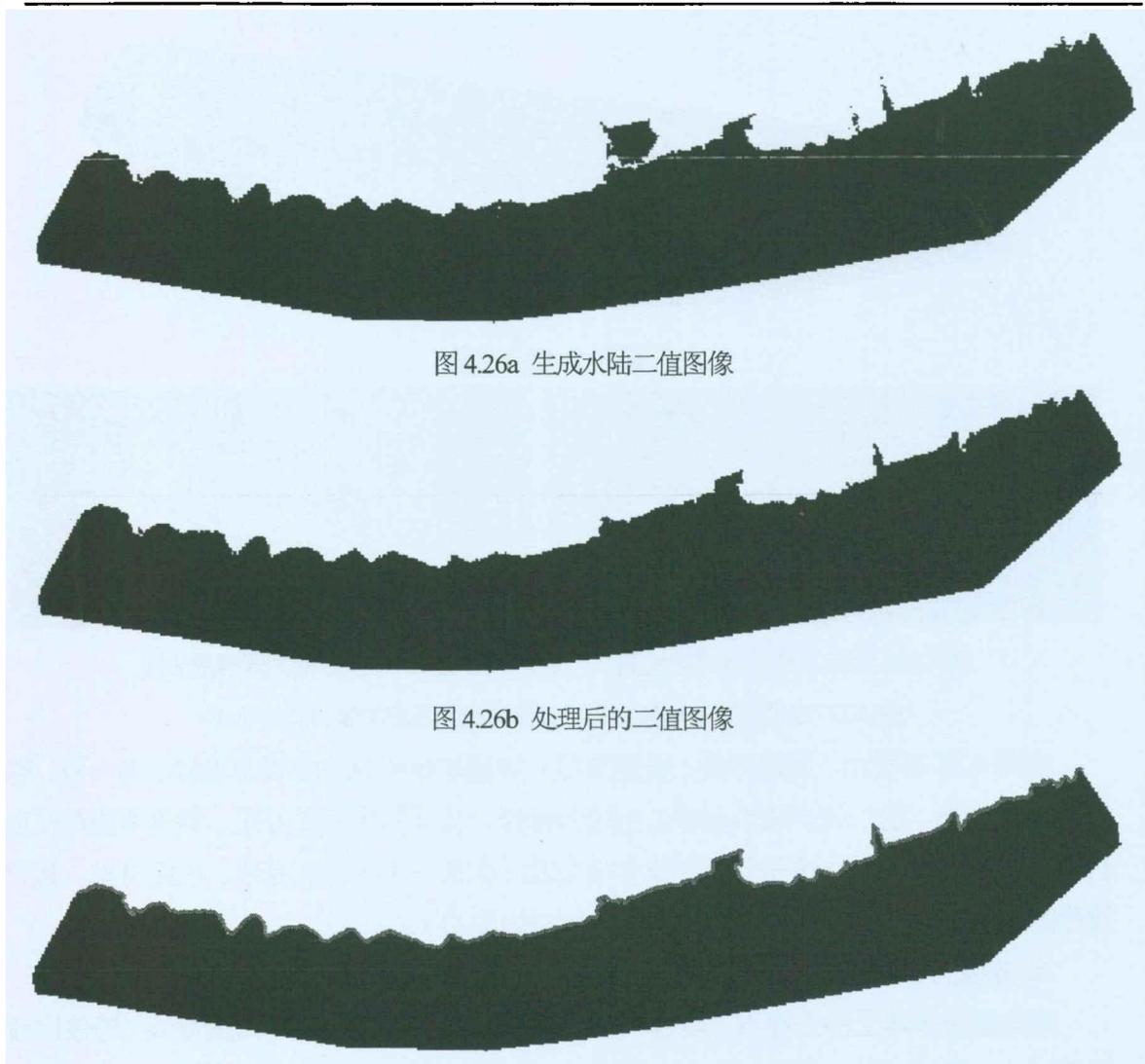


图 4.26a 生成水陆二值图像

图 4.26b 处理后的二值图像

图 4.26c 提取的海岸线

图 4.26 图像分割改进法提取海岸线

#### 4.4.4.3 结果分析

##### (1) 效率对比分析

对比不同方法所使用的时间可得，改进法花费时间明显少于分割法花费时间。根据实验观察可知，正如 4.4.3.3 所述，由于改进法直接对 LiDAR 点云进行数据处理，摒弃了滤波分类并构建海岸 DEM 的过程，时间大大缩短至分割法的 1/3，效率得到极大提高。

##### (2) 可靠性分析

###### 1) 定性分析

将改进岸线、分割岸线、等值岸线和实地测量的痕迹岸线叠加显示于海岸 DEM 如图 4.27a 所示，其中红色线为改进岸线，紫色线为分割岸线，黄色线为等值岸线，蓝色点为痕迹岸线实测的采样点。图 4.27b 和图 4.27c 分别为图 4.27a 中的蓝色框和黑色框的局部放大图。

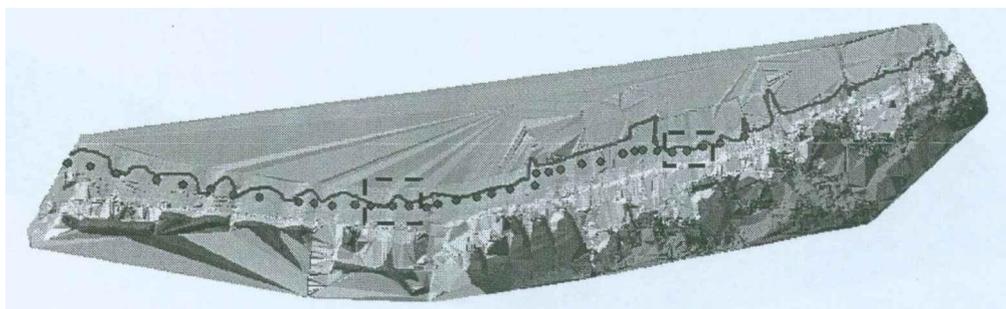


图 4.27a 叠加全图

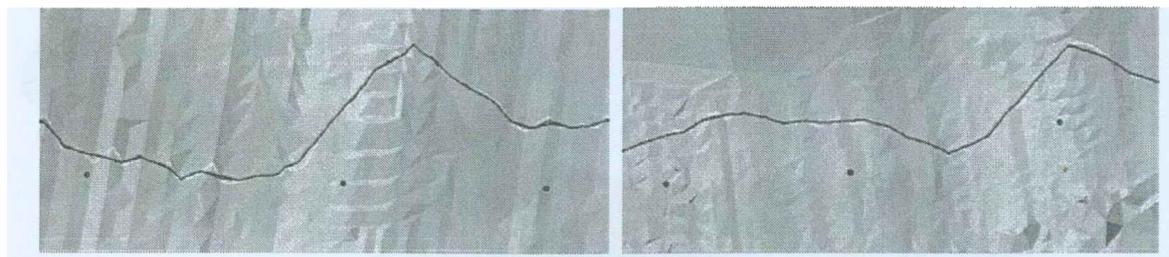


图 4.27b 蓝色方框的区域放大图

图 4.27c 黑色方框的区域放大图

图 4.27 改进岸线、等值岸线、分割岸线和痕迹岸线的叠加显示

由图 4.27 可看出，改进岸线、分割岸线、等值岸线和痕迹岸线的趋势走向一致，除了痕迹岸线外，前三种岸线形态特征也较为相似。从局部放大图可见，等值岸线存在曲折抖动现象，而改进岸线和分割岸线非常接近，在某些区域近似重合。由此可见，从岸线形态特征和平面位置上看，改进法和分割法提取的岸线相当。

## 2) 定量分析

选取痕迹岸线上的采样点（共 20 个）分别作改进岸线和分割岸线的垂线（等值岸线过于抖动、曲折，因此不予考虑），如图 4.28 所示。图 4.29 和图 4.30 分别是改进岸线、分割岸线到采样点的平面距离和垂直距离。

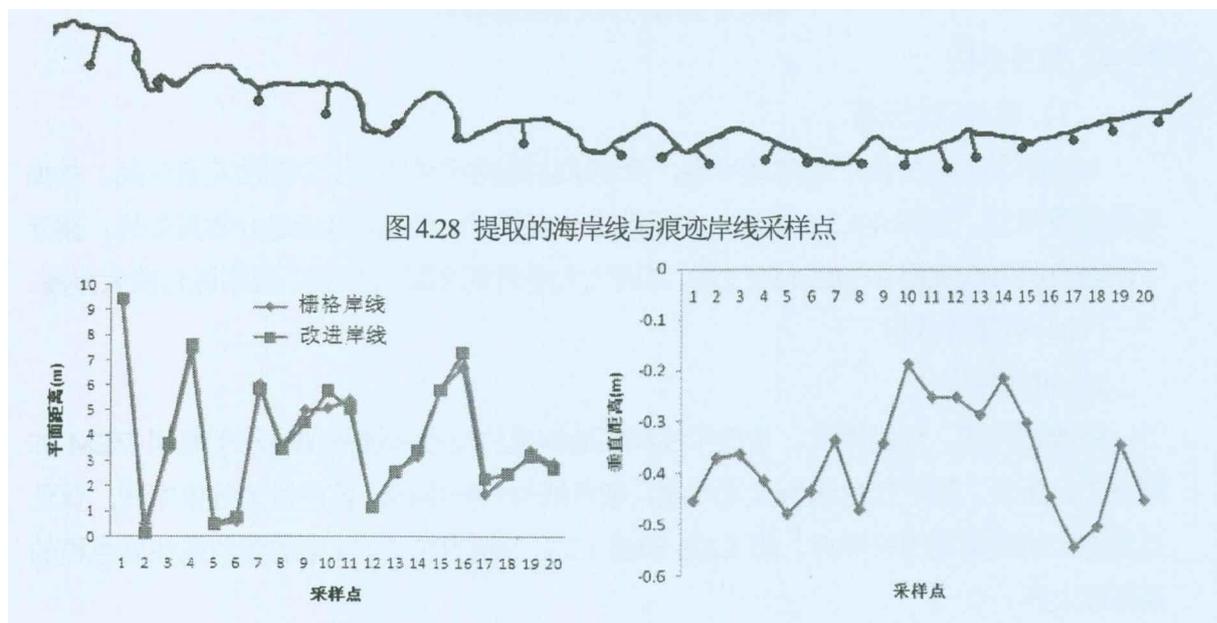


图 4.28 提取的海岸线与痕迹岸线采样点

图 4.29 LiDAR 岸线至采样点的平面距离

图 4.30 LiDAR 岸线至采样点的垂直距离

按 (4.4) 式、(4.5) 式与 (4.6) 式分别统计其平均距离和垂直距离的平均值、均方根与标准差, 统计结果列于表 4.3。

表 4.3 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m)

	LiDAR 岸线	平均值	均方根差	标准差
平面距离	改进岸线	3.820	4.502	2.445
	分割岸线	3.890	4.601	2.521
垂直距离	改进岸线	-0.372	0.385	0.100
	分割岸线	-0.372	0.385	0.100

由表 4.3 可知, 改进岸线与痕迹采样点的平面距离在统计上略好于分割岸线, 量值达到 4m, 主要是因本实例为平缓沙滩, 坡度小。

#### 4.4.5 实例四

本实验区为沙砾海岸, 有两种数据: 实地测量的痕迹岸线 (离散采样点) 和点云平均间距为 0.1m 的船载 LiDAR 点云, 约 17 万点。因此, 本实例将以实测的痕迹岸线为比对岸线, 分析基于 LiDAR 点云提取海岸线的可靠性, 同时对图像分割改进方法的优越性进行证明。

以长期验潮站实测水位数据计算平均大潮高潮面在平均海面上的高度, 再据高程异常成果, 计算得到平均大潮高潮面的大地高为 10.32m (与点云数据的坐标系统相统一)。

##### 4.4.5.1 图像分割法

构建海岸 DEM, 如图 4.31a 所示; 再以 MHWS 大地高为阈值, 转化为水陆二值图像, 如图 4.31b 所示; 然后将二值图进行图像处理, 提取其边缘线, 并进行简单修编后即得海岸线, 如图 4.31c 所示。

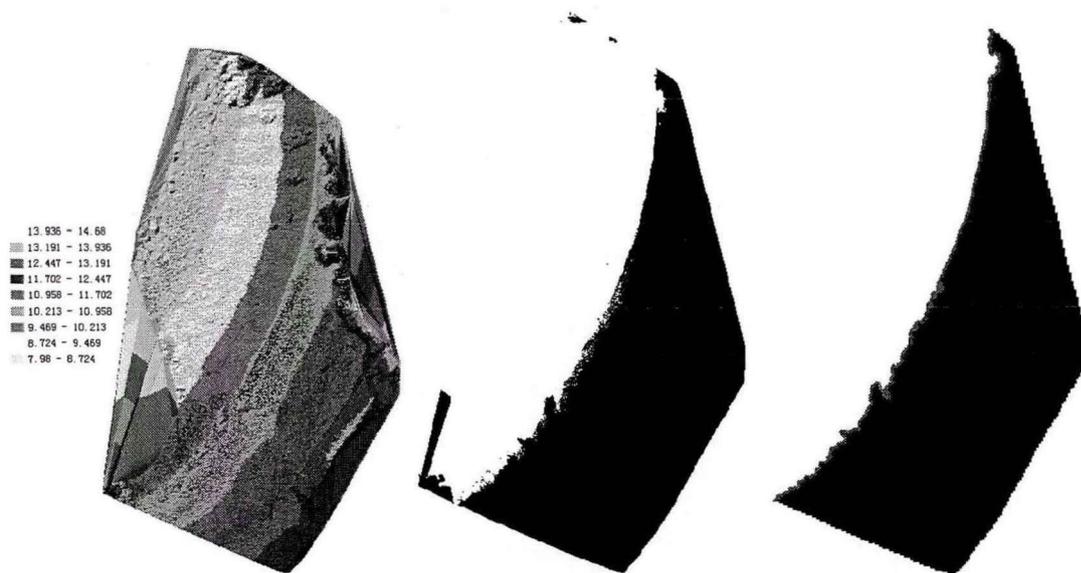


图 4.31a DEM

图 4.31b 水陆二值图

图 4.31c 提取的海岸线

图 4.31 图像分割法提取海岸线

#### 4.4.5.2 图像分割改进法

以 MHWS 大地高为阈值，将 LiDAR 点云转化为水陆二值图，如图 4.32a 所示；再对生成的二值图进行“水陆目标判辨”及“闭运算”等图像处理运算，提取二值图像的边缘即得海岸线，如图 4.32b 所示。

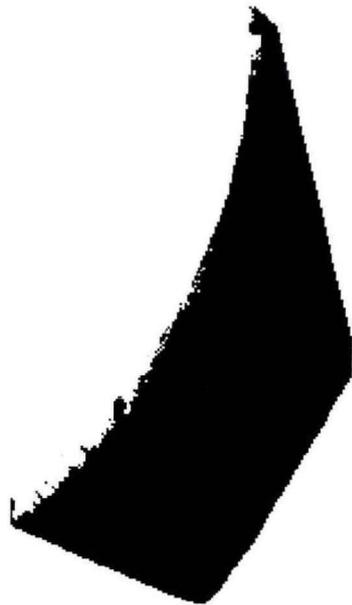


图 4.32a 原始的水陆二值图

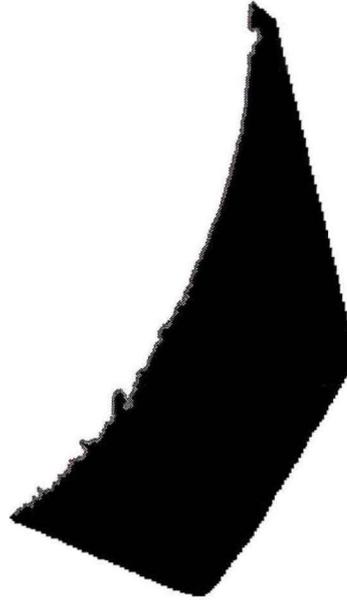


图 4.32b 提取的海岸线

图 4.32 图像分割改进法提取海岸线

#### 4.4.5.3 结果分析

##### (1) 定性分析



图 4.33a 叠加全图



图 4.33b 黑色框的区域放大图

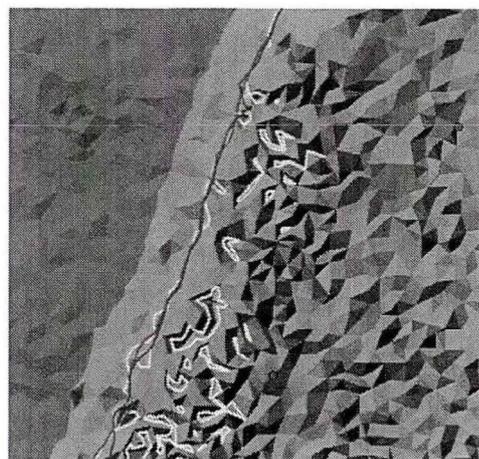


图 4.33c 蓝色框的区域放大图

图 4.33 改进岸线、等值岸线、分割岸线和痕迹岸线的叠加显示

将改进岸线、分割岸线、等值岸线和实地测量的痕迹岸线叠加显示于海岸 DEM，如图 4.33a 所示，其中红色表示改进岸线，紫色表示分割岸线，黄色表示等值岸线，蓝色表示痕迹岸线实测的采样点。图 4.33b 和图 4.33c 分别为图 4.33a 中的蓝色框和黑色框的局部放大图。

从图 4.33a 中可见，改进岸线、分割岸线、等值岸线和痕迹岸线的趋势走向一致。但从局部放大图 4.33b 与 4.33c 可见，等值岸线存在曲折抖动现象，而改进岸线和分割岸线非常接近。由此可见，从岸线形态特征和平面位置上看，改进法和分割法提取的岸线相当。

## (2) 定量分析

选取痕迹岸线上的采样点（共 13 个）分别作改进岸线和分割岸线的垂线（等值岸线过于抖动、曲折，因此不予考虑），如图 4.34 所示。图 4.35 和图 4.36 分别是改进岸线、分割岸线到采样点的平面距离和垂直距离。

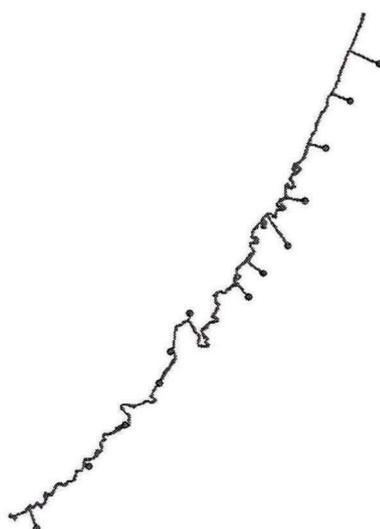


图 4.34 改进岸线、分割岸线与痕迹采样点分布

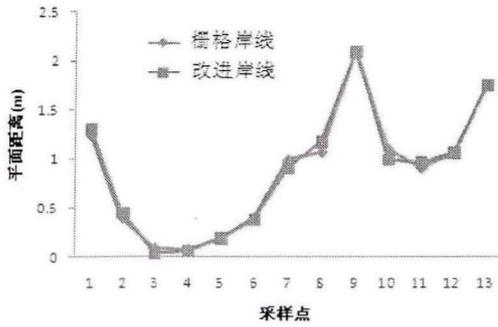


图 4.35 LiDAR 岸线至采样点的平面距离

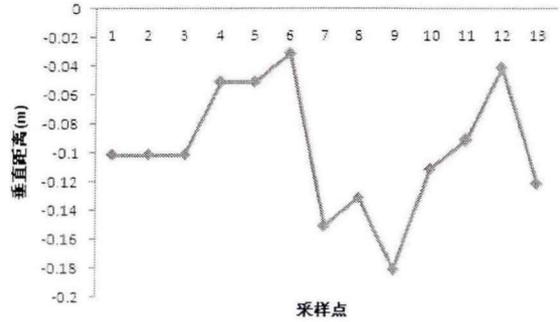


图 4.36 LiDAR 岸线至采样点的垂直距离

按 (4.4) 式、(4.5) 式与 (4.6) 式分别统计其平均距离和垂直距离的平均值、均方根与标准差, 统计结果列于表 4.4。

表 4.4 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m)

	LiDAR 岸线	平均值	均方根	标准差
平面距离	改进岸线	0.862	1.051	0.628
	分割岸线	0.873	1.066	0.637
垂直距离	改进岸线	-0.097	0.106	0.044
	分割岸线	-0.097	0.106	0.044

与痕迹采样点的垂直距离的平均值代表了理论计算的平均大潮高潮面与痕迹线之间的差异。由表 4.4 知, 该实例的垂直差异在 10cm 内, 小于前面三个实例, 原因主要是本实例中平均大潮高潮面在平均海面上高度是由长期验潮站实测水位计算、高程异常也是采用实测的结果, 而前面三个实例分别由精密潮汐模型与似大地水准面模型内插, 因此精度相对更高。10cm 的差异说明平均大潮高潮线与基岩上的痕迹线在整体上是吻合的, 也说明第三章设计的统计算法是合理的。

## 4.5 本章小结

1、介绍了国际上常用的海岸剖面法与等值线追踪法, 分析指出: 海岸剖面法运算量大、剖面的取样和分析是一个单调的、耗时的过程, 受主观因素影响大; 等值线追踪法未针对海岸线提取进行优化, 提取的海岸线碎乱, 存在众多的封闭多边形, 需后期大量的人工修订作业。

2、介绍了图像分割法的基本原理, 针对滤波与格网化这一步骤提出了改进。实例分析表明, 提出的改进方法省略海岸 DEM 的构建, 避免了其在构建过程中误差的影响, 使得提取的海岸线更可靠、形态更平滑, 大大减少了海岸线后期编辑处理的工作量。

3、通过四个实例的 LiDAR 点云、人工实地测量痕迹岸线、遥感影像与 DEM 等多源数据, 对等值线追踪法、图像分割法与图像分割改进法的普遍适用性进行检验。通过对比分析, 得出以下结论:

(1) 基于 LiDAR 点云数据提取海岸线的方法中, 等值线追踪法提取的海岸线普遍

碎乱、存在众多封闭多边形。而图像分割改进法与图像分割法提取的岸线在曲折趋势上基本一致，特别是对于沙质岸和沙砾岸，两者在形态特征和平面位置上都非常接近。但整体上看，改进岸线要比分割岸线更平滑、形态更合理。

(2) DEM 作为我国基础地理信息的重要数据之一，通过其提取的 MHWS 海岸线与由 LiDAR 数据提取的岸线非常相似，由此证实了基于 LiDAR 数据提取海岸线的可靠性。

(3) 与实测痕迹测量点的比较证明了图像分割法与图像分割改进法从 LiDAR 数据中提取岸线的可靠性，且无论在提取效率还是在提取岸线的形态特征描述上，图像分割改进法均优于图像分割法。

4、平均大潮高潮线与痕迹岸线在整体上是吻合的，第三章设计的统计算法是合理的。

## 第五章 点云栅格化提取海岸线方法

### 5.1 引言

上一章分析了国际上常用的海岸线提取方法：海岸剖面法直接根据 LiDAR 点云进行计算，运算量大，且海岸线的形态光滑程度取决于海岸剖面的选取，主观因素影响大；等值线追踪法实现相对简单，但生成的海岸线抖动较大，成锯齿形，存在破碎线段，需后期大量的人工修订工作；图像分割法自动化程度高，提取海岸线也相对较好；本文提出的图像分割改进方法进一步提高了效率与精度。但图像分割法及改进，都是以平均大潮高潮面高程为界，将 DEM 或点云转换为二值图像，即该图像只存在黑与白两色。若提取其它辅助的海岸要素（如 0m 等高线、平均高潮线、0 米等深线等），则意味着标识黑与白两种像元值的高程分界发生了改变，所以必须重新从二值化开始。对于图像分割改进法来说，每提取一种潮汐基准线，就需操作整个过程。同时，根据图像分割及其改进法提取的海岸线，其形态特征描述程度与点云的密度成正比，当点云密度大时，岸线形态描述细致，而当点云密度偏小时，岸线形态描述较为粗略，无法根据测绘需求直接提供所需比例尺的相应岸线成果。基于如上两点考虑，本章提出了一种新的海岸线提取方法——LiDAR 点云栅格化法，以期在提取海岸线的同时，便于提取多种潮汐特征线。并利用实例对前一章的图像分割改进方法与点云栅格化法进行对比分析，以检验点云栅格化法的可靠性。最后，从制图角度出发，结合海岸的类型特征，对提取的海岸线进行综合判绘，提供符合测绘需求的海岸线。

### 5.2 点云栅格化法的设计思路

图像分割法及改进方法是以潮汐基准面为界，将 DEM 或点云分为黑白两色，可理解为：以两种颜色描述整个 DEM 或点云的高程变化，黑白分界线即为潮汐基准线。因此，当潮汐基准面变化时（如平均海面、深度基准面等），必须重新二值化才能通过提取黑白分界线而提取对应的潮汐基准线。

若能以丰富的色彩或灰度来描述该高程变化，则在同一图像中可依不同潮汐基准面的高程，搜索出该高程所在色彩或灰度并相连，该连接线相当于图像分割法中的边缘线，再实施相似的图像运算，进而提取出该连线，即为对应的潮汐基准线。与图像分割法及其改进方法相比，这将便于提取多种潮汐基准线。其中，将 DEM 或点云转化为丰富的色彩或灰度的过程是由栅格化来实现。因此，本文称该方法为栅格化法。具体流程如 5.1 所示。

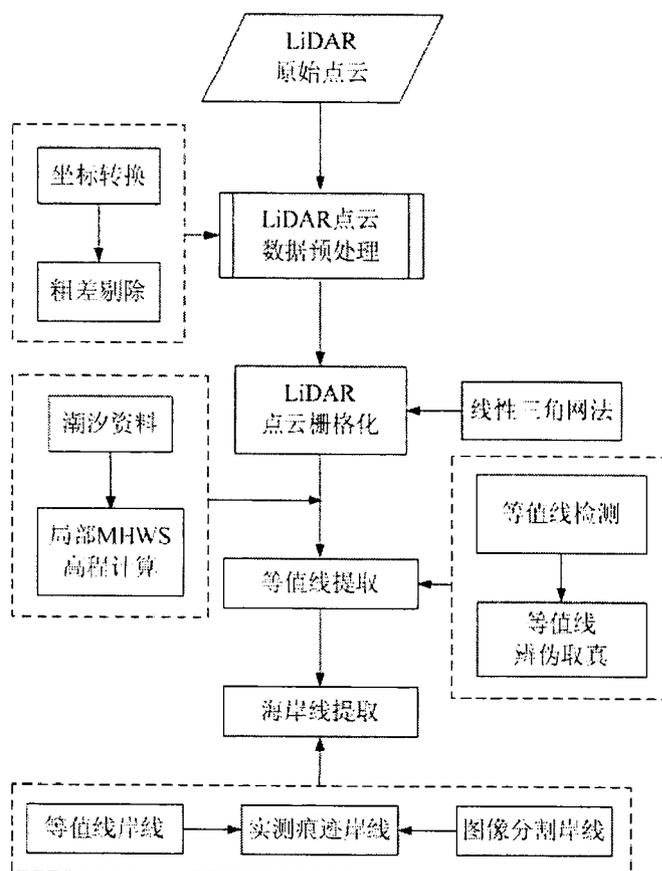


图 5.1 栅格化提取海岸线的流程图

图 5.1 与图像分割改进法流程图（图 4.5）相比，差异主要是将图像分割法中的“二值化”与“图像处理”改为栅格化法的“点云栅格化”与“等值线提取”。这两点差异也是栅格化法的核心步骤，需重点研究的方面。

### 5.3 点云的栅格化

LiDAR 点云的栅格化是指将 LiDAR 点云划分为若干个大小相同的栅格单元（又叫做像素），每个栅格单元具有唯一的行列地址，每个栅格单元的值则是由单元内的点云高程值采用一定的算法计算得到，通常以色彩（灰度）的方式表示。栅格化主要涉及两个问题：栅格单元大小的确定与栅格单元属性值的确定。

#### 5.3.1 栅格单元大小的确定

栅格单元的大小，即分辨率，决定着 LiDAR 数据描述地形表面的详细程度，栅格越小，表示越详细，同时也带来了大量的冗余数据，例如当栅格大小接近于平均点云距离时，栅格数据和 LiDAR 数据所描述的地表详细程度一致，也就失去了点云栅格化的意义；栅格越大，表示越粗略，精度也随之降低，当栅格过大时，将不能发挥 LiDAR 数据密度高的优点。栅格单元的大小决定着通过 LiDAR 数据描述地形表面的详略程度，决定着最终产品的精度，所以又称为栅格数据的精度。

栅格单元大小的确定是在数据量与精度之间找到平衡点，这与诸多方面的因素有关，

例如比例尺、图上最小分辨率等,但目前未有相关的标准规范和文献来规范数据的分辨率与海岸线精度之间的关系。航海图的目的是为了保障航海安全,其中当比例尺大于 1:50 000 时归类为港湾图,港湾图在详细描述港湾锚地及出入口航道通航条件的同时,对海岸也进行了详细表示<sup>[136]</sup>。港湾图是供舰船进出港口,及停泊抛锚之用,因此其所详细描述的海岸线一般为人工岸线(人工岸线位置无疑义,且形态规整),对自然岸线的大尺度描述很少。而海岸带地形图则详细表示了海岸线及其附近的地形要素,海岸带地形图的比例尺一般为 1:10 000、1:25 000,有时也根据需要采用 1:5 000、1:5 0000 比例尺<sup>[137]</sup>,即海岸带地形图的最大比例尺为 1:5 000,最小比例尺为 1:5 0000。本文分析认为,栅格单元大小的确定问题可从以下两个方案中进行选择:

方案一:取决于图上最小分辨率。

根据肉眼的视觉误差及图上显示误差,一般图上最小分辨率为 0.1mm,对于 1:5 000 的海岸带地形图,实际距离为 5m,即对 LiDAR 点云进行栅格化的最小栅格单元大小为 5m。

方案二:取决于海岸线附近的地形复杂程度。

经过栅格化,地形变化将转化为色彩或灰度的变化。因此,地形越复杂,就需要越丰富的色彩或灰度变化来描述,即栅格单元大小应越小。地形复杂程度的量化指标可选择海岸带地形图等高线的基本等高距。根据相关标准规范<sup>[137]</sup>可推得 1:5 000 海岸带地形图的基本等高距在平原/丘陵地区为 1m、低山地区为 2.5m、中山地区为 2.5m,以及高山地区为 5m。栅格单元大小可选为对应比例尺所要求基本等高距的 1/2,具体为:在平原/丘陵地区对 LiDAR 点云进行栅格化的最小栅格单元大小为 0.5m、低山地区为 1.25m、中山地区为 1.25m,以及高山地区为 2.5m。

对比上述两个方案,方案一确定的 5m 栅格单元大小,对于点云平均间距为厘米级或米级的 LiDAR 数据来说,浪费了大量的原始数据。而方案二确定的栅格单元大小较合适,基本与点云平均间距相匹配。所以本文选择第二个方案来确定栅格单元的大小。

### 5.3.2 栅格单元属性值的确定

栅格单元属性值表示的是高程值(一般通过色彩/灰度值来呈现),可由单元内 LiDAR 点云的高程值按照一定的插值方法计算得到,主要取决于插值方法的选择,不同的插值方法得到不同的栅格属性值。这将由后续选定的栅格化算法来确定。

### 5.3.3 栅格化算法

栅格化传统数据源(间隔一般在几十米以上)时,由于数据稀疏,要获得所需点的数值(如高程值等)非常困难,一般情况下是采集所研区域的部分采样点(该采样点具有准确数值),然后通过插值算法由采样点插值出栅格的属性值,其实质为由稀疏点插值加密的过程,如图 5.2。不同于传统数据源的栅格化, LiDAR 点云数据非常密集,点云

平均间距一般为米级，甚至达毫米级，因此对 LiDAR 点云栅格化时，一般是由数个或数十个点云通过计算得到栅格的属性值，其实质为由密集点均衡到相对稀疏点，如图 5.3。

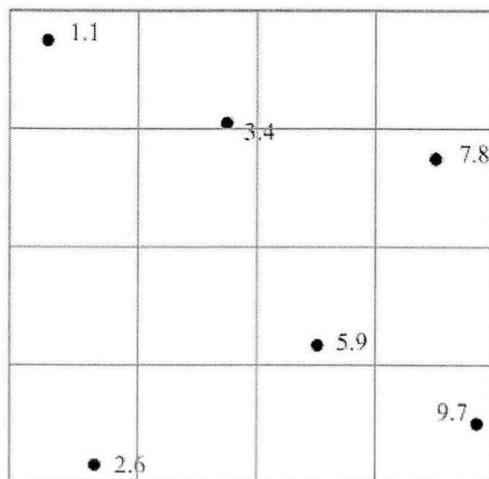


图 5.2 稀疏采样点及其栅格化示意

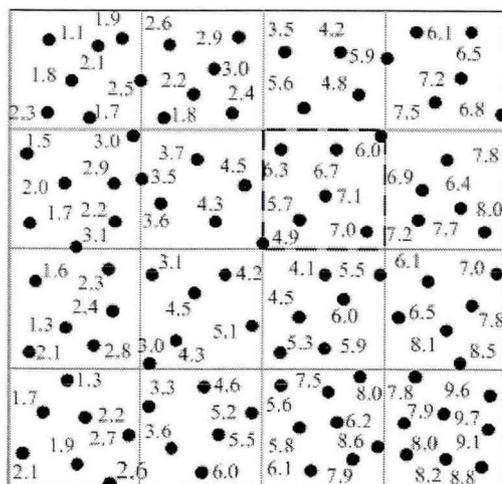


图 5.3 LiDAR 点云栅格化示意

本文主要考察四种常用的算法：反距离加权法、最近邻点法、移动平均法以及线性三角网法<sup>[134,138-139]</sup>，通过对比分析来确定适合于海岸地形的栅格算法。

反距离加权法是指栅格的属性值通过栅格中心点（一般指栅格的几何中心位置）与 LiDAR 点云之间的距离倒数为权重进行加权平均，离栅格中心点越近的点云，权重越大；最近邻点法是指选择离栅格中心点最近的点云作为栅格的属性值；移动平均法是指将搜索区域内点云的平均值作为栅格的属性值；线性三角网法通过连接点云构建三角网（每个三角形独立、唯一），根据三角网的属性值（三角网的属性值则由组成该三角形的点云线性插值而得）均匀分配栅格的属性值。任何的栅格化算法都会产生误差，可通过下式评估不同栅格化算法的精度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z'_i - Z_i)^2} \quad (5.1)$$

式中,  $n$  表示选择并预留作为检查点的 LiDAR 点云的总数, 高程值为  $Z_i (i=1,2,\dots,n)$ , 而  $Z'_i$  为栅格化这些检查点的像素值 (高程值)。

以点云平均间距为 0.1m、约 22 万个点的 LiDAR 点云数据为例, 将其进行栅格化 (栅格单元大小为 0.5m), 按 (5.1) 式对上述四种栅格化方法的精度进行统计。在同等条件下, 精度与耗时统计结果列于表 5.1。

表 5.1 四种栅格化方法的精度与耗时统计

指标	反距离加权法	最近邻点法	移动平均法	线性三角网法
RMSE/m	0.89	1.02	5.83	0.95
耗时/s	112	14	24	2

由表 5.1 可知, 从精度指标出发, 反距离加权法精度最高, 线性三角网法次之, 移动平均法最差; 从栅格化所用时间出发, 线性三角网法耗时最短, 最近邻点法次之, 反距离加权法耗时最长, 为线性三角网法的几十倍。对于 LiDAR 这样的海量数据, 点云总数可达几百万、甚至几千万, 除了精度方面的要求外, 效率也是至关重要的。因此, 综合考虑, 线性三角网法精度较高, 耗时最短, 本文将选其作为 LiDAR 点云栅格化的方法。

## 5.4 等值线提取

该环节的作用是可靠提取设置高程所在的等值线, 主要包括两个步骤:

### (一) 等值线检测

寻找属性值为某一高程值的栅格单元, 采取 8-邻域方式搜索并追踪下一个这样的栅格单元, 当等值线为封闭曲线时, 追踪到初始栅格单元时终止; 当等值线不封闭时, 则终止于数据边界; 当存在多条等值线时, 按顺序编号, 按照追踪完一条再追踪另一条方式直到检测完毕, 矢量化得到等值线。只要给定某一高程值, 通过该步骤便可检测到具有任意高程值的等值线。

### (二) 等值线的判伪取真。

该步骤与图像分割法类似。尽管构建栅格数据的过程能够滤除点云数据中的高频噪声, 但由于藻类、海草残骸、波浪等原因的影响, 由栅格数据检测的等值线并不全是真正海岸线, 不可避免地存在一些小的、不连续的多边形, 因此需要对检测到的等值线进行处理。可通过设置长度阈值 (针对未封闭的线段) 和面积阈值 (针对封闭多边形) 以排除掉多余的伪目标, 可减少后期海岸线的编辑处理工作量。

## 5.5 实例分析

为更清晰的分析证明点云栅格化法的可靠性和合理性, 本节将同样使用 4.4.1 节的试验数据, 由四个不同海岸类型的实验区进行实例分析, 对该方法的普适性进行检验。通过 LiDAR 点云数据提取平均大潮高潮线, 并以 DEM 数据、实测的痕迹岸线、遥感影像

的干湿线和瞬时水边线等多种数据源进行辅助验证,在第四章的基础上,进一步证明潮汐基准线与可视特征岸线之间相近但不相同的关系,明确基于平均大潮高潮面的海岸线具有客观的、严谨的测绘意义和法律地位,从而建立全面的、客观的海岸线测绘体系。

### 5.5.1 实例一

实例采用 4.4.1.1 节的数据,基岩海岛礁,船载 LiDAR 点云数据,点云平均间距为 2m,约 6 万个点云,该区域的真彩色点云如图 4.5 所示。经计算,平均大潮高潮面的大地高为 6.30m(与 4.4.2 节一致)。分别基于 DEM 数据和 LiDAR 点云数据提取海岸线,并以基于 DEM 提取的海岸线为比对岸线,分析点云栅格化法从 LiDAR 点云中提取海岸线的可靠性和合理性,同时对该方法与上一章提出的图像分割改进法进行对比分析。

#### 5.5.1.1 基于DEM提取的海岸线

采用图像分割法由 DEM 数据生成海岸线,提取的海岸线经过简单平滑修编后如图 5.4 所示。整个岸线提取时间约 12 分钟。

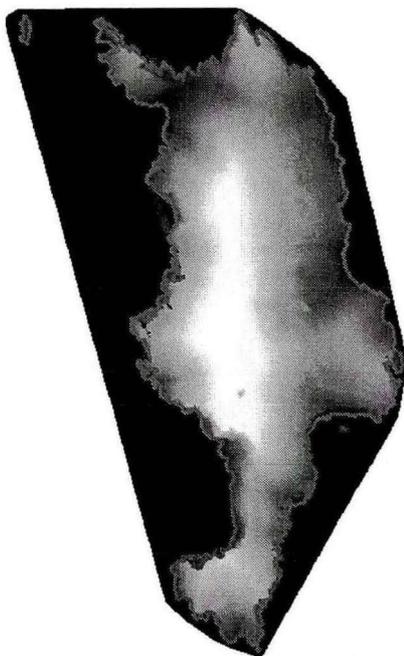


图 5.4 由 DEM 数据提取的海岸线

#### 5.5.1.2 栅格化法

基于 DEM 数据提取海岸线和采用图像分割法提取海岸线的过程可见 4.4.2,因此只列出栅格化法从 LiDAR 点云中提取海岸线的简要过程。首先,对 LiDAR 点云进行栅格化;其次,追踪矢量化具有 MHWS 高程的海岸线,如图 5.5 所示,整个岸线提取时间约 15 分钟。

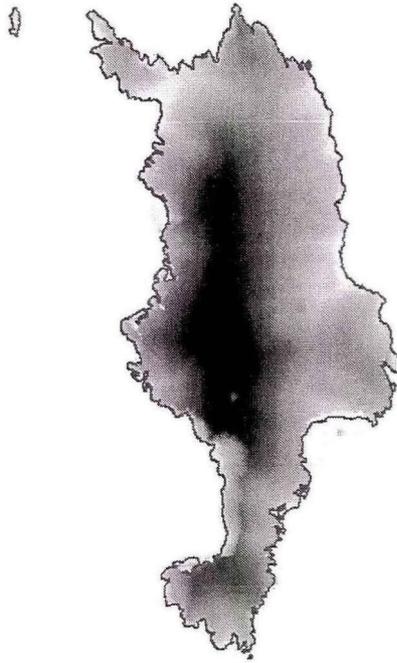


图 5.5 由点云数据栅格化法提取的海岸线

### 5.5.1.3 结果分析

将基于 DEM 数据由图像分割法提取的海岸线（下文简称“DEM 岸线”）、改进岸线和基于点云栅格化法提取的海岸线（下文简称“栅格岸线”）同时加载在点云数据上，如图 5.6 所示，图中蓝色线为 DEM 岸线，绿色线为改进岸线，红色线为栅格岸线。

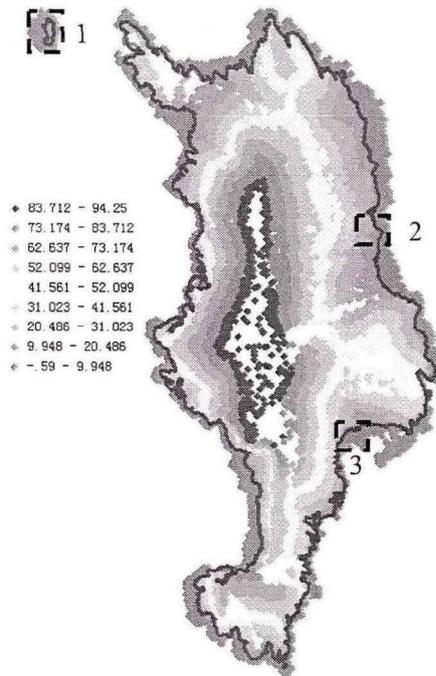


图 5.6 岸线提取结果

由图 5.6 知，三条岸线在整体曲折趋势走向上一致。正如第四章所述，DEM 是我国基础地理信息的重要数据之一，通过其提取的 MHWS 海岸线也应是可靠的，本实例的

结果表明 LiDAR 岸线与 DEM 岸线非常相似，从而证明基于 LiDAR 提取的海岸线是可行的，并且可靠性强。截取图中虚线框部分，放大图如 5.7 所示。

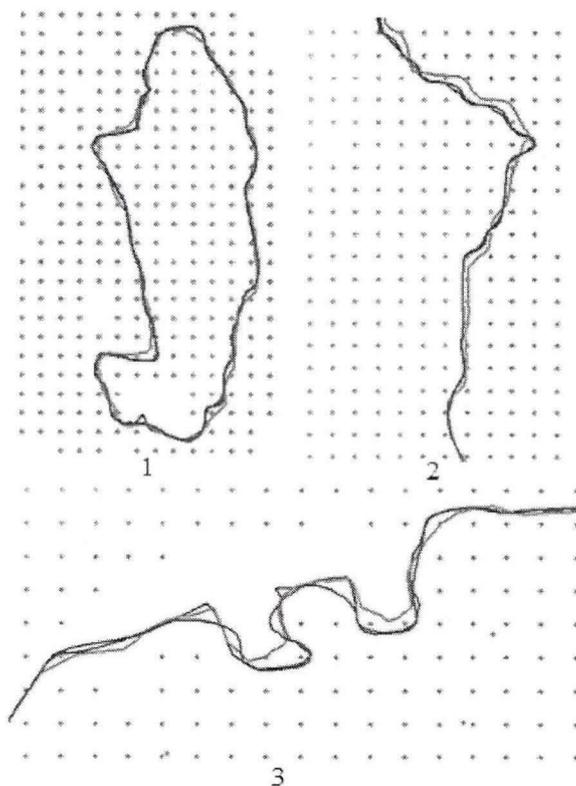


图 5.7 DEM 岸线、改进岸线与栅格岸线的局部放大图

由图 5.7 知，三种岸线在整体上较为相近，特别是在虚线框 1 区域，三者相差不大，原因已在 4.4.2 中阐述；从虚线框 2 区域看，栅格岸线比改进岸线更靠近 DEM 岸线；但从虚线框 3 区域看，栅格岸线（红色线）比 DEM 岸线更平滑，特别是在一些岬角处理上更具优势，更合理。因此可见，从定性角度，点云栅格化法（下文简称“栅格法”）提取的岸线要略优于改进法提取的岸线。

## 5.5.2 实例二

实例采用 4.4.1.2 节的数据，基岩海岸类型，船载 LiDAR 点云数据，点云平均间距为 0.1m，约 40 万个点云，该区域的真彩色点云如图 4.7 所示。实测痕迹岸线选取岩石上较为明显的痕迹线。经计算，平均大潮高潮面的大地高为 10.32m（与 4.4.3 节一致），通过与图像分割改进法、实测的痕迹岸线的对比，从定性和定量角度分析栅格化法的可靠性。

### 5.5.2.1 栅格化法

以绘制 1:5 000 大比例尺的海岸带地形图为例，丘陵地带（大连地区属于丘陵区）的等高距为 1m，从而确定栅格大小为 0.5m，栅格化采用线性三角网算法，将数据预处理后的 LiDAR 点云转换为分辨率为 0.5m 的栅格数据，如图 5.8 所示，提取海岸线如图 5.9

所示。



图 5.8 点云栅格化处理后数据

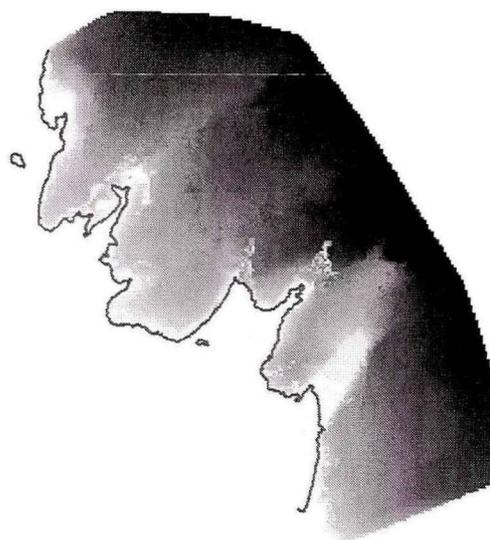


图 5.9 提取的海岸线

### 5.5.2.2 结果分析

#### (1) 定性分析

将改进岸线、痕迹岸线与栅格岸线叠加在栅格数据上，如图 5.10 所示，其中，紫色线为改进岸线，红色线为栅格岸线，绿色线为等值岸线，而蓝色点为痕迹岸线测量点。

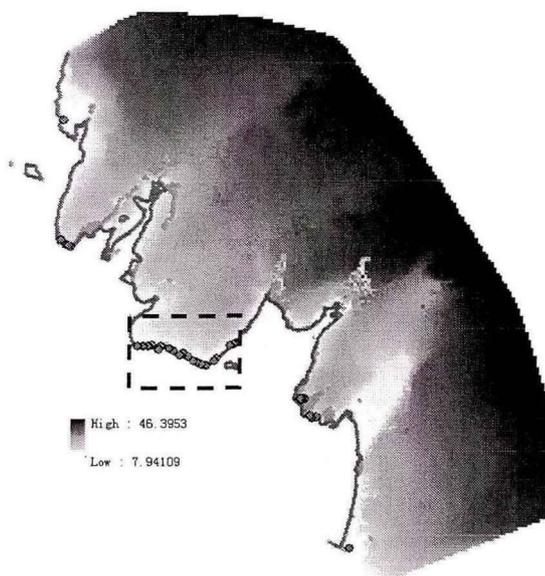


图 5.10 四种岸线叠加显示截图

由图 5.10 可知，改进岸线与栅格岸线基本一致，与痕迹岸线测量点相近。将痕迹岸线测量点分布密集的岸段，即图 5.10 虚线框部分进行局部放大，如图 5.11 所示。

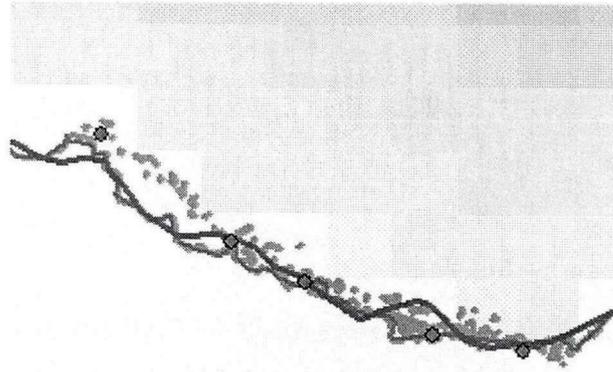


图 5.11 岸线成果局部放大

由图 5.11 能更清晰看出，改进岸线与栅格岸线在形态上较一致，与痕迹岸线采样点也较接近。下面以痕迹岸线测量点对改进岸线与栅格岸线作定量分析。

(2) 定量分析

在痕迹岸线上选择 15 个采样点（如图 5.12 所示），并作栅格岸线的垂线，分别与栅格岸线（红色）和改进岸线（紫色）相交。栅格岸线、改进岸线与 15 个痕迹岸线采样点的平面距离如图 5.13 所示，垂直差异如图 5.14 所示。

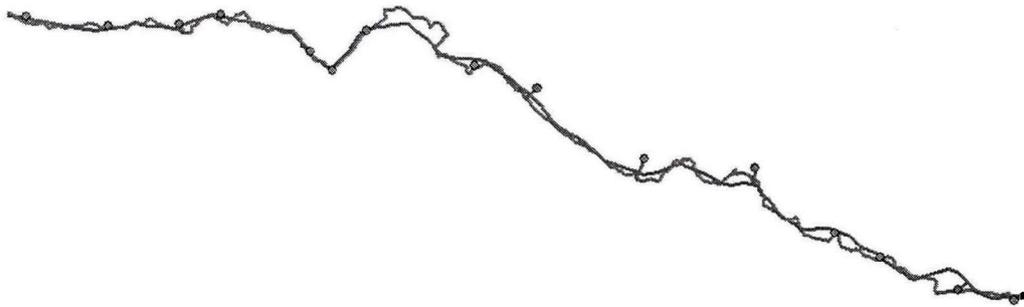


图 5.12 痕迹岸线的测量点分布

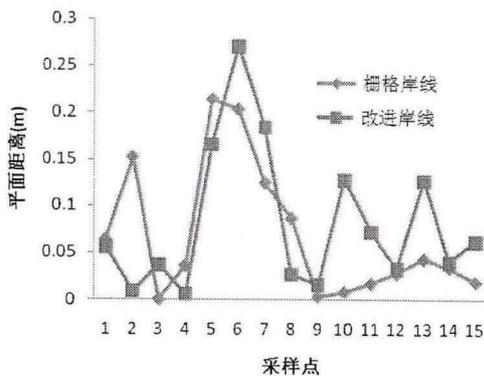


图 5.13 平面距离

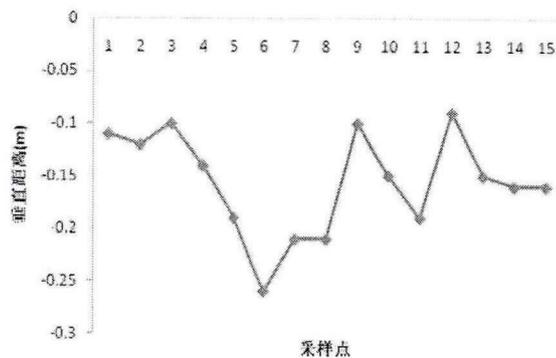


图 5.14 垂直距离

按 (4.4) 式、(4.5) 式与 (4.6) 式分别计算平面距离、垂直差异的平均值、均方根与标准差，结果列于表 5.2。

表 5.2 栅格岸线、改进岸线与痕迹岸线的比较 (单位: m)

	LiDAR 岸线	平均值	均方根	标准差
与痕迹岸线的平面距离	栅格岸线	0.069	0.098	0.072
	改进岸线	0.082	0.111	0.077
与痕迹岸线的垂直差异	栅格岸线	-0.156	0.163	0.049
	改进岸线	-0.156	0.163	0.049

由表 5.2 可知, 栅格化法与图像分割改进法提取的海岸线成果都具有较高的精度, 且高程都低于痕迹岸线, 原因应是本实例人工测量时选择了痕迹线的上端。当然, 痕迹线的测量工作就是受很强主观因素影响的过程, 测量点的高程并不一致, 这也与提取岸线时用理论计算的固定值不同。因实例属于基岩海岸类型, 垂直方向的差异对平面位置的影响很小。

实例分析表明 LiDAR 点云栅格化法提取的海岸线形态合理、可靠, 且只需极少的人工编辑处理。相比于图像分割法及改进, 因以丰富的灰度来描述点云的高程变化, 给定高程, 即可从点云的栅格数据中矢量化具有该高程的辅助岸线要素, 此时, 在保证精度相当同时, 在效率上更优异。

### 5.5.3 实例三

由中国近海精密潮汐模型<sup>[77]</sup>计算该处的平均大潮高潮面在平均海面上的高度, 再以似大地水准面模型<sup>[127]</sup>内插该处的高程异常, 进而计算得到平均大潮高潮面的大地高为 8.63m (与点云数据的坐标系统相统一)。

采取图像分割改进法与栅格化法分别由 LiDAR 数据提取海岸线, 提取过程与结果叙述如下。

#### 5.5.3.1 栅格化法

首先, 对 LiDAR 点云进行栅格化, 如图 5.15a 所示; 其次, 追踪矢量化具有 MHWS 高程的海岸线, 如图 5.15b 所示。整个岸线提取过程共花费时间 11 分钟, 几乎不需要人工修编。

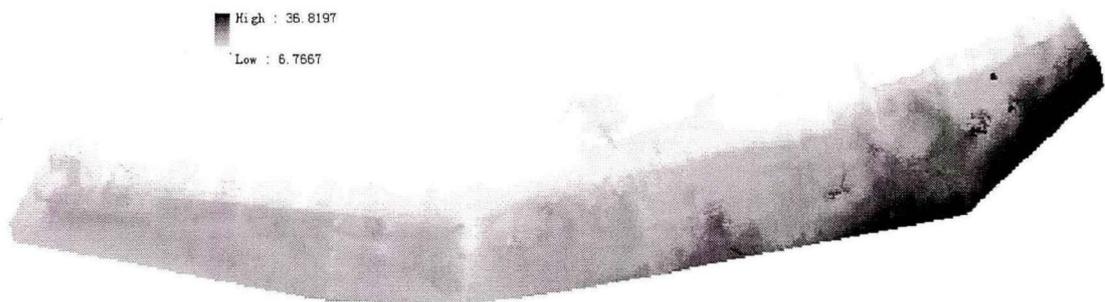


图 5.15a 点云栅格化

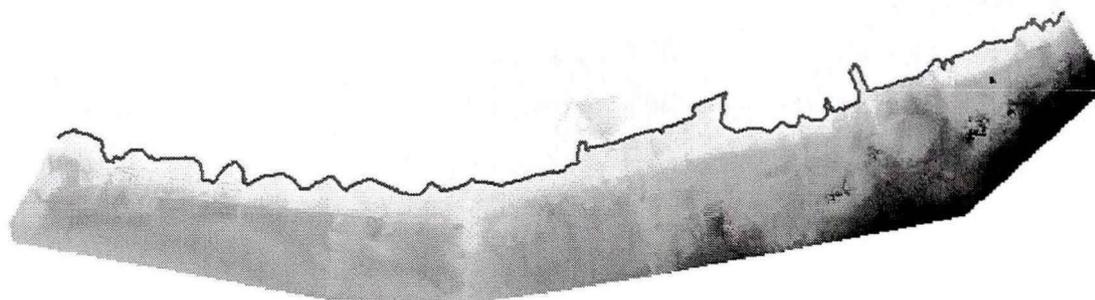


图 5.15b 提取海岸线

图 5.15 栅格化法提取海岸线

### 5.5.3.2 结果分析

#### (1) 定性分析

将改进岸线、栅格岸线和痕迹岸线叠加于 LiDAR 点云上，如图 5.16a 所示，其紫色虚线框的局部放大如图 5.16b 所示。其中，黑色线为改进岸线，红色线为栅格岸线，绿色线为等值岸线，而痕迹岸线以蓝色离散采样点的形式表示。

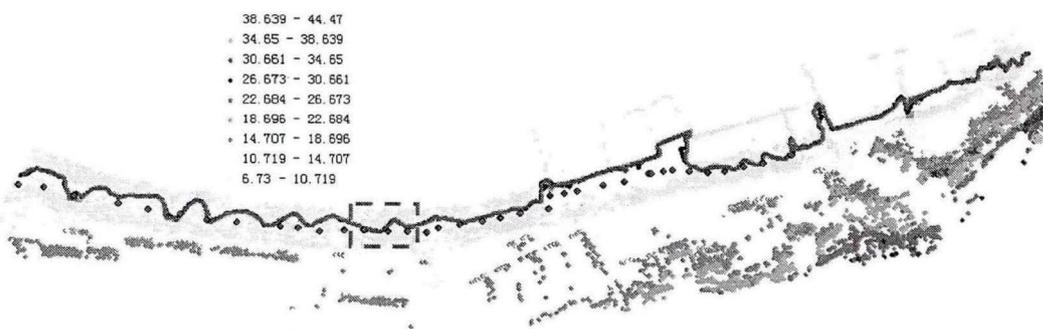


图 5.16a 全图

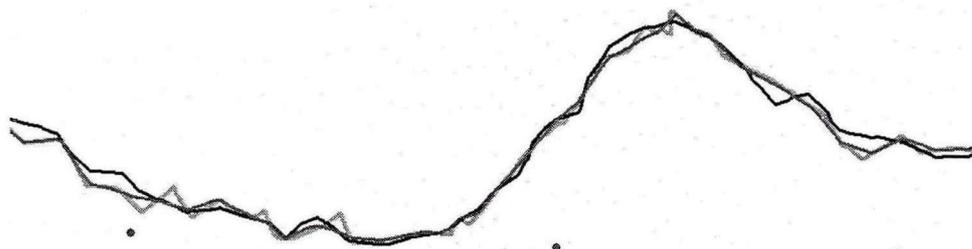


图 5.16b 局部放大图

图 5.16 岸线提取成果对比

由图 5.16a 知，这三条岸线的整体曲折趋势走向一致，改进岸线与栅格岸线的平面位置非常接近，在图 5.16b 局部放大图中才能发现，在平滑程度上，栅格岸线（红色线）

略好于改进岸线（黑色线）。

与 LiDAR 数据提取的岸线相比，痕迹岸线的差别较大，尽管实地采样点较密集，但由采样点连接成的痕迹岸线呈折线状，对海岸线曲折变化的描述相对粗略。同时，由于实地上存在多条痕迹（见图 5.17 箭头 1 号、2 号、3 号、4 号指示），尽管存在着痕迹判定原则，但仍受较强的主观因素影响，本实验区的实测数据取靠岸沙脊的最上沿为痕迹（图 5.17 中的 1 号箭头处），并平均每隔 15m 左右测量一采样点。



图 5.17 实地多条痕迹线示意

(2) 定量分析

选取痕迹岸线上的采样点（共 20 个）分别作栅格岸线和改进岸线的垂线，如图 5.18 所示。图 5.19 和图 5.20 分别是栅格岸线、改进岸线到采样点的平面距离和垂直距离。

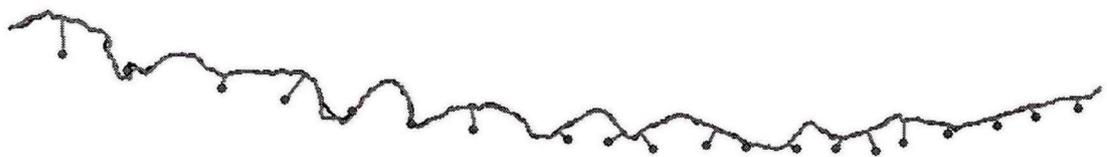


图 5.18 提取的海岸线与痕迹岸线采样点

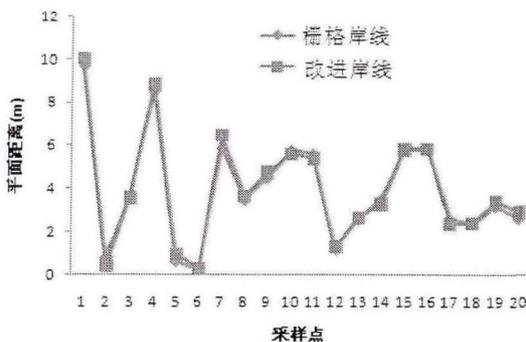


图 5.19 提取的岸线至采样点的平面距离

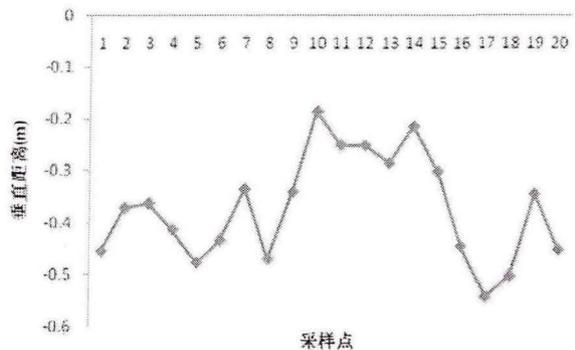


图 5.20 提取的岸线至采样点的垂直距离

按 (4.4) 式、(4.5) 式与 (4.6) 式分别统计其平均距离和垂直距离的平均值、均方根与标准差, 统计结果列于表 5.3。

表 5.3 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m)

	LiDAR 岸线	平均值	均方根差	标准差
平面距离	栅格岸线	3.908	4.630	2.549
	改进岸线	3.983	4.732	2.62
垂直距离	栅格岸线	-0.372	0.385	0.100
	改进岸线	-0.372	0.385	0.100

由表 5.3 知, 栅格岸线比改进岸线略靠近于痕迹岸线, 与痕迹岸线的垂直距离约为 39cm, 但与痕迹岸线的平面距离都较大, 均方根达到了约 4.7m。这与海岸是平缓的沙滩有关, 由于坡度小, 较小的高程差异对应的平面位置差异较大。因此, 在统计平面位置差异时需顾及坡度的影响。由于目前无明确的岸线精度评估指标, 本文以 1m 等高距所对应的平面距离作为对照指标, 作为岸线间平面位置差异的参考。若设海岸线附近的坡度为  $\theta$ , 则 1m 等高距所对应的平面距离  $\Delta d$  可由下式计算

$$\Delta d = \frac{1}{2 \tan \theta} \quad (5.2)$$

坡度  $\theta$  可由海岸线附近的点云数据以曲面拟合法估计。经计算, 本实例的  $\Delta d = 5.5m$ 。事实上, 由于海水上冲的惯性作用, 痕迹线一般都偏高。如夏东兴等<sup>[32]</sup>认为: “在一般沙质海岸, 应以滩脊为海岸线测量依据, 但滩脊可能会高出当地平均大潮高潮线 1~2m”。这也是表 5.3 中提取的岸线都低于痕迹岸线的主要原因。

#### 5.5.4 实例四

以实例附近长期验潮站的实测水位数据计算平均大潮高潮面在平均海面上的距离, 并据高程异常成果, 计算得到平均大潮高潮面的大地高为 10.32m, 与点云数据的坐标系相统一。采取图像分割改进法与栅格化法分别由 LiDAR 数据提取海岸线, 提取过程与结果叙述如下。

##### 5.5.4.1 栅格化法

首先, 对 LiDAR 点云进行栅格化, 如图 5.21a 所示; 其次, 追踪矢量化具有 MHWS 高程的海岸线, 如图 5.21b 所示。

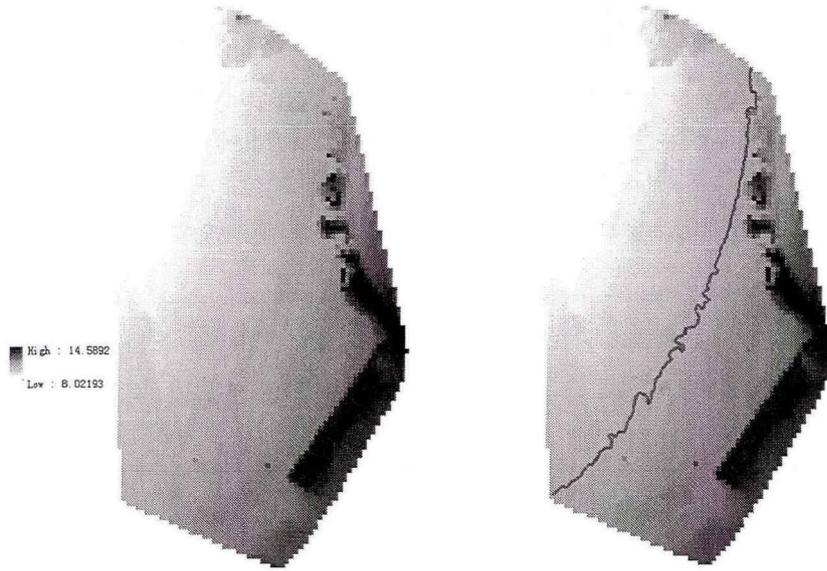


图 5.21a 点云栅格

图 5.21b 提取的海岸线

图 5.21 栅格化法提取海岸线

#### 5.5.4.2 结果分析

##### (1) 定性分析

图 5.22 为岸线叠加于 LiDAR 点云上的结果。图中，黑色线为改进岸线，红色线为栅格岸线，绿色线为等值岸线，蓝色的离散采样点为痕迹岸线。

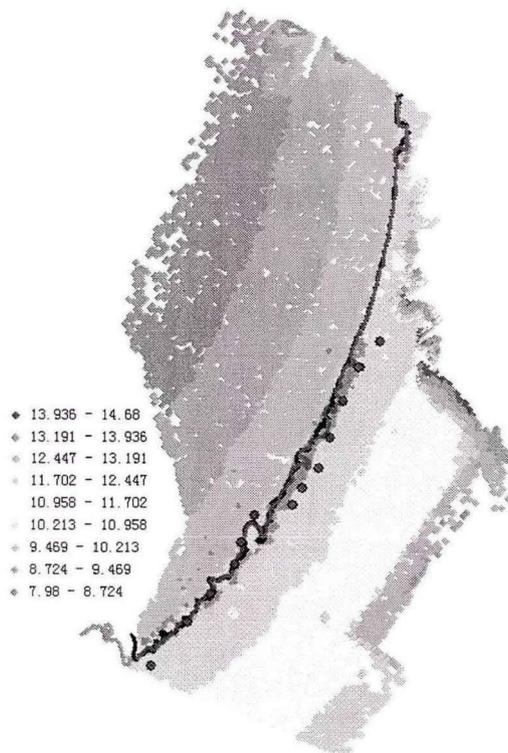


图 5.22 岸线提取成果

由图 5.22 知，由 LiDAR 数据提取的岸线在整体曲折趋势走向上一致，且与痕迹线实测点基本相符。截取局部放大，如图 5.23 所示。

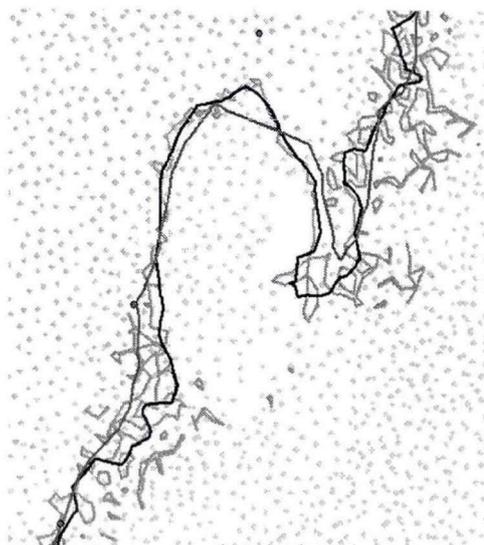


图 5.23 岸线提取成果局部放大图

(2) 定量分析

选取痕迹岸线上的采样点（共 13 个）分别作栅格岸线和改进岸线的垂线，如图 5.24 所示。图 5.25 和图 5.26 分别是栅格岸线、改进岸线到采样点的平面距离和垂直距离。

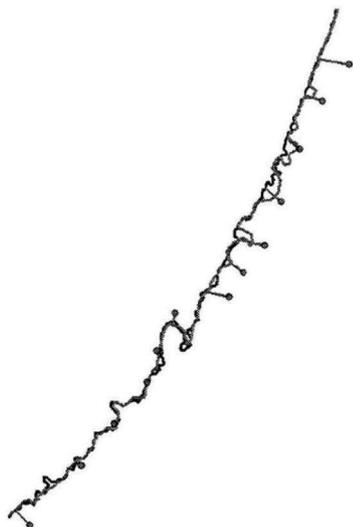


图 5.24 栅格岸线、改进岸线与痕迹采样点分布

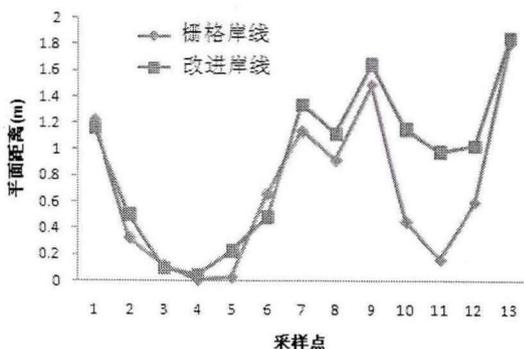


图 5.25 提取的岸线至采样点的平面距离

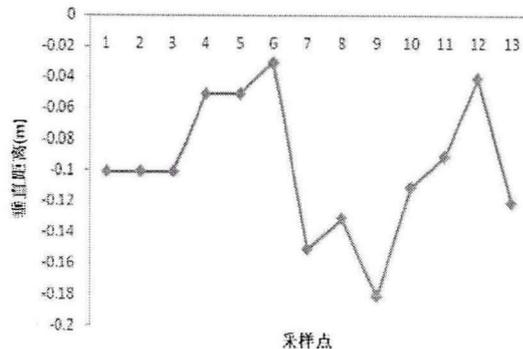


图 5.26 提取的岸线至采样点的垂直距离

按 (4.4) 式、(4.5) 式与 (4.6) 式分别统计其平均距离和垂直距离的平均值、均方根与标准差, 统计结果列于表 5.4。

表 5.4 提取的岸线与痕迹采样点的差异统计 (单位: m)

	LiDAR 岸线	平均值	均方根	标准差
平面距离	栅格岸线	0.687	0.890	0.586
	改进岸线	0.896	1.055	0.588
垂直距离	栅格岸线	-0.097	0.106	0.044
	改进岸线	-0.097	0.106	0.044

由表 5.4 知, 栅格岸线、改进岸线的高程都低于痕迹岸线, 平均约 0.097m。据 (5.2) 式, 计算本海岸段的 1m 等高距平面  $\Delta d = 3.5m$ , 因此平面距离也在合理的范围内。

## 5.6 海岸线的综合判绘

在海岸带与海岛礁的测绘实践中, 本文提出的图像分割改进法与栅格化法都能由 LiDAR 点云数据提取出平滑、可靠、形态合理的海岸线, 实现对海岸线的精确测绘。但是, 机载 LiDAR 可能因陆海交界处的地形遮挡, 船载 LiDAR 也可能因靠岸船只的阻挡等原因, 造成海岸线附近部分点云数据的缺失, 使得海岸地形不完整; 也可能由于不同的海岸线提取方法或阈值设置等因素, 造成海岸线错误识别等问题。因此, 有必要对提取的海岸线进行综合判绘、辨真去伪、编辑调整, 以确定所提取海岸线的空间位置合理、连续、平滑, 从而最终提供符合测绘需求的、精确的、合理的海岸线。

### 5.6.1 多源数据辅助判绘

与其它测量技术相比, 尽管 LiDAR 的穿透力较强, 但当遇到大的障碍物时, 如大型船只或浓密树木, 三维激光就无法完全穿透或者根本无法穿透, 如图 5.27 为船载 LiDAR 三维扫描某人工海岸, 由于靠岸船只的阻挡, 无法完全扫描到整条堤岸, 出现数据缺失, 从而产生了数据空白。



图 5.27 由于阻挡产生的数据空白

在数据空白处, 由于无法直接从 LiDAR 数据中提取所需的岸线要素, 因此需要利用遥感影像、DEM 等多源数据辅助修订。一般采取的方法是: 将多源数据与 LiDAR 点云配准, 通过人工方式判绘。

#### 5.6.1.1 遥感影像判绘

基于高密度、高精度的 LiDAR 点云数据能实现海岸线的精确测绘, 与其相匹配的遥感影像最好是来源于航空数字摄影测量, 在立体测图环境下, 通过跟踪等值线提取数据空白处的海岸线, 对 LiDAR 的海岸线成果作补充。在实践中, 因两种测量手段本身的误差以及像控的不一致等, 两种海岸线提取成果可能不能重合, 通常呈现系统性的偏差。此时可依据同段海岸线的位置差异, 对遥感影像提取的海岸线进行强制调整, 以匹配 LiDAR 提取的海岸线成果。

鉴于 LiDAR 测量实施单位很少同时实施航空摄影测量, 或难以获取外单位数据, 此时, 还可通过较低分辨率的卫星遥感影像对海岸线缺测部分进行判绘, 从而对 LiDAR 的海岸线成果作补充。如图 5.27, 数据空白部分为人工码头的中间部分, 此时, 以影像作为辅助, 通过两侧的自然延伸而完成海岸线的测绘。这适用于人工建筑、平缓沙滩等变化简单的地形或地物。

#### 5.6.1.2 DEM数据判绘

DEM 数据通常在分辨率与精度上都低于 LiDAR 点云数据。在陆海交界处复杂的地形条件下, 常规测量手段难以获得高精度、高密度的碎部点成果, 因此, 对于 DEM 的应用需进行必要的检查与匹配工作。从 DEM 数据进行海岸线判绘, 可采用图像分割法。若与 LiDAR 点云数据提取的海岸线在曲折变化趋势上基本一致, 可采用两侧强制配准的方式。若两者的趋势明显不一致, 还需依据遥感影像的地形地物变化对 DEM 进行检查, 判断是否是 DEM 数据来源时效性差的原因, 地物与地形已发生了很大的改变。

#### 5.6.1.3 人工实地测量

若 LiDAR 缺测部分的地形或地物复杂, 又无高分辨率的航空遥感影像或可靠的 DEM 数据, 则需以人工实地测量的方式对缺测部分补充必要的碎部点。对于在实施控制测量困难或坐标系统与高程系统转换困难的远离大陆的海岛, 因缺测岸段通常很小, 可采用自由坐标的方式, 通过测量 LiDAR 点云中突出或明显的地物, 以同名点拟合的方式实现坐标系统与高程系统的转换。

### 5.6.2 海岸线化简的形态判绘

在海图与海岸带地形图上表示海岸线, 除要求准确表示海岸线的位置外, 还需详细地描绘海岸线的形状特征、弯曲程度及类型特点等, 因此需对提取的海岸线进行形态判绘。

目前对海岸线形状的化简大都集中在如何利用 Douglas-Peucker 经典算法, 也有学者对其进行改进, 如运用 Douglas 二叉树<sup>[140]</sup>、分维估值<sup>[141]</sup>、滚动圆法<sup>[142]</sup>, 以及化简海岸

线的弯曲骨架线<sup>[143]</sup>等,但这些方法都有其特定的适用范围,不具通用性。

海岸线作为线状要素的一种,除了满足一般线状要素的化简原则和要求外(即保持主要特征转折点的位置准确——精确性;保持弯曲形状和外部轮廓图形的基本特征——相似性;保持不同地段弯曲程度的差别和对比——可比性<sup>[144]</sup>)外,其作为一种特殊的线状要素,在海图与地形图上具有着极其重要和特殊的地理地位,因此在对其进行形状化简时,还需重点考虑如下两点:

- 1、一般情况下,应遵循“扩陆缩海”原则。对于中、大比例尺海图,其主要目的是为了保障航行安全,因此可适当考虑“扩大陆部、缩小海部”,舍去小海湾,不能舍去岬角。但有时为了保证相似性要求,可突出显示某一深入陆地的小海湾,将其适当夸大表示。

- 2、应尽可能的保持海岸线的形态特征、切割程度和弯曲大小的对比。不能一味的强调“扩陆缩海”,从而失去了精确性和相似性的要求,特别是对于小比例尺海图,其主要供远洋航行之用,海岸线对航行安全的影响较小,因此需要保持海岸线的整体形态特征。

事实上,海岸线的形状和弯曲情况与海岸类型有着密切的关系,不同类型或不同性质的海岸,其海岸线的形态和弯曲特点也不同。如沙质岸、砾石岸、植物岸等属于较为平缓的海岸,其海岸线一般呈平直圆滑状,通常用“软笔调”绘制;岩石岸、陡岸等则属于曲折陡峭的海岸,一般其海岸线较为曲折,呈锯齿状,弯曲变化较大,通常用“硬笔调”绘制;人工岸一般呈直线状,且以折角转弯,绘制较为简单清晰,一般为“硬笔调”。因此,本文基于 LiDAR 数据提取的海岸线还需结合地学特征,根据海岸类型的不同,通过人机交互的方式,对提取的海岸线采取不同“笔调”描绘其形状特征。

## 5.7 本章小结

本章提出了基于 LiDAR 点云提取海岸线的一种新方法——点云栅格化法,通过栅格化将点云转为以灰度描述高程的栅格数据,再矢量化跟踪等值线。以四个实例的 LiDAR 点云、人工实地测量痕迹岸线、遥感影像与 DEM 等多源数据,对图像分割改进法与点云栅格化法的普遍适用性进行检验。通过对比分析,可得出以下结论:

- 1、栅格化法提取的海岸线形态合理、可靠,且只需极少的人工编辑处理,在精度上与图像分割改进方法相当。但在提取多种辅助岸线要素时,效率上更优异,并且可直接根据测绘需求(比例尺)选择合适的栅格单元大小,进而提取相应的海岸线。

- 2、与实际痕迹测量点的对比表明,由 LiDAR 数据提取的平均大潮高潮线与痕迹岸线在整体上是吻合的,这证明第三章对海岸线定义的论证是正确的,设计的算法是可靠的。

- 3、DEM 数据是我国重要且可靠的地理信息数据,通过其提取的 MHWS 海岸线与由 LiDAR 数据提取的岸线非常相似,由此可证明通过点云栅格化法与图像分割改进法

从 LiDAR 数据中提取岸线的可靠性和可行性,且通过四个不同实例证明了点云栅格化法的通用性与普适性。

针对 LiDAR 点云数据可能存在空白的情况,对利用遥感影像、DEM 与人工实地测量等数据辅助提取海岸线进行了探讨,提出了初步的解决方案。并从制图角度出发,简要论述了海岸线形态判绘问题,基于 LiDAR 数据提取的海岸线还需结合地学特征,根据海岸类型的不同,通过人机交互的方式,对提取的海岸线采取不同“笔调”描绘其形状特征。

## 第六章 海岸线提取软件的设计与实现

### 6.1 引言

本章在分析比较目前已有的 LiDAR 点云数据处理软件的基础上,针对 LiDAR 数据处理软件缺少海岸线提取功能,拟基于 ArcGIS Engine 设计开发海岸线提取软件,实现本文第三章的平均大潮高潮面特征值算法与统计算法,以及 LiDAR 点云数据的读取与显示、预处理、DEM 和栅格数据的构建、海岸线的提取以及其它辅助岸线要素的提取等功能。该模块基于本文的研究成果,可作为由 LiDAR 数据精确测绘海岸线的一个工具。

### 6.2 LiDAR 数据处理软件现状

LiDAR 点云数据的处理软件,相对于 LiDAR 硬件技术的飞速进步,其发展相对滞后,数据处理过程中的诸多算法和模型还不够完善,目前国际上还没有非常成熟的 LiDAR 数据处理软件<sup>[145]</sup>。LiDAR 数据处理软件类型较少,一般由硬件厂商提供,其模型和算法通用性差,且需多次实验以选择参数,在数据处理过程中需要大量的人工交互编辑,自动化程度不高,处理结果不稳定,受作业人员的经验和技巧影响较大。

国内的桂能公司自主研发了 LiDAR 可视化分类软件产品——LSC,可实现多角度显示点云数据、去航带重叠、实时构 TIN、高程着色、去噪声等功能。国家“863”计划“十一五”期间支持研发的“机载 LiDAR 数据处理软件系统——ALDPro”,能够实现点云可视化、数据管理、滤波分类和配准融合等功能,但是距离实用化和商用化还有一定的距离。相对于国内软件的发展情况,国外已出现相应的商用软件,较为成熟的有 TerraSolid 系列、Quick Terrain Reader、RealWorks Survey、ERDAS LPS、ENVI LiDAR 以及 ArcGIS 等软件。

#### 6.2.1 TerraSolid

TerraSolid 系列软件是芬兰公司的第一套商业化 LiDAR 数据处理软件<sup>[146]</sup>,基于 Microstation 开发,包括: TerraMatch、TerraScan、TerraModeler、TerraPhoto、TerraSurvey、TerraPhoto Viewer、TerraScan Viewer、TerraPipe、TerraSlave、TerraPipeNet 等模块<sup>[146-147]</sup>。其中, TerraScan、TerraModeler、TerraPhoto 等模块较为常用,可集成处理激光数据。

##### 6.2.1.1 TerraScan 模块

TerraScan 是处理 LiDAR 点云数据的软件。具有可读入原始的激光点云(xyz 文本或类似于 LAS 的二进制文本)并三维显示、浏览;可自定义点类别,自动或手动分类激光点云;可交互式判别三维目标;数字化地物;探测电力线;矢量化房屋;生成激光点的

截面图<sup>[148]</sup>；输出点分类等功能，界面显示如图 6.1 所示。

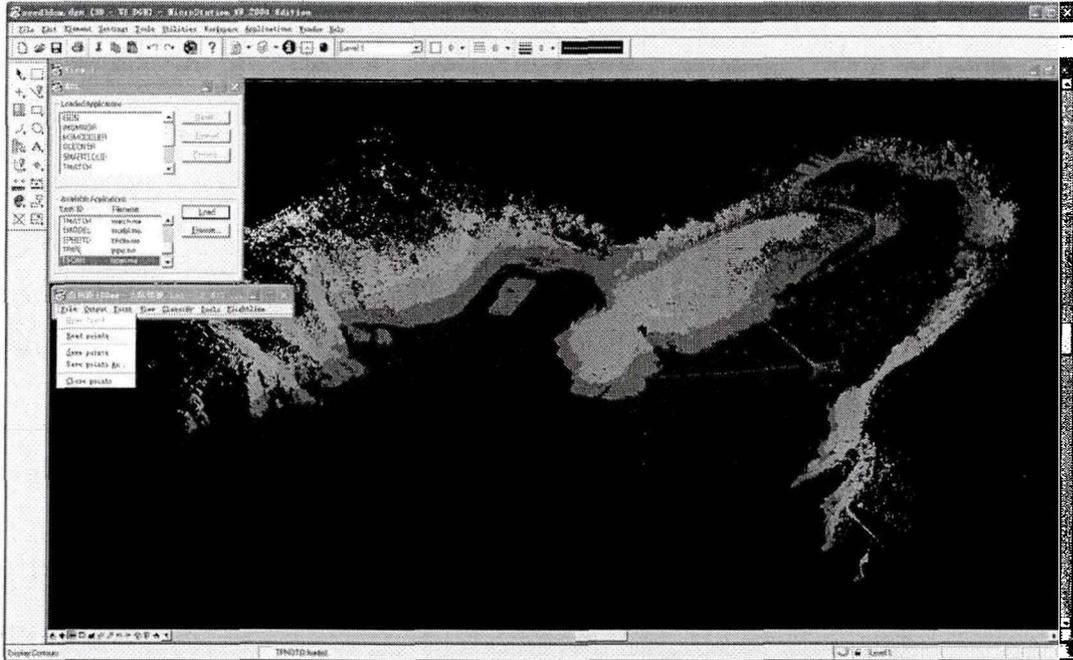


图 6.1 TerraScan 的显示界面

### 6.2.1.2 TerraModeler 模块

TerraModeler 是建立地表模型软件。可基于测量数据，或者是图形元素和 XYZ 文本文件建立地表、土层或者设计的三角面模型<sup>[149]</sup>。可以在同一个设计文件处理无数量限制的不同表面，并且可以交互编辑这些表面<sup>[147]</sup>，可用来计算体积、面积，生成等高线、轮廓线等，加载模块如图 6.2 所示。

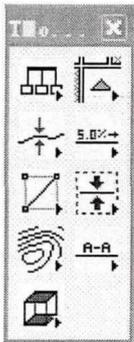


图 6.2 TerraModeler 加载模块

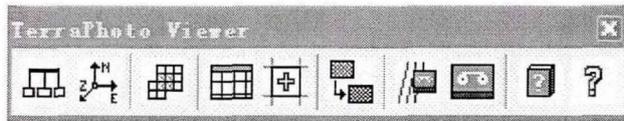


图 6.3 TerraPhoto 加载模块

### 6.2.1.3 TerraPhoto 模块

TerraPhoto 是利用地面激光点云作为映射面对航空影像进行正射纠正并生成正射影像的软件<sup>[149-150]</sup>，用来专门处理 LiDAR 产生的原始影像。整个纠正过程可以没有任何控制点条件下执行；可根据地表面精确构造激光点三角面模型；可根据高程值逐像素纠正影像；能自动平滑过渡两个影像间的色差<sup>[147]</sup>，加载模块如图 6.3 所示。

### 6.2.1.4 缺点分析

目前，TerraSolid 系列软件是较为成熟的 LiDAR 数据处理软件，国内外诸多学者利

用 TerraScan 对 LiDAR 点云进行分类和建模，但是也发现了该软件的缺点：

(1) TerraScan 是采用基于渐进 TIN 的滤波法进行分类，该算法的缺陷也成为 TerraScan 分类的缺点：一是在设置参数时需要不断的实验，或是更多的依赖于经验；二是当对象为陡峭的山区或是低矮的植被时，易出现错误。

(2) TerraSolid 系列软件是基于 Micorstation 开发的，需在运行 Micorstation<sup>[151]</sup>的基础上加载模块，因此受限于 Micorstation，浏览起来闪烁较为明显，速度较慢；同时用户需要熟悉 Microstation 操作才能更好的使用它。

### 6.2.2 Quick Terrain Reader/Modeler

Quick Terrain Reader/Modeler 是 Applied Imagery 公司推出的快速读取并显示三维点云的软件。能够输入/输出点云和原始 3D 数据，进行简单的量测、标注、显示数据信息等功能，界面显示如图 6.4 所示。

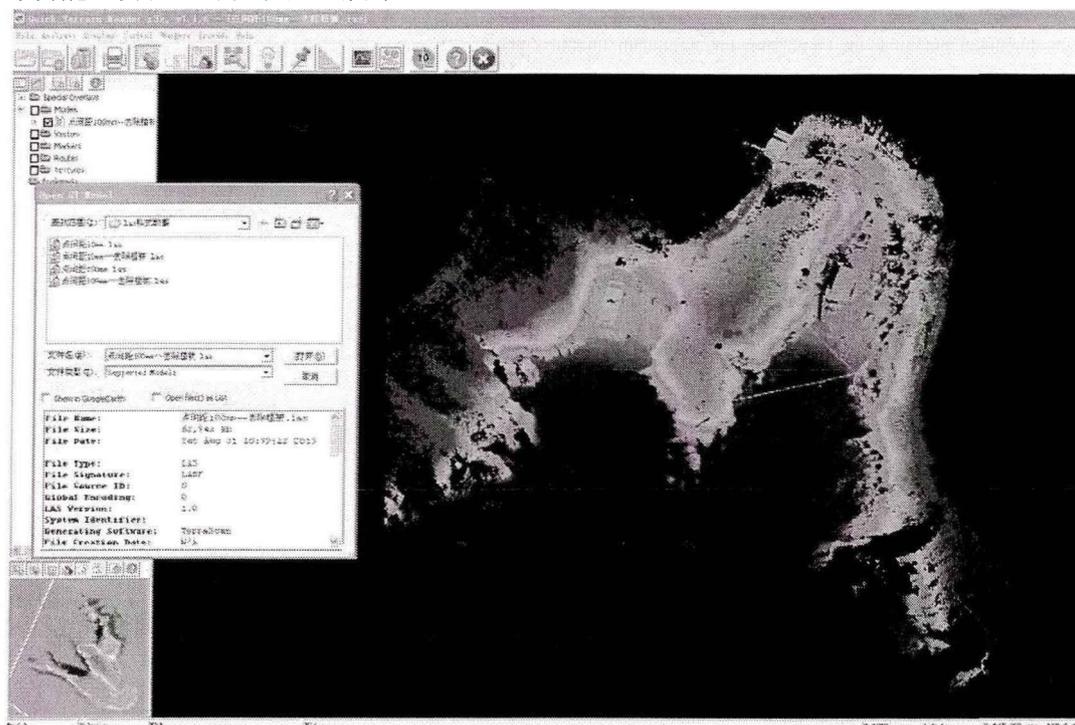


图 6.4 Quick Terrain Reader/Modeler 的显示界面

该软件的显示效果较好，一般情况下，仅用来读取浏览 LiDAR 数据，无法进行点云数据的滤波分类等处理。

### 6.2.3 RealWorks Survey

RealWorks Survey 是美国天宝 (Trimble) 公司专门为三维扫描应用设计的功能强大的软件，可读入三维激光扫描数据并显示为逼真的三维图形，能够输入、输出\*.wrp，及 ASCII 码等格式数据，具有配准、显示 (如点云附带目标颜色，可按真彩色显示)、量测、采样和分割点云等基本功能；OfficeSurvey 模块包括平面切割、三角网建模、等高线生成、容积计算等功能，以及基于点云的三维建模模块等。界面显示如图 6.5 所示。

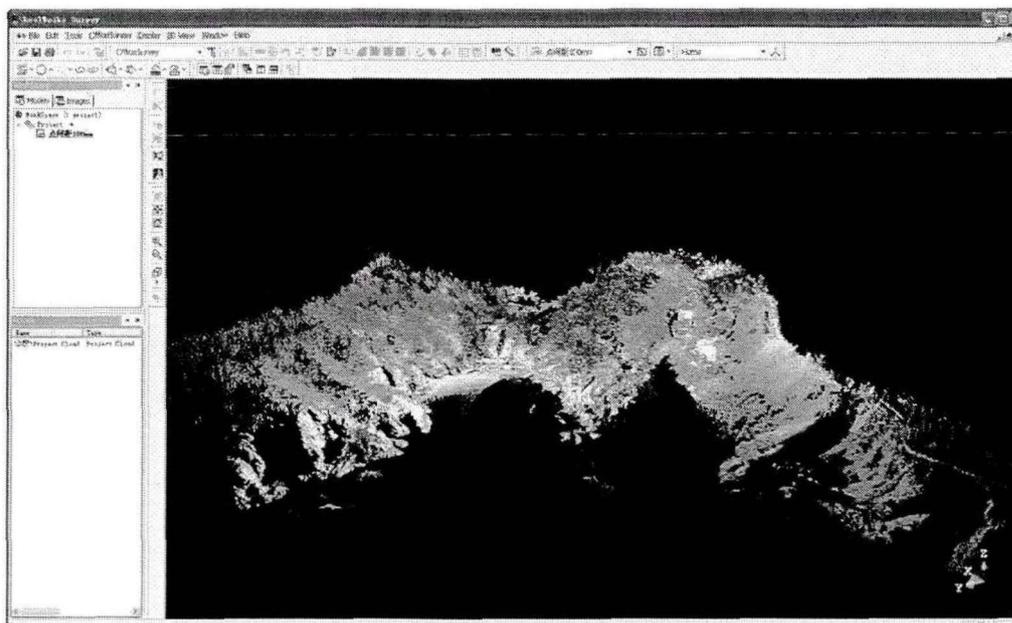


图 6.5 RealWorks Survey 的显示界面

该软件能够按真彩色显示点云数据，数据处理功能一般，没有滤波分类功能。可用作海量点云的分割。

#### 6.2.4 ENVI LiDAR

ENVI LiDAR<sup>[152]</sup>是 Exelis VIS 公司(ENVI/IDL 原产商)于 2011 年 10 月发布的 ENVI 新扩展，是 LiDAR 数据浏览、处理和分析工具。能读取 LAS 和 ASCII 文件，并进行快速多方位的可视化，可通过自动特征识别工具或手动编辑，从 LiDAR 数据中提取三维特征信息，如地形 (DSM、DEM)、等高线、树木、建筑物、电力线等，并加以修正，可将提取的信息导入 ENVI、ArcGIS 平台中进一步使用和分析，界面显示如图 6.6 所示。

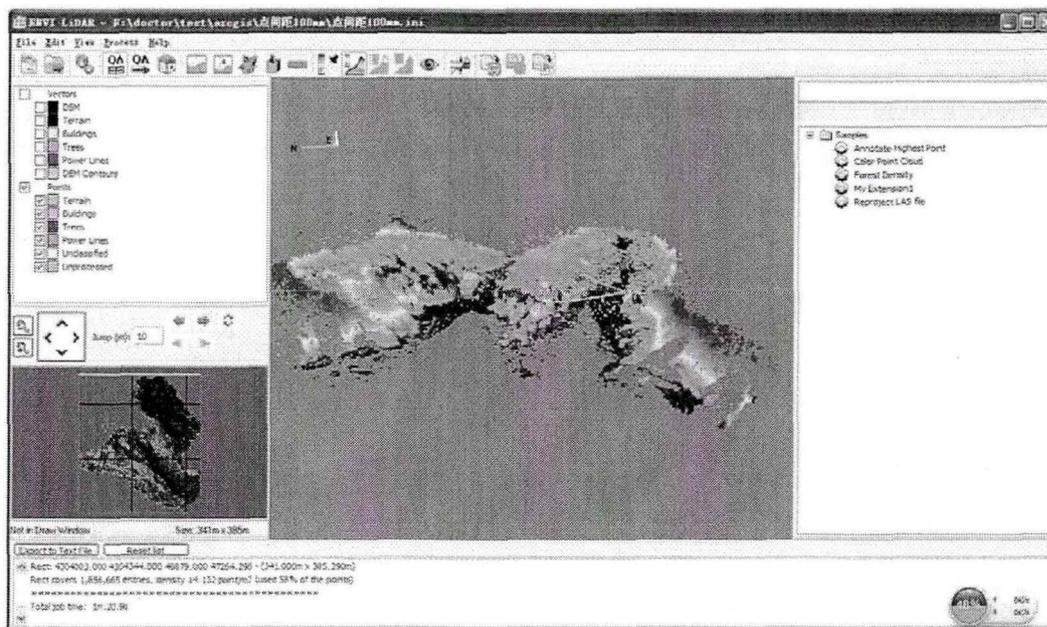


图 6.6 ENVI LiDAR 的显示界面

ENVI LiDAR 是较为成熟、全面的 LiDAR 点云数据处理软件，可以通过“precess”菜单设置模板提取特征信息。“precess”菜单设置模板如图 6.7 所示。

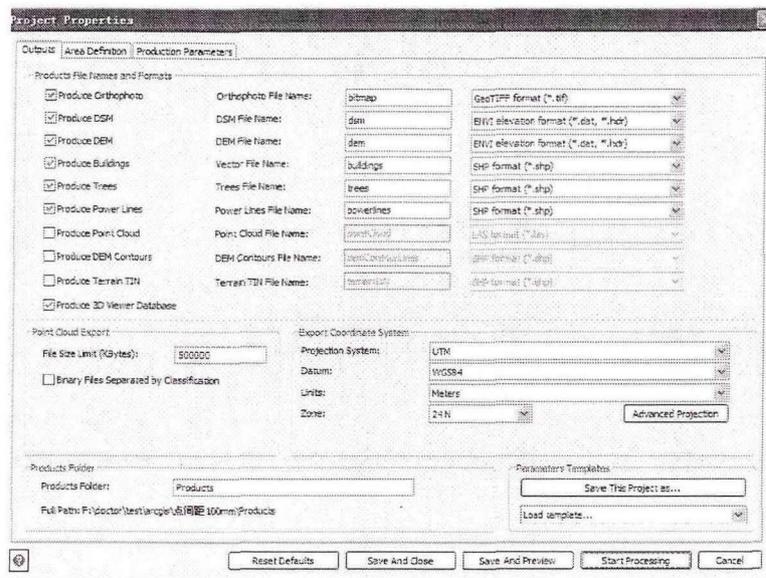


图 6.7 precess 菜单设置界面

### 6.2.5 ArcGIS

美国 ESRI 公司于 2012 年发布了 ArcGIS 10.1，一个重大变化是增加了新的数据集——LAS 数据集 (LAS dataset)，用来直接存储和管理海量 LiDAR 数据，可在 ArcMap 和 ArcScene 中快速显示、浏览、分析和检查 LAS 文件，并提供详细的统计资料和 LAS 数据所覆盖的面积；支持手动编辑 LAS 点分类，可更新 LiDAR 分类编码；LAS 数据集直接用点或 TIN 表面渲染<sup>[153-154]</sup>。界面显示如图 6.8 所示。

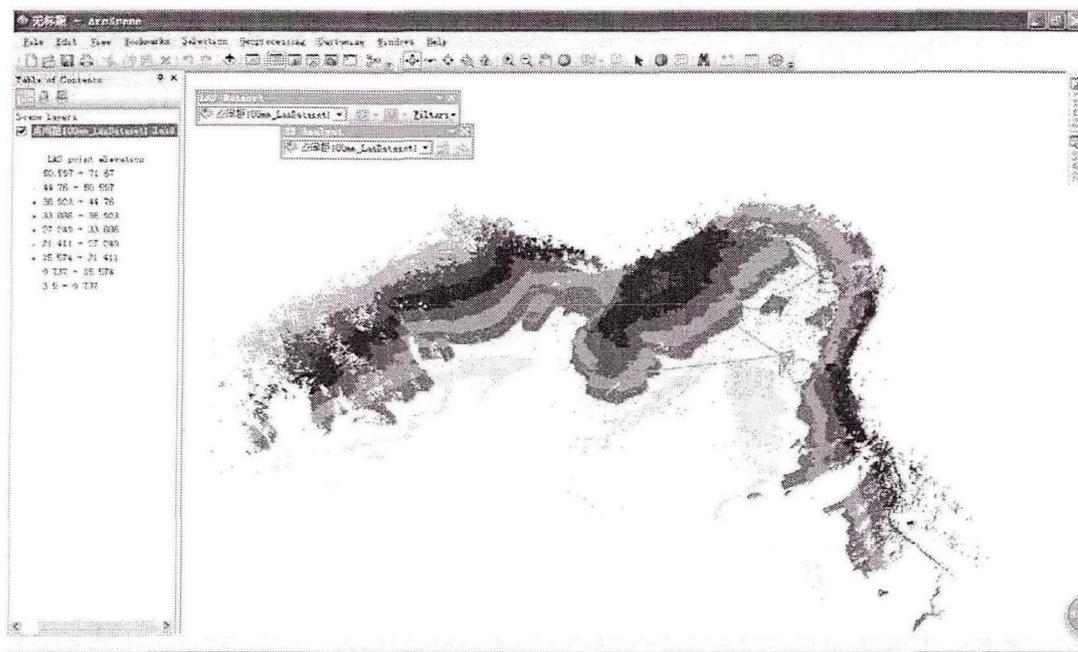


图 6.8 ArcGIS 10.2 的显示界面

### 6.2.6 ERDAS LPS

ERDAS LPS (Leica Photogrammetry Suite) 是美国鹰图公司开发的数字摄影测量工具, 功能强大且操作简单, 为影像处理及数字摄影测量提供高精度及高效能的生产工具。核心功能主要包括各种航天—航空的各类传感器影像的定向及空三计算、正射影像纠正、镶嵌以及影像处理等, 扩展模块包括数字地面模型提取 (ATE/eATE)、地形编辑器 (Terrain Editor)、数字测图系统 (PRO600)、立体分析 (Stereo Analyst) 等。LPS 的核心功能和扩展模块组合起来形成了一个完整的空间数据生成系统, 能够高效率高精度地生产空间基础数据。

### 6.2.7 其他软件或模块

除了如上所述的点云处理软件, 还有美国的 LIDAR Analyst 模块、德国 Inpho 软件的 DTMaster 模块、Pointools 公司的 Pointools 软件、CloudCompare 软件, 以及中国测绘科学研究院研发的 LidarStation 数据处理软件<sup>[155-156]</sup>等。

### 6.2.8 目前点云处理软件或模块存在的问题

通过上述比较分析发现, 目前的 LiDAR 点云数据处理软件或是为了配合其所对应的 LiDAR 硬件而提供的相关功能, 如 RealWorks Survey 是美国 Trimble 公司专门为三维扫描应用设计的软件; 或是只提供简单的功能和操作使用, 如 Quick Terrain Reader/Modeler 一般是用来读取并显示三维点云; 或者某些功能时需大量的人机交互, 如 TerraScan 模块在对点云进行滤波分类时需不断的人为试验以确定合理的阈值; 或是运行速度慢, 数据处理效率偏低, 如 TerraSolid 系列软件是基于 Micorstation 开发, 需在运行 Micorstation 的基础上加载模块, 因此受限于 Micorstation, 浏览起来闪烁较为明显, 速度较慢; 同时大部分软件都封装完毕, 不提供开发接口, 用户无法按照自身的要求和算法进行点云数据处理。并且目前的软件更多关注于如何处理陆地上的要素, 如道路的提取、电力线的提取、建筑物的建模等等, 无海岸线提取这一功能或涉及很少。针对目前点云处理软件现状及存在的问题, 本章在第三章、第四章、第五章研究的理论和方法技术的支撑下, 意欲设计并编制海岸线提取模块。

通过分析比较, 美国 ESRI 公司的 ENVI 软件和 ArcGIS 软件分别提供了 IDL 语言和 ArcGIS Engine 可用于编辑处理 LiDAR 点云数据等功能的开发, 鉴于 ArcGIS 是目前最强大的地理信息软件之一, 因此本文将采用 ArcGIS Engine 实现海岸线的提取功能。

## 6.3 海岸线提取软件的设计

### 6.3.1 开发平台

ArcGIS Engine 是 ESRI 公司 ArcGIS 产品的二次开发平台, 是一套强大的 COM 组件集合, 可有效地管理众多的 COM 对象。其前身是 ArcObjects 组件, 开发人员能够利

用 ArcObjects 开发出功能强大的 GIS 软件，但在 ArcGIS 9.0 版本之前，ArcObjects 不是独立的应用产品，只能在庞大的 ArcGIS Desktop 框架下运行，无法脱离 ArcGIS 而单独运行，因此 ESRI 公司将其中的一些核心组件单独打包，于 2004 年发布了 ArcGIS Engine。

ArcGIS Engine 可独立于 ArcGIS 桌面，无需购买 ArcGIS Desktop，因此其在灵活性和费用上占有很大的优势；同时，ArcGIS Engine 是一套完整的用于构建应用的嵌入式 GIS 程序的组件库，可用来创建新的应用程序或在自定义的软件中扩展 GIS 的功能，也可将 GIS 功能集成到已存在的应用中，也可使用扩展模块如 ArcGIS 的 3D 分析模块和空间分析模块进行扩展<sup>[157]</sup>。

C#是一种面向对象的编程语言，融合了VB的简单可视化操作和C++的高运行效率，具有强大的操作能力、优雅的语法风格、创新的语言特性及便捷的面向组件支撑等优势，因此本文将利用C#语言和ArcGIS Engine以及donetbar的界面美化软件开展该海岸线提取的软件开发。

### 6.3.2 功能模块的设计

本软件的关键功能是建立在平均大潮高潮面算法以及海岸线提取技术的研究基础上，因此分为两个主要模块：一是平均大潮高潮面计算模块，包括基于高低潮信息文件的平均大潮高潮面计算、基于潮汐模型的平均大潮高潮面计算以及平均大潮高潮面的垂直基准转换等功能；二是基于 ArcGIS Engine 的海岸线提取模块，包括点云数据的输入与显示、点云数据的预处理、多种方法的海岸线提取以及海岸线判绘等功能。软件功能模块设计如图 6.9 所示。

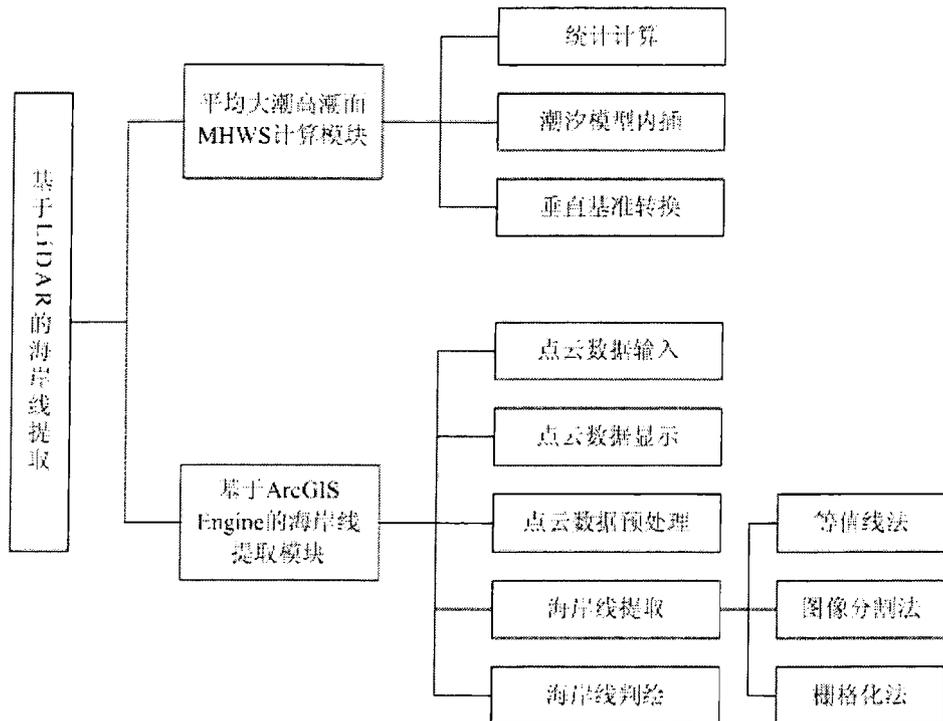


图 6.9 软件功能模块设计

## 6.4 海岸线提取软件的功能实现

### 6.4.1 平均大潮高潮面计算模块

本模块将实现平均大潮高潮面的统计计算以及在多种海域垂直基准间的转换，具体为：

#### 1、平均大潮高潮面的统计计算

按本文第三章设计的统计算法，由高低潮信息文件计算平均大潮高潮面。与深度基准面相似，该计算值是指在当地平均海面上的高度。高低潮信息文件来源于验潮站长期水位数据的统计或调和常数的预报。

#### 2、基于潮汐模型的平均大潮高潮面计算

对于远离长期验潮站的测区，可由潮汐模型内插出测区的调和常数，进而由调和常数预报高低潮信息，实现平均大潮高潮面的计算。

#### 3、平均大潮高潮面的基准转换

依据海面地形、高程异常等垂直基准转换信息，将基于当地平均海面的平均大潮高潮面计算结果转换为国家 85 高程或大地高，以实现与点云数据的高程系统的统一。垂直基准转换信息可来源于测区的已知信息，本模块将提供由海面地形模型、平均海面高模型、似大地水准面模型内插的功能。

### 6.4.2 基于ArcGIS Engine的海岸线提取模块

本模块包括点云数据的录入与显示、点云数据的预处理、多种方法的海岸线提取以及海岸线判绘等功能。

#### 6.4.2.1 点云数据录入

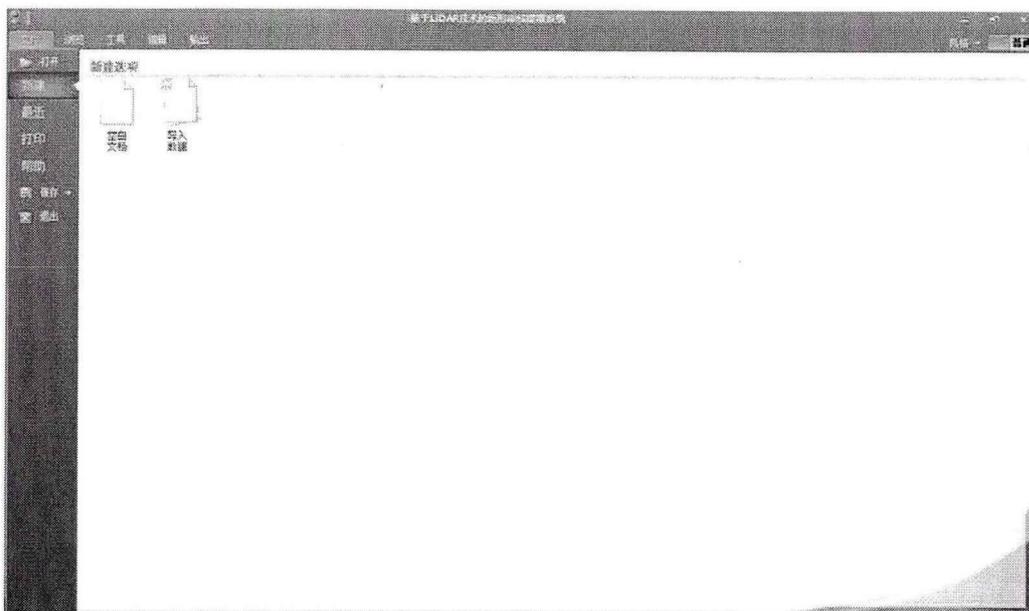


图 6.10 数据录入界面

支持多种数据格式：① las 各版本，也可查看 las 数据的头文件；② ASCII 文件格式、shapefile 文件、DEM 以及栅格数据。同时可将 las 数据转换为.txt、shapefile、DEM 和栅格数据。数据录入界面如图 6.10 所示。

#### 6.4.2.2 点云数据的显示

该模块可以二维形式显示（高程则通过颜色以区分），也可更形象逼真地进行三维显示，同时实现放大、缩小、全屏及漫游等功能，能够快速显示海量的点云数据。三维显示点云如图 6.11 所示。

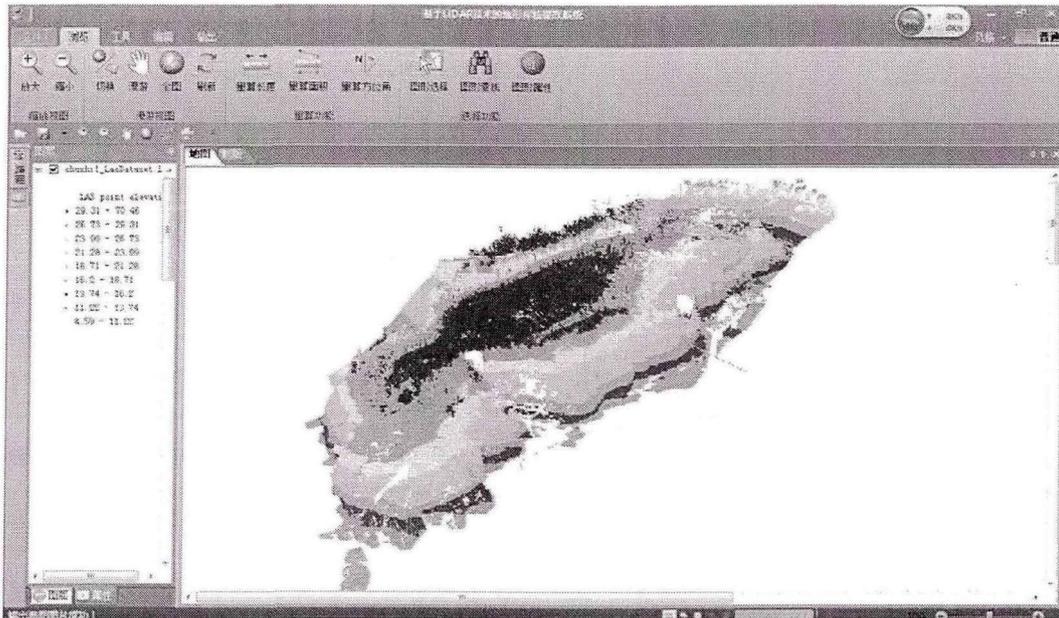


图 6.11 点云数据的三维显示

#### 6.4.2.3 点云数据的预处理

能够进行简单的点云预处理：通过设置高程阈值，剔除粗差，并对点云进行滤波分类。由于目前的滤波算法不具有适普性，无法应对复杂多变的海岸地形，因此在该模块中采取一种快捷的滤波分类方法：根据 MHWS 高程，设置一阈值  $\Delta h$ ，以此高程为中线，建立半径为  $\Delta h$  的缓冲带，删除缓冲带以外的点云，从而保留缓冲带内的点云，即为海岸带点云。这样既减少点云的数量，提高了处理速度，又免除了因为滤波分类不合理而产生的误差。生成的海岸带点云以二维形式显示如图 6.12 所示。

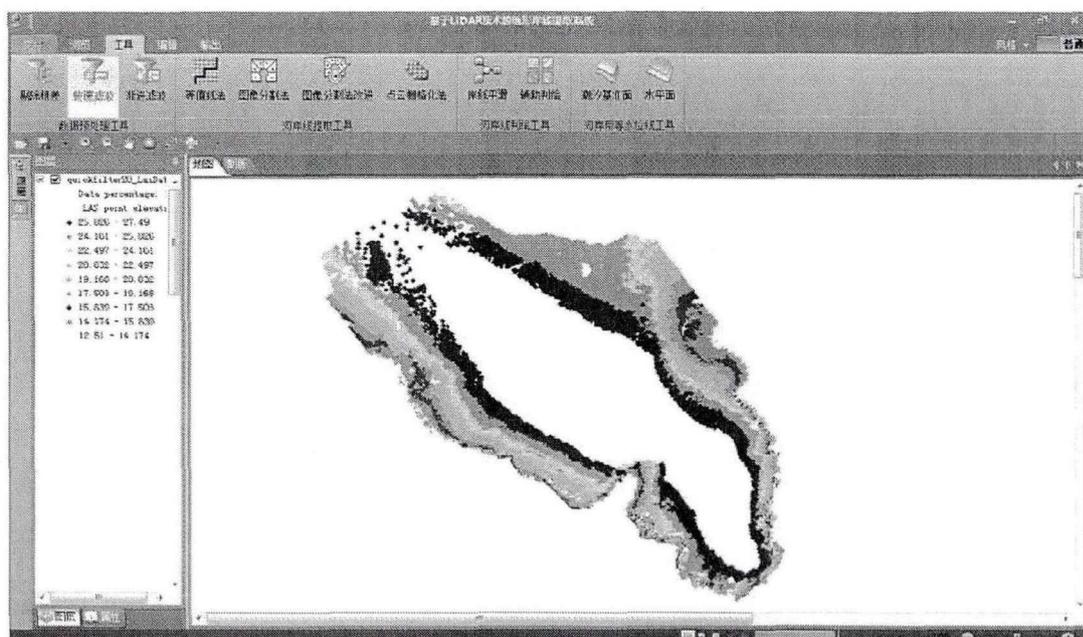


图 6.12 快速滤波后的点云数据显示

#### 6.4.2.4 海岸线的提取

可由等值线追踪法、图像分割法、图像分割改进法、点云栅格化法等 4 种方法，从 LiDAR 点云中提取海岸线。如图 6.13 为栅格化法提取海岸线的示例。

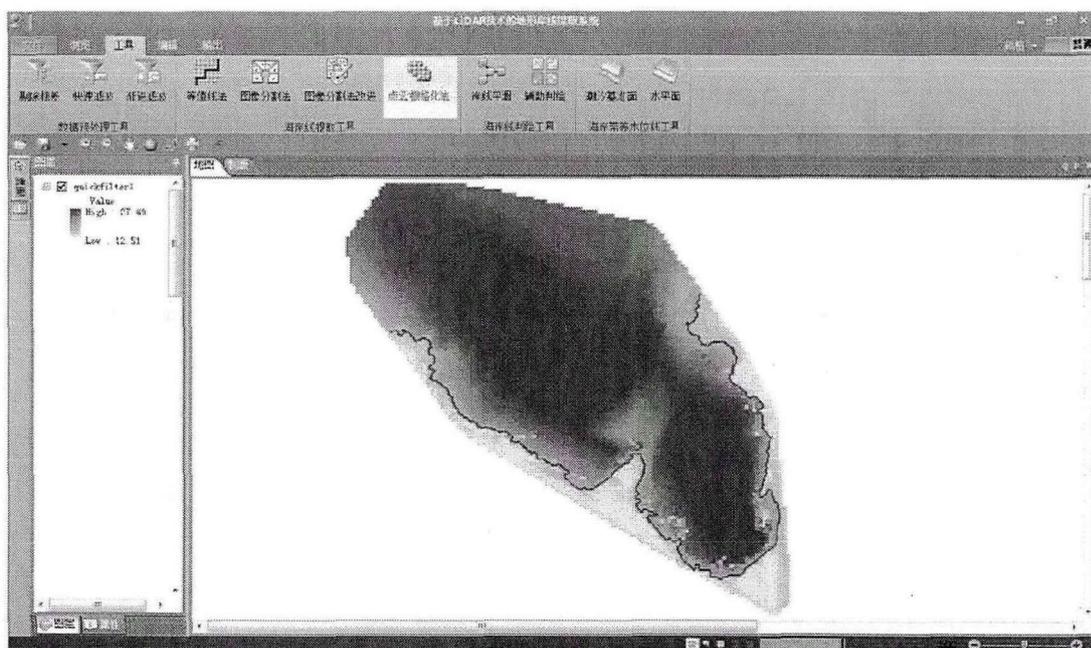


图 6.13 栅格化法提取海岸线

#### 6.4.2.5 海岸线的判绘

提供对提取海岸线的判辨和修编等功能，可结合遥感影像等其它数据源，对点云数据空白区补充，及对海岸线进行平滑等处理，最终提供符合标准的产品。

### 6.5 本章小结

本章简要介绍并分析了目前已有的 LiDAR 点云数据处理软件, 针对 LiDAR 数据处理软件缺少海岸线提取功能, 在本文第三章的平均大潮高潮面算法与第四章、第五章的海岸线提取方法等研究成果基础上, 基于 ArcGIS Engine 设计开发海岸线提取软件, 可进行平均大潮高潮面的统计计算以及在多种海域垂直基准间的转换; 同时具有点云数据的录入与显示、点云数据的预处理、多种方法的海岸线提取以及海岸线判绘等功能。该海岸线提取软件可作为由 LiDAR 数据精确测绘海岸线的一个工具, 实现海岸线测绘由传统的实地测量模式 (主观的、时效性差且工作量大的测量模式) 转变为新兴的 LiDAR 技术条件下的岸线快速测量模式 (高效的、客观的测量模式)。

## 第七章 总结与展望

### 7.1 结论

本文在分析研究国内外 LiDAR 提取海岸线现状的基础上,以完善海岸线的科学严谨定义、平均大潮高潮面的扩展及算法设计、海岸线提取方法研究及提取工具的设计为主线,系统地研究并构建了由 LiDAR 数据精确测绘海岸线的理论与技术方法,主要研究结论总结如下:

1、分析了我国相关标准的海岸线定义,指出现行以痕迹岸线为主的定义方式,使得岸线测定受主观因素影响大,且不满足测绘学对地形要素几何和物理意义准确唯一表示的基本要求。提出在测绘学范畴下我国海岸线应采用基于潮汐基准面的定义方式,分析认为潮汐基准面应选择平均大潮高潮面,海岸线定义为平均大潮高潮线,这是 LiDAR 技术条件下提取海岸线的必要条件。同时,指出平均大潮高潮面在概念上不能覆盖所有潮汐类型、算法上也不完善。

2、从潮差变化规律角度,将“大潮”概念由海洋潮汐学上局限于半日潮类型的朔望大潮,扩展包含日潮类型的回归大潮。据此实现了“平均大潮高潮面”概念的完善。设计了由实测水位或天文预报潮位数据统计计算大潮平均高潮位、大潮平均高高潮位的算法,该统计算法消除了以潮汐类型数人为分类的问题,且能保证只将天文大潮纳入统计。由精密潮汐模型仿真无潮点附近的连续站点,以特征潮位面应空间连续平滑变化为标准,分析指出平均大潮高潮面应选择统计算法中的大潮平均高高潮位。由我国沿岸 50 个长期验潮站实测水位数据,统计得出,平均大潮高潮面的潮位累积频率平均为 97%、相对理论最高潮面约为 74%,符合我国海岸线定义的内涵。

3、在分析目前国际上常用的海岸剖面法、等值线追踪法和图像分割法等方法从 LiDAR 点云中提取海岸线存在的问题,提出了图像分割改进法,实例分析表明,该方法能可靠地提取形态平滑的海岸线,海岸线后期编辑处理的工作量很少,效率高。针对图形分割法及其改进方法无法同时提取多种辅助岸线要素,以及无法根据比例尺的要求提取岸线的问题,提出了点云栅格化法提取海岸线。实例表明,栅格化法提取的海岸线形态合理、可靠,且只需极少的人工编辑处理,在精度上与图像分割改进法相当,但在提取多种辅助岸线要素时,效率上更优异。

4、分析检验了等值线追踪法、图像分割改进法与栅格化法的普遍适用性。四个实例的结果表明,等值线追踪法提取的海岸线普遍碎乱、存在众多封闭多边形,而图像分割改进法与栅格化法提取的岸线在曲折趋势上基本一致,岸线平滑、形态合理。提取的海岸线在整体上与实测痕迹线是吻合的,证明了对海岸线定义的论证是正确的,设计的算法与提出的提取方法是可靠的。

5、在分析目前 LiDAR 点云数据处理软件功能的基础上,指出点云处理软件较硬件的发展明显落后,功能单一、不全面,缺少岸线提取等问题,在本文研究的理论和方法技术的支撑下,基于 ArcGIS Engine 设计并编制了海岸线提取软件,这表明本文关于海岸线定义与海岸线提取等相关的理论与技术方法具有较强的实用价值,能实现由 LiDAR 数据精确测绘海岸线的目的。

## 7.2 创新点

1、针对目前我国海岸线定义及位置确定不明确的问题,并结合我国国情,给出并完善了海岸线科学严谨的定义:平均大潮高潮面与海岸的交接线,即平均大潮高潮线。

2、针对平均大潮高潮面概念只存在于半日潮类型海域的问题,从潮差变化规律角度,将“大潮”概念由海洋潮汐学上局限于半日潮类型的朔望大潮,扩展包含日潮类型的回归大潮。据此实现了“平均大潮高潮面”概念的完善。

3、设计了基于实测水位数据的统计算法,通过潮汐最复杂的无潮点附近的仿真站点,以特征潮位面空间连续平滑变化为标准,选择确定平均大潮高潮面的算法为统计算法中的大潮平均高高潮位。对我国沿岸 50 个长期验潮站实测水位数据的计算与统计,证明其符合海岸线最基本的内涵“海岸线是划分喜盐生物与淡水环境生物的界线”。

4、提出了海岸线提取的图像分割改进方法,四个不同类型海岸的实例分析表明,该方法提高了海岸线提取的效率,提取的海岸线可靠、形态平滑。

5、提出了海岸线提取的点云栅格化法,可实现任意给定高程的辅助岸线的提取。四个不同类型海岸的实例分析表明,栅格化法提取的海岸线形态合理、可靠,且只需极少的人工编辑处理,在精度上与图像分割改进方法相当,而在提取多种辅助岸线要素时,效率上更优异。

## 7.3 展望

LiDAR 技术是海岸带与海岛礁测绘的发展方向,为海岸线的精确测绘提供了数据基础。基于潮汐基准面的海岸线定义及相应算法、提取潮汐基准线的技术方法等,是由 LiDAR 点云数据提取海岸线的基础。但目前国内对这两个方面的研究都处于起步阶段,本文以海岸线定义、海岸线提取方法至海岸线提取工具为主线,尝试构建由 LiDAR 数据精确测绘海岸线的理论与技术方法体系。本文的研究已取得了一定的突破,但该体系还没有完全构建,后续将对以下两个方面开展研究工作:

1、选择我国沿岸各潮汐类型的典型验潮站,通过实测验潮站附近的痕迹岸线(选受海浪、流等影响较小的陡崖、人工海岸等),通过对比分析平均大潮高潮面与痕迹岸线的吻合程度,进一步明确平均大潮高潮线与痕迹岸线的关系。

2、对于远离大陆的海岛,潮汐基准面与垂直基准转换将通过潮汐模型与海域垂直基准转换模型等实现,此时,可发展以海岸线为参考的质量与精度评估方法:综合相邻航

带的水边线、海岸线的高程差异、痕迹岸线空间形态等信息，实现对水位推算、基准面推算、基准转换与基准点等的精度评估。

## 参考文献

- [1] 王家耀. 关于信息时代地图学的再思考[J]. 测绘科学技术学报, 2013(4): 329-333.
- [2] 于彩霞, 王家耀, 许军, 等. 海岸线提取技术研究进展[J]. 测绘科学与技术学报, 2014, 31(3): 305-309.
- [3] 高燕. 越南大陆海岸线遥感智能解译方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [4] 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.
- [5] 罗伊萍. LIDAR 数据滤波和影像辅助提取建筑物[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [6] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [7] 杨洋. 基于车载 LIDAR 数据的建筑物立面重建技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [8] Moore, L.J. Shoreline Mapping Techniques [J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16(1): 111-124.
- [9] Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., & Gelfenbaum, G. Linking Proxy-Based and Datum-Based Shorelines on a High-Energy Coastline: Implications for Shoreline Change Analyses [J]. Journal of Coastal Research, 2003, 38: 57-82.
- [10] O'Connell, J. F. & Leatherman, S.P. Coastal Erosion Hazards and Mapping along the Massachusetts Shore [J]. Journal of Coastal Research, 1999, 28: 27-33.
- [11] O'Connell, J. F. Documenting Short-Term Variability of Beach Reference Features Using a Volunteer Beach & Dune Profiling Program in Massachusetts [J]. Proceedings of the 14th Biennial Coastal Zone Conference, 2005.
- [12] Elizabeth, H.B., Ian, L. T. Shoreline Definition and Detection: A Review [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(4): 688-703.
- [13] Pajak, M.J. & Leatherman, S.P. The High Water Line as Shoreline Indicator [J]. Journal of Coastal Research, 2002, 18(2), p. 329-337.
- [14] Shalowitz, A. L. Shore and Sea Boundaries with Special Reference to the Interpretation and Use of Coast and Geodetic Survey Data [M]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1964.
- [15] Farrell, S., Lepp, T. Speer, B., etc. Mapping erosion hazard areas in Ocean County [J]. Journal of Coastal Research, 1999, 28: 50-57.
- [16] Fenster, M. S., Dolan, R. Mapping erosion hazard areas in the City of Virginia Beach [J]. Journal of Coastal Research, 1999, 28: 56-68.
- [17] Leatherman, S. P., Anders, F. J. Mapping and managing coastal erosion hazards in New York [J]. Journal of Coastal Research, 1999, 28: 34-42.
- [18] Leatherman, S. P., Eskandary, L. S. Evaluation of Coastal Erosion Hazards along Delaware's

- Atlantic Coast [J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, 28: 43-49.
- [19] Moore, L.J., Benumof, B.T., Griggs, G. B. Coastal Erosion Hazards in Santa Cruz and San Diego[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, 28:121-139.
- [20] Priest, G. R. Coastal Shoreline Change Study: Northern and Central Lincoln Couty, Oregon[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, 28:140-157.
- [21] Stephen T. M., Robert W. F. Where's the Shoreline? Sources of Historical High Water Lines Developed in the Context of Massachusetts coastal Regulations [J]. *International Federation of Surveyors*, 2008(2): 1-18.
- [22] Rongxing Li, Ruijin Ma, Kaichang Di. Digital Tide-Coordinated Shoreline [J]. *Marine Geodesy*, 2002(25): 27-36.
- [23] Ismael, F. L., Fernando J, A. T., Manuel A, A. T., etc. A New, Robust, and Accurate Method to Extract Tide-Coordinated Shorelines from Coastal Elevation Models [J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(3): 683-699.
- [24] Fisher, J.S., Overton, M.F. Interpretation of Shoreline Position from Aerial Photographs. *Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering[C]*, Kobe, Japan, 1994: 1998-2003.
- [25] Parker, B. Where is the Shoreline? The Answer is not as Simple as One Might Expect [J]. *Hydro International*, 2001, 5(5): 6-9.
- [26] Hess, K. W. Tidal Datums and Tide Coordination [J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 38: 38-43.
- [27] Stockdon, H. F., Sallenger, A. H., List, J. H., et al. Estimation of Shoreline Position and Change Using Airborne Topographic Lidar Data[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, 18(3): 502-513.
- [28] List, J.H., Farris, A.S., Sullivan, C. Reversing Storm Hotspots on Sandy Beaches: Spatial and Temporal Characteristics [J]. *Marine Geology*, 2006(226): 261-279.
- [29] Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., & Gelfenbaum, G. Linking Proxy-Based and Datum-Based Shorelines on a High-Energy Coastline: Implications for Shoreline Change Analyses [J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 38: 57-82.
- [30] 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.
- [31] 杨玉娣, 边淑华. 海岸线及其划定方法探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2007, 6: 34-35.
- [32] 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) : 28-33.
- [33] 王义刚, 夏雪瑾, 冯媛媛. 陆海分界和河海分界探讨[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(增): 47-54.
- [34] 王长海, 邱桔斐, 丁红. 海域使用中有关海岸线的问题探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(4): 51-56.

- [35] 党亚民, 程鹏飞, 章传银, 等. 海岛礁测绘技术与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [36] 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.
- [37] L.C. Chen, J.Y. Rau. Detection of Shoreline Changes for Tideland Areas using Multi-temporal Satellite Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(17): 3383-3397.
- [38] Joo-Hyung Ryu, Joong-Sun Won, Kyung Duck Min. Waterline Extraction from Landsat TM Data in a Tidal Flat: A Case Study in Gom so Bay, Korea[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(3): 442-456.
- [39] Niedermeier, A, Lehner, S., Sander, J. Monitoring Big River Estuaries Using SAR Images [J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001(4): 1756-1758.
- [40] Jung-Kung Liu, Rongxing Li, Sagar Deshpande, et al. Estimation of Blufflines Using Topographic Lidar Data and Orthoimages[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2009, 75(1): 69-79.
- [41] Crowell, M., Leatherman, S.P., Buckley, M.K. Historical Shoreline Change: Error Analysis and Mapping Accuracy [J]. Journal of Coastal Research, 1991, 7(3): 839-852.
- [42] Martin, J. Analysis of the Wet/dry Line as an Indicator of Shoreline Position on a Sand Beach[D]. America, North Carolina State University, 1997, p71.
- [43] Morton, R.A., Speed, F.M. Evaluation of Shorelines and Legal Boundaries Controlled by Water Levels on Sandy Beaches [J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(4): 1373-1384.
- [44] Overton, M.F., Grenier, R.R., Judge, E.K., etc. Identification and Analysis of Coastal Erosion Hazard Areas: Dare and Brunswick Counties, North Carolina[J]. Journal of Coastal Research Special Issue, 1999(28): 69-84.
- [45] Patrick, W. L., Jeffrey, H. L., Jeffrey, D. W. Mean High Water and Wet/dry Shorelines [M]. North Carolina Division of Coastal Management, 2004: 12..
- [46] Dolan, R., Hayden, B.P., May, P., etc. The Reliability of Shoreline Change Measurements from Aerial Photographs [J]. Shore and Beach, 1980, 48(4): 22-29.
- [47] Moore, L.J., Ruggiero, P., List, J.H. Comparing Mean High Water and High Water Shorelines: Should Proxy-datum Offsets Be Incorporated into Shoreline Change Analysis? [J]. Journal of Coastal Research, 2006, 22(4): 894-905.
- [48] Daniels, R.C., Ruggiero, P., Mccandless, D. Interpretation of the Average High Water Line from Aerial Photography: Variability and Repeatability [J]. Southwest Washington Coastal Erosion Workshop Report 1999. Eds. G. Gelfenbaum and G. Kaminsky. USGS Open-File Report. 2000(00-439): 58-74.
- [49] Robertson, W. V., Whitman D., Zhang K. Q., et al. Mapping Shoreline Position Using Airborne Laser Altimetry [J]. Journal of Coastal Research, 2004, 20(3): 884-892.

- [50] Hongxing Liu, Douglas Sherman, Songgang Gu. 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.
- [51] 冯兰娣, 孙效功, 胥可辉. 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, 2002, 32(5): 777-781.
- [52] 朱小鹤. 珠江口海岸线变化的遥感监测[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 20-22.
- [53] 瞿继双, 王超, 王正志. 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, 2003, 8(7): 805-809.
- [54] 刘鹏. 海岸线影像特征提取方法与实证研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- [55] 张锁平, 张春田. 基于全变差和脊波变换的海岸线提取算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 2580-2585.
- [56] 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.
- [57] 李传龙, 李颖, 马龙. 一种新的遥感图像海岸线检测方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 212-214.
- [58] 马小峰. 海岸线卫星遥感提取方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [59] 沈芳, 郜昂, 吴建平, 等. 淤泥质潮滩水边线提取的遥感研究及DEM构建[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 102-107.
- [60] 刘燕春, 张鹰. 基于遥感岸线识别技术的射阳河口潮滩冲淤演变研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 658-663.
- [61] 孙晓宇. 环渤海重点区域岸线、湿地提取及时空变化研究[R]. 中国科学院博士后研究工作报告, 2010.
- [62] 高义. 我国大陆海岸线 30 年时空变化研究[D]. 烟台: 中国科学院海岸带研究, 2011.
- [63] 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): 77-104.
- [64] 孙美仙, 张伟. 福建省海岸线遥感调查方法及其应用研究[J]. 台湾海峡, 2004, 23(2): 213-218.
- [65] 黄海军, 李成治, 郭建军. 卫星影像在黄河三角洲变化研究中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 30-37.
- [66] 韩震, 恽才兴. 伶仃洋大铲湾潮滩冲淤遥感反演研究[J]. 海洋学报, 2003, 25(2): 58-63.
- [67] 王忠蕾, 张训华. 基于 RS 的海岸线动态监测研究进展[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(4): 1-7.
- [68] 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.
- [69] 刘善伟, 张杰, 马毅, 等. 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, 2011, 26(5): 613-618.

- [70] 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[J]. 测绘通报, 2011(3): 41-44.
- [71] 申家双. 海岸带等水位线信息提取与垂直基准转换技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- [72] 张良, 马洪超, 邬建伟. 联合机载 LiDAR 数据和潮汐数据自动提取潮位线[J]. 遥感学报, 2012, 16(2): 405-416.
- [73] 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.
- [74] 李杰, 孙楠楠, 唐秋华, 等. 三维激光扫描技术在海岸线测绘中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2012, 3: 90-95.
- [75] 倪绍起, 张杰, 马毅, 等. 基于机载 LiDAR 与潮汐推算的海岸带自然岸线遥感提取方法研究[J]. 海洋学研究, 2013, 31(3): 55-61.
- [76] 暴景阳, 许军, 于彩霞. 航空摄影测量模式下的海岸线综合推算技术[J]. 海洋测绘, 2013, 33(6): 1-5.
- [77] 暴景阳, 许军. 卫星测高数据的潮汐提取与建模应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2013.
- [78] 龚亮. 机载 LiDAR 点云数据分类技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- [79] 赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [80] 袁枫. 机载 LiDAR 数据处理与土地利用分类研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [81] 王永平. 机载 LiDAR 数据处理及林业三维信息提取研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2006.
- [82] 张丽军. 基于 LiDAR 的康西瓦断裂晚第四纪滑动速率研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [83] Andre Samberg. An Implementation of the ASPRS LAS Standard [J]. IAPRS Volume, Part 3/W52, 2007: 363-372.
- [84] ASPRS LiDAR Data Exchange Format Standard Version 1.0. <http://www.lasformat.org>.
- [85] Wehr A, Lohr U. Airborne Laser Scanning- an Introduction and Overview [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 68-82.
- [86] Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2/3):199-214.
- [87] Michael S R. Manual of Airborne Topographic LiDAR [M]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2012.
- [88] Mercer J B, Schnick S. Comparison of DEMs from STAR-31 Interferometric SAR and Scanning Laser[C]. Intermap Technologies Corp White Paper. Calgary, Alberta, Canada, 2000.
- [89] Andre Samberg. An Implementation of the ASPRS LAS Standard [J]. IAPRS Volume, Part 3/W52, 2007: 363-372.

- [90] ASPRS LiDAR Data Exchange Format Standard Version 1.4. <http://www.lasformat.org>.
- [91] Lewis Graham. Las 1.4 Specification [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012(2): 93-102.
- [92] 甘桂琴. 机载 LiDAR 点云数据滤波方法研究[D]. 中南大学, 2012.
- [93] Lindenberger J. Laser-profilemessungen zur Topographischen Gelandaufnahme [D]. Stuttgart: Universitat Stuttgart, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1993.
- [94] 董静. 融合多特征的机载 LiDAR 点云数据滤波方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
- [95] Kilian J, Haalan, English M. Capture and Evaluation of Airborne Laser Scanner Data [J]. IAPRS, 1996, 31(B3): 383-388.
- [96] Zhang Keqi. A Progressive Morphological filter for Removing Non-ground Measurements from Airborne LiDAR Data [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 872-882.
- [97] 黄先锋, 李卉, 王潇, 等. 机载 LiDAR 数据滤波方法评述[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 466-469.
- [98] Filin S. Surface Clustering from Airborne Laser Scanning Data [J]. ISPRS Commission III Symposium" Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria, 2002.09: 119-124.
- [99] Roggero M. Object Segmentation with region growing and principle component analysis[J]. ISPRS Commission III Symposium" Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria, 2002.09: 289-294.
- [100] Lee I., Schenk T. Advanced DTM generation from LiDAR Data [J]. IAPRS, 2001(3): 57-65.
- [101] Sithole G. Filtering Strategy: Working Towards Reliability [J]. ISPRS Commission III Symposium" Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria, 2002, 09: 330-335.
- [102] Sithole G., Vosselman G. Filtering of Airborne Laser Scanning Data Based on Segmented Point Clouds [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2005, 36(Part 3/ W19): 66-71.
- [103] Axelsson P. DEM Generation form Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models [J]. IAPRS, 2000, 33(B4): 110-117.
- [104] 隋立春, 张熠斌, 张硕, 等. 基于渐进三角网的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1159-1163.
- [105] 周晓明, 马秋禾, 许晓亮, 等. LiDAR 点云滤波算法分析—以 ISPRS 测试实验为参考[J]. 测绘工程, 2011, 20(5): 36-39, 52.
- [106] 王金亮, 陈联君. 激光雷达点云数据的滤波算法述评[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 632-638.
- [107] 胡举, 杨辽, 沈金祥, 等. 一种基于分割的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 武汉大学学

- 报(信息科学版), 2012, 37(3): 318-321.
- [108] George Sithole, George Vosselman. Report: ISPRS Comparison of Filters[R]. 2003.08.
- [109] Joo-Hyung Ryu, Joong-Sun Won, Kyung Duck Min. 2002. Waterline Extraction from Landsat TM data in a Tidal Flat a Case Study in Gomso Bay, Korea [J]. Remote Sensing of Environment, 83: 442-456.
- [110] 李宁. 沿岸低潮线推算及领海基点确定技术研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2014.
- [111] 赵玉灵. 近 30 年来我国海岸线遥感调查与演变分析[J]. 国土资源遥感, 2010(86): 174-177.
- [112] U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. Computational Techniques for Tidal Datums Handbook[R]. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 2, 2003.
- [113] M. Harris, J. Brock, A. Nayegandhi, et al. Extracting Shorelines from NASA Airborne Topographic Lidar-Derived Digital Elevation Models[R]. U.S. Department of the Interior and Geological Survey, 2005.
- [114] Rebecca C. Smyth, James C. Gibeaut, John Andrews. The Texas Shoreline Change Project Coastal Mapping of West and East Bays in the Galveston Bay System using Airborne LiDAR [R]. Bureau of Economic Geology, 2003.
- [115] 国家技术监督局. GB 12327-1998 海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版, 1999.
- [116] 国家技术监督局. GB 12319-1998 海图图式[S]. 北京: 中国标准出版, 1999.
- [117] 《海洋测绘词典》编委会. 海洋测绘词典[M]. 北京: 测绘出版社, 1999.
- [118] 窦勇. 基于 RS、GIS 调查资料的青岛市海岸带生态系统健康评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [119] 国家测绘局. CH/T 7001-1999 海岸带地形图测绘规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [120] 国家技术监督局. 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.
- [121] 国家技术监督局. GB/T 20257.1-2007 地图图式[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [122] 交通运输部. JTS 131-2012 水运工程测量规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [123] 王长海, 邱桔斐, 丁红. 海域使用中有关海岸线的问题探讨[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(4): 51-56.
- [124] 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, 7: 61-67.
- [125] 方国洪, 王骥, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的调和分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [126] 孟德润, 田光耀, 刘雁春. 海洋潮汐学[M]. 北京: 海潮出版社, 1993.
- [127] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- [128] Hicks S.D. Tide and Current Glossary [M]. U.S. National Ocean Service, 1989.
- [129] Hicks S.D. Tide and Current Glossary [M]. U.S. National Ocean Service, 2000.
- [130] U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. Tidal Datums and Their

- Applications[R]. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1, 2001.
- [131] International Hydrographic Organization. Manual on Hydrography[M]. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2005.
- [132] 许军. 水下地形测量的水位改正效应研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2009.
- [133] 邓凯亮. 海域多源重力数据的处理、融合及应用研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2011.
- [134] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [135] LiDAR in ArcGIS 10.1 for Desktop. Esri 中国信息技术有限公司, 2012.
- [136] 郑义东, 彭认灿, 李树军, 等. 海图设计学[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2009.
- [137] 中国人民解放军总参谋部测绘局. 海岸带地形图测绘规范 CHB 3.3-01[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2003.
- [138] 张锦明. DEM 插值算法适应性研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
- [139] 王建, 白世彪, 陈晔, 等. Suerfer 8 地理信息制图[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004.
- [140] 刘颖, 翟京生. 海岸线形态的表达与自动综合[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(4): 78-81.
- [141] 刘欢, 谢三德, 王芳. 海岸线自动综合方法综述[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(3): 225-228.
- [142] 董箭, 彭认灿, 郑义东, 等. 基于滚动球模型的单值曲面缓冲体边界生成算法[J]. 2013, 25(7): 996-1004.
- [143] 陈惠荣, 彭认灿, 郑义东, 等. 以弯曲骨架线为化简指标的海岸线综合方法, 2011, 36(12): 1418-1422.
- [144] 王厚祥, 李进杰. 海图制图综合[M]. 北京: 测绘出版社, 1997.
- [145] 万幼川, 张永军. 摄影测量与遥感学科发展现状与趋势[J]. 工程勘察, 2009(3): 6-12.
- [146] 高志国. 基于 Terrasolid 软件的点云数据滤波处理研究[J]. 城市勘测, 2012(6): 66-69.
- [147] 张娟, 张小叶, 曹海春. 基于 Terrasolid 系列软件的机载 LiDAR 数据后处理[J]. 科技情况开发与经济, 2009, 19(26): 90-92.
- [148] 高志国. 地面三维激光扫描数据处理及建模研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [149] 陈云, 丁思磊, 王铁军. 基于 TerraSolid 软件的 Lidar 数据处理初探[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(4): 40-42.
- [150] 谭敏, 洪金益. 基于 Terrasolid 软件的车载激光点云数据处理初探[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(5): 195-198.
- [151] 陈新玺, 顾君晖, 邓鹏, 等. Terrasolid 与 ArcGIS 相结合的海量多波束数据成图处理方法[J]. 测绘科学, 2012, 5: 48-52.
- [152] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理办法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [153] 池建. 精通 ArcGIS 地理信息系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

- [154] 牟乃夏, 刘文宝, 王海银, 等. ArcGIS 10 地理信息系统教程[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [155] 张会霞, 朱文强. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [156] 刘正军, 徐胜攀, 左志权, 等. 机载激光雷达数据处理软件设计及关键技术研究[J]. 测绘通报, 2012(12): 91-93.
- [157] 李崇贵, 陈峥, 丰德恩, 等. ArcGIS Engine 组件式开发及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2013.

## 作者简介 攻读博士学位期间完成的主要工作

### 一、个人简历

于彩霞，女，1981年7月出生，山东青岛人。

1999年入海军大连舰艇学院 地图与地理信息工程专业，2003年6月获学士学位；

2004年入海军大连舰艇学院攻读硕士研究生，2007年3月获硕士学位；

2010年入解放军信息工程大学攻读博士，因休产假休学一年。

### 二、攻读博士学位期间发表的学术论文

1. 海岸线提取技术研究进展，《测绘科学技术学报》，2014年第3期，第一作者；

2. 基于云模型的数字海图制图质量评估方法，《海洋测绘》，2013年第3期，第一作者；

3. 一种从LiDAR点云中提取海岸线的新方法，《测绘通报》，2015年第5期，第一作者；

4. 一种基于LiDAR点云栅格化的海岸线提取方法，《测绘科学技术学报》，2015年第2期，第一作者；

5. 一种基于ArcGIS的LiDAR点云数据生成等值线的方法，《海洋测绘》，2015年第2期，第一作者；

6. 基于LiDAR点云的高精度DEM构建方法研究，《地理空间信息》，2015年第3期，第一作者；

7. 海岸线及其测绘技术探讨，《测绘工程》，已录用，拟2015年第7期，第一作者；

8. 一种基于LiDAR点云提取海岸线的二值图像化改进方法，《武汉大学学报（空间信息版）》，已修回，第一作者。

### 三、攻读博士学位期间的科研情况

1. 国家重点实验室开放基金《基于LiDAR的海岛礁地形岸线测绘技术》，在研，2015.01-2016.12，项目负责人；

2. 国家自然科学基金《高安全性高精度的数字水深模型构建理论与方法》，在研，2012.01-2015.12，参与者；

3. 国家863计划项目《南海通达性分析及航线自动生成》，已结题，

2012.01-2014.12, 完成人;

4. 国家 927 专项《深度基准面标注与更新技术研究》, 已结题,  
2012.06-2014.12, 完成人。

## 致 谢

当论文进行到此处时，我的内心充满了感激和感恩，感谢我的导师、我的老师、我的同事、我的朋友，以及我的亲人们，感谢在这次求学中遇到的所有的人和经历……

感谢我的导师王家耀院士，作为著名的地理信息系统专家，虽然已过古稀之年，他依然自如地引领于学科的前沿，依然无私地奉献于学科的发展，依然辛勤地耕耘于三尺讲台，他对学科发展的高瞻远瞩、对测绘事业的执著奉献、对学生的关爱教诲，无一不时刻激励着我、鞭策着我。师从王院士以来，我的每一次进步和成长，都凝聚着导师的心血，导师交给我的不仅是专业知识，更有严谨认真的态度和谦逊做人的准则。真心祝愿导师健康长寿，万事如意！

感谢解放军信息工程大学地理空间信息学院的老师、同学和朋友们！感谢吕晓华副院长、李宏伟主任、孙群教授、华一新教授、武芳教授、陈毓芬教授、魏海平教授、郭建忠教授、成毅副教授对我的指导和帮助；感谢院士团队的兄弟姐妹陈科、黄瑞阳、谢明霞、柳佳佳给予我温馨、和谐的家庭温暖；感谢我的朋友和同学们姚松林队长、郑束蕾、马兰、陈换新、李明、刘汉生、张欣、齐晓飞等对我生活上的关心和学习上的帮助。虽然只有短短一年的共同生活，感谢你们给予我一个温馨、丰富的异地球学经历，而你们将是我这一生的良师益友！

感谢在调研期间国家海洋局第一海洋研究所、武汉大学遥感国家重点实验室、中海达公司、天津海事测绘中心等单位对我无私的帮助和指点！

感谢海军大连舰艇学院的领导、老师、同事和朋友们！感谢海洋测绘系郑义东主任、张伟政委和赵希亮副主任对我工作、学习的关怀和指点；感谢我敬爱的老师们黄文骞教授、暴景阳教授、彭认灿教授、张立华教授、许坚副教授、李树军教授、田震教授、尤宝平副教授、徐卫明副教授对我学业上的指导和工作上的帮助；感谢我亲爱的同事和朋友们李改肖、陈惠荣、吴迪、王沫、王美娜、王玮、董箭、徐明、于亚静对我工作上的支持和生活上的关心。感谢海洋测绘系为我提供了一个和谐的成长和工作环境，能生活在这样的大家庭里是我莫大的荣幸！

感谢我的父母不辞辛苦地将我抚养长大、培养成人，又坚定不移地信任我、支持我、帮助我！感谢我的老公许军对我学业、工作及生活上的帮助和爱护，有你做人生伴侣是我一生的幸运！感谢我的儿子许铭宸小朋友，感谢他带给我的欢笑和感动，他是我的希望和力量的源泉，而我也正努力地带给他榜样的力量！

最后，再次感谢所有关心帮助过我的领导、老师、同事、朋友和亲人们！感谢一路有你们相伴！

2015年4月7日