

文章编号:1673-6338(2014)03-0305-05

# 海岸线提取技术研究进展

于彩霞<sup>1,2</sup>, 王家耀<sup>1</sup>, 许军<sup>2</sup>, 彭认灿<sup>2</sup>, 成毅<sup>1</sup>, 王沫<sup>1,2</sup>

(1. 信息工程大学 河南 郑州 450001; 2. 海军大连舰艇学院 辽宁 大连 116018)

**摘要:**探讨了海岸线定义不明确的问题。在总结实地测量痕迹线法和遥感影像提取法在测量海岸线的实现过程和关键技术的基础上,分析指出了这两种方法都存在效率低下、工作周期长、安全隐患大等缺点。介绍了国外利用航空 LiDAR 数据提取海岸线的主要方法及其实现过程。美国在垂直基准转换系统 VDatum 的支撑下, LiDAR 技术提取海岸线法获得了较广泛的应用,而国内在技术方法研究与海域垂直基准建设方面则处于起步阶段。最后针对海岸线测量存在的问题提出了几点建议。

**关键词:**海岸线提取;平均大潮高潮面;痕迹线;水边线;LiDAR 技术

中图分类号:P229 文献标识码:A DOI 编码:10.3969/j.issn.1673-6338.2014.03.018

## Advance of Coastline Extraction Technology

YU Caixia<sup>1,2</sup>, WANG Jiayao<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, PENG Rencan<sup>2</sup>, CHENG Yi<sup>1</sup>, WANG Mo<sup>1,2</sup>

(1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** Firstly, the problem of ambiguous coastline definition was discussed. Then based on the summary of field measuring mark line method and remote sensing extraction method to measure coastline, shortcomings of both methods that were inefficient, longer cycle and danger were pointed out. And then the mean methods and the realization process of coastline extraction by LiDAR abroad were discussed, moreover supported by VDatum (Vertical Datum Transformation) in the USA, the coastline extraction by LiDAR was applied much widely, while at home the method study and ocean vertical datum construction were at starting stage. In the end several proposals for coastline extraction were put forward.

**Key words:** coastline extraction; Mean High Water Springs (MHWS); mark line; water-edge line; LiDAR

海岸线是海洋与陆地的分界线,是海陆图上最重要的地形要素之一,被国际地理信息委员会 (IGDC) 定为最重要的 27 种地表特征之一。如何全面、快速、准确地测绘海岸线的位置及监测其动态变化,对于海岸带的科学管理和持续利用具有十分重要的现实意义,也是实现海洋可持续发展的有效方法之一。

海岸线包括大陆海岸线和岛屿海岸线,在我国,两者总长达 32 000 多千米,且海岸类型多种多样。如果采用传统的岸线测量方法,测量周期长,且需耗费大量的人力物力,不同的测量工作人员由于各自的知识与经验的不同,测量的岸线也存在着差异。遥感影像提取海岸线的方法,能够快速、大范围、高效率地提取岸线,弥补了传统测

量方法的缺点。但是由于受到影像分辨率和成像时间的限制,大多数学者从影像中提取到的是成像时刻的水边线,而非严格意义上的海岸线。

20 世纪 70 年代出现的 LiDAR 技术能直接、快速、高精度、高密度地获取地面三维信息,不受时间、空间限制,弥补了遥感影像不足,且 LiDAR 的一个重要应用特点是能够在一些使用传统测量方法比较困难甚至危险的地区进行作业,如海岸带、岛礁等。随着高精度 LiDAR 在海岸测量中的应用,利用点云数据提取海岸线的技术在国外特别是美国发展迅速,而在国内则处于起步阶段。

### 1 海岸线的定义问题

海岸线是海洋与陆地的分界线。广义上,瞬

收稿日期:2013-04-21;修回日期:2013-11-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(41074002);2013 年海军大连舰艇学院科研发展基金资助军事学术项目。

作者简介:于彩霞(1981-),女,山东青岛人,讲师,博士生,主要从事地图学与地理信息系统教学与研究。E-mail:yucaixia@163.com

时水位线是海洋与陆地的直观分界,因此可认为是海岸线。目前,海岸线的确定与变化趋势研究仍大多基于海洋调查目的,旨在查明海岸的基本状况,普遍将瞬时水位线等同于海岸线。特别是利用遥感影像动态监测海岸线的变化时,通常会将成像时刻的水边线(或痕迹线)代替为海岸线。

狭义上,海陆分界线是资源属性(土地或海洋)与法律管辖权的分割线,同时海岛岸线是海岛形状描绘与面积量算的依据。此时,海岸线的空间位置应与时间基本无关,且通常定义为某种特征潮位面。《海道测量规范》(GB12327-1998)<sup>[1]</sup>、《中国海图图式》(GB12319-1998)<sup>[2]</sup>和《地形图图式》(GB/T7929-1995)<sup>[3]</sup>等国家标准中规定,海岸线是指平均大潮高潮的痕迹所形成的水陆分界线。国家与地方法律以及相关的行业标准中都采用相似的定义。

但实际上,海岸线的定义并不明确,具体体现为实地测量时是测量痕迹线还是截取平均大潮高潮线。目前未见关于平均大潮高潮面与痕迹岸线的吻合度以及统计计算方法的系统研究,包括潮汐类型、时间跨度(历元)等问题的研究。这造成在相同海岸线的定义下,因施测人员对定义的理解差异、测量时间不同而导致标绘的海岸线间存在较大差异。这不符合测绘对地形要素几何和物理意义准确、唯一表示的要求。

## 2 实地痕迹线测量法

长期以来,测绘海岸线通常采用实地测量法,这也是最原始的常规海岸线测量方法,即采用光学测量仪器(经纬仪、全站仪等)在高潮潮位线附近每隔一定距离采集海岸线特征点,标划在数字地形图上并连接成线得到海岸线。随着GPS定位测量技术的发展,虽然能够全天候、动态、实时进行,但仍需人工携带GPS移动站到现场定位。

由于在进行实际测绘时无法测量平均大潮高潮线,因此《海岸带地形图测绘规范》(CHB 3.3-01)<sup>[4]</sup>中规定“海岸线以平均大潮高潮时所形成的实际痕迹进行测绘”,即以测量的痕迹线来代替海岸线。海岸的类型很多,包括(粉砂)淤泥质海岸、沙(砾)质海岸、基岩海岸、人工海岸和生物海岸五大类型。不同的海岸类型,其痕迹线的确定原则也不同<sup>[5-6]</sup>。

在不同类型的海岸上准确测量海岸线并不容易,测绘人员较容易进入实地测量的有部分(粉砂)淤泥质海岸、沙(砾)质海岸和人工海岸;对于

其他海岸类型,测绘人员难以到达或需要采取特殊措施才能到达,特别是当进行岩石陡岸测量时,有时需要测绘工作人员爬上悬崖采集特征点,费时费力,也存在着极大的危险性。

痕迹岸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,小范围内岸线高程不一致现象普遍存在。进行测量时受人为影响较大,不同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。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。

## 3 遥感影像提取海岸线法

遥感技术由于其多时相、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,具有较高的经济和社会效益。

随着遥感手段的发展,岸线确定及其变化已大多基于遥感技术。早期受限于遥感资料分辨率等的影响,基本都直接将瞬时水边线作为海岸线,后来发展为将湿/干线(wet/dry line)、平均大潮面(MHW)、植物生长分界线等作为海岸线。

### 3.1 水边线提取

水边线提取的实质是遥感影像边缘的提取,可分为人工目视解译与自动解译。目视解译通过人机交互方式把水边线描绘出来并保存成线性矢量图层,方法简单,但工作量大,精度受人为主观因素的影响;自动解译提取方法快捷,计算过程可以多次重复,方法较多。

Joo Hyung Ryu等<sup>[7]</sup>根据TM4和TM5两个波段对水体和陆地反射率的区分,选择出合适的阈值,把单纯的淤泥质海岸与混浊的海水分开,但在海水比较混浊的近岸,该方法的误差较大,他们同时指出水边线的提取不仅受到波段组合的影响,还受到所处位置的坡度等的影响。Andreas Niedermeier等<sup>[8]</sup>利用SAR影像,采用小波边缘检测等算法实现了对水边线的提取。张朝阳等<sup>[9]</sup>基于色差Canny和形态学色差从彩色遥感影像中提取海岸线,这种方法兼顾了梯度幅值计算中边缘定位准确和抑制噪声的要求,充分利用了彩色信息,较好地实现了海岸线的半自动提取。沈芳等<sup>[10]</sup>采用了多时相陆地卫星提取潮滩水边线的方法,探讨在不同潮情条件下,各光谱波段对淤泥质潮滩水边线判断的敏感性,分析表明沙质海岸

与淤泥质海岸水边线的确定方法存在较大差异。

由于海岸线的动态性,又不同于常规的陆地要素(如道路)特征的提取。所以,也有学者结合地学知识采用不同的岸线提取方法,如张鹰等<sup>[11]</sup>运用地学分析方法对遥感信息提取的对象进行专题分解,将实地调查的样本信息与遥感影像数据结合进行提取,属于人工分析与计算机处理相结合的半自动方法。

### 3.2 水边线的修正

目前大多数研究提取的海岸线都是瞬时水边线(成像时刻的水崖线),是一条动态变化的边界,并不是真正意义上的岸线。因此,部分学者在提取水边线的基础上,结合潮汐或生物生长分界等信息进行修正,以期提取真正意义上的海岸线。

严海兵等<sup>[12]</sup>根据卫星成像时刻的潮位高度、平均大潮高潮位的潮水高度以及海岸坡度等信息,计算出水边线至高潮线的水平距离,由此来确定海岸线的位置。这种潮位校正水边线的方法需要详细的潮位观测资料,且适于地形起伏小的海域。申家双等<sup>[13]</sup>利用水边线信息,结合潮汐模型(或验潮数据)推断出水边线的高程值,一系列不同潮位条件下获得的遥感水边线即可形成一系列已知高程信息的等高线,利用这些等高线和海图的零米线通过空间插值进而得到潮间带 DEM,最后根据潮汐模型计算当地平均大潮高潮面的高程,以此为高程参考面与 DEM 横切得到海岸线,但并未做相关计算来进行验证。张祥国等<sup>[14]</sup>认为通过间接地物更容易确认淤泥质海岸线,白茅草、盐蒿等耐盐碱植物一般稀疏分布在高潮位以上,可视其边界为海岸线。该方法在精度要求不高的情况下,可作海岸线计算,但不宜做定量分析。

### 3.3 存在的问题

作为传统的海岸线测量方法之一的航空摄影测量法同样需要在野外采集海岸线特征点,这些特征点的采集工作与实地测量法的工作量同样繁重且效率低下、危险系数高,并且要求影像清晰,当影像缺乏明显高潮潮位线特征时,往往难以进行判读。

目前,利用遥感影像进行海岸线的确定与变化趋势研究仍大多基于海洋调查目的,且因遥感资料成像时间、分辨率的限制,一般提取的是瞬时水边线(成像时刻的水涯线),并非海岸线(平均大潮高潮线),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。这种对于海岸线的提取旨在对海岸线进行资源调查,即查明海岸

的基本情况,而不是拥有明确精度指标的地理信息表示。并且提取的水边线精度受到遥感资料分辨率、成像时间的限制。一方面,我国海岸带地区缺少遥感影像,尤其是高分辨遥感影像(如 IK-NOS 卫星的遥感资料地面分辨率为 4 m,最高可达 1 m; QuickBird 数据的地面分辨率为 2.44 m,最高可达 0.61 m);另一方面,受到可见光遥感本身的限制,遥感成像时需要无云遮挡,即资料获取时受到一定的天气条件限制。当然,也可选用微波遥感传感器如合成孔径雷达(SAR)影像,其不受天气限制,但成本较高<sup>[15]</sup>。

## 4 LiDAR 技术提取海岸线法

LiDAR 技术可基于航空平台,获取海岸带的高分辨率点云数据,具有速度快、精度高的特点,成为海岸线提取的新技术。

### 4.1 国外研究现状

在国外, LiDAR 测量已经应用于大比例尺的海滩地形(Stockdon 等<sup>[16]</sup>)、海岸带的人为影响(Thornton 等<sup>[17]</sup>)、海崖破坏(Sallenger 等<sup>[18]</sup>)以及飓风引起的海岸变化(Sallenger 等<sup>[19]</sup>)。LiDAR 数据能够生成基于潮汐基准的垂直参考岸线(Allan 等<sup>[20]</sup>; Moore 等<sup>[21]</sup>; Parker<sup>[22]</sup>; Robertson 等<sup>[23]</sup>; Stockdon 等<sup>[16]</sup>)。

Limber 等<sup>[24-25]</sup>通过数据和观察对平均高潮面和湿/干线进行对比,并且评估了从 LiDAR 数据中提取平均高潮面的两种常用方法:一种方法是基于线性的离散原始 LiDAR 高程值来得到 MHW(Stockdon 等<sup>[16]</sup>; Weber 等<sup>[26]</sup>);另一种方法是基于从垂直校正的 LiDAR 数字高程模型(DEM 或者格网)中提取等值线(Hess 等<sup>[27]</sup>; Parker 等<sup>[22]</sup>)。两者的不同主要体现在从 LiDAR 数据中提取 MHW 的方法不同,即基于剖面方法和基于 VDatum 方法。得出的结论是:后一种方法比前一种方法得出的海岸线更靠岸近些,原因主要是 MHW 高程和定义的差异,以及处理 LiDAR 数据方法而产生的偏差。

Smith 等<sup>[28]</sup>利用北卡罗莱纳州部分海岸的 LiDAR 数据与 VDatum 方法提取了岸线。VDatum 中的 MHW 高程是沿岸连续变化的,所以海岸线上两段相近的岸线可能有不同的 MHW 值。由于 VDatum 中的 DEM 分辨率为 1 m 或更高,岸线可以勾画出许多小规模的地形特征,例如起伏的海滩嘴和十字水道。这种连续的地形经常会产生有噪音的岸线,必须人工平滑。依赖于该应用过程,

通过内插或光滑原始 LiDAR 数据点集来生成 DEM 的做法潜在地增加了其不确定性。

Stockdon 等<sup>[16]</sup>不使用 DEM,而使用原始的 LiDAR 数据进行统计分析。浅滩的 LiDAR 数据点密度足够形成线性回归,所以可以精确地定位 MHW。另外,可以简单地将置信区间应用到 MHW,用于解决回归的不确定性,也可以从回归线趋势来近似出海滩倾斜角度。相对于 VDatum, MHW 的高程不是连续变化的,并且大面积的海岸线保持不变。如果计算机能够处理这样繁重的原始 LiDAR 数据库(该数据库包括了上千万的高程点),从“真实”的角度,原始数据对于 DEM 就更具有优越性,同时对比于内插,高程值就可用来定位 MHW。

理论上,由海岸线(某个定义潮位面)的高程、高精度 LiDAR 数据生成的 DEM 就可以确定海岸线的平面位置,即提取出海岸线。具体可采用交叉海岸剖面法 CSP(Cross-Shore Profile Method)或等值线法(Contouring Method)。交叉海岸剖面法需花费较长的时间,等值线法简单易操作,许多数据处理软件中都有生成等值线的功能,某个定义潮位面高程所在的等值线即为海岸线。但实际确定的海岸线存在一定的问题:岸线的平面位置抖动较大,空间位置不连续,存在零碎的线段。造成这种情况的原因很多:靠近水线的 LiDAR 测量受到了波浪和潮汐的影响,浅滩的藻类海草沉积过厚,沙丘和滨后阶地脊部地形的精确分类, LiDAR 信号的噪声,以及湿地、海峡和洪水洼地的数据空缺等。因此,通常需要对提取的岸线进行人工识别、编辑与调整以确定最终空间位置连续、平滑的海岸线。

针对上述情况, Hongxing Liu 等<sup>[29]</sup>提出一种方法来自动识别和修正错误岸线段,从而生成一条可靠的海岸线。在 Texas 湾海岸获得了较好的效果。

#### 4.2 国内研究现状

国内对 LiDAR 点云处理技术的研究起步较晚,大都集中在如何利用 LiDAR 数据提取树木、建筑物、桥梁、车辆、三维城市建模,以及道路等陆地地物,而在海岸带测量方面的应用研究却鲜有。史照良等<sup>[30]</sup>运用机载 LiDAR 系统进行沿海滩涂、海岛礁测绘,开创了我国沿海滩涂、海岛礁高精度测图技术的新途径。于庆国等<sup>[31]</sup>使用 ALS50 海岛(礁)测绘生产技术基本实现了从数据采集到应用的全数字化过程,弥补了我国在岛

(礁)测绘方面的技术、装备和生产条件储备的不足。楼燕敏等<sup>[32]</sup>介绍了机载 LiDAR 技术在浙江省滩涂海岸地形测量项目中的技术优势和应用情况,并就航飞潮位选择、数据精度控制和数据处理方法进行了简单介绍。这些研究是从 LiDAR 作业和应用的角度出发,并未对后期的从三维数据中提取海岸线技术作进一步的更深层次的探究。

#### 4.3 存在的问题

LiDAR 数据是高密度、高精度的三维数据,理论上通过其提取的海岸线精度高,符合岸线提取要求,但其精度验证困难,绝大多数是通过与部分地区实地测量的结果相比较,或是同原图像进行叠加比较。

利用 LiDAR 测量海岸带及海岸线的相关方法与技术在海外研究较早,并得到了大量应用,特别是在美国,对海岸线的定义与算法很明确。该技术已逐渐成熟,并且具有 VDatum 软件的支持,但是该软件并未覆盖整个北卡罗来纳州,因此具有一定的局限性<sup>[33]</sup>。目前,国内对 LiDAR 点云处理技术的研究起步较晚,对于 LiDAR 在海岸带测量的应用还处于起步阶段,特别是从测绘角度确定海岸线等地形要素的研究还未见相关文献。

#### 5 结论和建议

在现阶段海岸线提取工作中,实地测量痕迹线法还将会持续较长一段时间,部分区域也会采用遥感影像提取方法,而 LiDAR 技术作为提取海岸线的新方法,具有高精度、高效益的优势,将在海岸线提取工作中发挥着越来越重要的作用。

1) 国内对海岸线的定义不够明确(至少可能存在理解差异),平均大潮高潮面只能在半日潮海域进行统计与计算,更无可靠的基准面数据集支撑。因此,需明确海岸线的定义和计算方法,统一海岸线提取标准,构建平均大潮高潮面与 1985 国家高程基准或椭球面的网格化模型。

2) LiDAR 具有全天候、高精度等优势,利用 LiDAR 数据提取海岸线这一新技术,具有自动化程度高和外业劳动强度低的优势。目前,国内无论在硬件、软件,或是相关应用方面(特别是在海岸带、海岛礁测绘)的研究还处于起步阶段,因此需要尽快建立一套以 LiDAR 技术为核心的测绘系统,充分发挥 LiDAR 在海岸带测绘的优势,提高海岸带测绘的效率。

3) 目前对海岸线提取的研究还只是局限于有限的范围,采取的方法也只是局限于特定的海

岸线类型 缺乏普遍适应性。在实际工作中,可根据具体的实际情况采用不同的方法,或者采用多种方法同时进行,相互补充,相互参考,从而提高海岸线提取的精度。

### 参考文献:

- [1] 国家技术监督局.海道测量规范[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [2] 国家技术监督局.中国海图图式[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [3] 国家技术监督局.地形图图式[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [4] 总参谋部测绘局.海岸带地形图测绘规范[S].北京,2003.
- [5] 夏东兴,段炎,吴桑云.现代海岸线划定方法研究[J].海洋学研究,2009(27):28-33.
- [6] 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.
- [7] JOO HYUNG RYU,JOONG SUNWON,KYUNG DUCK MIN. Water 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.
- [8] NIEDERMEIER A,LEHNERS,SANDER J. Monitoring Big River Estuaries Using SAR Images[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001(4):1756-1758.
- [9] 张朝阳,冯伍法,张俊华.基于色差的遥感影像海岸线的提取[J].测绘学院学报,2005,22(4):259-262.
- [10] 沈芳,郗昂,吴建平,等.淤泥质潮滩水变线提取的遥感研究及DEM构建——以长江口九段沙为例[J].测绘学报,2008,37(1):102-107.
- [11] 张鹰,邱永红.海岸带地物特征的遥感信息提取方法[J].海洋预报,2002,19(8):14-21.
- [12] 严海兵,李秉柏,陈敏东.遥感技术提取海岸线的研究进展[J].地域研究与开发,2009,28(1):101-105.
- [13] 申家双,翟京生,郭海涛,等.海岸线提取技术研究[J].海洋测绘,2009,29(6):74-77.
- [14] 张祥国,张忍顺,王艳,等.基于RS的淤泥质海岸滩涂淤长速度分析——以江苏赣榆县宋庄岸段为例[J].国土资源遥感,2005(4):69-73.
- [15] 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.
- [16] STOCKDON H,SALLENGER A,HOLMAN R,et al. Estimation of Shoreline Position and Change Using Airborne Topographic LiDAR Data[J]. Journal of Coastal Research, 2002, 18(3):502-513.
- [17] THORNTON E B,SALLENGER A H,CONFORTO SESTO J,et al. Sand Mining Impacts on Long-term Dune Erosion in Southern Monterey Bay[J]. Marine Geology, 2006, 229(1/2):45-58.
- [18] SALLENGER A,KRABILL W,BROCK J,et al. Sea-cliff Erosion as a Function of Beach Changes and Extreme Wave Runup during the 1997-98[J]. Marine Geology, 2002, 187(3/4):279-297.
- [19] SALLENGER A H,WRIGHT C W,LILLYCROP J. Coastal Impacts of the 2004 Hurricanes Measured with Airborne LiDAR: Initial Results[J]. Shore and Beach, 2005, 73(2/3):10-14.
- [20] ALLAN J C,KOMAR P D,PRIEST G R. Shoreline Variability on the High-Energy Oregon Coast and Its Usefulness in Erosion-Hazard Assessments [J]. Journal of Coastal Research Special Issue, 2003(38):83-105.
- [21] 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.
- [22] PARKER B. The Difficulties in Measuring a Consistently Defined Shoreline—the Problem of Vertical Referencing [J]. Journal of Coastal Research Special Issue, 2003(38):44-56.
- [23] ROBERTSON W,WHITMAN D,ZHANG K,et al. Mapping Shoreline Position Using Airborne Laser Altimetry [J]. Journal of Coastal Research, 2004, 20(3):884-892.
- [24] LIMBER P W,LIST J H,WARREN J W,et al. Using Topographic LiDAR Data to Delineate the North Carolina Shoreline [C]// Proceedings of Coastal Sediments' 07. New Orleans, Louisiana, 2007:1837-1850.
- [25] LIMBER P W,LIST J H,WARREN J W. Management Applications of LiDAR-Derived Mean High Water Shorelines in North Carolina [C]// Proceedings of Coastal Zone' 07. Portland, Oregon, 2007:5.
- [26] WEBER K M,LIST J H,MORGAN K L M. An Operational Mean High Water Datum for Determination of Shoreline Position from Topographic LiDAR Data. USGS Open-File Report 2005-1027 [R/OL]. [2005-10-2] (2013-01-20). <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1027/>.
- [27] HESS K W,SPARGO E,WONG A,et al. VDatum for Coastal North Carolina: Tidal Datums, Marine Grids, and Sea Surface Topography [R]. USA, Maryland: Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2005.
- [28] SMITH S L,HOLLAND D A, LONGLEY P A. The Importance of Understanding Error in LiDAR Digital Elevation Models [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004(35):996-1001.
- [29] 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.
- [30] 史照良,曹敏. LiDAR 技术在海岛礁、滩涂测绘中的应用 [J]. 测绘通报, 2007(5):49-53.
- [31] 于国庆,刘达,刘凯. 基于 ALS50 的海岛(礁)测绘生产研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(2):194-199.
- [32] 楼燕敏,吴迪. 机载 LiDAR 技术在浙江省滩涂海岸地形测量中的应用研究 [J]. 测绘通报, 2012(12):47-50.
- [33] PATRICK W L,JEFFREY H L,JEFFREY D W. Mean High Water and Wet/Dry Shorelines [M]. North Carolina: North Carolina Division of Coastal Management, 2004:12.

责任编辑 安敏