



机载激光雷达在水下地貌识别与断裂构造精细解译中的应用

刘 刚, 金鼎坚, 吴 芳, 于 坤, 李 奇, 张文凯, 王建超

Application of airborne LiDAR to identification of underwater geomorphology and fine interpretation of faults.

LIU Gang, JIN Dingjian, WU Fang, YU Kun, LI Qi, ZHANG Wenkai, and WANG Jianchao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021061502>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221

生物载体对海底冷泉-热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

澳大利亚波拿巴盆地N区块岩性圈闭识别探讨

Identification of lithologic traps in block N of Bonaparte Basin, Australia

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 183



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘刚, 金鼎坚, 吴芳, 等. 机载激光雷达在水下地貌识别与断裂构造精细解译中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 190-199.
LIU Gang, JIN Dingjian, WU Fang, et al. Application of airborne LiDAR to identification of underwater geomorphology and fine interpretation of faults.[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 190-199.

机载激光雷达在水下地貌识别与断裂构造精细解译中的应用

刘刚, 金鼎坚, 吴芳, 于坤, 李奇, 张文凯, 王建超

中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

摘要: 机载激光雷达水深测量是高效获取高精度近岸海底地形的一种新型技术, 具有测量精度高、效率高、作业区域广的特点。通过分析 CZMIL Nova II 机载激光雷达测深系统获取的南海某岛高分辨率海底地形数据, 发现除地貌类型的识别以外, 该数据还可用于海底断裂构造的高精度解译。通过对激光雷达测深渲染图像的解译, 发现工作区海底地貌由沙嘴、海岬、海湾、古波切台、岸坡、断陷洼地、峡谷、平原和断块残丘组成; 海底发育走向 NW、NNW、NNE 和 NEE 的 4 组主要断裂, 环绕海岛的岸线和水下地貌受多组断裂的控制; 海底断裂系统在地表的延伸部分得到了 CZMIL Nova II 系统数字相机同步拍摄的陆地高分辨率图像的验证。本项研究将陆地构造的遥感解译方法拓展到高程渲染图像的水下断裂解译, 在清澈水域的海岸带调查工作中具有很大的应用潜力。

关键词: CZMIL Nova II; 机载激光雷达测深; 海底地貌; 海底断裂; 精细解译

中图分类号: TP79

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021061502

Application of airborne LiDAR to identification of underwater geomorphology and fine interpretation of faults.

LIU Gang, JIN Dingjian, WU Fang, YU Kun, LI Qi, ZHANG Wenkai, WANG Jianchao

China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China

Abstract: The airborne lidar bathymetry (ALB) is a new equipment for efficient survey of offshore seabed topography with high precision, high accuracy, high efficiency and wide operation area. By study of the high-resolution submarine topography data collected by the CZMIL Nova II ALB system from an island in the South China Sea, it is found that the data can be used for efficient identification of geomorphic types and precise interpretation of submarine fractures, and the principles and methods adopted are very similar to the remote sensing interpretation for land structures. Through the detailed interpretation of the images acquired by lidar sounding, many seabed geomorphic types are found in the study area, for examples, the sand spit, headland, bay, ancient wave-cut platform, bank slope, fault depression, valley, submarine plain and residual fault block. The submarine landform and coastline surrounding the island are mainly controlled by fractures. Four groups of faults in NW, NNW, NNE and NEE directions are found on the seafloor, basically in consistent with the regional tectonic patterns. The extension of submarine rift system on land surface is proved by the high-resolution images acquired synchronously by the digital camera of CZMIL Nova II system. Our experience in this survey proves that to extend the technique of remote sensing interpretation for land structures to the underwater fault interpretation offshore is a good solution to the precise detection of fault structures in coastal shallow waters.

Key words: CZMIL Nova II; airborne lidar bathymetry; seafloor landforms; submarine faults; fine interpretation

近岸海底地形与水下地质构造是海岸带地质调查中的重要基础数据, 在沿海城镇和重大工程规划建设、环保、防灾、海底生境调查、海岸带科学研究等工作中发挥着重要作用。海底地形测量有船载多波束、遥感反演、机载激光雷达等技术手段^[1-3]。

在海底构造探测领域, 一般使用船载浅水地震勘探^[4-6]和航空磁测。船载平台具有效率低、成本高、浅水无法通行等缺点。浅水地震勘探多采用电火花震源激发, 获取的地震资料有多次波产生的虚像反射, 造成构造解释假象^[6]。利用水下地质体的磁

资助项目: 国家高分专项“高分航空载荷自然资源调查应用示范”(04-H30G01-9001-20/22); 中国地质调查局项目“重要海峡通道遥感地质调查”(DD20191011)

作者简介: 刘刚(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事遥感地质研究工作, E-mail: lgang666@126.com

通讯作者: 金鼎坚(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事航空遥感地质调查技术方法研究, E-mail: jindingjian@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2021-06-15; 改回日期: 2021-09-09. 文凤英编辑

性差异所进行的航磁构造探测,只能发现具有磁异常的规模较大的断裂构造,小断裂难以识别。因此,与人类活动密切相关的近岸浅水区大比例尺高精度的断裂构造探测成为一个难点。相较上述技术,机载激光雷达水深测量(airborne lidar bathymetry, ALB)具有效率高、速度快、作业区域广、测量精度高的优势,是高效获取高精度近岸海底地形、底质和断裂构造信息的新手段。

从 20 世纪 60 年代末开始,发达国家便开展机载激光雷达水深测量技术的研究和应用^[7-15]。中国从 20 世纪 80 年代末开始机载激光雷达测深系统的研究工作^[16],但总体而言还处于试验阶段,尚未形成实用化的系统。为满足海岸带调查工作的需求,作者所在单位引进了 Teledyne Optech 公司的新一代 CZMIL Nova II 机载激光雷达水深测量系统,在南海多地开展了机载激光雷达海陆一体地形测量工作,在中国民用领域首次获取了大量实测数据。通过对测量数据的解释,发现除水深探测外还可用于近岸水下地貌的详细划分和海底断裂构造的精细解译(1:10 000)。经过处理的高分辨率高程渲染图像对海底为基岩底质的水下断裂的识别非常有效,在海岸带调查研究中有很好的应用前景。

由于解译工作始于项目的收尾阶段,且不是最初设计的工作内容,因此没能对测深雷达识别的断裂构造进行野外实地验证。研究区内的岛屿面积仅 1.5 km²,没有大比例尺的区域地质调查资料作为解译工作参考,只有早期填制的 1:200 000 地质图。该图显示岛屿全部由花岗岩构成,没有断裂构造,这可能与当时茂密的地表植被及砂土覆盖、交通状况及工作精度有关。在没有野外验证和参考资料佐证的情况下,为避免激光雷达单一数据源可能造成的多解性,作者使用 CZMIL Nova II 测量系统携带的 Phase One iXU-RS1000 数字相机同步拍摄的超高分辨率(空间分辨率 0.2 m,比例尺 1:2 000)陆地影像,对激光雷达识别的部分海底断裂在陆地的延伸端进行了更为精细的解译验证,二者吻合度很高。利用高精度激光雷达数据进行水下构造精细解译还处于探索阶段,但经过一定时间的积累和技术方法的改进,有可能成为基岩型海岸带调查的一个新领域。

1 数据获取及处理

1.1 研究区概况

研究区位于南海北部,为一个距陆地约 3 km 的

海岛及其周边浅水区域。该区属亚热带海洋气候,雨量充沛、地表植被茂密。海岛东西长 1 400 m,南北宽约 1 100 m,面积约 1.5 km²,大致呈不规则的四边形。岛屿西北部区域为地形相对平坦的砂质海岸(沙滩),岛屿西南、东南至东北部沿线均为曲折的岩质海岸,地势陡峭,地形多变。尤其是东南和东北近海,岸线以上发育海蚀崖,水下则暗礁遍布,波涛汹涌、地形复杂多变。岛四周海域清澈透明,海水能见度 6~27 m,冬春季一般为 NE 浪,夏秋季盛行 S-SE 浪,海域周边经常受到台风的影响。

1.2 测深数据获取及处理

机载激光雷达水深测量(ALB)是一种采用扫描脉冲激光测量水深/水下地形的主动式航空遥感技术^[17],根据衰减最小^[18]的蓝绿波段激光在水面和水底反射回波的时间差计算水深。先进的 CZMIL Nova II 机载激光雷达水深测量集成了测深雷达、CASI-1500h 高光谱成像仪、Phase One iXU-RS1000 数字相机等三种传感器,可同步获取激光雷达、高光谱和数字影像 3 种遥感数据,利用配套的软件自动生成海陆一体的三维地形和环境信息产品。

本文使用的激光雷达和数字影像数据为搭载 CZMIL Nova II 系统的运-12 E 型飞机所获取,测量时间为春季。平均飞行速度 220 km/h,航高 400 m,航向 NW,旁向重叠度 30%,航线间距约 200 m。飞行前收集了测区 40 个均匀分布的高精度船载多波束测深数据点(深度均在 30 m 左右),对获取的激光测深数据进行“点对点”式的精度评估,经统计(表 1)30 m 水深附近的激光雷达高程测量精度 0.369 m^[19],优于 IHO 1a 级精度要求。然后利用地理信息系统软件,对激光雷达数据按照高程值进行彩色渲染,并叠加在山体阴影图上,生成具有立体、彩色效果的高分辨率(空间采样间隔 1 m)海陆一体高程渲染图。使用专业软件在渲染图上进行 1:10 000 比例尺的水下地貌识别及断裂构造精细解译,最后利用超高分辨率陆地影像对部分解译断裂进行了验证。具体工作流程见图 1。

2 水下地貌识别及断裂构造解译

2.1 水下地貌识别

2.1.1 解译标志及地貌分类

根据陆地解译工作经验,砂砾黏土等细粒物质经过长期搬运和分选以后,成分均匀、组构稳定,由

表 1 研究区激光测深精度统计
Table 1 Statistics of the depth measurement accuracy in the study area

深度/m	平均误差/m	标准差/m	RMSE/m	系统标称精度/m	IHO 1a级要求/m
30	-0.304	0.211	0.369	0.492	0.634

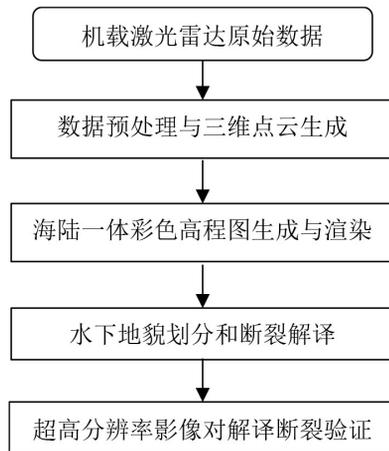


图 1 数据处理及遥感解译流程图

Fig.1 Flowchart of data processing and remote sensing interpretation

它们构成的沙滩、平原等堆积地貌,地形平坦、边界圆滑。在遥感影像上呈现单调的块状纹理,地表起伏不大、边界柔顺渐变。而主要由基岩构成的丘陵山地等侵蚀地貌由于沟壑纵横、高低不平,在遥感影像上呈粗糙不均的斑点状纹理,边界大部分参差不齐或呈折线状。同理,在激光雷达高程彩色渲染图像上(图 2),由粒径较小的砂砾构成的海底平原、水下沙嘴等海积地貌,由于地势平缓、水深变化不大,一般呈现相对均一的块状纹理,色调渐变。而凸凹不平、高程变化剧烈的海蚀基岩山地,则具有粗糙不均的斑点状纹理,色调多变。根据这些影像特征首先可以识别出以沙砾为主的海积地貌和基岩为主的海蚀地貌类型,然后根据水下地貌的形态、纹理、起伏度等解译标志,参考海洋地貌的分类标准^[20]进行比较详细的类型划分。通过解译发现岛屿四周水下地貌由沙嘴、古波切台、岸坡、海岬、槽谷、断块残丘和外围的海底平原组成(图 2),其中海蚀地貌的形成与构造作用密不可分。

2.1.2 海积地貌

研究区的海积地貌由水下沙嘴和海底平原组成。岛的西北侧海域为冬春季 NE 向浪和夏秋季 S-SE 向浪的交汇部位,距离陆地较近,水深不大,泥砂等细粒物质在此沉淀,形成了顶端指向西北的三角形水下沙嘴。雷达渲染图像显示该区域呈渐变的黄绿色调、表面光滑,地形北陡南缓,但总体起伏

不大,海水深度由东向西逐渐变深(0~23 m)。

图 2 显示海底平原位于研究区的外围,以海岛为中心环绕其他海底地貌分布。海底平原西高东低,地势平坦,水深约 25~35 m,在雷达渲染图像上由蓝绿色调渐变为蓝色调。

2.1.3 海蚀地貌

水下海蚀地貌由古波切台、岸坡、海岬、槽谷、断块残丘组成,多数与断裂构造有关。更新世大冰期全球海平面剧烈下降,上述地貌可能露出水面遭受剥蚀,疑似多种外营力综合作用的结果。

古波切台:位于海岛北侧,为 NEE 向延伸的狭长水下平坦台地,台地西端被沙嘴覆盖,东端与水下岸坡相连。经过量算其南北宽 60~150 m,东西长约 1200 m。根据雷达渲染图像特征推断台地的近岸浅水区域覆盖薄层海砂,远岸砂体变薄尖灭。根据图 2 中高程剖面 AB 量测,台地平均水深仅 12 m 左右。由于地史时期冰期与间冰期的交替出现造成海平面的多次剧烈升降^[21],推断该台地初期是潮间带的古波切台,由于后期海平面的上升淹没在水下。剖面 AB 显示在水深接近 13 m 处的台地外(北)缘为一个高差 10 m 左右的陡崖,此处水深急剧增加到 23 m,然后向北与平原相接。陡崖沿 NEE 向平直延伸超过 120 m,怀疑为断层 F1 所控制。

水下岸坡:分布于海岛西部、南部和东部的广阔海域,为宽窄陡缓不一的基岩岸坡,大部分发育侵蚀沟槽。海岛西南部的岸坡窄而陡,平均宽度 135 m 左右,由图 2 中的高程剖面 CD 可以看出在距岸线不到 15 m 的水平距离内,水深迅速达到 12 m,在距岸约 160 m 处以一个高约 2 m 的陡坎与平缓的海底平原相接。该陡坎平行岸线向 NW 方向线性延伸,根据地貌、影像特征及区域断裂构造的展布规律,推测是一条断层陡坎(图 2, F16)。

海岛南部、东部大片区域的水下岸坡比较宽缓,岸线至岸坡末端(坡脚)水深为 0~30 m。岸坡在渲染图像上形成密集的斑点和条带纹理,说明坡体由高低不平的暗礁和沟槽构成,海底地形非常复杂。根据图像上的定向带状纹理推断,岸坡发育 NW 向延伸的一系列冲刷侵蚀沟槽,它们平行排列,组合形态呈梳齿状。图 2 中垂直于沟槽延伸方向的高程曲线(剖面 EF),具有峰谷相间排列的特点,

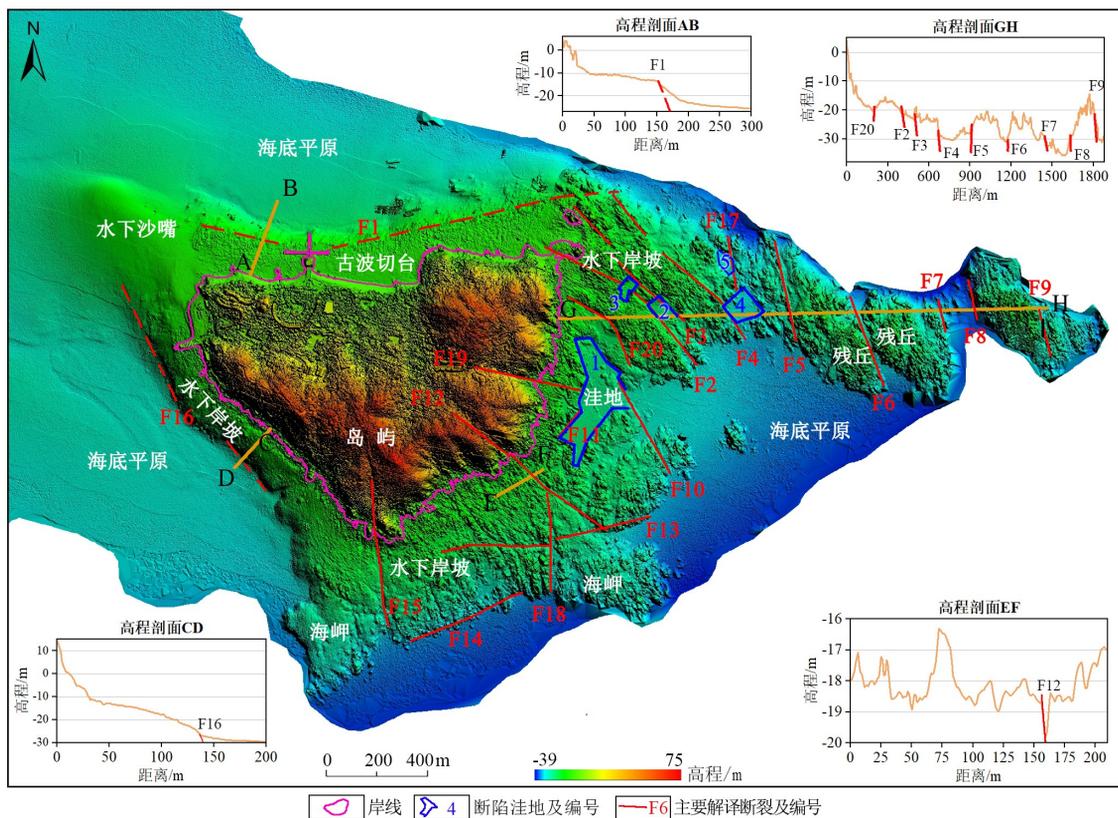


图 2 以激光雷达高程渲染图像为背景的地貌、主要断裂及剖面位置图

Fig.2 Map of geomorphology, with major faults and profile locations map based on lidar elevation rendering images

与剖面 AB、CD 的平缓波形具有显著的差别。雷达渲染图像和陆域超高分辨率图像的综合遥感解译成果表明,梳齿状沟槽大部分沿构造裂隙发育,主要断裂 F12 就位于一个陡立的 V 形沟槽中,上述现象说明研究区的地貌与断裂构造密切相关。

断陷洼地: 5 个洼地均位于海岛东侧海底,大部分为长方形,个别为多边形,洼地边界均由断裂控制。最大者为图 2 中不规则的“∪”形 1 号洼地(图 3a 是其放大图)。该洼地由走向 NE、NNE 和 NW 三组断裂围限,在形态上类似于著名的汾渭地堑。洼地内部平坦,四周(除东侧顶点有开口外)为陡立的断层崖。1 号洼地东西宽 200~230 m,南北长约 650 m,平均水深 22 m 左右,周边陡崖高 4~8 m。研究区成群发育的洼地说明该区域现在或前期曾处于拉张应力控制之下。

水下海岬: 2 个较大的海岬位于海岛南侧水下岸坡的末端,海岬中间为隐溺古海湾。岬角均为方形,与图 4 a、b 中海平面以上的陆域海岬类似,推测由 NE 和 NW 两组断裂控制,均属构造成因。

断块残丘: 在海岛东北侧远岸水域海底,存在 3 个形态及大小相似、长对角线均为 NW 向的菱形残丘(图 3b,空间位置见图 5),残丘之间以 V 型或

U 型峡(槽)谷间隔。图 2 中的剖面 GH 显示,谷地与断块残丘以近于直立的断层崖相接,其底部与残丘峰顶的高差都在 10 m 以上,最大者高差超过 20 m。通过对图像的解析发现 3 个残丘受 NNW、NW 和 NE 走向的 3 组断层控制,在空间上以右行斜列形式排列,推测残丘是剪切拉分作用所形成的断块山。

2.2 水下断裂构造解译

2.2.1 解译标志

利用遥感影像识别陆域断裂在技术方法上已非常成熟,发现的数量明显高于传统地面调查工作,在基岩裸露区断裂识别的准确性在 90% 以上,尤其是地貌特征明显的新断裂或活动断裂。利用遥感技术识别断裂主要依据构造作用在地表所形成的解译标志,如断层崖、断层陡坎、平直的沟谷、线状排列的鞍部地形、山地与平原的地貌单元突变等。在统一的区域应力场中,断裂构造的空间排列具有一定规律性,因此解译标志的空间展布也有规律可循。解译标志的形成,是由于断裂构造对岩石的破坏作用,导致其抗风化能力降低,在外营力作用下所形成的规律性排列的负地貌。同样,在波涛

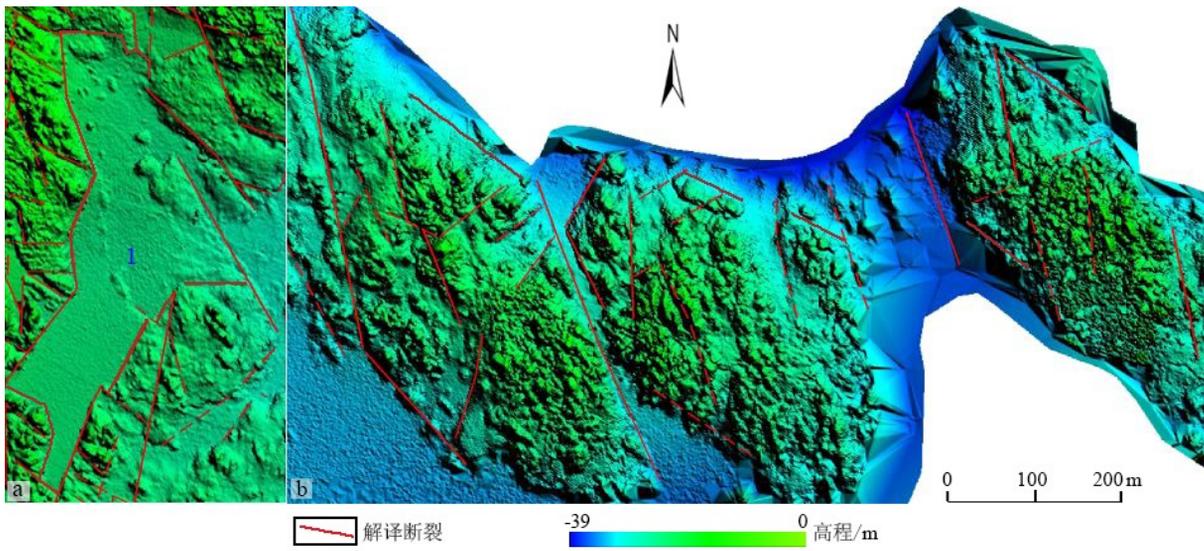


图3 局部放大的1号断陷洼地(a)及菱形残丘(b)激光雷达测高渲染图像

Fig.3 Locally enlarged fault depression No. 1 (a) and rhombic monadnock (b) lidar sounding rendered images

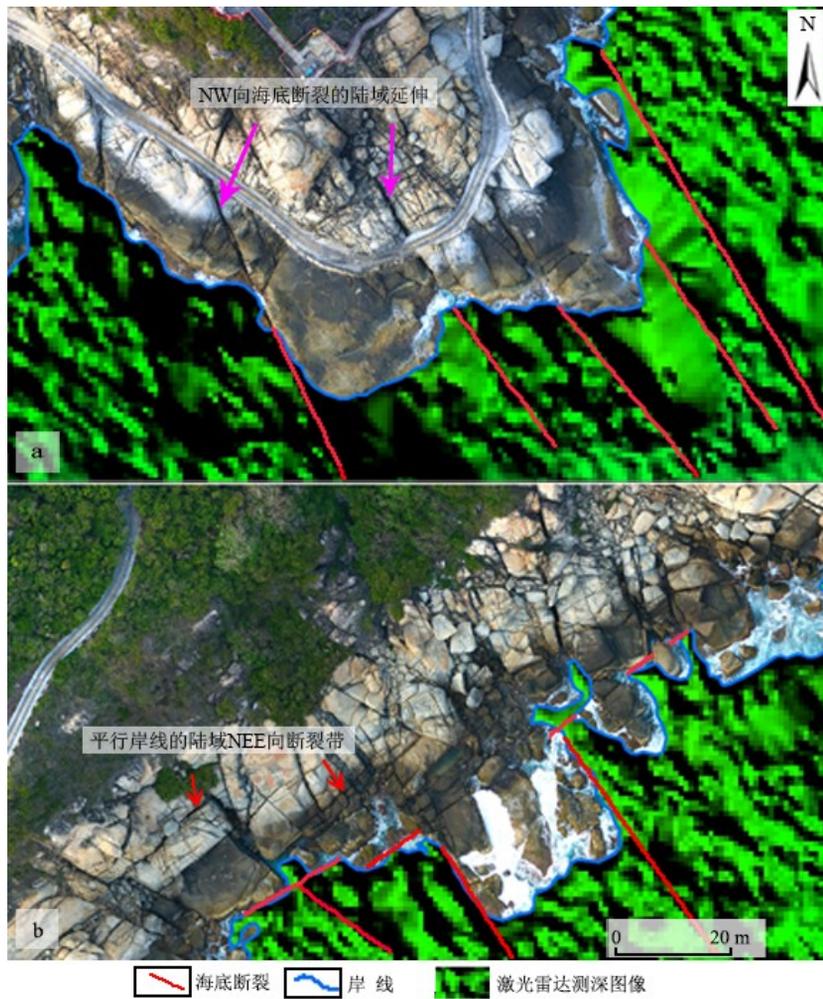


图4 断裂系统在陆域超高分辨率图像和海域激光雷达图像上的影像特征

a. NW 向断裂由水下延伸到陆地; b. NEE 向断裂控制了岸线的走向, 水下 NW 向断裂控制陆地直角海岬。

Fig.4 Image characteristics of the fracture system on ultra-high resolution images of land area and marine lidar images

a. The NW strike faults extended from seafloor to land, b. The extension direction of the shoreline was controlled by NEE strike faults , while seabed NW faults controlled the right-angle land promontory.

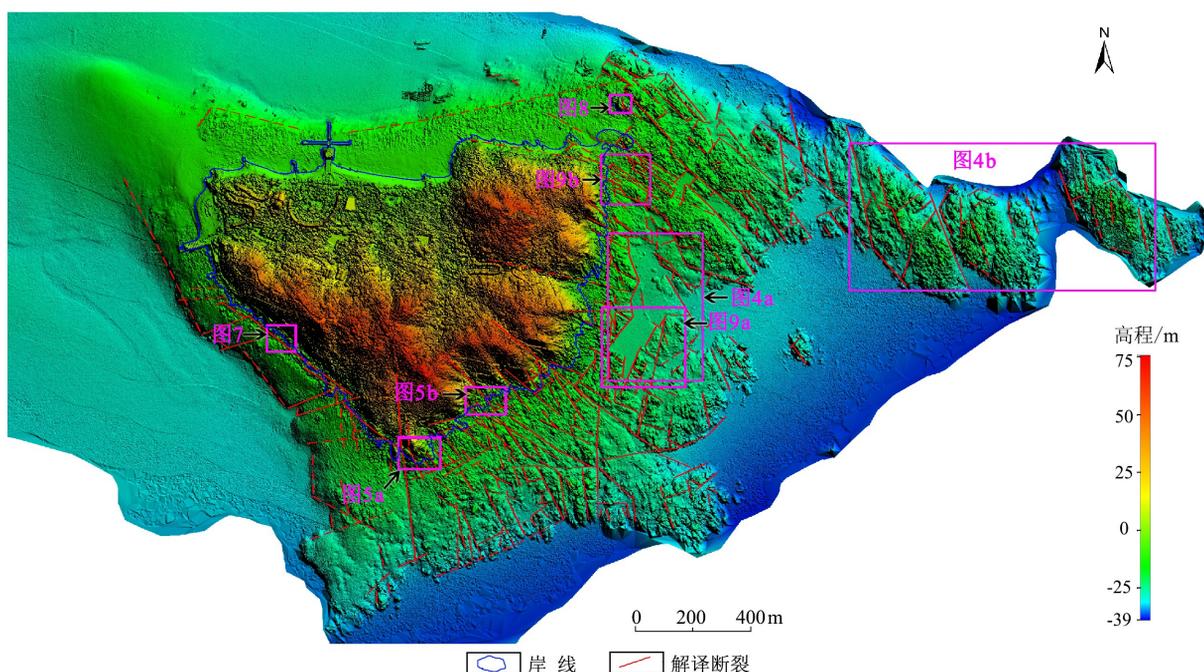


图 5 利用激光雷达渲染图像解译的海底断裂及局部放大图的空间位置示意

Fig.5 Submarine faults interpreted by lidar rendering image, partly enlarged

汹涌的海洋,断裂活动的局部应力释放也会导致岩石发生结构和构造上的破坏,在潮汐、洋流、波浪持续作用下,破碎的岩石被海水侵蚀、搬运,从而形成沿断层走向规律性排列的负地形,也就是水下解译标志。潮间带等水动力较强区域,断裂构造的解译标志甚至比有土壤和植被覆盖的陆地表面还要清晰。根据现有研究成果^[21-22]推断,仅在新生代以来的海平面反复升降过程中,水深在 40 m 以内的海底可能多次露出海面,遭受地表径流等其他外营力的侵蚀,因此研究区水下的断崖、陡坎、沟槽等解译标志,应该是陆域、海域各种外营力综合作用的结果。

由于缺少野外工作和大比例尺地质资料的支持,为验证海底断裂解译标志的可靠性,在海陆过渡带利用 CZMIL NOVA II 系统同步获取的陆地超高分辨率(0.2 m)摄影数据,对解译的部分水下断裂在陆地的延伸部分进行了海陆连续跟踪对比解译,作为激光雷达提取的水下断裂的辅助证据。超高分辨率影像可以满足 1:2 000 比例尺的测绘制图要求,在实际工作中可以放大到 1:1 500,地面宽度超过 0.3 m 的构造裂隙、破碎带等在图 4 上(空间位置见图 5)清晰可见,是核验海底断裂的有效手段。研究区海底断裂的主要解译标志有断层崖、断层陡坎、平直的冲刷沟槽等所形成的线性影像,锯齿状水下岸坡及岸坡坡脚的急拐弯,水下基岩残丘或岸坡与海底平原的直线状地貌突变等。

2.2.2 总体构造特征

根据构造地质学理论及先验知识,在一定的区域应力场作用下,会产生不同走向的断裂系统;不同性质的断裂在形态、规模、走向等方面具有一定的差异,并形成具有关联性的构造地貌;根据地貌类型以及断裂的规模、形态和交切关系,可以推测断裂的性质及古构造应力场。经过对 CZMIL NOVA II 系统获取的高分辨率激光雷达渲染图像及陆地超高分辨率图像的综合解译分析,发现工作区发育走向 NW、NNW、NNE、NEE 的 4 组主要断裂(表 2,图 2),与区域构造格局^[23-24]基本一致。在构造破碎和海水侵蚀等内外营力联合作用下,在海底形成具有优选方位的一系列冲刷沟槽、陡坎、断陷洼地和断块残丘。NW 走向的一组断裂规模大、数量多、连续性好;NNW 向断裂是断块残丘的主要边界断裂;NNE 和 NEE 向的断裂以小规模为主,连续性差,以正断层居多。海岛从西南、东南至东北沿线都是断层控制的基岩海岸。由于研究区属于时代较新的大陆边缘海环境,结合前人的研究成果^[23-24]推测部分海底断裂可能是活动断裂。

岛屿周边海底断裂的发育(或可识别)程度具有一定的差异。由图 2 和图 5 可以看出,岛屿西北侧水下沙嘴区域由于海砂覆盖严重,没有发现断裂;岛屿北侧剖面 AB 所在的水下平台(古波切台)区也有薄砂覆盖,解译效果不好,但根据台地北缘长度超过 1 200 m、落差达 12 m 的平直陡崖以及台

表 2 利用雷达高程渲染图像解译的主要海底断裂
Table 2 Main submarine fractures interpreted from lidar rendering image

断裂编号	走向	解译标志	推测性质	是否陆地影像验证
F1	NEE	平直的长陡崖	正断层	否, 未延伸至陆地
F2	NW	平直沟槽、断陷洼地边界	正断层	是
F3	NW	平直沟槽、断陷洼地边界	正断层	否, 未延伸至陆地
F4	NW	平直沟槽、断陷洼地边界	正断层	否, 未延伸至陆地
F5	NNW	平直沟槽、断块山边界	未知	否, 未延伸至陆地
F6	NW	陡崖, 断块山边界	未知	否, 未延伸至陆地
F7	NNW	陡崖、U型谷西边界	正断层	否, 未延伸至陆地
F8	NNW	陡崖、U型谷东边界	正断层	否, 未延伸至陆地
F9	NNW	陡崖、平直沟槽	未知	否, 未延伸至陆地
F10	NW	平直沟槽、线性排列陡坎	正断层	否, 未延伸至陆地
F11	东凸弧形	陡崖、断陷洼地边界	正断层	否, 未延伸至陆地
F12	NW	平直沟槽、鞍状地貌	未知	是
F13	EW	线性排列陡坎、岸坡边界	未知	否, 未延伸至陆地
F14	NEE	线性排列陡坎、岸坡边界	未知	否, 未延伸至陆地
F15	NNW	平直沟槽、陡坎	未知	是
F16	NW	平直陡崖	正断层	否, 未延伸至陆地
F17	NNW	断陷洼地边界, 陡坎	正断层	否, 未延伸至陆地
F18	SN	平直沟槽	未知	否, 未延伸至陆地
F19	NWW	平直沟槽、鞍状地貌	平移断层	是
F20	NWW	陡坎	未知	否, 未延伸至陆地

地东北角处暗礁的不连续性, 推测陡崖为一条规模较大的 NEE 走向断层。岛屿西南侧剖面 CD 所在的水下岸坡也有少量薄砂覆盖, 但根据坡脚不正常的锯齿状形态、陡坎地貌以及陆域超高分辨率图像的辅助支持, 提取出数条沿岸断层(图 6, 空间位置见图 5); 海岛东南至东北侧的海底由基岩构成, 构造地貌非常清晰, 是断裂信息提取的主要区域, NW、NNW、NNE、NEE 向 4 组断裂均有发现。

2.2.3 断裂分组详述

NW 向断裂: 是研究区最为发育的断裂, 无论规模还是数量 NW 走向的断裂都占有绝对优势。该组断裂控制了岛屿西南、东北岸线及部分水下岸坡的边界, 形成了水下岸坡上相间排列的冲刷沟槽(详见图 2 剖面 EF, 图 4a)。根据海岛西南、东南及东北海岸带陆域超高分辨率图像上的断层崖、断层陡坎(图 4、6、7)推断, 大部分 NW 向断裂近于直立, 部分倾向 NE。该组断裂切割其他断裂或地貌的运动学特征(图 8, 空间位置见图 5), 显示其既有

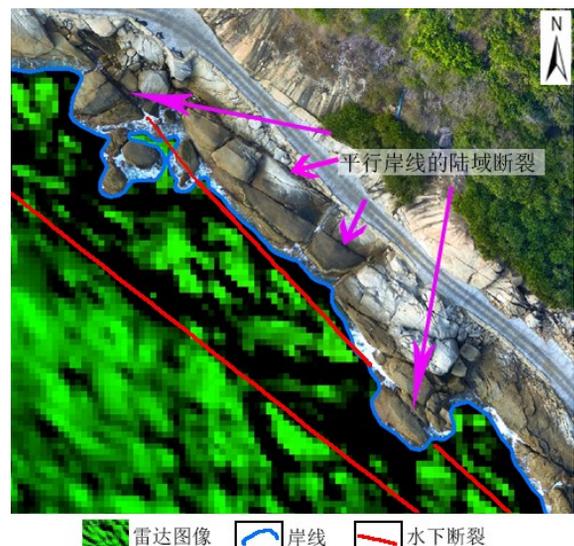


图 6 控制西南岸线的断裂带激光雷达和陆域超高分辨率影像

Fig.6 Lidar and ultra-high resolution images of the fault zone along the southwest shoreline

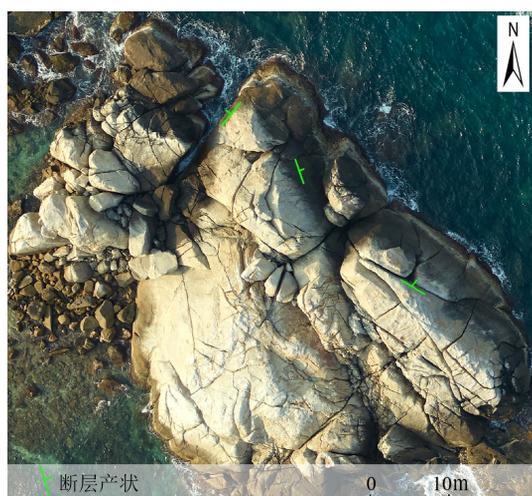


图 7 倾向 NE、NEE 和 NW 的断层崖陆域超高分辨率图像
Fig.7 Ultra-high resolution image of fault scarps tending in NE, NEE and NW directions

左行又有右行剪切现象,也可能有多期活动。工作区由西向东 NW 向断裂主要有 F16、F12、F20、F2、F3、F4 等(图 2)。其中 F16 控制了岛屿的西南部水下岸坡与海底平原的边界, F12 由水下进入陆地,形成了地表丘陵山地的鞍状地形, F2、F3、F4 则是海底断陷洼地的边界断层。在岛屿南侧和东北侧的水下岸坡上,该组断裂密集平行分布,是梳齿状冲刷沟槽微地貌的主要控制要素。水下激光雷达及陆域超高分辨率图像解译成果均显示岛屿西南岸线受该组断裂的控制(图 6),属于断层海岸^[21]。在 GH 剖面靠近 H 端的远岸深水区域,该组断裂是菱

形断块残丘的东北和西南边界(图 3b, 空间位置见图 5)。

NNW 向断裂: 在剖面 GH 所在的东北海域远岸地段(图 2 中 GH 剖面靠近 H 端)最为发育,是水下残丘之间峡谷的主要控制断裂(图 2 中 F5、F6、F7、F8)。该组断裂连通性好、断距较大,在激光雷达渲染图像上具有清晰的线性影像特征。沿断裂发育一系列 V 型沟槽、陡坎或陡崖,构成了数个断块残丘东西两侧的主边界。主要的 NNW 向断裂有 F10、F17、F5、F6、F7、F8、F9 等(图 2),其中正断层 F10 构成最大的近岸 1 号断陷洼地与海底平原的东边界,正断层 F7、F8 形成了深达 20 余米的 U 形谷,构成局部的微型垒堑地貌。陆域高分辨率图像显示:在海岛东北角孤立礁石的数个断层崖上,该组断裂产状陡立或以高角度倾向 NEE(图 7, 具体空间位置见图 5)。

NNE 向断裂: 主要发育在海岛东侧近岸浅水地带(图 2 中 F12 和 F20 之间的区域),该组断裂控制了海岛的东部岸线。NNE 向断裂系在空间上平行海岛东部岸线的海底断续分布,规模一般较小,连续性不好,其代表性断裂是 F18。沿 F18 的走向(NNE)往北追索,可以发现一组断续出现(被 NW 向断裂交切)的断裂带,该带的西界是岸线,东界是 F11(实际由数条正断性质的断裂连接而成),F11 构成 1 号“>”)形断陷洼地的部分边界(图 3a)。根据断续分布的形态特征、控制海岛岸线(断层海岸)及与之平行的水下断陷洼地的事实,推断该组

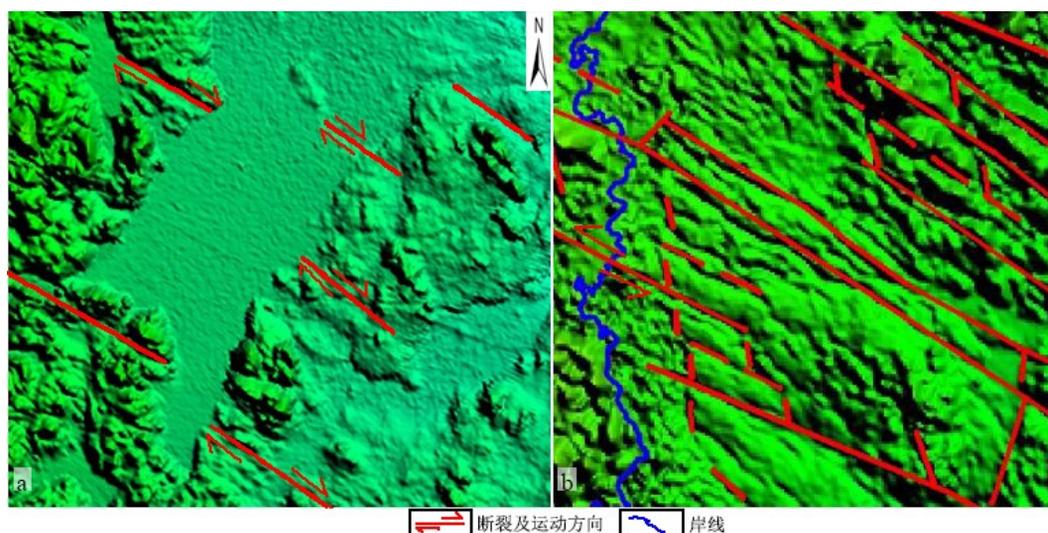


图 8 NW 走向断裂的不同运动学特征
a. 右行走滑断层, b. 左行走滑断层。

Fig.8 Kinematic characteristics of NW strike fractures
a. Right-lateral faults, b. left-lateral faults .

断裂以正断层为主。

NEE向断裂:主要发育在海岛的南侧,控制了海岛的南部岸线,并构成海岛南北两侧水下岸坡与海底平原的地貌突变线。在海岛南侧的海陆交互带,超高分辨率图像及激光雷达图像都可以看到数条NEE向断裂在陆地和 underwater 平行海岸延伸,控制了岸线的走向(图4b)。图2中该组断裂的典型代表F14、F13构成了海岛南侧水下基岩斜坡末端与海底平原的突变线;在海岛北侧F1则以陡崖的形式构成水下古波切台与海底平原的边界;在F2、F4两条断裂的南端区域,断续分布的NEE向断裂也以陡坎地貌构成了岸坡末端与平原区的突变线。根据断层海岸、水下断崖以及水下岸坡以陡坎与平原相接等诸多证据,推断该组断裂性质以正断层为主。根据剖面CD所在区域水下基岩坡脚的锯齿状形态及图4b中陆域超高分辨率图像左下角处NEE向断层的运动方向,推断该组断裂还具有左行平移的分量。

除上述断裂外,本区还有一个显著的构造特点是发育若干规模不等的小型水下断陷槽谷或洼地。图2显示它们大部分位于F12以东区域,主要受NE、NW向两组断裂的控制,长轴方向以NE居多,说明本区目前或曾经受NW-SE方向的拉张应力场控制。这可能与始新世晚期以来印度-澳大利亚板块与欧亚板块碰撞,青藏高原隆起导致地幔流向东南方向的蠕散运动所引起的陆缘引张断陷作用有关^[23],也可能是由于研究区所在区域向SE漂移旋转^[25-26],由速度上的局部差异所形成的牵引、拉分作用所致。

3 结论

(1)研究区海底地貌由沙嘴、海岬、波切台、岸坡、断陷洼地、槽谷、平原和断块残丘组成,环绕海岛的岸线由多组断裂控制,呈不规则的多边形。岛屿周边海底发育走向NW、NNW、NNE和NEE的4组主要断裂,与邻近大陆的构造格局基本一致。NW向断裂规模大、数量多、连续性好,是本区的主要断裂系;NNW向断裂是断块残丘的主要边界断裂;NNE和NEE向断裂以小规模为主、正断层居多,连续性较差。海底断裂系统在地表的延伸部分得到了同步获取的超高分辨率图像的验证。

(2)机载激光雷达是在水深小于40m的清澈水域开展海底地貌详细划分和水下断裂精细解译的新技术,根据航摄飞行设定的航高和空间采样间隔

的大小,至少可满足1:10 000~1:50 000大比例尺的调查研究工作。在没有海砂覆盖的水下基岩分布区,利用激光雷达高程渲染图像可以有效提取断裂构造信息;配备3种传感器的CZMIL Nova II海陆一体测量系统,不仅能够进行水深测量,而且在海岸带环境地质、工程地质、水文地质、地质灾害等专业调查及研究工作中具有很大的应用潜力。

参考文献 (References)

- [1] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794. [ZHAO Jianhu, OUYANG Yongzhong, WANG Aixue. Status and development tendency for sea-floor terrain measurement technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1786-1794.]
- [2] 翟国君, 黄谟涛. 海洋测量技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1752-1759. [ZHAI Guojun, HUANG Motao. The review of development of marine surveying Technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1752-1759.]
- [3] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 331-351. [MA Yi, ZHANG Jie, ZHANG Jingyu, et al. Progress in shallow water depth mapping from optical remote sensing [J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(3): 331-351.]
- [4] 韩孝辉, 薛玉龙, 刘刚. 海上风电场建设的前期地质调查研究方法[J]. 工程勘察, 2018, 46(3): 29-34. [HAN Xiaohui, XUE Yulong, LIU Gang. Study methods for preliminary geological survey of the construction of offshore wind farms [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018, 46(3): 29-34.]
- [5] 孟庆生, 楚贤峰, 郭秀军, 等. 高分辨率数据处理技术在近海工程地震勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 1006-1010. [MENG Qingsheng, CHU Xianfeng, GUO Xiujun, et al. The application of high resolution seismic data processing technique in multi-channel shallow offshore engineering seismic surveys [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(3): 1006-1010.]
- [6] 孙运宝, 赵铁虎, 潘军, 等. 表面多次波衰减技术在渤海海峡应用效果[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(2): 179-184. [SUN Yunbao, ZHAO Tiehu, PAN Jun, et al. The application of SRME to high resolution seismic exploration in shallow sea environment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(2): 179-184.]
- [7] Parker H, Sinclair M. The successful application of Airborne LiDAR Bathymetry surveys using latest technology[C]//2012 Oceans-Yeosu. Yeosu, Korea (South): IEEE, 2012.
- [8] Feygels V, Ramnath V, Smith B, et al. Meeting the international hydrographic organization requirements for bottom feature detection using the Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar (CZMIL)[C]//OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [9] Pastol Y. Use of airborne LiDAR bathymetry for coastal hydrographic surveying: the French experience [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 62(10062): 6-18.
- [10] Wozencraft J, Millar D. Airborne lidar and integrated technologies for

- coastal mapping and nautical charting [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2005, 39(3): 27-35.
- [11] Legleiter C J, Overstreet B T, Glennie C L, et al. Evaluating the capabilities of the CASI hyperspectral imaging system and Aquarius bathymetric LiDAR for measuring channel morphology in two distinct river environments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(3): 344-363.
- [12] Fernandez-Diaz J C, Glennie C L, Carter W E, et al. Early results of simultaneous terrain and shallow water bathymetry mapping using a single-wavelength airborne LiDAR sensor [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(2): 623-635.
- [13] Schwarz R, Mandlbauer G, Pfennigbauer M, et al. Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 150: 1-10.
- [14] Wright C W, Kranenburg C, Battista T A, et al. Depth calibration and validation of the experimental advanced airborne research Lidar, EAARL-B [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76(sp1): 4-17.
- [15] Kotilainen A T, Kaskela A M. Comparison of airborne LiDAR and shipboard acoustic data in complex shallow water environments: Filling in the white ribbon zone [J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 250-259.
- [16] 贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 6-16. [HE Yan, HU Shanjiang, CHEN Weibiao, et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency technology LiDAR detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 6-16.]
- [17] Guenther G C. Airborne lidar bathymetry digital elevation. model technologies and applications[M]//Maune M D. The DEM Users Manual. 2nd ed. Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007: 253-320.
- [18] Jerlov N G. *Optical Oceanography*[M]. New York: Elsevier, 1968: 167-168.
- [19] 金鼎坚, 吴芳, 于坤, 等. 机载激光雷达测深系统大规模应用测试与评估: 以中国海岸带为例[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 20200317. [JIN Dingjian, WU Fang, YU Kun, et al. Large-scale application test and evaluation of an airborne lidar bathymetry system-A case study in China's coastal zone [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200317.]
- [20] 周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌遥感解析与制图[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 42-51 [ZHOU Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai. *Digital Geomorphological Interpretation and Mapping from Remote Sensing*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 42-51.]
- [21] 田明中, 程捷. 第四纪地质学与地貌学[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 157-163 [TIAN Mingzhong, CHENG Jie. *Quaternary Geology and Geomorphology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 157-163.]
- [22] 曹超, 蔡锋, 郑勇玲, 等. 中国近海海底地形特征及剖面类型分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(2): 483-494. [CAO Chao, CAI Feng, ZHENG Yongling, et al. Topography characteristics and profile type of China offshore submarine [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(2): 483-494.]
- [23] 刘以宣, 钟建强, 詹文欢. 南海及邻域新构造运动基本特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(4): 1-13. [LIU Yixuan, ZHONG Jianqiang, ZHAN Wenhuan. Basic characteristics of neotectonism in South China Sea and its adjacent regions [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(4): 1-13.]
- [24] 刘瑞华, 张仲英. 海南岛的新构造运动特征[J]. *热带地理*, 1989, 9(2): 174-182. [LIU Ruihua, ZHANG Zhongying. Characteristics of Neotectonic Movement in Hainan Island [J]. *Tropical Geography*, 1989, 9(2): 174-182.]
- [25] 赵国强, 苏小宁. 基于GPS获得的中国大陆现今地壳运动速度场[J]. *地震*, 2014, 34(1): 97-103. [ZHAO Guoqiang, SU Xiaoning. Present-day crustal movement velocity field in mainland China derived from GPS observations [J]. *Earthquake*, 2014, 34(1): 97-103.]
- [26] 梁光河. 海南岛的成因机制研究[J]. *中国地质*, 2018, 45(4): 693-705. [LIANG Guanghe. A study of the genesis of Hainan Island [J]. *Geology in China*, 2018, 45(4): 693-705.]