李勇航,韦成府,李瑞铿,等.无人机与无人艇在海南东锣岛水上水下地貌联合调查中的应用[J].海洋地质前沿,2021,37(8):80-88.

无人机与无人艇在海南东锣岛水上水下地貌 联合调查中的应用

李勇航^{1,2},韦成府¹,李瑞铿¹,傅晓洲¹,杨江平¹,利明泽¹ (1中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 510760;2中山大学海洋科学学院,珠海 519082)

摘 要:水上无人系统主要包括水面无人艇和无人机,在传统大船和人员难以到达的浅水、岛 礁等高风险区域调查中具有重要的替代意义。通过水上无人系统对岛礁地貌进行调查,探讨 其调查数据的可靠性和应用实效。2020年9月,广州海洋地质调查局利用 C400 声学水面无 人艇和 Phantom 4 RTK 摄影无人机在海南东锣岛获取了多波束测深、侧扫声呐和正射影像等 数据。结果表明采集的数据能清楚识别海底沙丘、沙纹、沙斑、礁石等岛礁水下地貌以及裸露 礁石、植被、房屋、码头、废弃铁船、人工栈道等岛礁陆上地貌。证实无人机摄影在无人艇调查 中起到良好的辅助作用,联合调查可实现岛礁陆上和水下地貌数据完整拼接和融合;采集的 数据可靠性高,可用性强,在海洋牧场建设、岛礁生态修复以及揭示岛礁地质灾害特征等方面 具有重要参考价值。

关键词:水面无人艇;水上无人系统;岛礁调查;正射摄影;岛礁地貌;多波束;侧扫声呐中图分类号:P736;P715 文献标识码:A **DOI**:10.16028/j.1009-2722.2020.165

0 引言

随着我国对海岛开发建设和生态修复的需求 越来越大,急需查清岛礁水上和水下的地形地貌特 征,掌握其分布规律和形成演化机制。通常岛礁陆 上山体陡峭,植被茂密,不明生物较多,岸线弯曲多 变,周边水深较浅,水下礁石林立,地形复杂,不安 全因素多,因此,对这些调查人员和大船难以到达 的高风险区域进行地貌调查非常困难。而水上无 人系统是解决这一难题的有效方法,水上无人系统 主要包括水面无人艇和无人机,是未来执行水上救 援、搜救和监测等任务的主要手段^[1]。无人机低空 摄影测量具有较强的光谱信息采集能力,对陆上底 质和地貌分类具有天然优势,而无人艇水下声学测 量则具有直接测深及较强的地貌解译能力,因而二 者能够形成互补,具备进行多种手段融合的基础和 条件^[2-3]。虽然近年来水面无人艇^[4-8]和无人机^[9-10] 在海洋调查中的应用逐渐成熟,但利用二者进行联 合调查的应用很少,目前还处于探索阶段。SPECHT 等[11] 使用无人机和水面无人艇分别获得的正射影 像和单波束水深数据,分析了码头附近连岛沙洲的 规模和变化特征。栾天等^[12]探讨了无人机正射影 像辅助无人艇测深作业的方法。事实上这些单波 束水深和正射影像数据并未用于地貌特征分析。 2020年9月,广州海洋地质调查局使用无人机和无 人艇对东锣岛进行地貌调查。本文利用获取的正 射影像、多波束测深、侧扫声呐数据,探讨了该方法 的特点和优势、数据的可靠性及应用实效,以期为 未来使用无人机与无人艇等水上无人系统进行岛 礁地貌联合调查提供参考。

1 调查区背景

调查区位于中国海南岛南部三亚东锣岛海域 (图 1)。东锣岛离岸约 3 km, 面积约 0.1078 km², 岸线总长 1 375 m, 最大海拔标高 67.68 m, 海域最

收稿日期: 2020-10-21

资助项目: 国家重点研发计划项目 "天然气水合物高分辨率三维地震探 测系统整体设计"(2017YFC0307402); 中国地质调查局项目 "海南福建等 近海重点区矿产资源调查"(DD20201175); 中国地质调查局项目 "海南岛 东北部沿海地区综合地质调查"(DD20190308)

作者简介: 李勇航(1987-),男,硕士,工程师,主要从事海洋地质调查及 海底地形地貌研究方面的工作. E-mail: leo_hang@qq.com

深 14 m, 地势南高北低, 北侧地面坡度较平缓, 南侧 山体陡峻, 全岛坡度主要为 20°~35°, 个别达 70°~ 80°^[13]。岛上地貌类型以剥蚀侵蚀低丘陵为主^[14]。 海岸线基岩主要由裸露的砂砾岩滚石及珊瑚块组 成, 基岩滩宽 0.6~60 m 不等, 沿岛周缘呈带状分布; 岸线以上坡面覆盖茂密的植被(图 1c)。东锣岛海 域潮汐类型属于不正规日潮,潮差较小,属弱潮海区。在南部近岸海域,潮流以往复流为主,流向与流速随水深差异不大,涨潮流速约0.6 m/s,落潮流速约为0.7 m/s。余流受季风影响明显,受偏南季风影响时,余流流向为偏E方向,受偏北季风影响时,余流流向偏W向^[15]。



(a)、(b)分别基于审图号为 GS(2020)3183 和 JS(2015)02-194 的标准地图制作,底图无修改
图 1 调查区位置及东锣岛高分辨正射影像和水深图



2 调查设备

本次岛礁地貌调查使用的水上无人系统包括 多旋翼无人机和声学水面无人艇。"粤科 1"船为 支撑母船,用于水上无人系统的安全投放、回收以 及其他辅助保障服务,无人机与水面无人艇联合调 查示意图(图 2)。

大疆 Phantom 4 RTK 无人机由飞行器、遥控器、

云台相机及配套 GS RTK APP 组成,具备高精度摄 影测量功能。机载 D-RTK 可提供厘米级的高程和 平面定位精度。云台相机可稳定拍摄 2 000 万像素 照片。

科微 C400 声学水面无人艇平台搭载 3DSSiDX 三维侧扫声呐及条带测深一体化系统,能同时 获取多波束水深和侧扫声呐数据,其声呐探头内置 SBG Ellipse-2 微型惯性导航系统和 AML Micro-X 表层声速仪,配备双天线 GPS 接收机。惯导系统通





Fig.2 Schematic diagram of the joint survey of UAV and USV 过接收 GPS 信号为任务设备提供稳定的姿态、位置、速度、航向、时钟等数据。无人艇与通信基站、 遥控手柄分别通过 5.8、2.4 G 实时射频点对点通信 方式收发指令和数据。无人艇吃水 0.5 m, 配备旋转高清摄像头,结合任务载荷实时测深数据,可对 水下、水面及周边环境进行感知和预警,保障调查 过程中无人艇的安全。

3 数据与方法

无人机使用 GS RTK APP 加载卫星底图,依据 岛礁的岸线形态、海拔、天气等飞行环境信息,设定 测量范围、航线以及飞行高度等测量参数。本次调 查完成1架次,飞行高度100m,地面采样距离2.6 cm, 航向和旁向重叠率为70%,最大飞行速度6.5 m/s,完 成摄影测量后自动返航。铁壳的支撑母船为强磁 场区域,起飞前须选择空旷的甲板校准飞行器指南针。

由于岛礁岸线通常为不规则状,水上水下障碍 物较多,难以直接布设无人艇测线。先利用无人机 完成全岛礁的低空摄影,识别查清岛礁浅水区的礁 石、桩柱等障碍物分布情况,再在高潮位时利用水 面无人艇避开障碍物,缓慢靠近岛礁,并根据实时 显示的水深值圈定水深>1.0 m的安全调查区域布 设调查测线;最后绕岛分区块依次完成测量。在圈 定的安全区域,无人艇测线大致平行于岛礁等深线 布设,测线间距为水深的 3~5倍,确保侧扫声呐和 多波束实现全覆盖测量。无人艇自动巡线,紧急情 况下切换至人工操控。调查人员对无人艇工作状 态、采集资料质量进行监控。经海上试验对比,设 定发射频率 450 kHz,量程 30 m,波束宽度 55°,约 束角 10°。无人艇测量航速约 3.6 kn,定位误差 <1.0 m。通信基站架设在支撑母船上,全向天线距 海面约5m,通信距离达3km。

无人艇多波束测深使用 Caris 8.3 进行吃水、潮 汐、声速校正和滤波、剔除异常跳点等步骤,99.8% 的数据水深相对误差<0.3 m。侧扫声呐数据使用 SonarWiz 5.0 软件处理,包括导航数据处理、增益 调整、异常目标提取与识别等步骤。无人机摄影原 片数据使用 DJI Terra 软件处理,经空中三角测量和 几何校正处理,图像配准和融合后,最终获得数字 正射影像图,平面建图水平绝对精度达 0.7 cm。获 取的数据可满足规范和研究要求,最后使用 Global Mapper 18 叠加水上水下数据进行分析。

4 结果

多波束测深和侧扫声呐全覆盖面积 0.46 km², 高分辨率正射影像覆盖面积 0.26 km²,分析数据特 征识别出不同的地貌类型。

4.1 岛礁水下地貌

根据多波束测深和侧扫声呐数据揭示的地形 地貌参数特征,在调查区识别出水下沙丘、沙斑、沙 纹和礁石等地貌单元。图 3 所示水下沙丘呈条带 状展布, NNE 走向,脊线明显,其上叠置海底沙纹 (图 3a)。水下沙丘呈脊部浅两翼深的凸起状,脊部 水深约 2.5 m,脊高 5 m(图 3b)。

沙纹是沙丘的初级形态,沙纹与沙丘的主要区 别在于沙形上的变异^[16]。图 4a 揭示了东锣岛东部 海域发育明显的沙纹地貌,其声学上呈韵律排列的 条带状,波脊线为 NNE 走向;同时图像上还可见海 底礁石堆积,直径 0.5~1 m 不等。海底沙斑是底质 局部突变的直接反映,这些物质可能是贝壳、海底 附着生物、珊瑚形成的胶结物或岩石等,具有连片 发育或呈零星分布的特征。图 4b 揭示位于东锣岛 西北部海域的沙斑地貌特征,声学上具强背散射特 征,呈连片发育,分布边界形状不规则。图 4c 揭示 了典型的海底礁石地貌,呈大小不一、形态不规则 的特征,声学上具有礁石正面背散射强(表现为亮 色),背面背散射弱或无(表现为暗色或黑色)。海 底礁石在东锣岛周缘海域广泛分布,是最为普遍的 地貌单元,推断主要来源于岛上岩石经风化侵蚀后 崩塌滚落,部分或与自生生物礁有关。

4.2 岛礁陆上地貌

通过分析无人机摄影获取的高分辨率正射影







图 4 侧扫声呐揭示的海底沙斑、沙纹和水下礁石地貌 Fig.4 Submarine geomorphology of sand pitches, sand ripples and reefs revealed by side-scan sonar

像图,识别出自然地貌(裸露礁石、植被)、人工构筑物(房屋、码头、栈道)以及人工废弃物(废弃铁船、码头便桥、建筑材料)等多种地貌单元。岛礁周缘可见无植覆盖的基岩礁石滩,南部宽、北部窄,具有明显的分带特征(图1)。礁石直径0.3~20m不等,节理发育明显,呈NNE走向(图5a)。陆上礁石呈灰白色或灰色,海陆交互地带礁石受海水侵蚀影响,呈墨绿色或革色,磨圆度较好。依据植被茎叶形态和颜色一致性差异,可识别出不同类型植被。植被整体呈绿色或浅绿色,图5b所示 I型植被树枝细



图 5 岛礁陆上典型自然地貌 Fig.5 Typical island natural geomorphology

长特征明显,呈"Y"字形,叶子细长,颜色一致性差。 Ⅱ型植被叶子细碎,颜色不均一。Ⅲ型植被茎叶整 体呈团块状,叶子颜色均一。

正射影像图可清晰识别出房屋、蓄水池、垃圾 站、防波堤等在用人工构筑物以及人工栈道、建材、 铁船、码头等废弃人工构筑物(图 6),它们大多具有 形态边界规则、颜色均一的特征,易于识别。在东 锣岛北部,可识别出房屋码头、港池、防波堤、系泊 渔船的形状、太小以及它们的相对位置关系(图 6a、 b)。在全岛发现多条人工栈道,宽约 2 m,栈道阶梯 上有植物生长(图 6c),多处石阶倒塌,指示该处栈 道已经处于废弃状态。在全岛发现多达 34 处用浅 绿色塑料网裹盖的废弃建材,堆积面积大小不等 (图 6d)。在东锣岛东南部岸边,发现有废弃铁船,其 长约 9 m,宽约 3 m,船体格架清晰可见(图 6e)。在 东锣岛西北部岸边发现一处废弃码头,海域遗留 22 根铁桩,推断该码头栈桥宽约 8 m,码头长约 16 m, 宽约 10 m(图 6f),此外,通过影像图也发现岛礁岸 线残留较多人工垃圾。

4.3 海陆交互地带地貌

在岛礁海陆交互地带,礁石是最主要的地貌单元。通过无人机与无人艇等多源数据的综合对比, 对海陆交互地带微地貌进行分析,可减少解释误 判。以位于岛礁东部极浅水区的礁石地貌为例, 水下礁石主要分布于1~2m水深区域,退潮时可 见露出的礁石。图7为同一处潮下带礁石堆的影 像图与声呐图的对比。图7a高分辨率正射影像图 可见在浅青色海水之下的礁石堆,礁石堆连片分 布,在水下呈灰黑色。图7b侧扫声呐则进一步揭 示了水下礁石堆形状和大小,与图4c提及岩石声 学特征类似,水下礁石正背面声学上强弱差异对 比明显,正面强,背面弱或无背散射。图7a所示石 堤,其水下部分在图7b中表现为明显的强背散射



(a)房屋; (b)码头; (c)人工栈道; (d)废弃建材; (e)废弃船只; (f)废弃码头
图 6 岛礁陆上典型的人工地貌
Fig.6 Typical island artificial geomorphology



图 7 正射影像与侧扫声呐共同揭示的极浅水区水下礁石地貌 Fig.7 Submarine reefs in extremely shallow water area revealed by orthophoto map and side-scan sonar

特征。受石堤遮挡屏蔽,石堤后为无回波(黑色)的 声影区。

5 讨论

5.1 联合调查的特点与优势

5.1.1 无人机辅助无人艇调查作业

在海陆交互地带等极浅水区,无人机先行"探 路"查明障碍物分布,提高了无人艇调查的安全性。 岛礁岸线不规则和水下地形复杂,导致直接进行无 人艇调查的风险不可控。通过无人机快速获取测 区正射影像成果,无人艇测区和测线避开可能造成 作业风险的水上障碍物和岸滩,在不低于无人机摄 影测量时的潮水位时,布设测线自动巡线测量调 查^[12]。对岛礁等水下地形复杂或潮差大的区域,仅 识别水面障碍物显然不够安全。在东锣岛调查中, 在低潮位时先利用无人机对极浅水区进行低空摄 影,识别并标记水下和露出水面的礁石等障碍物的 位置(图 7);无人艇再在高潮位时段避开标记的障 碍物位置,缓慢靠近岛礁,根据艇上实时水深划定 安全区域,最后再布设调查测线,分块快速完成极 浅水区的调查。实际调查中证实该方法安全可靠, 无人机摄影在无人艇调查中起到较好的辅助作用。 5.1.2 实现岛礁陆上和水下地貌数据的拼接、融合

无人机低空摄影测量具有高清晰、大比例尺、 小面积、高现势性的优点,是卫星遥感与普通航空 摄影不可缺少的补充^[17]。水面无人艇声学测量则 具有吃水浅、快速高效、功能多样、小巧灵活等特 点,可对常规载人大船不能进入的浅水区(水深<5m) 进行测量,保证采集数据的完整性^[4]。在东锣岛地 貌调查中,无人机获取的高分辨率正射影像与无人 艇获取的多波束测深和侧扫声呐数据进行拼接、融 合(图1),甚至在浅至1m水深的海陆交互地带,实 现了对水下密集分布的水下礁石堆的多源数据分 析(图7)。

针对"最后一米"水深区域测量难的问题,下一步将利用高精度的激光雷达无人机及无人艇水上 水下一体化测绘系统对岛礁进行三维地形测量,通 过统一海陆垂直基准,融合陆上与水下地形等多源 异构数据,获取岛礁高分辨率的三维全景立体图像。

5.2 岛礁地貌类型及其特征分析

应用水面无人艇和无人机进行地貌调查的关键 和核心是调查资料的可靠性。基于光学和水声学 成像原理,依据地貌单元的大小、形态及分布特征, 结合调查区背景对其进行解译。调查区陆上和水下 地貌类型丰富(图 3~6),识别的地貌单元主要特征 及其分布位置归纳见表1。地貌的形成发展是内、外 动力相互作用的结果,同时人类活动在现代技术社 会里已成为一种重要的地貌营力(第三地貌动力)^[18]。 从微地貌单元的类型和特征看,东锣岛陆上地貌受 第三地貌动力影响要大于水下地貌,这可能是人类 陆上活动强度要远大于水下活动强度的缘故。

5.3 岛礁地貌应用实效

基于识别的微地貌类型和特征,从地貌指示意 义的角度评估和验证其应用实效。

5.3.1 助力海洋牧场建设

岛礁水下地貌特征指示的底质类型,可为海洋

| Table 1 Main features and distribution of the micro-geomorphology in survey area | | | |
|--|-------|--|-----------|
| 地貌类型 | 微地貌单元 | 主要特征 | 分布位置 |
| 水下地貌 | 水下沙丘 | 脊部浅、两翼深的凸起状,条带状,近SN走向 | 北部海域 |
| | 海底沙纹 | 呈韵律排列的条带状,近SN走向 | 东部海域 |
| | 海底沙斑 | 强背散射,连片或零散分布 | 西北部海域 |
| | 海底礁石 | 正面背散射强,背面背散射弱或无;呈墨绿色或革色 | 环岛礁广泛分布 |
| 陆上地貌 | 裸露礁石 | 呈灰白色或灰色,节理发育 | 主要在岛缘分布 |
| | 植被 | 种类多样,茎叶呈Y型、细碎、团状,颜色一致性较好或较差的呈绿色或浅绿色,连片发育 | 岸线以上茂盛生长 |
| | 房屋/水池 | 具有规则的边界、形状和均一的颜色 | 北部 |
| | 码头 | 堤坝、港池等明显,构筑物边界形状规则,颜色均一 | 北部 |
| | 人工栈道 | 条带状延伸,梯级等可见 | 东部、南部发现多处 |
| | 建筑材料 | 淡绿色网布覆盖,条柱状物堆叠 | 全岛多达34处 |
| | 废弃铁船 | 船只龙骨和轮廓明显,褐色锈迹明显 | 西南部岛缘 |
| | 废弃码头 | 残留铁桩呈T型分布 | 东北部海域 |

表 1 调查区微地貌主要特征及其分布位置

牧场建设和生态修复提供选址基础资料。人工鱼 礁是为入海生物提供栖息地,是海洋牧场建设过程 中采用的一种技术手段^[19]。人工鱼礁投放区选址 若欠科学性,将导致部分人工鱼礁淤积和下陷程度 较大,生态功能的发挥也因此受到影响^[20]。沿岛礁 周缘分布的海底礁石是陆上基岩的水下延伸,调查 显示海底存在密集成群发育的小型礁石(图 1c、4c、 7),可作为海底珊瑚生产培育的天然基底以及天然 的鱼礁。海底沙丘、沙纹发育指示近底水流的不稳 定性^[21],可能与较强的水动力条件有关,推断表层 沉积物为中细砂,结合浅层地质结构特征、海底承 载能力分析,可进一步对该区域投放人工鱼礁的适

宜性进行评价。

5.3.2 揭示地质灾害特征

岛礁陆上地貌特征揭示了地质灾害分布特征。 东锣岛上地质灾害可分为坡地重力型和水动力型 2类^[13],前者主要受自然力控制,后者主要受人类 活动影响。岛礁南部、东南部和西南部基岩滩宽 10~50 m(图 1), 岩石节理发育(图 5a), 是坡地重力 型地质灾害发生的主要部位。基岩礁石是岛礁斜 坡上的岩体长期受到的海浪侵蚀和风化,在重力作 用下解体滚落或坠落形成。海岸侵蚀等水动力型 地质灾害主要发生在北部海岸。通过对比最新正 射影像图(图 6b)及4个时期谷歌卫星遥感影像



注:数据来源于谷歌卫星历史影像

图 8 东锣岛北部不同时期卫星遥感对比图

Fig.8 Comparison of satellite remote sensing images of the north of Dongluo island in different periods

(图 8),北岸原在高潮和低潮时皆有沙滩裸露(图 8a、 b),码头及防波堤建成后引起水动力条件的改变, 北部海岸侵蚀加剧,导致原有沙滩消失(图 8c、d)。 5.3.3 评估生态环境

海岛上基础设施建设、生活垃圾及放牧等人为 因素可能会造成生态景观的破坏,环境的污染以及 水土流失的加剧^[22]。北部的码头港池在建设过程 中对珊瑚礁挖掘,造成海底生态系统破坏,海底出 现不同程度的荒漠化。岛上建筑逐渐增多,人类活 动逐渐增强(图 6a、8)以及人工栈道(图 6c)、建材 (图 6d)在全岛大范围的废弃,可能会对岛上生物筑 巢栖息、植物生长等生态环境造成一定影响。

6 结论

(1)在海陆交互地带等极浅水区,无人机先行 "探路"查明障碍物分布,提高了无人艇调查的安全 性,无人机摄影在无人艇调查中起到较好的辅助作 用。无人机与无人艇的联合调查,可实现岛礁陆上 和水下地貌数据完整拼接和融合。

(2)无人机与无人艇获取的数据可靠性高。利 用侧扫声呐与多波束数据可识别出海底沙丘、沙纹、 沙斑、礁石等岛礁水下地貌,利用高分辨率正射影 像图可识别出植被、礁石、房屋、码头、人工栈道、 废弃建材等岛礁陆上地貌。在海陆交互浅水地带, 水上水下多源数据共同对地貌进行识别,可减少解 译误判。

(3)无人机与无人艇获取的数据可用性强,指导意义大。在海洋牧场建设、揭示灾害地质分布特征及评估生态环境方面,具有很好的实用价值。

致谢:感谢安徽科微智能科技公司王文浩、徐 林和欧阳亚洲工程师在无人艇使用过程中给予的 支持和帮助!

参考文献:

- [1] 张卫东,刘笑成,韩鹏.水上无人系统研究进展及其面临的挑 战[J].自动化学报,2020,46(5):847-857.
- [2] 黄荣永,余克服,王英辉,等.珊瑚礁遥感研究进展[J].遥感学

报, 2019, 23(6): 1091-1112.

- [3] WALKER B K, RIEGL B, DODGE R E. Mapping coral reef habitats in southeast Florida using a combined technique approach[J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24(5): 1138-1150.
- [4] 李勇航,单晨晨,苏明,等.声学水面无人艇在浅水海底地貌调 查中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(6):219-226.
- [5] 方中华, 褚宏宪, 冯京, 等. 无人船艇在海洋地质调查中的应用 及展望[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(3): 72-77.
- [6] 常继强, 蒲进菁, 庄振业, 等. 无人船在海洋调查领域的应用分析[J]. 船舶工程, 2019, 41(1): 6-10+78.
- [7] 董超,刘蔚,李雪,等.无人水面艇海洋调查国内应用进展与展望[J].导航与控制,2019,18(1):1-9,43.
- [8] TURNER I L, HARLEY M D, DRUMMOND C D. UAVs for coastal surveying[J]. Coastal Engineering, 2016, 114: 19-24.
- [9] 高兴国,田梓文,麻德明,等.无人机LiDAR系统在砂质海岸监测中的应用[J].海洋环境科学,2020,39(3):468-472.
- [10] 石硕崇,李杰,唐秋华,等. 低空旋翼无人机载LiDAR系统在 海岛测绘中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 162-170.
- [11] SPECHT C, LEWICKA O, SPECHT M, et al. Methodology for carrying out measurements of the tombolo geomorphic landform using unmanned aerial and surface vehicles near Sopot pier, Poland [J]. Journal of Marine and Engineering, 2020, 8(6): 384.
- [12] 栾天, 聂仁奇. 无人机正射影像辅助无人船测深作业方法探 讨[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 142-147.
- [13] 韩孝辉,薛玉龙,何其江,等.三亚东锣岛沙滩恢复可能性探 讨[J].海洋开发与管理,2016,33(1):52-56.
- [14] 汪啸风,马大铨,蒋大海,等.海南岛地质[M].北京:地质出版 社,1991:78.
- [15] 海南省海洋渔业厅.海南省海岛资源综合调查研究专业报告 集[M].北京:海洋出版社,1999:37-38.
- [16] 王尚毅,李大鸣.南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆坡海底沙 波动态分析[J].海洋学报(中文版), 1994, 16(6): 122-132.
- [17] 王洛飞. 无人机低空摄影测量在城市测绘保障中的应用前 景[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2): 217-219, 222.
- [18] 曾克峰, 刘超, 程璜鑫. 地貌学及第四纪地质学教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014: 18-21.
- [19] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [20] 刘崇焕,程前.浅海海域海洋牧场人工鱼礁区地质调查方法 综述[J].中国水产,2020,47(4):45-47.
- [21] 庄振业,曹立华,刘升发,等.陆架沙丘(波)活动量级和稳定性标志研究[J].中国海洋大学学报,2008,38(6):1001-1007.
- [22] 黄奕财. 三亚东锣岛开发与保护浅谈[J]. 科技信息, 2011(29): 662, 617.

APPLICATION OF UAV AND USV IN JOINT SURVEY OF THE SUBMARINE AND LAND GEOMORPHOLOGY IN DONGLUO ISLAND, HAINAN

LI Yonghang^{1,2}, WEI Chengfu¹, LI Ruikeng¹, FU Xiaozhou¹, YANG Jiangping¹, LI Mingze¹

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China;
2 School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: OUS (overwater unmanned system) mainly include USV (unmanned surface vehicle) and UAV (unmanned aerial vehicle), which are of great significance in the investigation of high-risk areas such as shallow water and islands, which are difficult to reach by traditional big vessels and surveyor. The purpose of this paper is to discuss the features, reliability, and effectiveness of OUS in island investigation. C400 acoustic USV and Phantom 4 RTK photographic UAV were used to acquire multi-beam sounding, side-scan sonar, and DOM (digital orthophoto maps) data in the Dongluo Island, Hainan. The results show that the collected data can clearly identify the submarine geomorphology of the island such as submarine dunes, sand ripples, sand pitches, and reefs, as well as the land geomorphology of the island such as bare rocks, vegetation, houses, docks, abandoned iron boats, and artificial plank roads. It is confirmed that UAV orthophoto plays a good auxiliary role in the survey of USV, and the OUS joint survey can realize the complete integration of land and submarine geomorphological data of the island. The collected data have high reliability and good usability, which are of great reference value for marine pasture construction, reef ecological restoration, and revealing features of island geological disasters.

Key words: unmanned surface vehicle; overwater unmanned system; island investigation; orthophoto; island landform; multi-beam sounding; side-scan sonar