

蔡绍孟, 陈春华, 刘建波, 等. 基于无人机航测技术的东郊椰林海草盖度反演研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(7): 183–194, doi:10.12284/hyxb2023113

Cai Shaomeng, Chen Chunhua, Liu Jianbo, et al. Study on inverting seagrass coverage ratio at Dongjiao Coconut Forest based on UAV aerial survey technology[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(7): 183–194, doi:10.12284/hyxb2023113

基于无人机航测技术的东郊椰林海草盖度反演研究

蔡绍孟¹, 陈春华^{1,2*}, 刘建波^{2,3}, 宋长伟²

(1. 海南热带海洋学院 生态环境学院, 海南 三亚 572022; 2. 海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 571126; 3. 中国海洋大学 信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100)

摘要: 海草盖度是反映海草床生态状况的重要指标。本文通过航拍方案设计和飞行条件试验采用无人机航拍获取了东郊椰林海草高分辨率影像图, 结合 ArcGIS 软件影像分类工具和 3D 工具反演了海草分布范围, 研究出海草盖度计算的新方法并计算了东郊椰林海草的盖度, 模拟传统海草盖度调查方法的站点布置, 探讨了其结果可比性和代表性问题。研究结果表明, 东郊椰林海草主要分布于离岸 300 m 以内的珊瑚礁坪上, 呈斑块状、间隔式分布, 获取东郊椰林沿岸海草集中分布区面积为 23 221 m², 占研究区面积的比例为 17.79%; 海草覆盖面积约为 16 423 m², 海草盖度为 12.58%, 海草盖度较高, 海草床生态状况良好。在研究区的东南区域有马尾藻密集分布, 分布面积为 755.6 m², 其盖度为 0.5%, 呈独栋圆柱状漂浮生长。通过模拟试验, 传统海草盖度调查方法有样框法和样线法, 布置站点不同, 样框、样线放置有随机性, 海草盖度调查结果变动明显, 是传统调查方法的结果存在代表性差、可比性差的原因。本研究成果在海草生态监控区调查中具有推广应用价值。

关键词: 无人机航测; 东郊椰林; 海草盖度; 最大似然法; Iso 聚类非监督分类

中图分类号: P714.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)07-0183-12

1 引言

海草作为一种由陆生植物演化而来, 可以完全适应海洋生存环境的大型沉水型高等植物, 是当前地球上唯一可以在海水中完成完整的生长发育过程的被子植物^[1]。海草能够起到净化海水、稳固海床、减缓波浪和潮流等重要的作用, 是海洋生物索饵和育幼的良好场所^[2], 是一些大型生物乃至哺乳动物赖以生存的栖息地^[3]。Duarte 等^[4] 估测全球海草每年有 1.9 亿美元的产出, 具有极高的经济价值。近些年来, 随着全球变暖^[5] 以及海平面上升^[6], 根据有关记录, 全球

的海草面积已经消失了将近 1/3, 且海草床年退化速率已经接近 2%, 是海草再生速度的 10 倍以上^[7]。人为干扰破坏比自然灾害导致海草退化更严峻。近些年来, 国内学者对于各地区的海草面积调查报道足以说明我国海草退化严重的问题。广东湛江市流沙湾 20 世纪 90 年代损毁海草床开挖虾池发展养虾业, 导致养殖范围内海草已绝迹^[8]。陈石泉等^[9]2004–2013 年对海南岛东部沿海海草床进行长期定点监测, 平均盖度总体上呈下降趋势, 由 2004 年 58.60% 下降到 2013 年 21.12%。吴钟解等^[10] 调查发现海南岛海草床平均盖度在 2015–2019 年间从 25.9% 下降到 16.7%。

收稿日期: 2022-11-08; 修订日期: 2023-02-12。

基金项目: 海南省重点研发计划社会发展项目(ZDYF2023SHFZ143); 海南省重点研发计划高新技术项目(ZDYF2020022)。

作者简介: 蔡绍孟(1996—), 男, 海南省万宁市人, 主要从事资源环境研究工作。E-mail: 1010392732@qq.com

* 通信作者: 陈春华(1964—), 男, 研究员, 主要从事海洋调查和监测工作。E-mail: chchen314@qq.com

调查海草盖度的变化能够反映出海草生态系统的健康状况,利用无人机航测技术能够快速稳定获取大范围海草分布数据,对开展海草生态的保护研究具有十分重要的意义。

目前,国内海草资源调查以现场调查为主,主要有鳐式调查(Manta tow)方法^[11-12],样框法、样线法^[13]结合潜水拍摄^[14]用于海草盖度调查。传统的海草盖度现场调查方法得出的盖度结果只能代表调查站点的调查结果,难以代表大范围海区海草盖度的实际情况,虽然能够提供采样站点信息,历年多次海草盖度调查结果存在可比性差的问题。

利用无人机航测技术可以快速、准确、经济、有效获取航拍影像图^[15]。国外学者将无人机航测技术获取航拍影像图,并计算海草分布面积和海草盖度的报道较多^[16]。Nahirnick 等^[17]利用低空无人机航测技术获取了 3 个河口海草分布图像并分类处理得到海草面积,精度达到了 92% 以上。Chand 和 Bollard^[18]使用无人机航拍得到考克斯湾(Cox's Bay)夏、秋、冬 3 个季节期间的海草影像图,得出海草面积从夏到秋的增长,从秋到冬的减少。Ventura 等^[19]利用无人机航拍河口海草影像图并基于对象的图像分析(OBIA)对海草特征进行分类,总体分类精度达到 85%。高分辨率的无人机航拍影像图是进行海草分类提取的重要数据源,国外学者通过无人机航测技术对沿岸海草进行生态监测并尝试使用不同分类技术对获取的海草航拍矢量数据图进行分类提取^[20-28]。说

明无人机航测技术可以应用于沿岸海草分布和盖度调查,对本文的研究具有借鉴作用。国内无人机航测技术主要应用于森林资源^[29]、农田信息^[30]、城市绿地^[31]等方面报道较多,因海面水体反射、海水浑浊、风浪大等因素导致无人机无法拍到海草图片或无法拼接海草航拍影像图,应用于海草监测报道较少。

本文利用无人机航测技术结合 PIX4D 软件、ArcGIS 软件影像分类工具和 3D 工具研究海草分布反演和计算海草盖度的新方法,可以克服传统调查方法海草盖度的代表性、可比性问题,为准确掌握海南省海草分布情况提供重要工具,为海南省海草床生态监控区海草盖度调查提供可靠的新方法。

2 数据和方法

2.1 研究区概况

研究区位于海南省文昌市东郊椰林南部近海海域,地理位置为 $19^{\circ}31'29''\sim 19^{\circ}31'19''\text{N}$, $110^{\circ}51'51''\sim 110^{\circ}52'08''\text{E}$,面积为 $150\,000\text{ m}^2$ (图 1)。研究区处于珊瑚礁盘上,礁盘宽度为 $800\sim 1\,000\text{ m}$,海底主要为珊瑚碎屑和沙质类型,在珊瑚礁离岸 300 m 范围内水深 $0\sim 1\text{ m}$ 处适宜海草和大型藻类生长,在礁盘边缘有活珊瑚分布,离岸 1 km 有大面积礁石分布。

2.2 无人机航测技术获取影像图数据

2.2.1 飞行设备及参数

飞行设备采用大疆精灵 Phantom 4 RTK 无人机,配备 2 000 万像素的相机。无人机部分参数如下(表 1)。

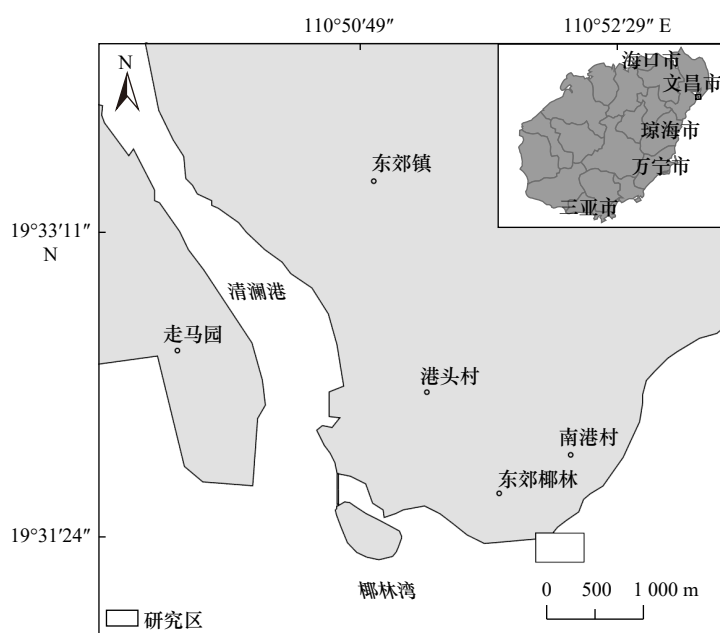


图 1 研究区域位置图

Fig. 1 location map of the study area

表1 无人机成像系统参数
Table 1 Unmanned aerial vehicle (UAV) imaging system parameters

参数	数值
飞行器	
重量	1 391 g
最大起飞海拔高度	6 000 m
飞行时间	约30 min
工作环境因素	0~40℃
相机	
影像传感器	CMOS; 有效像素2 000万
照片最大分辨率	5 472 × 3 648(3 : 2)

2.2.2 无人机飞行方案设计

收集东郊椰林近岸海域的历史遥感图,从遥感图中海草生长分布情况确定航测范围为东西向 500 m,南北向 300 m,并根据研究范围规划无人机航拍飞行航线。

由于海面光反射、海面动态变化和海面无特征点的影响,海水潮位较高时无人机拍摄的图片无法拼接成完整影像图。根据国家海洋信息中心编制的潮汐表选择东郊椰林海草低潮时间段进行航拍工作。选定的无人机航拍时间为 2021 年 9 月 5 日 16-17 时,无人机航拍作业时天气晴朗,海况较好,微风,海平面较为平静,无明显水波纹,海底生物清晰可见,水深为 0~1 m。飞行高度为 50 m,速度为 3.9 m/s,拍摄模式为定时拍摄,完成任务后自动返航。相机设置:照片比例为 3 : 2,白平衡为晴天,测光模式为平均测光,云台角度为-90°。重叠率设置:旁向重叠率为 70%,纵向重叠率为 80%,边距设置为自动。分为两个架次

飞行,航拍范围为 300 m × 500 m。

2.2.3 影像数据处理

POS 数据已经写入到影像图当中,将像片、像控点坐标导入到 PIX4D 软件自动计算,选择 3D Maps 作为正射影像输出结果。处理流程选择初始化处理、DSM 和正射影像生产两个步骤。数据全自动处理拼接结束后,查看成果报告并分析。采用坐标系为 WGS84,平均地面采样距离(Average Ground Sampling Distance, GSD)为 1.66 cm,覆盖面积为 0.231 7 km²,可以通过 ArcGIS 软件来查看 TIFF 格式正射影像成果图的坐标、距离、面积等信息。

2.3 Iso 聚类非监督分类获取海草盖度的方法

为了研究方便,使用 ArcGIS 软件中的渔网工具将 300 m × 500 m 的研究区航拍图分成 15 个区块 100 m × 100 m,图 2 是区块 13 离海面 50 m 航拍的影像图,图中的矩形范围是验证区,该验证区离海面 20 m 进行拍摄得到影像图,见图 3。图 3 清楚显示了海草分布,在拍摄的过程也进行了现场验证,航拍影像图清晰地反映出海草分布情况。运用 ArcGIS 软件影像分类工具中的 Iso 聚类非监督分类^[32]对拍摄得到的航拍影像图按照颜色进行自动分类,通过选取分类数目 6、9、12 这 3 种情况进行分类, ArcGIS 软件界面能把海草分布的影像图与摄取的海草矢量数据叠置对比,直观地看出海草分类提取的效果,经比较分类数目为 6 时海草分布范围的矢量提取效果较好。本研究对象为海草,从影像图中看到海草分布的范围,其分类值为 1 和 2,对其他海底沙、珊瑚碎块、马尾藻等范围的分类值为 3、4、5、6,用范围选取工具删除,提取的矢量数据仅为海草的分布范围,见图 4。从

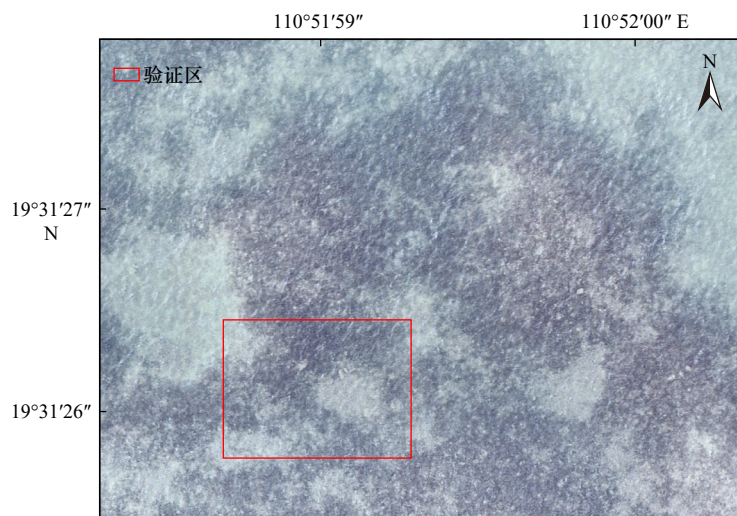


图2 区块 13 中的验证区域

Fig. 2 The validation area in Block 13

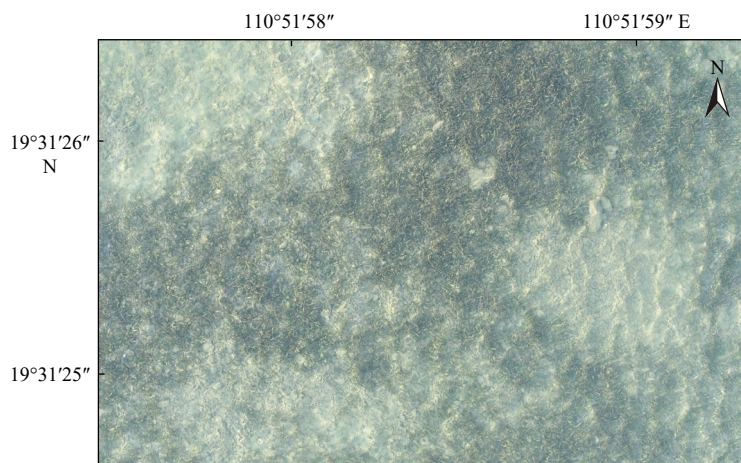


图3 验证区域的海草分布(20 m, 无人机拍摄)

Fig. 3 Seaweed distribution in validation area (20 m, photo by UAV)

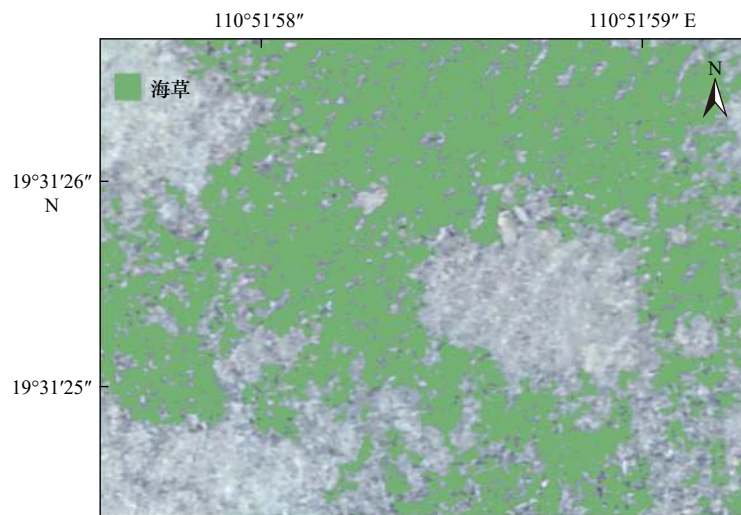


图4 验证区海草分布的矢量数据

Fig. 4 Vector data of seagrass distribution at validation area

ArcGIS 软件的矢量数据属性表获取该区的海草集中分布面积,由海草分布面积与该区面积之比得出海草盖度。同样方法得出研究区的海草盖度。

2.4 现场海草盖度调查的模拟方法

国内海草盖度的调查方法一般采用现场样框法和站点样线法^[11-13],模拟这两种方法的调查站位放置,运用 Iso 聚类非监督分类方法计算海草盖度,探讨现场设站历年多次调查结果的可比性差、代表性差的原因。

2.4.1 现场样框法

以 100 m 为间隔,在研究区布设 4 个断面,西断面 2 个站点,其他 3 个断面 3 个站点,共布设站点 11 个,每个站点布置样框大小为 5 m × 5 m,将 11 个站点整体向东边平移 50 m,随后继续向南边平移 50 m,各站点和样框放置见图 5a。根据模拟的 11 站的 3 种情况分别计算海草盖度。

2.4.2 站点样线法

在研究区模拟布设 D1、D2、D3 3 个站点,每个站点范围均为 50 m × 150 m,见图 5b,每个站点间隔 50 m 设置 3 条样线,每条样线的长度均为 50 m,将每个站点的样线分别向南平移 10 m、20 m、30 m,形成 4 种不同位置的布设站点方式,本次试验总共测试 3 个站点中拉取 3 条样线在 4 处不同位置,使用 ArcGIS 软件中的量尺工具测量海草所占样线长度,计算海草的平均盖度。

3 结果

3.1 无人机航拍结果

本次 50 m 飞行高度航拍获得原始图共 922 张,使用 PIX4D 软件拼接处理后生成一整张带坐标信息的高精确海草航拍矢量数据影像图(图 6),幅面为

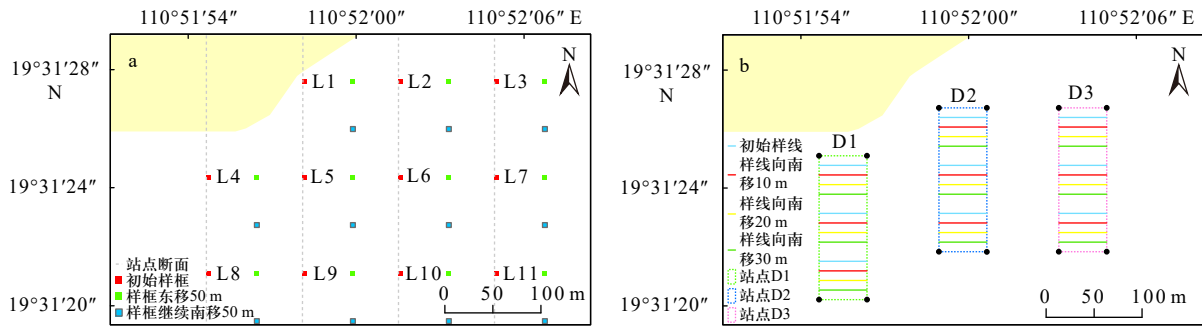


图5 模拟调查站点布设

Fig. 5 Simulatively location of investigation station

a. 样框法; b. 样线法

a. Enclosing-square method; b. line transect method

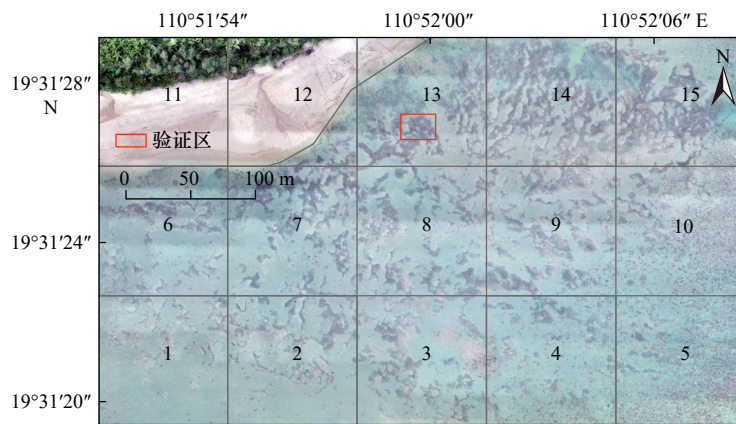


图6 无人机航拍影像图

Fig. 6 Image map photed by UAV

300 m×500 m, 图中标出了细分的15个区块。

从图5知, 东郊椰林沿岸海草床生长在珊瑚礁碎上, 礁碎外缘附近有活珊瑚分布, 这与蔡泽富等^[33]进行海南生态监控区高隆湾和龙湾的海湾类型海草分布类似, 海草主要分布在离岸300 m、水深小于1.5 m的范围, 珊瑚礁坪宽广, 海底沙和生物碎屑分布面积较大, 现场看到部分海草生长在粗颗粒的珊瑚碎屑中。研究区退潮时海底海草裸露, 海草肉眼可见, 呈片状、间隔式分布, 这与海南后海湾、铁炉港、鹿回头、西瑁洲岛以及小东海等其他调查区分布特点相近^[34]。技术人员实地调查到圆叶丝粉草(*Cymodocea rotunda*)、单脉二药草(*Halodule uninervis*)、海菖蒲(*Enhalus acoroides*)、泰来草(*Thalassia hemprichii*)、针叶草(*Syringodium isoetifolium*)和卵叶喜盐草(*Halophila ovalis*)6种海草, 优势种为圆叶丝粉草和泰来草。

东郊椰林马尾藻主要密集分布在研究区的东南区域, 其盖度在10%以上, 其他区域马尾藻分布较为稀疏, 盖度均小于1%, 原因是东南区域有较多的珊瑚礁及岩石分布, 适宜于马尾藻根附着生长, 其他区域

海底主要以淤泥、沙质和珊瑚碎屑组成, 适合海草生长, 是海草的密集分布区, 但有零星的珊瑚礁上生长有马尾藻。采用ArcGIS软件影像分类工具最大似然法分类和3D等值线工具计算得出马尾藻分布约有3000株。现场采集到3种马尾藻, 通过形态学鉴定其种类名称分别为宽叶马尾藻(*Sargassum euryphyllum*)、匍枝马尾藻(*S. polycystum*)和重缘叶马尾藻(*S. duplicatum*), 通过固着器固着在珊瑚礁石或者岩石上, 马尾藻生长在水深0.5~2 m范围, 株高约为30 cm, 主要是独株生长, 呈圆柱状漂浮生长。

3.2 海草分布特征

陈春华等^[35]采用ArcGIS软件影像分类工具最大似然法分类对研究区的区块8进行了海草分布研究, 采用该方法得到研究区的海草斑块状分布矢量图, 见图7。

从ArcGIS软件的矢量数据属性表获取各区块的海草集中分布面积、海域面积、海草斑块数和海草分布比例如表2所示。调查区海域面积为130556 m², 得出该研究区海草集中分布面积约为23221 m², 有2014个集中分布区, 平均集中分布的面积占调查海

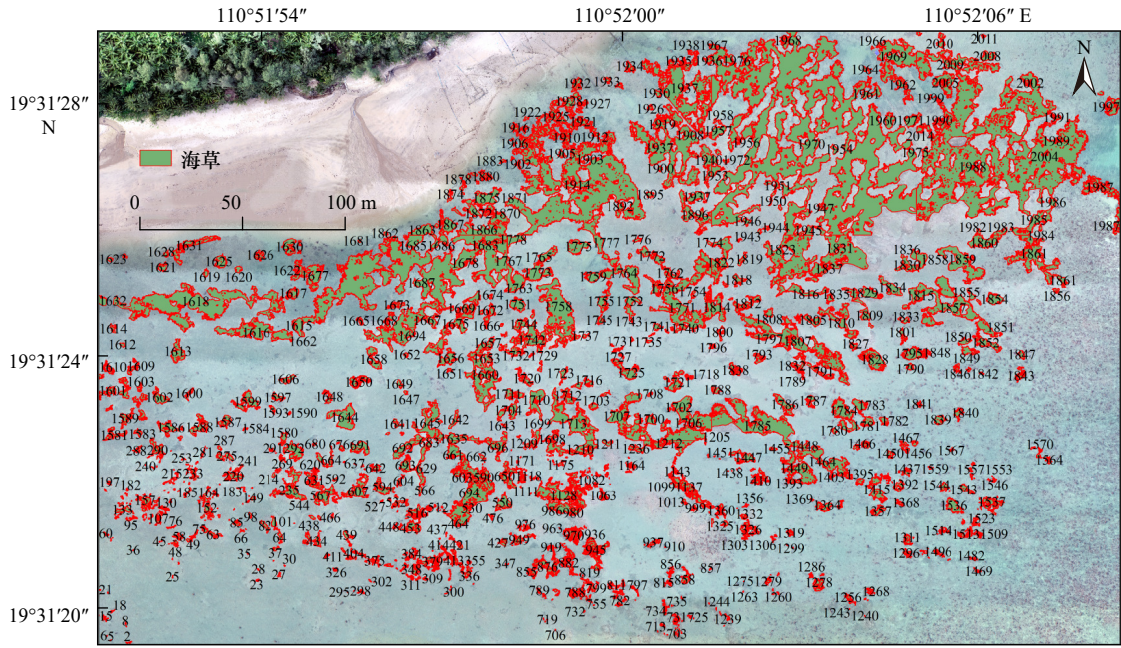


图 7 研究区海草集中分布矢量图

Fig. 7 Vectorgraph of seagrass concentrated distribution at research area

表 2 研究区海草集中分布特征

Table 2 Concentrated distribution feature of seagrass at research area

区块	区块1	区块2	区块3	区块4	区块5	区块6	区块7	区块8	区块9	区块10	区块12	区块13	区块14	区块15	总计
海草集中面积/m ²	413	1 076	897	593	152	1 427	2 413	2 176	2 219	912	376	2 813	4 433	3 310	23 221
海域面积/hm ²	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.166 1	0.889 5	1	1	13.055 6
斑块数/个	292	405	539	232	109	55	64	83	59	38	28	53	23	34	2 014
集中分布比例/%	4.13	10.76	8.97	5.93	1.52	14.27	24.13	21.76	22.19	9.12	22.64	31.62	44.33	33.10	17.79

域面积的 17.79%，海草集中分布的比例较高，说明海草床生态状况良好。实地调查发现，集中分布区由大量海草和少数的脱落叶片、沙、贝壳、淤泥及珊瑚碎屑等组成。离岸较远的区块 1、3、4、5、10 这 5 个区块海草集中分布面积比例在 10% 以下；区块 2、6 号海草集中分布面积达到了 1 000 m² 以上，比例均达到 10% 以上；离岸较近的区块 7、8、9、13 号海草集中分布的比例达到 20% 以上；区块 14 和 15 号海草分布最密集，是该研究区海草生长最茂盛的两个区块，海草集中分布的比例分别为 44.33% 和 33.10%。离岸较远区块 1、2、3、4、5 内海草斑块个数较多，均在 100 个以上，海草斑块面积小，零星分布，其中区块 3 内的斑块数最多，达到了 539 个；离岸较近区块 6、7、8、9、10、12、13、14、15 内的海草斑块较少，均在 100 个以下，海草斑块面积大，成片状分布，海草生长较为茂盛，其中区块 14 内的斑块数最少，为 23 个。

3.3 海草盖度结果

图 8 是 Iso 聚类非监督分类方法得出的海草分布

分类矢量图，各个区块的海草分布面积和海草盖度结果如表 3 所示。

研究区海草面积为 16 423 m²，海域面积为 130 556 m²，海草平均盖度为 12.58%，海草生态状况良好。研究区外缘东南区、南区的区块 1、2、3、4、5、10 平均海草盖度在 10% 以下；离岸较近的区块 6、8、9、13 的海草面积都达到了 1 000 m² 以上，平均盖度均在 10% 以上，区块 13 海草盖度达到了 21.92%；区块 7、14、15 海草分布最为密集，面积高达 2 000 m² 以上，平均盖度均在 20% 以上；海草盖度最大的是区块 14，其盖度为 29.82%。调查结果表明，研究区离岸较近的区域海草分布较远岸好，离岸超过 300 m 基本没有海草分布。

3.4 模拟现场海草盖度调查结果

通过模拟布设调查站点进行样框法和样线法采用同样的 Iso 聚类非监督分类法计算各站和研究区的海草盖度，结果如下：

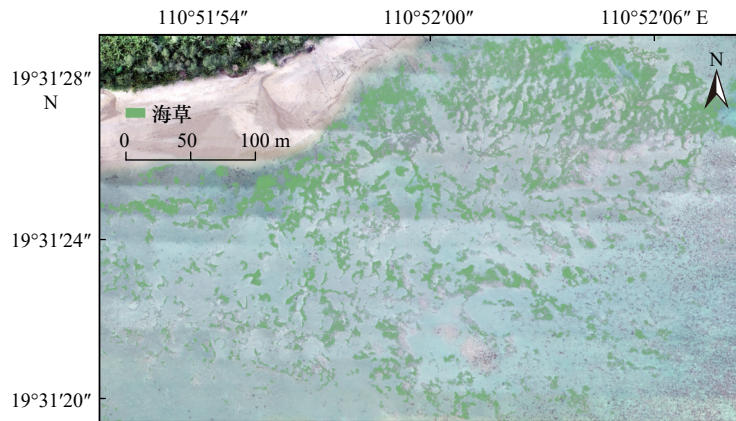


图 8 研究区海草分布矢量图
Fig. 8 Vectorgraph of seagrass distribution at research area

表 3 海草盖度计算结果

Table 3 Calculation results of seagrass coverage rate

区块	区块1	区块2	区块3	区块4	区块5	区块6	区块7	区块8	区块9	区块10	区块12	区块13	区块14	区块15	总计
海草面积/m ²	277	715	816	585	149	1 171	2 056	1 521	1 273	394	283	1 950	2 982	2 251	16 423
海域面积/hm ²	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.166 1	0.889 5	1	1	13.055 6
海草盖度/%	2.77	7.15	8.16	5.85	1.49	11.71	20.56	15.21	12.73	3.94	17.03	21.92	29.82	22.51	12.58

3.4.1 样框法

布设的 11 个模拟站点、整体向东平移、接着向南平移 3 种情况计算样框(5 × 5) m² 内的海草分布面积和海草盖度如表 4 所示。

原 11 个站点中有 3 个站点无海草分布, 其他站点海草盖度在 4.68%~44.84%, 平均为 18.36%, 高于实际平均海草盖度 12.58%, 每个站点相差较大; 向东边平移 50 m, 11 个站点中 6 个站点无海草分布, 其他站点海草盖度在 0.68%~40.72%, 平均为 7.73%, 低于实际平均海草盖度; 继续向南边平移 50 m, 11 个站点有 7 个无海草分布, 其他站点海草盖度在 3.52%~54.44%,

各站相差很大, 平均为 7.01%, 低于实际平均海草盖度。3 种情况下海草盖度都有明显差别, 平均值为 11.03%, 与实际平均海草盖度 12.58% 接近, 说明站点样框布设越多研究区的调查结果越接近真实值, 见图 9a。

3.4.2 样线法

模拟的 3 个站点, 计算所占海草的长度, 得出每条样线和站点的海草盖度如表 5 所示。从表中知, D1、D2、D3 3 个站点的 3 条初始样线所占海草比例相差较大, 各站海草盖度分别为 17.2%、36.0%、29.0%, 海草盖度相差较大, 平均为 27.4%; D1、D2、D3 各站点初始 3 条样线整体向南平移 10 m, 各站海草盖度分

表 4 模拟站点样框的海草盖度

Table 4 Seagrass coverage ratio at simulative investigation stations enclosing-square

站点	海草面积与盖度	样框L1	样框L2	样框L3	样框L4	样框L5	样框L6	样框L7	样框L8	样框L9	样框L10	样框L11	总计
原站点	面积/m ²	7.08	7.01	11.21	2.51	1.17	3.79	-	6.55	11.19	-	-	50.51
	盖度/%	28.32	28.04	44.84	10.03	4.68	15.16	-	26.2	44.76	-	-	18.36
整体向东边平移50 m	面积/m ²	-	6.83	3.79	10.18	-	-	-	0.17	0.30	-	-	21.27
	盖度/%	-	27.32	15.16	40.72	-	-	-	0.68	1.2	-	-	7.73
随后向南边平移50 m	面积/m ²	-	2.91	13.61	1.89	0.88	-	-	-	-	-	-	19.29
	盖度/%	-	11.64	54.44	7.56	3.52	-	-	-	-	-	-	7.01
平均盖度/%													11.03

注:“-”表示未发现海草分布。

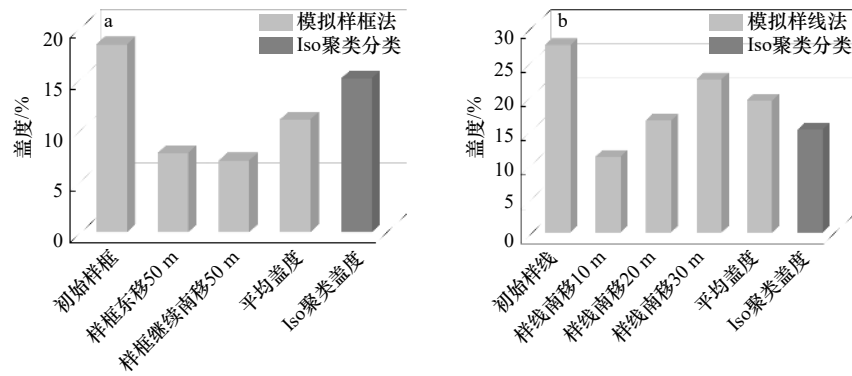


图9 不同情况下研究区的海草盖度

Fig. 9 Seagrass coverage ratio under different conditions at research area

a. 样框法; b. 样线法

a. Enclosing-square method; b. line transect method

表5 模拟断面拉线调查属性表

Table 5 Property sheet of simulated cross-section cable survey

样线	海草长度和盖度	站点D1				站点D2				站点D3				小计
		样线L1	样线L2	样线L3	平均/%	样线L1	样线L2	样线L3	平均/%	样线L1	样线L2	样线L3	平均/%	
初始样线	海草长度/m	20.1	4.8	0.9		23.7	15.74	14.1		21.1	8.3	14.1		
	盖度/%	40.2	9.6	1.8	17.2	47.4	31.4	28.2	36.0	42.2	16.6	28.2	29.0	27.4
整体南移10 m	海草长度/m	8.2	0.3	2.7		6.6	4.1	6.5		10.8	4.0	6.5		
	盖度/%	16.4	0.6	5.4	7.5	13.2	8.2	13.0	11.5	21.4	8.0	13	14.2	11.1
整体向南平移20 m	海草长度/m	4.7	15.0	6.1		28.6	3.8	21.2		12.2	13.4	17.0		
	盖度/%	9.4	30.0	12.2	17.2	28.6	3.8	21.2	17.9	12.2	13.4	17.0	14.2	16.4
整体向南平移30 m	海草长度/m	2.7	8.3	0.2		13.6	6.8	7.4		24.5	21.5	15.6		
	盖度/%	5.4	16.6	0.4	7.5	27.2	13.6	14.8	18.5	49.0	43.0	31.2	41.1	22.4
平均/%				12.4				21.0				24.6		19.31

别为 7.5%、11.5%、14.2%，海草盖度相差不大，平均为 11.1%，不到初始样线的 1/2；D1、D2、D3 各站点初始 3 条样线整体向南平移 20 m，各站海草盖度分别为 17.2%、17.9%、14.2%，海草盖度相差不大，平均为 16.4%，低于初始样线站点；D1、D2、D3 各站点初始 3 条样线整体向南平移 30 m，各站海草盖度分别为 7.5%、18.5%、41.1%，海草盖度相差较大，平均为 22.4%，稍低于初始样线站点。3 个站点放置 3 条 50 m 样线在 4 个不同位置试验测得站点内海草平均盖度分别为 12.4%、21.0%、24.6%，根据样线法得到研究区的总海草盖度为 19.31%，与实际平均海草盖度 12.58% 相差较大，似乎样框法好于样线法图 9b。

通过以上试验分析实地调查方法，样框、样线位置不同、站点位置稍有不同，海草盖度调查结果都不同，有时会有显著差别，样框放在无海草的位置，海

草盖度为 0，样线法因线长，这种情况出现的几率较小，站点设置越多，研究区的海草盖度越能反映海草盖度的真实情况，通过试验表明将无人机航测技术应用于海草盖度调查能真实得出大范围的海草盖度，解决传统调查存在代表性、可比性、合理性等问题，可以应用于海草床生态监控工作。

4 讨论

4.1 无人机航测技术用于海草盖度调查新方法的特点

目前，国内海草盖度现场调查方法是布设站点采用样线法和样框法，GPS 定位站点位置，潜水员分别通过水下摄像机和照相机拍摄样线和样框，带回实验室估测判读、分析计算海草盖度^[13]。吴钟解等^[10]采用这种方法于 2019 年在海南岛周边海域布设站点调查到海南省海域海草平均盖度为 16.7%，该值实际为龙

湾、长圯港、高隆湾、新村港、黎安港调查站点的平均结果,用以代表海南省沿岸海区的盖度调查结果是存在争议的。本文模拟海草盖度现场调查方法,变换站点、样线、样框位置,得到海草盖度相应变化,证明了传统海草盖度调查方法存在代表性、可比性、随机性等问题。本研究得出的海草盖度调查新方法是采用无人机航测技术,通过飞行条件设计,运用 PIX4D 软件拼接得到高分辨率的海草分布影像图,结合 ArcGIS 软件影像分类工具提取海草像元颜色特征分类矢量数据,以东郊椰林近岸 $300\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的海域范围为例,对比直观的海草分布影像图进行手工处理,计算得出海草盖度为 12.58%,与传统的海草盖度现场调查方法相比,该结果是研究区大范围的、真实的、有代表性的、有可比性的海草盖度结果。

4.2 海草集中分布区比例和海草盖度分析

采用 ArcGIS 软件影像分类工具中的最大似然法提取图 6 海草颜色特征的像元矢量数据,再利用 ArcGIS 软件 3D 工具的等值线工具得到海草集中分布区面积,通过计算得到第 8 区块海草集中分布区有 83 个,面积为 $2\,176\text{ m}^2$,占区块 8 的比例为 21.76%,研究区有 15 个区块,同样方法计算得到研究区的海草集中分布区数为 2 014 个,海草面积占 15 个区块面积的 17.79%,此结果说明了海草是不连续、间断、斑块状分布的特点。

采用 ArcGIS 软件影像分类工具中的 Iso 聚类非监督分类提取图 7 研究区的像元海草颜色特征矢量数据,利用影像图海草分布区校核海草矢量数据,得出海草分布面积,计算海草盖度,为 12.58%,该值较研究区海草集中分布区比例 17.79% 小,其原因是研究区每个斑块状集中分布区中有无海草分布的面积。计算得到研究区海草盖度是研究区 $300\text{ m} \times 500\text{ m}$ 大范围内的数据,是研究区海草盖度真实的结果,与布设站点调查实际只代表站点的海草盖度结果不同。

4.3 无人机航测技术新方法在海草床生态监控中的应用

采用 ArcGIS 软件影像分类工具获得相对准确的矢量数据,应合理选择飞行高度和监控范围。本文研究区范围 $300\text{ m} \times 500\text{ m}$,选取高度 50 m ,需要两个飞行架次完成,飞行时间约 1 h ,超过了低潮时段海草露出海面的时间,需要分成 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的 15 个区块

获取海草矢量数据以减小误差。为了避免低潮时段潮汐涨落水深变化引起像元颜色特征变化,在低潮时段 30 min 内完成一架次得到的影像图,获取海草矢量数据的误差较小。利用本研究得出海草盖度新方法,海草生态监控区范围可以选取 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$,飞行高度选取 100 m ,可以满足一架次飞行完成。制定无人机航测步骤和方法、航拍影像图处理方法、海草集中分布范围计算方法、海草盖度计算方法,构建海草床生态监控区监测的技术方法可应用于海南省的海草床生态监测和保护管理。

5 结论

本文通过航拍方案设计和飞行条件试验航拍获取了东郊椰林海草高分辨率海草影像图,采用 ArcGIS 软件影像分类工具与 3D 工具研究得到海草集中分布比例和海草盖度,并模拟传统现场海草盖度调查的站点布置,进行比较探讨,得出以下结论。

(1)从海草影像图结合现场调查得到:东郊椰林海草主要分布于离岸 300 m 以内的珊瑚礁坪上,呈斑块状、间隔式分布,实地调查到圆叶丝粉草、单脉二药草、海菖蒲、泰来草、针叶草和卵叶喜盐草 6 种海草;马尾藻密集分布在研究区的东南区域,呈独株圆柱状漂浮生长,调查到马尾藻种类有宽叶马尾藻、匍枝马尾藻和重缘叶马尾藻。

(2)东郊椰林研究区内 2 014 个斑块状海草集中分布区面积约为 $23\,221\text{ m}^2$,占调查面积的 17.79%;海草分布面积约为 $16\,423\text{ m}^2$,海草盖度为 12.58%,海草盖度较高,说明该研究区域海草床生态状况良好。

(3)模拟海草盖度调查的样框法和样线法站点布设,样框法站点 11 个和样线法 3 个站点 3 条样线整体变换位置,样框、样线位置不同、站点位置移动海草盖度变动明显,存在系统误差,传统海草盖度调查存在代表性、可比性、随机性等问题,每年、每航次调查结果变化因存在系统误差难以反映真实情况。将无人机航测技术应用于海草盖度调查能真实得出大范围的海草盖度,很好解决存在的问题。

(4)本文海草盖度的研究成果在海草生态监控区调查中具有推广应用价值,优化原有监控区调查方法,引入无人机航测技术和 ArcGIS 软件工具计算海草盖度,可进一步构建海草床生态监控技术方案。

参考文献:

- [1] 周媛媛. 海草床资源保护与可持续发展研究[J]. 国土与自然资源研究, 2021(2): 68-71.
Zhou Yuanyuan. Study on the protection and sustainable development of seagrass bed resources[J]. Territory & Natural Resources Study,

- 2021(2): 68–71.
- [2] Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 505–509.
- [3] 韩秋影, 施平. 海草生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5561–5570.
Han Qiuying, Shi Ping. Progress in the study of seagrass ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5561–5570.
- [4] Duarte C M, Borum J, Short F T, et al. Seagrass ecosystems: their global status and prospects[M]//Polunin N V C. *Aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 281–294.
- [5] Orth R J, Carruthers T J B, Dennison W C, et al. A global crisis for seagrass ecosystems[J]. *Bioscience*, 2006, 56(12): 987–996.
- [6] Wahl T, Haigh I D, Woodworth P L, et al. Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124: 51–67.
- [7] Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(30): 12377–12381.
- [8] 黄小平, 黄良民, 李颖虹, 等. 华南沿海主要海草床及其生境威胁[J]. *科学通报*, 2006, 51(2): 136–142.
Huang Xiaoping, Huang Liangmin, Li Yinghong. Main seagrass beds and threats to their habitats in the coastal sea of South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 136–142.
- [9] 陈石泉, 王道儒, 吴钟解, 等. 海南岛东海岸海草床近10 a变化趋势探讨[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(1): 48–53.
Chen Shiquan, Wang Daoru, Wu Zhongjie, et al. Discussion of the change trend of the seagrass beds in the east coast of Hainan Island in nearly a decade[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(1): 48–53.
- [10] 吴钟解, 陈石泉, 蔡泽富, 等. 海南岛海草床分布变化及恢复建议[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(4): 542–549.
Wu Zhongjie, Chen Shiquan, Cai Zefu, et al. Analysis of distribution change and restoration suggestion of the seagrass beds in Hainan Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(4): 542–549.
- [11] 陈春华, 吴钟解, 张光星. 新村港海草床的生态状况及可持续利用探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2011, 28(11): 74–78.
Chen Chunhua, Wu Zhongjie, Zhang Guangxing. Discussion on the ecological status and sustainable utilization of seagrass beds in Xincun Port[J]. *Ocean Development and Management*, 2011, 28(11): 74–78.
- [12] 王道儒, 吴钟解, 陈春华, 等. 海南岛海草资源分布现状及存在威胁[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(1): 34–38.
Wang Daoru, Wu Zhongjie, Chen Chunhua, et al. Distribution of sea-grass resources and existing threat in Hainan Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(1): 34–38.
- [13] 陈石泉, 林国尧, 蔡泽富, 等. 海南东寨港海草资源分布特征及影响因素[J]. *湿地科学与管理*, 2019, 15(4): 53–56.
Chen Shiquan, Lin Guoyao, Cai Zefu, et al. Patterns and impacting factors of the distribution of the seagrass resources in Dongzhai Harbour of Hainan[J]. *Wetland Science & Management*, 2019, 15(4): 53–56.
- [14] 李政, 李文涛, 杨晓龙, 等. 威海荣成桑沟湾海域海草床分布现状及其生态特征[J]. *海洋科学*, 2020, 44(10): 52–59.
Li Zheng, Li Wentao, Yang Xiaolong, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass beds in Rongcheng Sanggou Bay, Weihai[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(10): 52–59.
- [15] 杨中华, 庞海. 我国资源环境监测中遥感技术应用现状及展望[J]. *中外企业家*, 2009(12): 164–165.
Yang Zhonghua, Pang Hai. Application status and prospect of remote sensing technology in resource and environmental monitoring in China[J]. *Chinese & Foreign Entrepreneurs*, 2009(12): 164–165.
- [16] Guerrero M K M R, Vivar J A M, Ramos R V, et al. Assessment of seagrass percent cover and water quality using UAV images and field measurements in Bolinao, Pangasinan[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-4/W19: 233–240.
- [17] Nahirnack N K, Hunter P, Costa M, et al. Benefits and challenges of UAS imagery for eelgrass (*Zostera marina*) mapping in small estuaries of the Canadian west coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(3): 673–683.
- [18] Chand S, Bollard B. Detecting the spatial variability of seagrass meadows and their consequences on associated macrofauna benthic activity using novel drone technology[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 160.
- [19] Ventura D, Bonifazi A, Gravina M F, et al. Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA)[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1331.
- [20] Pasqualini V, Pergent-martini C, Pergent G, et al. Use of SPOT 5 for mapping seagrasses: an application to *Posidonia oceanica*[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(1): 39–45.
- [21] Barillé L, Robin M, Harin N, et al. Increase in seagrass distribution at Bourgneuf Bay (France) detected by spatial remote sensing[J]. *Aquatic Botany*, 2010, 92(3): 185–194.
- [22] Yang Chaoyu, Yang Dingtian, Cao Wenxi, et al. Analysis of seagrass reflectivity by using a water column correction algorithm[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(17/18): 4595–4608.
- [23] Hobley B, Arosio R, French G, et al. Semi-supervised segmentation for coastal monitoring seagrass using RPA imagery[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1741.
- [24] Duffy J P, Pratt L, Anderson K, et al. Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 169–180.

- [25] Chayhard S, Manthachitra V, Naulchawee K, et al. Multi-temporal mapping of seagrass distribution by using integrated remote sensing data in Kung Kraben Bay (KKB), Chanthaburi Province, Thailand[J]. *International Journal of Agricultural Technology*, 2018, 14(2): 161–170.
- [26] Konar B, Iken K. The use of unmanned aerial vehicle imagery in intertidal monitoring[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2018, 147: 79–86.
- [27] Riniatsih I, Ambariyanto A, Yudiati E, et al. Monitoring the seagrass ecosystem using the unmanned aerial vehicle (UAV) in coastal water of Jepara[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 674(1): 012075.
- [28] Yang Bo, Hawthorne T L, Searson H, et al. High-resolution UAV mapping for investigating eelgrass beds along the west coast of north America[C]//Proceedings of the IGARSS 2020–2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2020: 6317–6320.
- [29] 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
Sun Jiabing. Principles and Applications of Remote Sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [30] 任艳中, 王弟, 李轶涛, 等. 无人机遥感在森林资源监测中的应用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(8): 111–118.
Ren Yanzhong, Wang Di, Li Yitao, et al. Applications of unmanned aerial vehicle-based remote sensing in forest resources monitoring: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(8): 111–118.
- [31] 周游. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展[J]. *农村实用技术*, 2020(8): 92–93.
Zhou You. Application progress of UAV remote sensing in farmland information monitoring[J]. *Rural Practical Technology*, 2020(8): 92–93.
- [32] 张敏霞, 梅丹英, 高伟俊, 等. 无人机遥感技术在城市绿地监测中的应用进展[J]. *中国城市林业*, 2019, 17(5): 5–11.
Zhang Minxia, Mei Danying, Gao Weijun, et al. Review on the applications of UAV remote sensing technology to urban green space monitoring[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2019, 17(5): 5–11.
- [33] 蔡泽富, 陈石泉, 吴钟解, 等. 海南岛海湾与泻湖中海草的分布差异及影响分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2017(3): 74–84.
Cai Zefu, Chen Shiquan, Wu Zhongjie, et al. Distribution differences and environmental effects of seagrasses between bays and lagoons of Hainan Island[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2017(3): 74–84.
- [34] 郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护[J]. *生物多样性*, 2013, 21(5): 517–526.
Zheng Fengying, Qiu Guanglong, Fan Hangqing, et al. Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(5): 517–526.
- [35] 陈春华, 蔡绍孟, 刘建波, 等. 无人机航测技术在海草床调查中的试点应用[J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(4): 637–643.
Chen Chunhua, Cai Shaomeng, Liu Jianbo, et al. Pilot application of UAV aerial survey technique in seagrass bed investigation[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(4): 637–643.

Study on inverting seagrass coverage ratio at Dongjiao Coconut Forest based on UAV aerial survey technology

Cai Shaomeng¹, Chen Chunhua^{1,2}, Liu Jianbo^{2,3}, Song Changwei²

(1. College of Ecology and Environment, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China; 2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China; 3. Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Seagrass coverage ratio is an important indicator reflecting the ecological status of seagrass beds. In this paper, through the design of aerial photography scheme and flight condition test, the high-resolution seagrass image map of the Dongjiao Coconut Forest sea area was obtained by using UAV aerial photography. Combined with the image classification tools of ArcGIS software and 3D tools, a new method for calculating the coverage ratio of seagrass were obtained and the coverage of seagrass was calculated. The station location of simulating survey method of the traditional seagrass coverage ratio was compared and discussed. Seagrasses in the coastal sea bed of the Dongjiao Coconut Forest are distributed on the coral reefs within 300 m from the shore with patches and intervals. Using the new method, the concentrated distribution area of seagrass at sea bed of the Dongjiao Coconut Forest is about 23 221 m², and average concentration distribution ratio is 17.79%. The distribution area of seagrass in this

study area is about 16 423 m², and the coverage ratio of seagrass is 12.58%. The coverage ratio of seagrass is higher, and the ecological condition of seagrass bed is good. Sargassum is densely distributed in the southeast area of the study area, with a distribution area of 755.6 m² and a coverage of 0.5%, and grows as a single cylinder floating. By simulating the investigation station location of the sample frame method and sample line method of traditional seagrass coverage survey, seagrass coverage ratio changes with different stations, sample frame, and sample line positions changing randomly, which is the reason for the representativeness and comparability of the traditional survey results. The research results of this project have the promotion and application value in the investigation of seagrass ecological monitoring area.

Key words: UAV aerial photography; Dongjiao Coconut Forest; seagrass coverage ratio; maximum likelihood method; interactive self-organization