

引文格式: 胡义强, 杨骥, 荆文龙, 等. 基于无人机遥感的海岸带生态环境监测研究综述 [J]. 测绘通报, 2022(6): 18-24. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0165.

基于无人机遥感的海岸带生态环境监测研究综述

胡义强¹, 杨骥^{1,2}, 荆文龙^{1,2}, 杨传训^{1,3,4}, 舒思京¹, 李勇^{1,2}

(1. 广东省科学院广州地理研究所(广东省遥感与地理信息系统应用重点实验室, 广东省地理时空大数据工程实验室), 广东 广州 510070; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文介绍了无人机遥感系统的发展历史及现状, 并从海岸带生态环境监测应用角度, 总结了无人机平台、载荷在海岸带生态环境监测的现状; 综述了无人机遥感在海岸带生态环境监测中 8 个不同场景的应用, 为无人机遥感在海岸带管理中的发展潜力和有效性提供了参考。同时指出, 为进一步提升无人机遥感在海岸带生态环境监测中的应用效果, 需要在无人机载荷、像控点(GCPs) 布设、光谱数据处理等相关技术方面进行进一步研究和完善。未来, 随着无人机数据传输速度的提高与无人机自组网技术的发展, 有望实现海岸带生态环境高效、智能化监测。

关键词: 无人机; 遥感; 海岸带; 生态环境监测; 综述

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2022)06-0018-07

Review of coastal ecological environment monitoring based on unmanned aerial vehicle remote sensing

HU Yiqiang¹, YANG Ji^{1,2}, JING Wenlong^{1,2}, YANG Chuanxun^{1,3,4}, SHU Sijing¹, LI Yong^{1,2}

(1. Key Lab of Guangdong for Utilization of Remote Sensing and Geographical Information System (Guangdong Province Engineering Laboratory for Geographic Spatiotemporal Big Data, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences), Guangzhou 510070, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, we introduce the history and current situation of development of UAV remote sensing systems by introducing the application status of UAV platform and UAV remote sensors from the perspective of coastal ecological environment monitoring. Then we review UAVRS applications in eight different areas of the coastal ecological environment monitoring, which provides evidence of the potentials and effectiveness of UAVRS for coastal zone management. This study points out that in order to further improve the application effect of UAVRS in coastal ecological environment monitoring, it is necessary to conduct further research and improvement in UAV remote sensors, setting out ground control points (GCPs), spectral data processing and other related technologies. In the future, with the improvement of UAV data transmission speed and the development of UAV AD hoc network technology, it is expected to achieve efficient and intelligent monitoring of coastal ecological environment.

Key words: UAV; remote sensing; coastal zone; ecological environment monitoring; review

海岸带地区是海洋向陆地的过渡地带, 陆地、海洋和大气相互作用明显, 是地球表面自然环境和生态最为特殊和复杂的区域^[1]。随着人类对海岸带资源过渡开发利用和海岸工程建设的增多, 海岸带生态环境遭到极大的破坏, 严重制约了海岸带资源的综合利用和可持续发展。因此, 开展海岸带生态环境监测, 对于海岸带综合治理具有重要意义。

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)作为一种新型的的低空遥感平台, 携带方便, 起降灵活, 不受定位和时间限制, 弥补了卫星遥感在重访周期长、影像分辨率低、易受云层影响和成本高等方面的不足^[2], 在海岸带生态环境监测中的应用日渐兴起。

无人机遥感(UAV remote sensing, UAVRS)即无人机与遥感技术的结合, 能够对空间信息进行智能

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(41976189; 41976190); 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2019GDASYL-0301001); 广东省科技计划项目(2021B1212100006); 广东省引进创新创业团队项目(2016ZT06D336); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)(GML2019ZD0301); 人才团队引进重大专项(GML2019ZD0301); 广西科技重点研发计划项目(桂科 AB20297037)

作者简介: 胡义强(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事生态环境遥感监测工作。E-mail: hyiqiang@gdas.ac.cn

通信作者: 杨骥。E-mail: yangji@gdas.ac.cn

化、自动化、专用化的获取和同步传输,完成遥感数据的实时处理、建模和分析^[3]。无人机遥感凭借其高效灵活、可携带不同载荷和相对低廉的运行成本的优势,使其成为有用的海岸带生态环境遥感监测工具。

本文首先介绍无人机遥感系统的组成及在海岸带生态环境监测中的应用情况,以期为具体监测工作中选择合适的无人机遥感系统提供参考;其次,对无人机遥感在海岸线变化、近海水质、陆源入海污染、藻类灾害、海岸带湿地、围填海工程、海漂垃圾和海上溢油监测中的应用现状进行综述,为无人机遥感在海岸带管理中的发展潜力和有效性提供依据;然后,提出进一步提升无人机遥感在海岸带生态环境监测中的应用效果的建议;最后,指出无人机遥感在海岸带生态环境监测中的趋势和方向。

1 海岸带生态监测中无人机遥感系统发展现状

1.1 无人机遥感平台

无人机的类型按照飞行原理和机械结构组成可分为固定翼和多旋翼,这两种是目前最常见的机型,每种类型的无人机都有自身优缺点^[4]。多旋翼无人机具有易于操作、飞行稳定性强、具备悬停能力和垂直起降能力、对起飞环境要求低等优点,但多旋翼无人机飞行时间(一般<30 min)和飞行覆盖面积有限(1~8 hm²,根据海拔高度);相较而言,固定翼无人机能够飞行更快更高且搭载载荷大、续航时间长(可达60 min)、可以覆盖更大范围的区域(10~40 hm²,根据海拔高度)^[5],但固定翼无人机不具备悬停能力,而且需要比多旋翼无人机更大的起降面积。在平台选择上,由于海岸带环境受场地限制,往往不具备固定翼无人机的起降条件。相比而言,多旋翼无人机操作简单,可随时起降和定点观测,便于在研究中长期、高频率地采集遥感数据,较适合应用于此类研究中。

1.2 无人机载荷

随着轻小型无人机平台的发展,无人机载荷在分辨率、精准性、可靠性等方面不断取得进步。无人机载荷类型包括:光学遥感、激光雷达遥感和微波遥感载荷。常用于海岸带生态环境监测的载荷有:光学载荷(高分可见光相机、光谱多光谱成像仪、高光谱成像仪)、热红外成像仪、激光雷达和合成孔径雷达。

1.2.1 高分可见光相机

高分可见光相机能够捕捉可见光波段范围内的影像信息,是海岸带生态环境监测中最常用的载荷之一,可以收集许多有价值的信息(如色调、饱和度和强度)。这些高分辨率的彩色图像可用于摄影测量中生成正射影像,并在深度学习工作流程中用于构建研究区训练样本的数据,对研究目标自动分类和识别,主要应用于岸线变化监测^[6]、海漂垃圾监测^[7]、围填海工程监测^[8]等研究。

1.2.2 光谱成像仪

光谱成像仪既能捕捉到可见光波段信息,还能捕捉到肉眼不可见的近红外波段的信息。多光谱成像仪可提供具有3~10个非连续波段的图像,高光谱成像仪具有比多光谱更多的信息,可以捕捉包含多达数十甚至数百个以上连续的波段。光谱成像仪主要通过计算离散电磁波谱波长的代数表达式求解光谱指数,生成反映地物状况的一种遥感指标,在海岸带生态环境监测中,光谱成像仪可用于水质反演^[9]、藻类灾害检测^[10]和红树林分类^[11]等研究。

1.2.3 热成像仪

热红外成像与可见光成像技术不同,可以捕捉属于热红外部分的电磁辐射区域,并依据不同物体表面温度对红外线反射差异,将光线辐射能量转换成电信号,进而将其可视化,通过热红外影像中不同颜色判断被测物体情况。热红外成像可以检测到物体不同部位的温差,有较强的敏感性,在海岸带生态环境监测中可应用于陆源入海污染物监测^[12]、海上溢油监测^[13]及生物活动监测等。

1.2.4 激光雷达

激光雷达(LiDAR)遥感载荷可分为相位式和脉冲式,具有灵活可靠、不易受天气影响、可获取高精度三维点云的特点。目前无人机激光雷达主要采用脉冲式,可快速获取大面积获取三维点云数据,生成数字高程模型(DEM)产品,利用特定波长激光在水中的高穿透性,还能够测量船舶无法进入区域的水深数据。目前不仅在地形变化、生物量监测、森林植被信息等领域有所应用,还在近海水深测量及水下地形测绘等方面发挥了重要作用^[14-15]。

1.2.5 合成孔径雷达

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种主动探测方式的微波成像遥感系统,探测距离远覆盖范围大,可以在能见度极低的气象条件下得到类似光学照相的高分辨雷达图像^[16]。SAR系统主要通过发射不同波段与极化的电磁波照射地

物,接收到不同的微波后向散射信息,通过测量地物后向散射信号,产生表征散射强度的图像。由于目前无人机 SAR 技术还处在发展阶段,有些学者在围填海监测、海漂垃圾监测等领域进行了尝试。

2 无人机遥感系统在海岸带生态环境监测中的应用

2.1 海岸线变化监测

近年来,受海岸工程建设、海上养殖等人类活动的影响,海岸带外部形态变化巨大。海岸带具有地物破碎、高动态、反差小等特点,海岸线提取一直是个难题,利用常规测量手段(如实地测量、航空遥感、卫星遥感)已无法满足海岸线变化监测精度要求^[17]。随着无人机遥感日趋成熟,无人机摄影测量技术为获取海岸线高精度空间数据提供了另一种解决方案。大多数无人机海岸线变化监测研究都是利用无人机搭载高分可见光相机获取可见光影像,基于生成高精度的数字正射影像(DOM),采用人工目视解译或岸线识别提取算法,以便精确提取海岸线变化;有些学者还尝试基于可见光影像生成高分辨率的数字表面模型(DSM)点云数据,将 DSM 点云生成 DEM,通过等值线追踪等方法,自动提取海岛岸线^[18]。基于无人机摄影测量方法获取 DSM 点云提取的岸线虽然可行,但摄影测量的准确性容易受到拍摄环境的影响,当测量区域有较大水域时,图像匹配的精度会降低,在精度提高方面还需进行深入研究;与摄影测量方法不同的是,无人机激光雷达(UAV-LiDAR)可直接获取高精度点云数据,在海岸线提取上也得到了很好的应用,文献[19]开展了将无人机倾斜摄影海岸带的潮位与 DEM 相结合的岸线提取方法,并取得了较好的效果。随着无人机激光雷达系统的不断发展,利用高精度 DEM 数据提取海岸线也将成为未来的发展趋势。

2.2 近海水质监测

近年来,由于人类活动的影响,我国近海海域水环境污染日益严重,水体的富营养化破坏了海洋生态系统,已成为社会经济进一步发展的障碍。水质监测是评价水质情况与水污染防治的主要科学依据,传统的水质监测主要采用人工定时定点采样和实验室分析,这种监测方法虽然精度高,但是需耗费大量的人力和物力,且覆盖范围有限,难以实现水质情况实时监测和管理^[20]。无人机遥感可搭载光谱成像仪获取近海水体光谱数据,结合实测采样点监测光谱数据与水体中悬浮物浓度、浊度的关

系,建立水质参数反演模型,选择出最佳反演波段,实现水质指标含量(叶绿素 a、悬浮物浓度(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)等)的反演。在水体透明度反演研究中,高光谱遥感数据具有丰富的光谱信息,通过建立透明度反演模型,可定量反演水质透明度情况^[21]。但目前水质反演模型建立往往要结合实测水样数据构建反演模型,受采样点的布设不均匀和构建的水质监测模型适用性等因素,以及高光谱成像过程中水面局部反射率异常影响,水质参数反演的精度还有待提高。

2.3 陆源入海污染监测

陆源入海排污口是海洋污染的重要污染源之一,也是海洋环境监测的重要内容。入海排污口往往有分布广泛、数量众多、隐蔽性强的特点,加上沿海地区地形复杂,依靠人工检查巡查等传统方式异常艰难,无法满足调查工作的实际需要^[22]。无人机遥感技术能够快速获取调查区域遥感数据,并通过人工目视解译发现各类排污口。针对裸露排污口,往往形态可见便于识别,可利用无人机平台搭载可见光载荷获取高分辨率真彩色影像,制作正射影像图,通过人工判读直接对便于识别的排污口进行提取^[23]。针对隐蔽的排污口,利用污水与自然水体温度存在显著差异的特点,通过无人机平台搭载热红外载荷获取热红外数据,根据热红外影像中不同颜色代表不同被测水体温度,判别隐藏污染源的位置、分布和扩散范围。由于无人机覆盖范围有限,当监测区域范围较大时,可结合卫星遥感数据,通过反演水质参数,划分出重点监测区域,再利用高分辨率无人机遥感数据进行排污口的解译。通过卫星遥感与无人机遥感相结合的方式,充分发挥卫星遥感覆盖面积大、无人机遥感分辨率高等特点,将有助于提升陆源入海污染口监测效率。

2.4 藻类灾害监测

近年来,我国沿海海域藻类灾害频发,引发海洋溶解氧浓度下降、遮挡阳光,导致鱼类及其他海洋生物因缺氧死亡,造成严重的海洋生态环境破坏和经济损失^[24]。赤潮和绿潮是目前最常见的两种藻类灾害,叶绿素 a 为浮游植物生物量和营养水平的定量描述指标,藻类植物的空间分布特征与海表面叶绿素异常聚集显著相关。现阶段研究中,宏观的藻类灾害监测主要依据卫星多光谱遥感反演水体中叶绿素 a 浓度进行监测^[25],但卫星遥感分辨率较低,且受云层影响,无法对近岸小范围的赤潮灾害进行有效监测。无人机遥感可弥补卫星遥感的不足,在赤潮灾害监测中取得了良好的监测效

果,具有较大的应用潜力^[26]。针对赤潮灾害,一些学者利用无人机搭载的多光谱成像仪获取高精度多光谱数据,构建了叶绿素 a 浓度反演模型,采用叶绿素阈值分割等算法进行赤潮信息的提取,实现赤潮灾害分布监测;对于绿潮灾害,基于无人机高精度多光谱数据,通过研究归一化植被指数(NDVI)与绿潮分布的关系,可实现绿潮分布的提取;除此之外,文献[27]在研究蓝藻灾害监测中,发现无人机遥感的近红外数据,能够很好地区分蓝绿藻发生的差异,并利用其特点提取了蓝藻分布。然而,国内利用遥感技术对藻类灾害的研究大多局限于观测藻类灾害的发生,利用卫星遥感数据进一步研究藻类灾害的机制和与风、海表温度、海表盐度等海洋环境因素的动态过程,将成为未来研究的重点。

2.5 海岸带湿地监测

红树林作为独特的过渡湿地,具有较高的生态系统价值。近年来,遥感技术已成为红树林监测的重要手段。目前,受无人机平台载重、飞行控制能力等限制,在无人机遥感海岸带湿地监测中,以搭载轻型可见光相机、多光谱相机为主。在基于可见光数据的监测中,往往采用无人机搭载高分可见光相机获取红树林生态系统的 DOM,通过图像分类方法和基于深度卷积神经网络模型,实现对红树林进行物种识别标记^[28]。高光谱遥感技术具有“图谱合一”的特点,能够在获取地物影像的同时,得到地物的连续光谱信息。在这类研究中通常采用提取平均光谱特征及 NDVI 值,运用最大似然法、随机森林(RF)分类、支持向量机(SVM)的方法^[29],开展对红树林湿地精细分类和空间分布研究。随着无人机激光雷达技术的发展,其在林业应用研究中应用也越来越广,主要用于获取森林垂直结构信息,但目前应用于红树林的研究较少。一些研究还尝试将无人机遥感与卫星遥感相结合,以研究红树林动态变化,实现了红树林动态变化及结构属性的快速监测^[30]。随着无人机遥感技术的发展,进一步搭载更为复杂的激光雷达、高光谱等载荷成为可能,将雷达数据和光学遥感数据进行融合,有助于进一步获取红树林生态系统更多参数特征。

2.6 围填海工程监测

围填海造地是人类利用海域资源的主要方式,为沿海地区带来经济发展的同时,也一定程度上破坏了海岸带生态环境,海域动态监测是科学管理围填海工程的重要内容。无人机遥感技术可用于填海工程的界址监测、岸线变迁监测。通过无人机搭载高分可见光相机获取高分辨率的遥感数据,结合

围填海坡顶线和坡脚线数据,可提取围填海进展及海岸施工已形成的陆域部分。但是目前无人机遥感还无法直接获取填海坡脚线,需采用 RTK 测量和水下测量相结合的方式,因此无法作为填海工程监测的直接监测手段。随着无人机激光雷达技术的发展,将激光测深设备搭载到无人机平台上,既能对已填陆域进行监测,同时还能获取水下填海坡脚线和水深信息^[31],实现围填海工程水陆一体化监测。一些研究还开展了无人机机载合成孔径雷达在围填海监测中的应用研究,并成功提取了填海过程中的界址与面积变化情况,验证了其在围填海监测应用中的适用性,有效地拓展了围填海监测手段^[32]。除此之外,在围填海工程施工阶段,利用无人机遥感,通过 5G 设备高清视频、图像信息传输、GPS 定位显示等手段,还可以实现对工地进度、工程质量、人类活动、施工安全的立体巡控,可为围填海工程动态监管提供有利的科学保障。

2.7 海漂垃圾监测

随着沿海工农业、旅游业、海上养殖的不断发展,海漂垃圾逐渐成为世界各海域普遍多发的海洋污染现象,并因其多样性、持久性和长期存在海洋环境中而备受关注^[33]。目前海漂垃圾常用调查方法主要依靠船只,需要大量的人力和物力。一些学者利用卫星遥感方式,但受遥感影像分辨率的限制,很难识别像海漂垃圾较小的物体。无人机遥感可以获得更高分辨率的影像,在海漂垃圾监测中的应用也越来越广泛,常用于海漂垃圾的载荷有视频载荷、多光谱、高光谱成像仪和热成像仪^[34]。目前国内对于海漂垃圾的研究还较少,现有的研究大多采用可见光的红绿蓝(RGB)波段和光谱(近红外和短波红外部分光谱)影像数据,以区分空间离散漂浮塑料^[35-36]。海漂垃圾可见光遥感监测主要通过无人机搭载高分可见光相机,基于无人机航拍正射影像图和高清视频数据,采用阈值法、卷积神经网络等提取方法^[37],实现对海漂垃圾分布数据(包括位置、类型、面积等要素)的自动识别提取。高光谱遥感在海漂垃圾监测和识别方面也具有较大潜力,通过对高光谱图像预处理,使用不同样本集对分类算法进行训练,选择适合海漂垃圾监测的分类器,可对目标进行自动识别。一些研究还尝试利用 SAR 载荷监测可能含有高浓度微塑料的海面浮油表面,这为使用 SAR 探测可能含有海漂垃圾的区域提供了有利的科学依据,在未来还需进一步深入研究。

2.8 海上溢油监测

海洋溢油是当今最常见的海洋污染物之一,在造成巨大的经济损失的同时,还严重影响了海洋生态环境^[38]。无人机光学遥感技术在海上溢油监测中发挥着重要作用,光谱响应特性是溢油光学遥感的重要基础,由于不同厚度浮油的反射光谱不同,可用于识别不同溢油污染类型和估算溢油量。由于在紫外遥感波段,油膜覆盖海面的反射率明显大于正常海面,且对小于 $5\ \mu\text{m}$ 的油膜比较敏感^[39],国内外学者利用此特性开展了大量的紫外遥感的溢油研究^[40]。此外,由于溢油具有一定的光学厚度,它吸收太阳辐射,并将其中一部分辐射重新释放为热能,因此利用无人机搭载热红外载荷,根据油膜和海水不同的热红外特性,在热红外影像中提取溢油区域。但光学和红外遥感监测溢油还存在一些不足,由于光学遥感易受天气影响,热红外遥感分辨率较低且只能监测出较厚的油膜,紫外遥感易受光照条件的限制。研究表明^[41-42],机载合成孔径雷达技术不受天气影响,可主动探测海表面溢油,提供不同波段极化下的高分辨率雷达图像,是溢油监测的有效手段,基于SAR图像纹理特征、散射特征、形状特征,根据油膜粗糙度与后向散射系数的关系,构建溢油散射模型,实现SAR海面溢油区域监测。但SAR影像在识别溢油时,受生物成因的表面膜和一些海洋现象(风浪、涡旋、表面流、内波等)的影响,会将其误判成溢油。综上所述,每一种溢油监测方法都有其不足,多源溢油监测手段融合,将在一定程度上提高海上溢油监测的准确率。

3 无人机遥感在海岸带生态监测应用中的挑战与展望

3.1 无人机遥感在海岸带生态环境监测面临的技术挑战

虽然无人机遥感可以广泛地应用在海岸带生态环境监测,但在沿海生态环境监测研究中使用无人机仍存在一些技术挑战。

(1) 载荷技术: 由于无人机的低飞行自主性,所能获取的影像带宽相比航空和卫星遥感影像要低很多,这也限制了无人机遥感只能调查非常有限的研究区域,因此需要开发更高分辨率的载荷,使无人机在更高的飞行高度获取宽带宽、大范围的海洋遥感数据。

(2) 像控点布设: 海滩是永久变化的,这为在海岸带研究中使用固定的地面控制点(GCPs)进行图像校正带来了一定的挑战。未来可通过采用不

同的可移动目标点作为地面控制点,确保采集图像的准确性^[43]。

(3) 多光谱数据质量: 随着多光谱技术在海岸带生态环境监测应用领域的不断扩展,对光谱数据的质量要求也越来越高。由于光谱数据质量与光照条件密切相关,因此既要实现光谱数据的高速获取,又不能损失数据质量,同时对光谱数据处理也带来了一定的挑战。

(4) 无人机海量数据处理技术: 海岸带无人机遥感监测数据包含高分辨率的可见光、高清视频、高光谱、激光雷达等多种数据,具有数据海量、信息丰富、结构复杂、类型多样等特点,如何通过管理系统对这些海量数据进行在线管理,是目前面临的一项挑战。

3.2 未来展望

(1) 无人机数据传输方面: 随着5G时代的到来,每秒的数据传输速度从MB级上升到了GB级,这也使得无人机数据传输变得更加方便快捷。通过卫星通信和导航技术,将“空-天-地”通信集成在一起^[44],可以完成无人机远程控制、高分辨率遥感数据实时回传及自动驾驶控制,结合深度学习算法,实现海岸带生态环境动态化、自动化、智能化监测^[45]。

(2) 无人机合成孔径雷达技术: 随着无人机遥感在海岸带监测中的广泛应用,对可搭载于无人机的微小型合成孔径雷达(Mini SAR)的需求也在日益增加。合成孔径雷达是一种主动式微波成像雷达,具有全天候的工作能力,且能穿云透雾,可在不同频段、极化方式下获取高分辨率的雷达影像,在海岛地形测绘、海岸线监测、海上溢油监测等领域有其独特优势。未来,随着轻小型无人机的发展,对合成孔径雷达载荷的重量也提出了更高的要求。

(3) 无人机续航力方面: 无人机有限的续航时间一直是影响无人机发展的关键因素,随着燃料电池技术(如氢燃料、锂离子和石墨烯电池等)的发展将会一定程度地提升无人机电池的蓄电量。在无人机的节能领域上,研究无人机绿色能源(如太阳能)收集技术,也将作为提高无人机续航时间的发展方向。然而,由于无人机能量收集的随机到达,能量收集的效率相对较低,为提高充电效率,研究基于多天线技术的空中无线充电等新型能量传输技术具有重要意义^[46]。

(4) 无人机自组网遥感观测方面: 由于无人机遥感观测覆盖范围有限,如果执行面积较大的任务,需多次往返才能完全覆盖任务区域,往往耗时

长、效率低。通过自组网技术,多无人机之间信息传递、共享,相互协作完成对任务环境的感知。在未来的海岸带生态环境监测中,通过使用无人机自组网技术,可以灵活、高效地完成面积较大的监测任务。

(5) 多源遥感数据融合方面:目前单一无人机遥感数据采集方式已经无法满足实际应用需求,将可见光载荷、红外载荷、激光雷达等多种载荷相结合的方式获取遥感数据,已成为无人机遥感发展的趋势。将同一区域不同来源、不同特征的遥感数据匹配融合,可弥补单一数据源的不足,实现多种数据源在空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率的优势互补,提升无人机遥感信息提取的可靠性,为无人机遥感技术开拓更广阔的应用领域^[47]。

4 结 语

本文通过对无人机遥感平台和载荷的介绍,为选择无人机遥感开展海岸带监测具体工作的适用性提供参考。通过综述无人机遥感系统在海岸带生态环境监测中的应用,证明了无人机遥感能够提供监测围填海工程、近海水质、陆源入海污染、赤潮灾害、海岸带湿地及海漂垃圾所需要的遥感数据信息,可作为海岸带生态环境“数字化”管理获取遥感数据信息的有价值工具,具有较大发展潜力和有效性。但无人机遥感发展还面临着载荷、像控点布设及无人机数据处理等方面的技术挑战。随着低成本、高分辨率、轻量化载荷与无人机的集成,基于无人机遥感的海岸带生态环境监测的应用也将显著增加并迎来新的发展机遇。

参考文献:

[1] 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等. 基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估: 以舟山海岸带为例 [J]. 生态学报, 2014, 34(3): 718-726.

[2] SHAKHATREH H, SAWALMEH A H, AL-FUQAHA A, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): a survey on civil applications and key research challenges [J]. IEEE Access, 2019, 7: 48572-48634.

[3] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.

[4] OLSON D, ANDERSON J. Review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, imagery processing, and their applications in agriculture [J]. Agronomy Journal, 2021, 113(2): 971-992.

[5] FLOREANO D, WOOD R J. Science, technology and the

future of small autonomous drones [J]. Nature, 2015, 521(7553): 460-466.

[6] 邓才龙. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究 [D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015.

[7] 李德鑫,闫志刚,孙久运. 基于无人机视觉的河道漂浮垃圾分类检测技术研究 [J]. 金属矿山, 2021(9): 199-205.

[8] 孙玉超,曾纪胜,蒋城飞,等. 无人机低空遥感在填海工程动态监测中的应用 [J]. 海洋技术学报, 2016, 35(6): 5-9.

[9] JIANG Q, XU L, SUN S, et al. Retrieval model for total nitrogen concentration based on UAV hyper spectral remote sensing data and machine learning algorithms: a case study in the Miyun Reservoir, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107356.

[10] 姜宗辰,马毅,江涛,等. 基于深度置信网络(DBN)的赤潮高光谱遥感提取研究 [J]. 海洋技术学报, 2019, 38(2): 1-7.

[11] 马云梅. 基于国产多源高分遥感的广西红树林种间分类研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.

[12] 张元敏. 无人机航测技术在入海排污口排查中的应用 [J]. 测绘通报, 2020(1): 146-149.

[13] CHEN Xu, LIU Lei, HUANG Wei. The detection and prediction for oil spill on the sea based on the infrared images [J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 391-404.

[14] VAGLIO LAURIN G, CHEN Qi, LINDSELL J A, et al. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with LiDAR and hyperspectral data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 89: 49-58.

[15] HOLMGREN J, PERSSON Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 415-423.

[16] 王岩飞,刘畅,詹学丽,等. 无人机组合成孔径雷达系统技术与应用 [J]. 雷达学报, 2016, 5(4): 333-349.

[17] 麻德明,刘焱雄,金永德,等. 面向对象的无人机遥感影像海岸线提取方法研究 [J]. 海洋科学, 2020, 44(10): 46-51.

[18] PAPAKONSTANTINOOU A, DOUKARI M, TOPOUZELIS K. Coastline change detection using unmanned aerial vehicles and image processing techniques [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(9/10): 5564-5571.

[19] HUANG Chao, ZHANG Hongmei, ZHAO Jianhu. High-efficiency determination of coastline by combination of tidal level and coastal zone DEM from UAV tilt photogrammetry [J]. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2189.

[20] GHOLIZADEH M H, MELESSE A M, REDDI L. A comprehensive review on water quality parameters

- estimation using remote sensing techniques [J]. *Sensors*, 2016, 16(8) : 1298.
- [21] WEI Lifei, WANG Zhou, HUANG Can, et al. Transparency estimation of narrow rivers by UAV-borne hyperspectral remote sensing imagery [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 168137-168153.
- [22] 李翔宇, 张操. 大连黄海地区入海排污口高分辨率航测排查 [J]. *科技创新与应用*, 2020(17) : 144-145.
- [23] PARK G, PARK K, SONG B. Spatio-temporal change monitoring of outside manure piles using unmanned aerial vehicle images [J]. *Drones*, 2020, 5(1) : 1-9.
- [24] 关道明, 战秀文. 我国沿海水域赤潮灾害及其防治对策 [J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(2) : 60-63.
- [25] WEI Guifeng, TANG Danling, WANG Sufen. Distribution of chlorophyll and harmful algal blooms (HABs) : a review on space based studies in the coastal environments of Chinese marginal seas [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(1) : 12-19.
- [26] SHANG Shaoling, LEE Zhongping, LIN Gong, et al. Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 85-94.
- [27] KAGEYAMA Y, TAKAHASHI J, NISHIDA M, et al. Analysis of water quality in Miharu Dam reservoir, Japan, using UAV data [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 11: S183-S185.
- [28] 冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 等. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用 [J]. *热带地理*, 2015, 35(1) : 35-42.
- [29] BELGIU M, DRĂGUT L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [30] BESELLY S, WEGEN M, GRUETERS U, et al. Eleven years of mangrove-mudflat dynamics on the mud volcano-induced prograding delta in east Java, Indonesia: integrating UAV and satellite imagery [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(6) : 112-130.
- [31] PE'ERI S, PHILPOT W. Increasing the existence of very shallow-water LiDAR measurements using the red-channel waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5) : 1217-1223.
- [32] 王厚军, 李明, 丁宁, 等. 无人机机载 MiniSAR 在围填海监测中的应用探索 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(3) : 97-99.
- [33] GALL S C, THOMPSON R C. The impact of debris on marine life [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 92(1/ 2) : 170-179.
- [34] VEENSTRA T S, CHURNSIDE J H. Airborne sensors for detecting large marine debris at sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 65(1/2/3) : 63-68.
- [35] ACUÑA-RUZ T, URIBE D, TAYLOR R, et al. Anthropogenic marine debris over beaches: spectral characterization for remote sensing applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 309-322.
- [36] BIERMANN L, CLEWLEY D, MARTINEZ-VICENTE V, et al. Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 53-64.
- [37] FALLATI L, POLIDORI A, SALVATORE C, et al. Anthropogenic Marine Debris assessment with Unmanned Aerial Vehicle imagery and deep learning: a case study along the beaches of the Republic of Maldives [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133581.
- [38] CAMPHUYSEN C J, HEUBECK M. Marine oil pollution and beached bird surveys: the development of a sensitive monitoring instrument [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 112(3) : 443-461.
- [39] 张婷, 张杰. 基于无人机紫外与 SAR 的溢油遥感监测方法研究 [J]. *海洋科学*, 2018, 42(6) : 141-149.
- [40] FINGAS M, BROWN C. Review of oil spill remote sensing [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 83(1) : 9-23.
- [41] CAI Yang, ZOU Yarong, LIANG Chao, et al. Research on polarization of oil spill and detection [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(3) : 84-89.
- [42] NAZ S, IQBAL M F, MAHMOOD I, et al. Marine oil spill detection using synthetic aperture radar over Indian Ocean [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 162: 111921.
- [43] ADADE R, AIBINU A M, EKUMAH B, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) applications in coastal zone management: a review [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(3) : 154-160.
- [44] 雷添杰, 张鹏鹏, 胡连兴, 等. 无人船遥感系统及其应用 [J]. *测绘通报*, 2021(2) : 82-86.
- [45] LI Bin, FEI Zesong, ZHANG Yan. UAV communications for 5G and beyond: recent advances and future trends [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2) : 2241-2263.
- [46] ZHANG Haidong, WANG Lingqing, TIAN Ting, et al. A review of unmanned aerial vehicle low-altitude remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(6) : 12-21.
- [47] 芦海利, 姚军, 王崇磊, 等. 多源数据融合的低分辨率无人机图像增强处理 [J]. *信息技术*, 2020, 44(11) : 112-116.

(责任编辑: 杨瑞芳)