

地理信息技术支撑下的南海岛礁资源环境 研究进展与展望

李弘毅^{1,2,3}, 刘永学^{1,2,3*}, 张思宇^{1,3}, 孙超^{1,3}, 孙佳琪^{1,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 中国南海研究协同创新中心, 南京 210023;
3. 海岸带开发与保护国土资源部重点实验室, 南京 210023)

摘要:面积辽阔的南海是中国未来重要的能源接续区与资源基地,也是涉及国家海洋权益最为集中的区域。本文针对地理信息技术支撑下的南海岛礁研究现状,从南海岛礁现有基础数据成果、遥感手段岛礁基础地理信息提取方法及提取成果所做的岛礁分析与评价3方面,系统地回顾了国内外涉及南海岛礁资源环境研究的相关进展,评述了现有研究技术方法存在的不足,并对未来的研究进行了展望,在此基础上,提出了3个主要方向作为未来研究的重点:①促进遥感数据获取多源化,构建海量多源、多尺度南海岛礁遥感数据仓库;②加强技术协同创新,结合地理信息技术的发展,提升岛礁信息提取与监测的准确性与可靠性;③提升遥感分析智能化,研究并建立综合分析与时空推演平台及战略决策辅助支撑系统,以期对南海岛礁的进一步深入研究提供参考。

关键词:南海;岛礁;地理信息技术;资源环境;进展与展望

1 引言

南海占中国海洋国土的2/3,蕴藏有丰富的石油、天然气、可燃冰及其他矿产和生物等资源(Trung et al, 2012),是未来重要的资源基地与能源接续区(Liu et al, 2011),是国家安全的天然屏障和重要的出海口与战略通道,也是地缘政治经济问题的多发区。作为连接印度洋和太平洋的重要交通要道——全世界的一半以上超级油轮航行于南海海域(Rosenberg et al, 2008),是中国、日本、韩国等国家的“海上生命线”(Wang et al, 2014)。

南海丰富的珊瑚岛礁资源,是中国开发、利用、保护与管控海洋的重要支点(周旻曦等, 2015),战略价值巨大。然而,南海海域岛礁正面临着巨大的环境压力,主要表现为渔业资源数量急剧下降,珊瑚礁盗采严重影响礁盘生长,沙岛面临海浪侵蚀威胁等。在目前的情势下,深入调查、准确获取、客观评

价南海珊瑚岛礁自然资源,是地理国情监测的重要组成部分,对保护海洋环境、开发南海岛屿、保障国家战略安全、满足国家在南海的重大战略需求、维护国家权益等具有重要意义(汪业成等, 2013)。

然而,目前南海珊瑚岛礁研究存在基础数据匮乏、动态监测体系缺失、专题定量评价处于定性阶段以及决策支持手段落后等问题,且由于研究涉及多学科、多目标,还面临数据整合难、遥感监测难、决策支持难等诸多技术难题与挑战。地理信息技术,包括地理信息系统(GIS)、遥感(RS)、全球定位系统(GPS)和数字地球技术等,更新了传统的数据获取方式,提供了海量动态的地理空间数据,并实现了海量数据管理与分享以及空间分析功能,革新了大时间跨度、大空间尺度对象的重复监测模式,目前地理信息技术已经在自然资源管理、环境规划与评价、土地管理等方面得到了广泛的应用。基于此,本文对地理信息技术支撑下的南海岛礁资源环

收稿日期:2016-10-09;修订日期:2017-05-31。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0501502);江苏省杰出青年基金项目(BK20160023) [Foundation: Key Research and Development Program of China, No.2016YFB0501502; Jiangsu Provincial Natural Science Foundation, No.BK20160023]。

作者简介:李弘毅(1992-),女,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为海洋遥感与GIS, E-mail: lu_left@163.com。

通讯作者:刘永学(1976-),男,江苏扬州人,博士,博导,教授,主要从事遥感科学应用与GIS研究, E-mail: yongxue@nju.edu.cn。

引用格式:李弘毅, 刘永学, 张思宇, 等. 2018. 地理信息技术支撑下的南海岛礁资源环境研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(11): 1454-1462. [Li H Y, Liu Y X, Zhang S Y, et al. 2018. Progress and prospects on coral reefs research in the South China Sea based on the application of geographic information technologies[J]. Progress in Geography, 37(11): 1454-1462.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.11.002

境数据调查成果以及相关研究现状进行梳理,从南海资源环境数据调查成果到南海岛礁信息遥感提取手段,再到围绕数据获取结果进行岛礁评价分析的研究现状,总体得出目前南海岛礁资源环境研究现状(图1),最后基于现有研究的不足,提出未来研究应把握的重点,旨在为地理信息技术支撑下的南海岛礁提取、分析与评价等相关岛礁分析研究和实践提供一定的借鉴,以期为国家的南海资源能源开发、海洋权益维护和区域和平发展等提供辅助决策依据。

2 南海岛礁资源环境信息提取与监测研究进展

2.1 南海科学考察数据支撑

中国对南海海洋科学考察始于20世纪50年代,1958-1960年“全国海洋普查”共获得各种资料报表和原始记录9.2万多份,各类海洋要素平面分布图、垂直分布图、断面图、周日变化图、温盐曲线

图、温深记录图等7万多幅,以及丰富的海洋沉积物样品和大量的标本,编绘了包括南海在内的海底地形等海洋综合调查图集;70年代,对西沙和中沙海域进行了岛礁生物及珊瑚礁地质、地貌专门考察;而对南沙海域的大规模综合科学考察始于80年代,通过在南沙群岛海区进行的3个航次的海洋学综合科学考察,取得了大量的海底地形、地貌等方面的第一手资料。然而,南海珊瑚岛礁数量众多,分布零散,不仅其地貌结构复杂、空间异质性也较强(Webb et al, 2010),并且由于珊瑚岛礁地貌在强风浪场、潮位时变、造礁生物等诸多因素的影响下表现出较高的动态性(Andréfouët et al, 2002),加之受天气、海面状况及南海周边局势等因素影响,实地调查工作开展困难,导致南沙群岛岛礁信息更新困难。所以尽管中国开展了大规模的南海科考活动,意义重大,影响深远,为早期的南海研究搭建起基础数据平台,但是数据获取手段局限、成本消耗巨大、数据获取时间周期过长等仍成为当时南海岛礁研究的瓶颈。

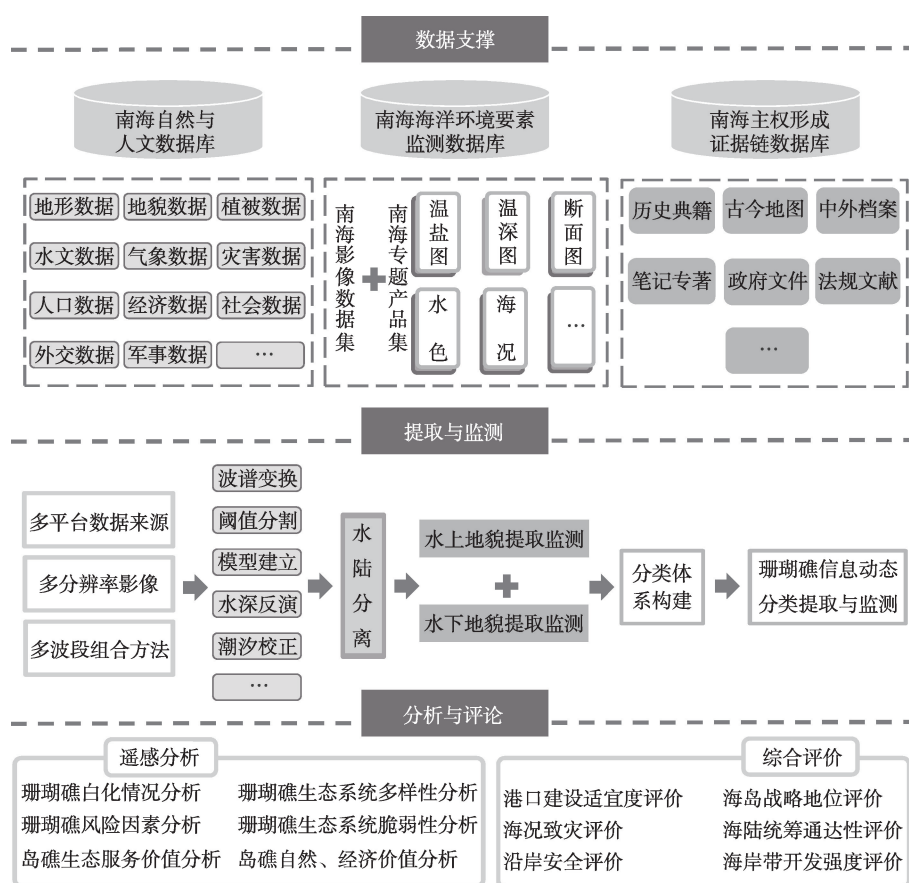


图1 地理信息技术支撑下的南海岛礁研究主要成果梳理

Fig.1 Achievements based on the application of geographic information technologies in the South China Sea

2.2 基于地理信息技术的南海岛礁基础地理信息提取与监测研究现状

卫星遥感技术作为大面积、实时的全球观测技术,能有效地克服传统地面调查因外界因素而无法实时动态大面积更新的限制,是开展南海珊瑚岛礁地貌专题制图和南海岛礁空间信息获取的新手段,并且已被广泛应用于全球典型珊瑚礁的信息提取与地貌分类。基于多平台、多光谱分辨率、空间分辨率的遥感数据已经证明了其对于珊瑚岛礁信息提取与监测的适用性和有效性(Andréfouët et al, 2003)。

2.2.1 南海岛礁基础地理信息提取

在岛礁信息提取算法方面,岛礁监测效果取决于传感器的平台(星载、机载、船载等)类型、时间/空间/光谱分辨率、大气清晰度、海水表面粗糙度、水深以及水的清晰度等等(Andréfouët et al, 2002; Hochberg et al, 2003; Kutser et al, 2003; Goodman et al, 2007; Roelfsema et al, 2010; Botha et al, 2013)。高空间分辨率遥感影像(IKONOS/SPOT5/QUICK-BIRD等)在岛礁详细准确信息监测及地貌分类上已被证明优于中等空间分辨率影像(Mumby et al, 2002; Benfield et al, 2007),并且针对全球范围内大量的珊瑚礁开展了案例研究(Hsu et al, 2008)。但是,相较于传感器平台,岛礁信息遥感提取对于提取方法更加敏感,并且针对不同的珊瑚礁类型一般对应特定的提取方法,主要包括基于纹理/统计等光谱信息的监督/非监督分类方法、结合辅助信息的面对象分类、自底向上的图像分类方法等,从而能有效地监测岛礁地貌变化。Yamano等(2006)基于多种分辨率遥感影像提取马绍尔群岛南部珊瑚礁水边线。邹亚荣等(2006)利用高分辨多光谱 Quick-Bird 影像,基于珊瑚礁几何参数与发育指数对南沙典型岛礁发育进行遥感监测,在珊瑚礁体迎风面水域由破波形成的纹理特征表明了海面粗糙度与水下礁坪的发育特性。陈建裕等(2007)研究了 SPOT5 数据对东沙环礁珊瑚礁遥感的可行性,指出 SPOT5 数据由于在光谱设置的缺陷不利于珊瑚礁信息的提取;在潟湖内珊瑚礁的信息提取上,SPOT5 数据提取的能力高于 ETM+数据。胡蕾秋(2010)等使用 SPOT5 10 m 多光谱数据对南沙群岛中弹丸礁和光星礁进行了分类实验,并以 QuickBird 融合影像判读结果及岛礁调查资料为参考,探讨了 SPOT5 对珊瑚礁水下信息的辨识能力。周旻曦等(2015)提出了

双尺度转化下模型与数据混合驱动的遥感地貌信息提取框架,在西沙群岛永乐环礁得到了较好的岛礁信息分类提取结果。Duan等(2016)利用 Landsat-8 OLI 影像对南沙群岛区域开展了遥感调查与动态监测,发现了4座在《我国南海诸岛部分标准地名》中未命名的岛礁。

尽管目前已开展大量的研究,但珊瑚岛礁遥感信息精确提取仍依赖于人工目视解译和监督分类;并且由于珊瑚岛礁底质差异大、地貌地物分异广等因素,现有研究大多利用中高分遥感影像针对典型单独岛礁进行解译。岛礁信息提取与监测面临岛礁对象单一、数据成本高、人工依赖程度高、自动化水平低且算法可移植性、可拓展性差等问题,因此改善并优化岛礁信息提取算法,利用遥感手段进行大范围珊瑚礁调查、快速了解南沙群岛岛礁情况是亟待解决的问题。

在岛礁水深反演方面,南海海域水深多在 1000 m 以上,但在岛礁分布区水深变化剧烈,在礁体边缘可由千米水深海盆变为几米水深礁坪(石伟等, 2014),且由于南海岛礁礁盘水深较浅,风浪、底质条件变化快,船只测量难度大,又受限于是他国对岛礁的侵占,难以抵近开展实地水深测量,由于岛礁周边水深数据的缺乏,南海商船货轮搁浅事件时有发生,2012年7月11日中国海军一艘护卫舰也意外在半月礁(南沙群岛)附近搁浅,由此可见,开展南海岛礁周边水深遥感反演研究势在必行。党福星等(2003)基于永暑礁(南沙群岛)TM 影像,分区地质类型,建立了南海岛礁的浅水深反演模型。盛琳等(2015)基于 Worldview-2 影像改进非线性模型对东岛(西沙群岛)进行了水深反演。张靖宇(2015)融合多源、多角度、多时相遥感反演模型,在北岛(西沙群岛)水深反演得到了较好的应用。尽管如此,面对整个南海海域 200 余个岛礁遥感水深反演的迫切需求,现有研究的广度和方法可扩展性都难以满足应用需求。南海岛礁周边水深遥感反演面临着数据匮乏、现存数据分辨率粗、信度和效度低等问题,严重制约着岛礁信息提取、分析与评价等方面的应用,是中国学者需要迫切关注的南海岛礁问题之一。

2.2.2 南海岛礁基础地理信息监测

珊瑚礁生态系统是全球最具有生产力的生态系统之一。近年来全球变暖以及海洋酸化等环境因素极大地威胁着珊瑚礁系统的多样性(Hoegh-

Guldborg et al, 2007; Knudby et al, 2007; Maina et al, 2008), 由于人类活动的影响常造成大面积珊瑚礁白化现象(Baker et al, 2008), 美国国家海洋和大气管理局已开展全球珊瑚礁观测项目, 使用遥感方法监测珊瑚礁在热应力下的反应((Strong et al, 2011)。就南海及其周边区域而言, 东南亚88%的珊瑚礁受到破坏性捕鱼、过渡捕捞、海洋污染、沿海开发等人类活动的威胁; 大规模的珊瑚礁退化危机可能对区域粮食安全、生物多样性、沿海渔业等造成数十亿美元的经济损失(Burke et al, 2006), 因此珊瑚礁生态系统遥感监测极具迫切性和必要性。

南海海域珊瑚礁面积约 $8.0 \times 10^3 \text{ km}^2$, 对南海海洋生物多样性、海洋资源维护具有不可或缺的作用。长期遥感监测表明, 永兴岛(西沙群岛)在1980-2008年活珊瑚覆盖率从90%降至10%(Yu, 2012)。通过监测美济礁和渚碧礁(南沙群岛)珊瑚共生黄藻显著减少研究表明, 美济礁有大量的白化现象(Li et al, 2011)。1997-2010年期间涠洲岛(南海北部)珊瑚骨架在极端温度变化压力下生长速率降低了26%(Chen et al, 2013)。除了自然环境变化导致的珊瑚礁生态环境退化, 南海海域开始兴起的大规模岛礁扩建、填海造岛活动也会对珊瑚礁生长以及环境可持续造成一定的负面生态影响, 目前南海已有多个岛礁建成机场, 其他人类居住等建筑亦在岛上兴建, 通过高分影像可以清楚地监测到南海岛礁的开发现状。

南海海域共有已定名岛礁287个, 然而目前面向南海海域珊瑚礁生态环境退化的研究仍然较少, 受限于岛礁主权争端影响与南海周边各岛礁声索国的军事控制, 部分岛礁难以进行定期更新的珊瑚礁现状科学调查, 所以针对南海岛礁白化情况或活珊瑚覆盖率等的岛礁生态环境遥感监测仍局限于极个别重点岛礁, 大量的南海海域珊瑚岛礁白化情况存在数据空白和资料缺失, 对珊瑚礁各资源环境要素的进一步动态监测更是无从谈起, 因此, 加强南海全海域尤其是地处争端核心区的南沙群岛珊瑚岛礁的遥感监测具有迫切性和重要性, 南海海域的岛礁健康监测与脆弱性分析仍处于起步阶段。

可以预见的是, 全球气候变化持续加剧、海洋温度变化趋势将会加速珊瑚礁的减少(Hoegh-Guldborg, 2007); 并且未来南海周边区域海洋水产养殖和海岸管理依旧会扩张, 其带来潜在过渡捕捞和海洋污染等因素亦会对南海珊瑚礁生态系统带来负

面影响。南海珊瑚礁面临着气候变化和人类活动共同作用的巨大挑战。因此, 对未来南海岛礁及其周边环境遥感分析研究提出了更高的要求, 需要在南海岛礁地貌提取与监测的基础上, 针对珊瑚礁对环境变化的响应情况进行遥感分析, 有效预测珊瑚礁在环境变化与人为活动双重压力下的变化情况, 辅助南海珊瑚礁资源保护与岛礁合理开发利用。

3 基于地理信息技术的南海岛礁分类与评价研究进展

3.1 南海珊瑚岛礁分类体系研究进展

南海多数珊瑚礁都表现出共有的、独特的地貌分层分带模式, 通常是珊瑚礁发育的结果。典型的地貌区域分带按深度变化包括礁前、礁坪、礁后、潟湖、点礁等(Mumby et al, 2004), 然而不同类型的珊瑚礁所依据的地貌分类体系又差异巨大。

在岛礁分类体系方面, 何宇华等(1998)选用通过卫星遥感技术获取的航天遥感数据TM-CCT作为主要遥感信息源, 并辅以航空遥感资料, 开展了南沙群岛重点岛、礁、滩的定位工作。潘春梅等(2002)根据南沙海区的地形地貌特征, 利用TM图像, 对不同的珊瑚礁、珊瑚沙发育状况和岛礁的地质特征与生态特征进行了分析, 研究了水下礁、滩的物质组份、发育程度及TM影像特征, 提出了30 m以浅岛礁分类方法, 查清了南沙海域岛、礁、滩、沙的形态和分布, 细化并完善了南沙群岛岛礁分类。纵观国内外岛礁地貌体系分类方法, 国内外学者利用遥感技术已展开了大量的工作, 完成了系列珊瑚岛礁专题制图并基于此构建了基于特定规则的分类体系。

但是, 由于岛礁地质环境、发育形态的差异, 多数研究采用的分类体系分异较大, 存在一定的主观性, 尚未形成完整统一的珊瑚岛礁分类体系。导致不同研究之间数据缺乏可比性, 同时阻碍了数据共享。因此, 建立完整的、符合珊瑚礁生态特点的、易于光学传感器监测的地貌分类体系是亟需解决的问题之一。

3.2 南海珊瑚岛礁评价研究进展

南海海域珊瑚礁蕴藏着丰富的资源, 同时也是最易受到气候变化影响的脆弱生态系统(Graham et al, 2008)。珊瑚礁遥感评价研究国外学者多集中于使用地理信息技术进行珊瑚礁生态价值评价、生态

系统的脆弱性评估、珊瑚礁风险评估(Burke et al, 2006)、珊瑚礁危害因素定级等研究(Burke et al, 2006)。近年来,面向维护国家海洋权益的需求,国内诸多学者在地理信息技术的支撑下,适时开展了南海岛礁价值评价、战略地位评价、海陆统筹通达性评价,以及岛礁周边海岸带开发强度评价、港口建设适宜度评价、海况致灾评价、沿岸安全评价等研究。

在岛礁价值评价方面,在多源遥感影像岛礁信息提取基础上,发展了海岛价值分类体系(陈韶阳, 2011; 张荷霞, 2014),针对海岛的自然资源价值、经济价值和生态服务价值方面进行了评价。其中包括南海海域风能资源(Zheng et al, 2011; 蒋洁等, 2014a)、油气资源(张荷霞等, 2013a)等;此外,考虑到南海主权争端情况,进行了越南非法占据岛礁的战略价值评价(唐盟, 2015; 赵赛帅等, 2015)与大量的南沙群岛岛礁的战略地位评价(成王玉等, 2013; 张荷霞, 刘永学等, 2014)。

南沙群岛的周边环境分析评价研究亦是现有研究热点。石伟等(2014)使用地理信息空间分析的方法针对南沙岛礁及其周边港口的可达性进行了评价模型研究;Wang等(2014)基于志愿者观测船(VOS)数据,在地理空间分析的辅助下使用模糊综合评价法进行了南海航道安全评价。针对南海海域风浪潮时变环境,进行了海面风浪场特征分析,并评价了近几十年来热带风暴对南海岛礁的影响(张荷霞等, 2013b; 孙超等, 2014),弥补了海况致灾对岛礁影响评价的缺失。Barnes等(2016)利用时间序列MODIS数据计算浑浊度指数评价了岛礁建设产生的环境影响。

纵观国内外珊瑚岛礁评价研究,目前仅有少量针对南海海域部分珊瑚礁开展的生态系统风险评估(廖彬彬, 2013),因此,对南海岛礁的珊瑚礁生态系统评价、生态服务价值状况应给予更多的关注。另外,现有评价多针对单个岛礁,尚未建立起综合生态、地理、海洋、气候与人类影响的评价模型,对南海岛礁珊瑚礁保护、南海决策分析提供有力的辅助依据,故需要协同数据与评估结果建立丰富的评价模型库群,以期南海海域资源保护与合理开发提供决策支持。

在评价方法方面,最常使用的是层次分析法、模糊综合评价法和生态和环境空间量值法等(陈韶阳, 2011)。层次分析法能将定性与定量相结合,层

次清晰,具有系统化的特点,但是一般通过专家打分等方式确定权重,主观性较强。模糊综合评价法指标清晰明确,计算简便,可以把定性评价转化为定量评价,有利于对一些难以定量判别的不确定因素进行评价。SAVEE(Spatial Appraisal and Valuation of Environment and Ecosystems)方法可针对生态系统和环境空间等地理单元对象,借助地理信息系统对数据进行定量化处理,最终得出定量化、可视化的评价结果。现有南海岛礁及其周边环境评价研究中,其评价方法、评价模型构建过程中,受到主观认知或评价因素不足等限制,从而对不同因子的权重估计有误差,降低了评价结果的精度。因此,未来研究需进一步规范评价指标体系,对南海岛礁时空过程进行统一建模,完善多因素多因子综合评价模型,以更加全面、准确地对南沙岛礁及其周边环境进行遥感评价,为国家制定海洋发展战略、区域行动计划提供辅助决策支持。

4 展望

地理信息技术的发展,已经在珊瑚岛礁遥感分析方面发挥着不可忽视的作用,全球气候变化和人类活动影响下的南海海域岛礁遥感研究是亟需解决的科学问题,地理信息技术是南海岛礁弥补缺失数据、增强理论研究和分析平台建设等问题的必由手段。目前基于遥感技术的岛礁信息提取、监测与综合评价分析主要受数据积累薄弱、岛礁地貌单元信息分类复杂、岛礁信息提取技术鲁棒性不足以及岛礁评价指标体系不够完善等方面的限制。针对上述基本问题,在地理信息技术支撑下,南海岛礁及其周边遥感分析有望从以下几个方面进一步发展。

4.1 提升遥感数据多源化,构建海量多源多尺度南海岛礁遥感数据仓库

考虑到南海岛礁分布零散,尺度范围差异大及南海海域珊瑚礁系统的复杂性,针对不同尺度的南海岛礁信息提取与分析,需要结合多源多尺度的光学、雷达、声学等多类型遥感数据,构建南海及其周边地区全覆盖、时空基准相对一致的遥感数据仓库,增强数据的更新频率,以进一步提升遥感数据的信度和效度。与此同时,针对遥感数据的多维动态特性,设计多粒度、多层次、异构的多源多格式数据集成平台,构建海洋遥感数据标准及规范,设计

高效的数据目录体系结构,实现网格环境下的长时间序列、多尺度的南海岛礁遥感数据无缝集成。

4.2 加强技术协同创新,提升岛礁信息提取与监测的准确性与可靠性

(1) 加强数据协同管理,构建南海岛礁资源环境地理信息系统,在地理信息技术的支撑下,将南海岛礁及周边国家和地区的地形地貌信息库、资源能源信息库、气象水文数据库、主权证据链数据库等信息进行充分的史地结合、文理结合以及多学科数据协同,以三维可视化等技术加以表现,构建南海及其周边资源环境的历史地理信息系统。

(2) 融合新兴技术方法,提升岛礁信息监测与提取的准确性与可靠性应同步开展。随着地理信息技术的快速发展,结合无人机航拍摄影技术等新兴领域,岛礁资源环境的监测手段将快速发展,数据可靠性有望大幅提升;在大量可靠数据的样本训练下,革新岛礁资源环境信息提取的算法,为未来岛礁信息的高精度分类提取监测提供可能。

4.3 遥感分析智能化,建立综合分析与情势推演平台和战略决策辅助支撑系统

南海海洋环境时变、岛礁底质异构,不同的珊瑚礁其地貌和基底类型差异显著,因此构建适用于多平台、多尺度的岛礁地貌分类系统是实现南海岛礁遥感监测的重要基础步骤。岛礁地貌分类系统构建需要注意:①突破底质异构、潮位时变等复杂环境下的岛礁遥感分类关键技术;②充分考虑地貌分类的地理学、生态学意义;③地貌分类系统可高度适用于已有多平台传感器设置和多尺度数据源特点;④地貌分类系统具有科学性和可操作性。在适用于多平台、多尺度的遥感监测的南海珊瑚岛礁地貌分类体系之上,南海岛礁信息提取需建立从栅格数据到多元特征空间再到类别和目标的智能化处理方法,实现集光谱/空间特征于一体的影像分割算法、多特征提取与表达方法以及有效的信息耦合机制,实行进一步的南海海域岛礁遥感动态监测及智能化综合分析,构建岛礁监测情势推演平台。

面对南海岛礁及其周边环境分析评价的个体化、多样化的问题,开展全方位、多维度分析,构建南海岛礁分析评价模型库群,同时进行评价方法量化描述的改进和优化,针对南海岛礁时空过程进行统一建模,综合自然、经济、政治、军事和灾害风险等多因素多因子变量不断完善和修正南海岛礁评价指标体系,实现从定性到定量、单一到系统、资

源环境到战略价值再到生态服务等南海系列化分析评价模型的跨越,从“点—线—面”多维度突破南海分析评价模型库群研建的关键技术,研发具有自主知识产权的南海综合分析决策支持平台,提升中国在南海问题上的话语权。

参考文献(References)

- 陈建裕,毛志华,张华国,等. 2007. SPOT5 数据东沙环礁珊瑚礁遥感能力分析[J]. 海洋学报: 中文版, 29(3): 51-57. [Chen J Y, Mao Z H, Zhang H G, et al. 2007. Analysis on coral reefs mapping using SPOT5 at Dongsha Atoll[J]. Acta Oceanologica Sinica, 29(3): 51-57.]
- 陈韶阳. 2011. 南沙群岛价值分类评价和开发策略研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. [Chen S Y. 2011. Research on classified value evaluation and development strategy of Nansha Islands[D]. Qingdao, China: Ocean University of China.]
- 成王玉,刘永学,李满春,等. 2013. 基于 AHP 与模糊综合评价方法的南沙东部岛礁战略价值评价[J]. 热带地理, 33(4): 381-386. [Cheng W Y, Liu Y X, Li M C, et al. 2013. Strategic value evaluation of the atolls in the eastern Nansha Islands based on AHP and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Tropical Geography, 33(4): 381-386.]
- 党福星,丁谦. 2003. 利用多波段卫星数据进行浅海水深反演方法研究[J]. 海洋通报, 22(3): 55-60. [Dang F X, Ding Q. 2003. Research on reefs bathymetry estimation by remote sensing using multi-band satellite data[J]. Marine Science Bulletin, 22(3): 55-60.]
- 何宇华,王永江. 1998. 卫星遥感在岛、礁、滩、沙资源分布现状综合调查中的应用[J]. 中国地质, (8): 43-46. [He Y H, Wang Y J. 1998. Satellite remote sensing applications on the island, reef, beach, sand distribution resources comprehensive survey[J]. Geology of China, (8): 43-46.]
- 胡蕾秋,刘亚岚,任玉环,等. 2010. SPOT5 多光谱图像对南沙珊瑚礁信息提取方法的探讨[J]. 遥感技术与应用, 25(4): 493-501. [Hu L Q, Liu Y L, Ren Y H, et al. 2010. Research on the extraction method of coral reef at Spratly Islands using SPOT5[J]. Remote Sensing Technology and Application, 25(4): 493-501.]
- 蒋洁,刘永学,李满春,等. 2014. 南海岛礁风能资源及风力发电评价: 基于 QuikSCAT 风场数据与 Landsat ETM+ 影像[J]. 资源科学, 36(1): 139-147. [Jiang J, Liu Y X, Li M C, et al. 2014. Wind energy resources and wind power generation on islands and reefs in the South China Sea based on QuikSCAT wind data and Landsat ETM+ images[J]. Resources Science, 36(1): 139-147.]
- 廖彬彬. 2013. 热带珊瑚岛礁生态系统风险评价与管理研究[D]. 上海: 华东师范大学. [Liao B B. 2013. Risk assess-

- ment and management of tropical coral reef ecosystems [D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 潘春梅, 丁谦, 曹文玉. 2002. 南沙群岛岛礁地形地貌TM影像特征分析[J]. 国土资源遥感, (2): 34-37, 60. [Pan C M, Ding Q, Cao W Y. 2002. The application of the adjustment technique to TM satellite imagery in Nansha Islands[J]. Remote Sensing for Land & Resources, (2): 34-37, 60.]
- 盛琳, 王双亭, 周高伟, 等. 2015. 非线性模型岛礁礁盘遥感水深反演[J]. 测绘科学, 40(10): 43-47. [Sheng L, Wang S T, Zhou G W, et al. 2015. Research on reefs bathymetry estimation by remote sensing based on nonlinear model[J]. Science of Surveying and Mapping, 40(10): 43-47.]
- 石伟, 苏奋振, 周成虎, 等. 2014. 南沙岛礁及周边港口可达性评价模型研究[J]. 地理学报, 69(10): 1510-1520. [Shi W, Su F Z, Zhou C H, et al. 2014. Research on accessibility model of Nansha Islands and surrounding seaports[J]. Acta Geographica Sinica, 69(10): 1510-1520.]
- 孙超, 刘永学, 李满春, 等. 2014. 近35年来热带风暴对我国南海岛礁的影响分析[J]. 国土资源遥感, 26(3): 135-140. [Sun C, Liu Y X, Li M C, et al. 2014. An analysis of tropical storms impact on islands and reefs in the South China Sea in the past 35 years[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 26(3): 135-140.]
- 唐盟. 2015. 被越南侵占的中国南沙群岛岛礁的时空分布特征及战略格局[J]. 热带地理, 35(5): 739-744. [Tang M. 2015. Spatial distribution characteristic and strategic situation of the islands and reefs invaded by Vietnam in the Chinese Nansha Islands[J]. Tropical Geography, 35(5): 739-744.]
- 汪业成, 刘永学, 李满春, 等. 2013. 基于场强模型南沙岛礁战略地位评价[J]. 地理研究, 32(12): 2292-2301. [Wang Y C, Liu Y X, Li M C, et al. 2013. The strategic position of Spratly Islands: An evaluation based on the field spread model[J]. Geographical Research, 32(12): 2292-2301.]
- 张荷霞. 2014. 南沙群岛岛礁战略价值评价研究[D]. 南京: 南京大学. [Zhang H X. 2014. Research on strategic value evaluation of the islands and reefs in the Nansha Islands [D]. Nanjing, China: Nanjing University.]
- 张荷霞, 刘永学, 李满春, 等. 2013a. 南海中南部海域油气资源开发战略价值评价[J]. Resources Science, 35(11): 2142-2150. [Zhang H X, Liu Y X, Li M C, et al. 2013a. Strategic value assessment of oil and gas exploitation in the central and southern South China Sea[J]. Resources Science, 35(11): 2142-2150.]
- 张荷霞, 刘永学, 李满春, 等. 2013b. 基于JASON-1资料的海域海面风、浪场特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 29(5): 53-57. [Zhang H X, Liu Y X, Li M C, et al. 2013b. Characteristic analysis on sea surface wind and wave fields in the South China Sea based on JASON-1 data[J]. Geography and Geo-Information Science, 29(5): 53-57.]
- 张荷霞, 刘永学, 李满春, 等. 2014. 基于AHP和EWCM的部分南沙岛礁战略价值模糊综合评价[J]. 海洋通报, 33(4): 377-382. [Zhang H X, Liu Y X, Li M C, et al. 2014. Fuzzy comprehensive evaluation of the strategic value for several reefs in the Spratly Islands based on AHP and EWCM[J]. Marine Science Bulletin, 33(4): 377-382.]
- 张靖宇. 2015. 浅海水深多维度遥感反演融合方法研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所. [Zhang J Y. 2015. Study on fusion models of multi-dimensional bathymetry inversion in shallow sea with remote sensing: A case study of the islands and reefs in South China Sea[D]. Qingdao, China: First Institute of Oceanography of National Bureau of Oceanography.]
- 赵赛帅, 刘永学, 李满春, 等. 2015. 基于AHP-变异系数法的越南南沙岛礁战略价值评价[J]. 海洋科学, 39(6): 114-121. [Zhao S S, Liu Y X, Li M C, et al. 2015. Strategic assessment of the Nansha Islands occupied by Vietnam based on AHP-variation coefficient method[J]. Marine Sciences, 39(6): 114-121.]
- 周旻曦, 刘永学, 李满春, 等. 2015. 多目标珊瑚岛礁地貌遥感信息提取方法: 以西沙永乐环礁为例[J]. 地理研究, 34(4): 677-690. [Zhou M X, Liu Y X, Li M C, et al. 2015. Geomorphologic information extraction for multi-objective coral islands from remotely sensed imagery: A case study for Yongle Atoll, South China Sea[J]. Geographical Research, 34(4): 677-690.]
- 邹亚荣, 林明森, 王华, 等. 2006. 对东沙岛基于融合信息高分辨遥感影像分类研究[J]. 海洋学报: 中文版, 28(1): 56-61. [Zou Y R, Lin M S, Wang H, et al. 2006. Study on high resolution image classification for Dongsha Island based on fuse information[J]. Acta Oceanologica Sinica, 28(1): 56-61.]
- Andréfouët S, Berkelmans R, Odriozola L, et al. 2002. Choosing the appropriate spatial resolution for monitoring coral bleaching events using remote sensing[J]. Coral Reefs, 21(2): 147-154.
- Andréfouët S, Kramer P, Torres-Pulliza D, et al. 2003. Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments[J]. Remote Sensing of Environment, 88(1-2): 128-143.
- Baker A C, Glynn P W, Riegl B. 2008. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 80(4): 435-471.
- Barnes B B, Hu C. 2016. Island building in the South China

- Sea: detection of turbidity plumes and artificial islands using Landsat and MODIS data[J]. *Scientific Reports*, 6: 1-12.
- Benfield S L, Guzman H M, Mair J M, et al. 2007. Mapping the distribution of coral reefs and associated sublittoral habitats in Pacific Panama: a comparison of optical satellite sensors and classification methodologies[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 28(22): 5047-5070.
- Botha E J, Brando V E, Anstee J M, et al. 2013. Increased spectral resolution enhances coral detection under varying water conditions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 131: 247-261.
- Burke L, Selig E, Spalding M. 2006. *Reefs at risk in Southeast Asia* [M]. Washington D.C., USA: World Resources Institute.
- Chen T, Li S, Yu K, et al. 2013. Increasing temperature anomalies reduce coral growth in the Weizhou Island, northern South China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130: 121-126.
- Chen T, Yu K, Shi Q, et al. 2009. Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(12): 2107-2117.
- Duan Y, Liu Y, Li M, et al. 2016. Reefs survey of the Nansha Islands based on Landsat 8 OLI images[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35: 11-19.
- Goodman J A, Ustin S L. 2007. Classification of benthic composition in a coral reef environment using spectral unmixing[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1): 341-353.
- Graham N A, McClanahan T R, MacNeil M A, et al. 2008. Climate warming, marine protected areas and the ocean-scale integrity of coral reef ecosystems[J]. *PLoS One*, 3(8): 1-9.
- Hochberg E J, Atkinson M J. 2003. Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 85(2): 174-189.
- Hoegh-Guldberg O, Mumby P, Hooten A, et al. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification [J]. *Science*, 318(5857): 1737-1742.
- Hsu M K, Liu A K, Zhao Y, et al. 2008. Satellite remote sensing of Spratly Islands using SAR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 29(21): 6427-6436.
- Knudby A, LeDrew E, Newman C. 2007. Progress in the use of remote sensing for coral reef biodiversity studies[J]. *Progress in Physical Geography*, 31(4): 421-434.
- Kutser T, Dekker A G, Skirving W. 2003. Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments[J]. *Limnology and Oceanography*, 48(1): 497-510.
- Li S, Yu K, Chen T, et al. 2011. Assessment of coral bleaching using symbiotic zooxanthellae density and satellite remote sensing data in the Nansha Islands, South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(10): 1031-1037.
- Liu H, Yao Y, Deng H. 2011. Geological and geophysical conditions for potential natural gas hydrate resources in southern South China Sea waters[J]. *Journal of Earth Science*, 22: 718-725.
- Maina J, Venus V, McClanahan T R, et al. 2008. Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models[J]. *Ecological Modelling*, 212(3-4): 180-199.
- Mumby P J, Edwards A J. 2002. Mapping marine environments with IKONOS imagery: Enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3): 248-257.
- Mumby P J, Skirving W, Strong A E, et al. 2004. Remote sensing of coral reefs and their physical environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 48(3-4): 219-228.
- Roelfsema C M, Phinn S R. 2010. Integrating field data with high spatial resolution multispectral satellite imagery for calibration and validation of coral reef benthic community maps[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1): 1-28.
- Rosenberg D, Chung C. 2008. Maritime security in the South China Sea: Coordinating coastal and user state priorities [J]. *Ocean Development & International Law*, 39(1): 51-68.
- Strong A E, Liu G, Skirving W, et al. 2011. NOAA's Coral Reef Watch program from satellite observations[J]. *Annals of GIS*, 17(2): 83-92.
- Trung N N. 2012. The gas hydrate potential in the South China Sea[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88: 41-47.
- Wang J, Li M, Liu Y, et al. 2014. Safety assessment of shipping routes in the South China Sea based on the fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Safety Science*, 62: 46-57.
- Webb A P, Kench P S. 2010. The dynamic response of reef islands to sea-level rise: Evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific[J]. *Global and Planetary Change*, 72(3): 234-246.
- Yamano H, Shimazaki H, Matsunaga T, et al. 2006. Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands[J]. *Geomorphology*, 82(3): 398-411.
- Yu K. 2012. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(8): 1217-1229.
- Zheng C, Zhuang H, Li X, et al. 2011. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea[J]. *Science China Technological Sciences*, 55(1): 163-173.

Progress and prospects on coral reefs research in the South China Sea based on the application of geographic information technologies

LI Hongyi^{1,2,3}, LIU Yongxue^{1,2,3*}, ZHANG Siyu^{1,3}, SUN Chao^{1,3}, SUN Jiaqi^{1,3}

(1. Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Collaborative Innovation Center for the South China Sea Studies, Nanjing University, Nanjing 210023,

China; 3. Key Laboratory of Coastal Zone Development and Protection, Ministry of Land and Resources of China, Nanjing 210023, China)

Abstract: The South China Sea region is an important prospective energy supply area and a resource base for China. Although coral reef resources are extremely abundant in the South China Sea, research on coral reef data extraction, and analysis and evaluation of coral reef resources have not attracted enough attention. This article put forward an analytical framework based on the application of geographic information technologies in the South China Sea, and reviewed the main progresses in three aspects: current availability of basic geographic data, methods on the extraction of basic geographic information, and evaluation of coral reefs in the South China Sea. Based on the review and analysis, this article proposed three research directions in the future: (1) promote multi-source remote sensing data acquisition, build massive remote sensing databases; (2) strengthen collaborative technological innovation, improve the accuracy and reliability of information extraction and monitoring results; and (3) promote intelligent remote sensing analysis, establish comprehensive analysis and decision-support systems which will provide theoretical reference for the further development of coral reef research in the South China Sea.

Key words: South China Sea; coral reefs; geographic information technology; resources and environment; progress and prospects

勘误及致歉声明

由于校对疏忽,本刊2014年第7期刊出的文章“气候变化科学与人类可持续发展”出现了错误,第874页右栏第4行“1998年”应为“1988年”。特此更正,并向作者和广大读者致歉,向发现并指出此错误的读者Zhang Junlin先生表示感谢!

地理科学进展编辑部

2018年11月20日