

南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系研究

左秀玲^{1,2,3}, 苏奋振^{1*}, 赵焕庭⁴, 方月¹, 杨娟¹

- (1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西大学 海洋学院, 南宁 530004;
4. 中国科学院南海海洋研究所 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301)

摘要: 珊瑚礁遥感地貌分类体系在珊瑚礁遥感地貌制图中具有重要的指导作用。目前, 珊瑚礁遥感地貌分类体系仍存在构建标准不统一、部分重要地貌类型不突出以及涵盖地貌类型不完备等问题, 影响了珊瑚礁遥感地貌制图应用于珊瑚礁科学和管理。本文采用中国南海46个珊瑚礁(环礁、台礁)的高分辨率遥感影像(WorldView-2、Quickbird), 并结合西沙群岛15个岛礁的地貌实地调查数据进行南海高分辨率遥感地貌分类体系的构建研究。以各地貌类型所处礁体位置、动力特征、出露程度和沉积类型为划分标准, 将相似尺度和重要性相当的地貌类型归为同等级别, 共构建了3级19类南海珊瑚礁遥感地貌分类体系。该分类体系划分标准统一、地貌类型数量最多且完备, 新命名了内礁坪生物稀疏带、内礁坪生物丛生带, 补充了水下礁脊、潮间带浅滩、浅水礁塘等地貌类型, 便于直观理解和推断不同尺度的海洋生态相互作用及重要性。同时, 其多等级多尺度性适用于分辨率由低到高的南海珊瑚礁遥感地貌制图, 有助于珊瑚礁态势演变分析、管理和保护, 为维护国家海洋权益作出应有的贡献。

关键词: 遥感; 高分辨率; 珊瑚礁; 地貌; 分类体系; 南海

1 引言

1.1 研究目的和意义

珊瑚礁地貌图提供了各地貌类型的分布和面积, 有助于从大尺度推测影响珊瑚礁的海洋生态过程, 在珊瑚礁生态评价和管理中发挥着关键作用(Andréfouët et al, 2004; Kordi et al, 2016; Roelfsema et al, 2018)。珊瑚礁遥感地貌分类体系在珊瑚礁遥感地貌制图中起着重要的指导作用。随着遥感传感器的进步, 珊瑚礁遥感地貌制图所涵盖的地貌类型不断丰富。然而, 该分类体系目前仍存在着构建标准不统一、部分地貌类型因级别较低而导致重要性不突出以及涵盖的地貌类型不完备等诸多问题, 影响了珊瑚礁遥感地貌制图在珊瑚礁科学研究和管理中的应用。因此, 构建一个具有统一划分标准

的并尽可能完备的珊瑚礁遥感地貌分类体系对珊瑚礁遥感地貌制图具有重要意义。

中国南海是太平洋最西部的边缘海, 地处2°45'S~23°24'N, 99°9'E~121°11'E, 发育了数百个珊瑚礁(以环礁为主)。南海诸岛珊瑚礁包括东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群岛四大群岛。其中, 南沙群岛珊瑚礁面积最大、珊瑚生长最繁盛, 长期以来在中国的海洋生物多样性维持、海产资源供给和国防建设等方面发挥着重大作用。然而, 由于远离大陆, 开展珊瑚礁实地调查需要大量的人力、物力以及经费投入, 时间成本高。同时, 随着南海地区丰富的油气资源和海洋资源的发掘, 由于其海洋资源丰富和战略地位重要, 南海诸岛主权争端也不断升级。一个系统完备的遥感地貌分类体系指导生成的南海珊瑚礁地貌图将有助于我国南海珊

收稿日期: 2016-10-09; 修订日期: 2017-07-09。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13010400); 国家自然科学基金项目(41801341) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA13010400; National Natural Science Foundation of China, No.41801341]。

作者简介: 左秀玲(1986-), 女, 山东济南人, 博士, 讲师, 从事海洋海岸带资源环境遥感与GIS研究, E-mail: zuoxl@lreis.ac.cn。

通讯作者: 苏奋振(1972-), 男, 福建永定人, 研究员, 从事海洋海岸带资源环境遥感与GIS研究, E-mail: sufz@lreis.ac.cn。

引用格式: 左秀玲, 苏奋振, 赵焕庭, 等. 2018. 南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系研究[J]. 地理科学进展, 37(11): 1463-1472. [Zuo X L, Su F Z, Zhao H T, et al. 2018. Development of a geomorphic classification scheme for coral reefs in the South China Sea based on high-resolution satellite images[J]. Progress in Geography, 37(11): 1463-1472.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.11.003

瑚礁态势演变分析、管理和保护,将为维护南海诸岛在“一带一路”中国国家主权益做出应有的贡献。

1.2 国内外珊瑚礁地貌遥感分类体系研究进展

珊瑚礁地貌以大尺度的地质结构为支撑,受气候环境组分和海洋过程控制,并结合生物反馈形成了发育良好的、可以清晰识别的地貌单元。目前珊瑚礁地貌分类体系主要基于地形、物种的丰富度和空间覆盖度进行构建(Goreau, 1959; Loya, 1972; Goldberg, 1973; Robert et al, 1973; 赵焕庭等, 1996)。以礁体位置、地形和动力环境为划分标准,典型的珊瑚礁地貌分类体系一级类型包括礁前、礁脊、礁坪、礁后和潟湖,然而不同的研究者之间也存在差异性。二级地貌类型的划分标准中多综合生境特征,因此命名多元化(表 1)。例如, Goreau 等

(1959)将牙买加岸礁按结构分为 2 等级 11 类;Robert 等(1973)从 1968 年夏到 1970 年 3 月调查了西印度浅水区 38 种珊瑚的分布与数量,将调查区地貌分为 1 级 10 类(限于利用水下呼吸器到达的深度)。中国于 20 世纪 60 年代初与苏联专家合作对海南岛的岸礁进行了研究,划分为封闭潟湖和封闭湾 2 类(纳乌莫夫等, 1960)。曾昭璇(1982)总结了环礁的类型和地貌特征,将环礁地貌划分为 3 等级 10 类。赵焕庭等(1992)将南沙群岛“腹地环礁”微地貌—沉积相带分为 2 等级 10 类。之后珊瑚礁动力地貌得到关注,以珊瑚礁区表层沉积物的粒度、生物组分、矿物成分和化学成分,并结合地貌学、岩石学综合分析,南海环礁地貌—沉积相带被分为广为使用的 2 等级 14 类(孙宗勋等, 1996; 赵焕庭等, 1996)。

表 1 实地调查和高分辨率遥感影像构建的地貌分类体系
Tab.1 Geomorphic classification schemes based on field survey and high-resolution remote sensing images

地貌体系	文献	等级	指标	类型
实地调查	Goreau, 1959	2 级	一级:所处礁体位置、动力环境; 二级:所处礁体位置、动力环境、 生境	礁后:海岸带、潟湖;礁脊:邻近潟湖带、礁坪、波浪带、 贫瘠带、混合带、扶壁带;向海坡:礁前、礁前斜坡、深 礁前带,共 11 类。
	Robert 等, 1973	1 级	所处礁体位置、动力环境、生境	海岸带;潟湖;礁后;礁坪;鹿角珊瑚带;贫瘠带;混合 带;辐板轴孔珊瑚带;礁前斜坡带;深礁前斜坡带,共 10 类。
	曾昭璇, 1982	3 级	所处礁体位置、动力环境	礁坡区;礁盘区:外礁盘、堤滩、次成潟湖、沙岛区(海 滩岩、沙堤带、中部洼地);潟湖区:点礁,共 9 类。
	赵焕庭等, 1992	2 级	所处礁体位置、动力环境	向海坡:下坡、上坡;外礁坪:礁缘坡、突起带、凹凸斑 带;内礁坪:礁原带、礁坑带;潟湖:潟湖坡、潟湖底、点 礁,共 10 类。
	孙宗勋等, 1996; 赵焕庭等, 1996	2 级	一级:所处礁体位置、动力环境; 二级:所处礁体位置、动力环境、 生境	向海坡(礁缘坡);外礁坪:礁凸起;内礁坪:珊瑚稀疏 带、珊瑚丛林带、礁坑发育带;潟湖:潟湖坡、潟湖盆、 点礁。礁坪上发育沙洲和灰沙岛,灰沙岛:海滩、沙 堤、沙席、洼地,共 14 类。
高分辨率 遥感影像	Mumby 等, 1999	2 级	一级:所处礁体位置、动力环境; 二级:所处礁体位置、动力环境、 生境	礁后;礁脊;潮沟:低潮沟、高潮沟;礁前;陡斜坡;点 礁:浓密点礁、分散点礁;潟湖层:浅潟湖层、深潟湖 层,共 10 类。
	Leon 等, 2011	2 级	一级:所处礁体位置;二级:所处 礁体位置、生境	礁前;礁脊;礁坪:珊瑚带、砂为主的礁坪、海草床、植 被沙洲;潟湖:砂为主的礁后、潟湖点礁、深潟湖;点 礁,共 10 类。
	Phinn 等, 2012	1 级	所处礁体位置	礁坡;礁脊;外礁坪;内礁坪;浅潟湖;深潟湖;共 6 类。
	龚剑明等, 2014	2 级	一级:所处礁体位置、动力环境、 生境;二级:所处礁体位置、动力 环境	水下礁脊;外礁坪;礁凸起带;附礁生物稀疏带;附礁 生物丛生带;礁坑发育带;潟湖:潟湖坡、潟湖底;点 礁;潮汐通道;沙洲;灰沙岛:海滩、沙堤、沙席、洼地, 共 15 类。
	周旻曦等, 2015	2 级	一级:水深条件、沉积环境;二 级:生物物理作用	向海坡;礁前;礁坪:礁脊、槽沟、珊瑚生长带、礁坑发 育带;潟湖:潟湖坡、潟湖盆、潟湖点礁;潮汐通道;暗 沙/暗滩;灰沙岛:海滩、沙丘,共 13 类。
	朱海天等, 2015	2 级	一级:所处礁体位置、动力环境; 二级:所处礁体位置、动力环境、 生境	参考赵焕庭(1996),获取外礁缘;外礁坪;礁突起带;内 礁坪:生物稀疏带、生物密集带、礁坑发育带;潟湖:潟 湖坡、潟湖盆、点礁;沙洲,共 10 类。
	Xu 等, 2016	2 级	一级:所处礁体位置,是否出露; 二级:所处礁体位置、动力环境	环礁地貌分为潟湖:潟湖水体,潟湖点礁,点礁陆地; 礁环:礁前,礁坪,浅台地,潮汐通道,礁环陆地,封闭 潟湖;沉没环礁,共 10 类。

由于珊瑚礁一般形成于较浅和干净的水中,光学遥感是珊瑚礁地貌制图的理想技术(Leon et al, 2011; Roelfsema et al, 2018),弥补了传统潜水实地调查成本高、费时费力、观测点不足的局限性。遥感技术的发展推动了珊瑚礁从早期的 Landsat-1 到目前高分辨率影像地貌制图的成功应用,例如在大堡礁(Ahmad et al, 1994)、加勒比海(Andréfouët et al, 2005)、印度洋(Naseer et al, 2004)和太平洋(Phinn et al, 2012)的研究。在珊瑚礁遥感地貌制图中,珊瑚礁遥感地貌分类体系与实地调查建立的地貌分类体系相似:一级地貌类型通常以所处礁体位置、动力环境为指标;二级地貌类型划分指标中常综合生境类型(珊瑚区、海草床等),命名多元化(Mumby et al, 1999; Leon et al, 2011; Phinn et al, 2012; 龚剑明等, 2014; 周旻曦等, 2015; 朱海天等, 2015; Xu et al, 2016)(表1)。热带海洋中的珊瑚岛为石灰质的砂和砂砾堆积物,全部由来自周围礁坪的碳酸盐沉积物组成,是人类和鸟的栖息地,在社会—经济及生态中非常重要(Roy et al, 1991; Fuentes et al, 2011; Perry et al, 2011; 赵美霞等, 2017)。然而,在珊瑚礁遥感地貌分类体系中珊瑚岛通常被划分为礁坪的次级类型(Leon et al, 2011),不能凸显其重要性。此外,通过高分辨率遥感影像可以从大尺度上识别更多的地貌类型,且不同的珊瑚礁涵盖的地貌类型均有差异。珊瑚礁遥感地貌分类体系构建中纳入的珊瑚礁越多,遥感地貌分类体系涵盖的地貌类型就越完备,适用性越强。迄今为止尚缺乏一个尽可能完备的遥感地貌分类体系指导珊瑚礁遥感地貌制图。

因此,针对目前珊瑚礁遥感地貌分类体系中构建标准不统一、部分地貌类型重要性不突出以及涵盖的地貌类型不完备等问题,本文采用南海诸岛46个珊瑚礁(环礁、台礁)的高分辨率遥感数据(World-View-2、Quickbird),并结合西沙群岛15个岛礁的地貌实地调查数据,在制定统一分级标准、突出重要地貌类型的基础上,构建完备的南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系,从而服务于国家珊瑚礁生态系统的管理、保护与主权维护,并对海洋地貌学科的发展与完善也具有重要意义。

2 分类体系构建方法

2.1 构建思路与准则

珊瑚礁地貌制图多采用光学遥感,传感器的光谱分辨率和空间分辨率决定了可识别的地貌类

型。Green等(1996)为珊瑚礁生境识别定义了“描述分辨率”,即低分辨率可能仅识别出珊瑚礁,而高分辨率会区分出不同的珊瑚物种。对于珊瑚礁地貌类型,“描述分辨率”同样适用,即遥感影像分辨率越高,可区分出的地貌类型就越多。因此“描述分辨率”具有多等级多尺度的特点,此处的尺度是指地貌类型在不同空间分辨率遥感影像上的反映。本文基于“描述分辨率”建立南海珊瑚礁遥感地貌分类体系。

由于地貌类型有明确的界限,沿着坡度通常会呈现一些变化(如深度)(Houston, 1994),虽然在没有实地调查的情况下通过遥感影像可直接解译(Mumby et al, 1999)。但在不同传感器的制图能力方面,中分辨率遥感影像(TM, Landsat)可划分出珊瑚礁大的地貌类型(礁前、礁脊、礁坪和潟湖)(Green et al, 1996; Mumby et al, 2004; Andréfouët et al, 2006),高分辨率的传感器如IKONOS, Quickbird等可识别出更详细的地貌类型。高分辨率传感器自IKONOS(多光谱分辨率4 m, 全色分辨率1 m)到Quickbird(多光谱分辨率2.44m, 全色分辨率0.61m)等被证实可识别出更详细的地貌类型,面积较小的、斑块状的以及窄条带状的浅水地貌类型(<5 m)均能清晰的区分出来(Maeder et al, 2002; Mumby et al, 2002; Andréfouët et al, 2003; Phinn et al, 2012)。

2.2 地貌类型的获取

本文基于南海诸岛46幅环礁和台礁的World-View-2、Quickbird高分辨率遥感影像构建南海珊瑚礁遥感地貌分类体系,所涉及珊瑚礁见图1和表2,遥感影像参数见表3。研究岛礁在东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群岛都有分布,对南海诸岛珊瑚礁有较好的代表性。参考已有珊瑚礁遥感地貌分类体系研究以及赵焕庭(1996)等对南海珊瑚礁地貌的系统研究,首先依据专家知识对高分辨率遥感影像中可识别的珊瑚礁地貌类型进行解译。地貌类型解译过程中应尽量避免冗余,例如环礁礁坪上发育的岛和台礁的岛均解译为灰沙岛,而不区分其所属的珊瑚礁类型。

地貌类型解译方法为专家指导目视解译法。研究表明,地貌类型目视解译精度等于甚至大于自动分类精度,但当区域面积较大时自动解译法可节省时间(Franklin et al, 2003, Andréfouët et al, 2005)。在ENVI软件方面,通过Transform功能将高分辨遥感影像的多光谱波段与全色波段融合以辅助解译,融合后的遥感影像既具有高空间分辨率

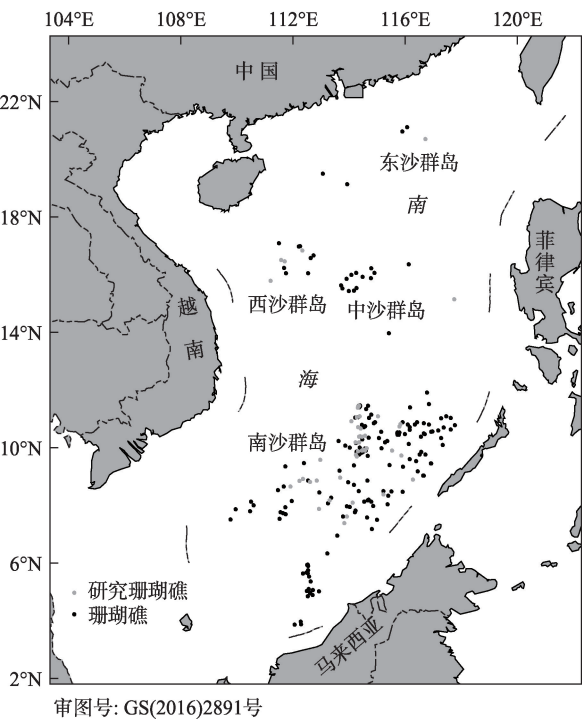


图1 南海诸岛及研究珊瑚礁分布图

Fig.1 Offshore archipelagos in the South China Sea and the distribution of the studied coral reefs

又具有丰富的光谱信息。因蓝绿波段在水中穿透性较好,地貌类型判读主要采用真彩色影像(红、绿、蓝波段合成)。地貌类型的解译采用自上而下的划分方法,即先划分大的地貌类型如水下礁脊、向海坡、外礁坪、礁凸起、内礁坪、潟湖、沙洲、灰沙

岛;然后在每一个大的地貌类型内再解译次级地貌类型,如潟湖进一步划分为潟湖坡、潟湖底、点礁和潮汐通道。

3 结果与分析

3.1 珊瑚礁地貌描述与体系的展现

珊瑚礁地貌类型清晰、准确的描述非常重要,可避免地貌制图中的混淆解译,为地貌等级的划分提供基础,还可指导珊瑚礁管理。本文珊瑚礁地貌类型描述采用的指标包括形态、动力特征、出露程度和沉积类型,这些指标可反映出珊瑚礁地貌形成的海洋过程和动力因素(Hamylton et al, 2016; Kayanne et al, 2016; Shen et al, 2018)。基于上述指标,结合已有研究,对46幅高分辨率遥感影像中解译出的所有岛礁地貌类型进行描述。为了验证珊瑚礁地貌类型描述的准确性,2014年6月对西沙群岛永兴岛、石岛、玉琢礁、盘石屿、华光礁、羚羊礁、筐仔沙洲、甘泉岛、全富岛、银屿、鸭公岛、七连屿(西沙洲、赵述岛、北岛、南沙洲)的15个岛礁开展了地貌类型实地调查,采集了珊瑚礁不同地貌类型的水下断面影像、水深数据、土壤和植被样本等。

南海46幅珊瑚礁高分辨率遥感影像中共解译出地貌类型19类,各地貌类型及结合实地调查的地貌类型描述见表4。地貌类型的描述中有的仅适用于南海珊瑚礁,如海藻脊;有的适用于全球大部分珊瑚礁,如礁坡。本文新命名了内礁坪生物稀疏带

表2 南海46个珊瑚礁的类型及分布

Tab.2 Type and status of 46 coral reefs

环礁		台礁
西沙群岛		永兴岛、中建岛、琛航岛、甘泉岛
东沙群岛		东沙岛
中沙群岛	黄岩岛	
南沙群岛	奈罗礁(越占)、渚碧礁、铁峙礁、双黄沙洲(菲占)、南薰礁、舶兰礁(越占)、赤瓜礁、鬼喊礁(越占)、东门礁、西门礁、安乐礁、牛轭礁、华阳礁、东礁(越占)、西礁(越占)、中礁(越占)、仁爱礁(菲占)、司令礁(菲占)、永暑礁、美济礁、弹丸礁(马占)、毕生礁(越占)、柏礁(越占)、光星仔礁(马占)、簸箕礁(马占)、半月礁	北子岛(菲占)、南子岛(越占)、中业岛(菲占)、南钥岛(菲占)、太平岛、鸿麻岛(越占)、敦谦沙洲(越占)、染青沙洲(越占)、景宏岛(越占)、西月岛(菲占)、费信岛(菲占)、马欢岛(菲占)、南威岛(越占)、安达沙洲(越占)

注:括号中标注的菲占为菲律宾侵占,越占为越南侵占,马占为马来西亚侵占。

表3 高分辨率遥感影像参数表

Tab.3 Parameters of high-resolution remote sensing images

传感器	获取时间	波段	分辨率(星下点)	
			全色/m	多光谱/m
Quickbird	2001.10	全色+4多光谱波段	0.61	2.44
WorldView-2	2009.10	全色+8多光谱波段	0.50	1.80

和内礁坪生物丛生带2个地貌类型,补充了水下礁脊、内礁坪潮间带浅滩、浅水礁塘地貌类型。内礁坪生物稀疏带邻近礁凸起带,为环礁和台礁礁坪中普遍存在的一个地貌类型(Zuo et al, 2017)。该带珊瑚覆盖度很低,调查的西沙群岛造礁珊瑚平均覆盖度仅为6.73%。内礁坪生物丛生带靠近潟湖坡,主要出现在环礁较宽阔的北侧礁坪,珊瑚覆盖度非常高,调查的西沙群岛造礁珊瑚平均覆盖度可达44.7%。地貌等级依据各地貌类型在珊瑚礁上的相对位置(由外海到内部潟湖或灰沙岛),综合考虑动力特征、出露程度、沉积类型特征,将相似尺度、相

同重要性的地貌类型归为同等级别,并将沙洲、灰沙岛地貌类型作为第一等级进行划分。

根据所处礁体位置、形态、动力特征、出露程度、沉积类型等差异,本文共将地貌类型划分3个等级,第一等级:自海向潟湖或灰沙岛,包括:水下礁脊、礁前斜坡(向海坡)、礁坪、潟湖、浅水礁塘、沙洲、灰沙岛;第二等级:礁前斜坡下坡、礁前斜坡上坡、外礁坪、礁凸起带、内礁坪、潟湖坡、潟湖底、点礁、潮汐通道、海滩、沙堤、沙席、洼地;第三等级:内礁坪生物稀疏带、内礁坪潮间带浅滩、内礁坪生物丛生带、内礁坪礁坑发育带(表4)。其中第一等级和第

表4 南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系

Tab.4 Geomorphic classification scheme for coral reefs in the South China Sea based on high-resolution satellite images

1级		2级		3级		说明	形态	动力特征	出露程度	沉积类型
代码	地貌	代码	地貌	代码	地貌-生物					
1	水下礁脊					大环礁不出露礁坪			低潮不出露	繁生珊瑚和钙藻等造礁生物以及贝类
2	礁前斜坡 (向海坡)	2.1	礁前斜坡下坡			大于 700~900 m, 切割起伏 坡度稍缓	型			
		2.2	礁前斜坡上坡			700~900 m 以 内 , 较陡	平直型			
3	礁坪	3.1	外礁坪			槽沟发育带		高波能带	低潮几乎全部干出	覆盖大量生物碎屑物, 珊瑚生长较差
		3.2	礁凸起带			海藻脊, 无活珊瑚			低潮完全干出	珊瑚藻, 生物碎屑多为砾石
		3.3	内礁坪	3.3.1	生物稀疏带	稀疏的珊瑚、附礁生物		低波能带	薄层海水	积水洼地底部堆积松散的厚约 1 cm 的生物砂屑
				3.3.2	潮间带浅滩	无珊瑚等生物, 砂砾混合堆积物	丘状或条带状		低潮出露	白色的生物质砂砾混合堆积
				3.3.3	生物丛生带	抗浪性差的珊瑚和附礁生物茂盛			低潮不出露	粗砂、细砂等生物碎屑
				3.3.4	礁坑发育带	深而大的礁坑, 坑壁繁生珊瑚	起伏最大		低潮不出露	几厘米的白色生物砂、含生物砾块
4	潟湖	4.1	潟湖坡			水深较浅			低潮不出露	生物碎屑物以粗砂为主
		4.2	潟湖底						低潮不出露	生物碎屑物主要是中细砂、粉砂质砂
		4.3	点礁			潟湖底或潟湖坡上	峰丘型 礁坪型		低潮不出露 低潮出露	
		4.4	潮汐通道			即口门, 流急	直通式 门槛式	高波能带		一般无碎屑沉积物
5	浅水礁塘					礁坪上常积水的低洼地			低潮不出露	生物质的砂砾为主
6	沙洲					没有或很少植物	不稳定		高潮出露	松散的珊瑚砂砾、贝壳碎屑和其他生物碎屑
7	灰沙岛	7.1	海滩			不长植物			潮间带	中砂为主, 各类高潮线粗砂和砾含量较高。分选中等-差
		7.2	沙堤			植被繁茂, 有高脊	环状		高潮出露	粗中砂、砾石含量极少, 分选中等
		7.3	沙席			植被优良, 低地				粗中砂、砾石含量极少, 分选中等
		7.4	洼地			涉水而过, 无大的树木				中砂、细砂为主

二等级以所处礁体位置和动力环境为分类标准,第三等级以所处礁体位置、动力环境和生境(珊瑚、海藻等生物的多少)为分类标准。

3.2 珊瑚礁遥感地貌制图

以构建的南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系为指导,对南海46个珊瑚礁进行高分辨率遥感地貌制图,制图过程中从外海向潟湖或灰沙岛按照等级依次划分地貌类型。本文以西沙群岛甘泉岛(16°36'N, 111°35'E)、南沙群岛敦谦沙洲(10°23'N,

114°28'E)、南沙群岛簸箕礁(8°7'N, 114°10'E)和南沙群岛安乐礁(9°56'N, 114°31'E)的高分辨率遥感地貌制图结果进行展示。由于光学遥感在最清澈的水中最大穿透深度仅为25 m(Mumby et al, 1999),因此礁前斜坡(向海坡)只绘制到遥感可以识别的范围内,即礁前斜坡上坡,实际的礁前斜坡比此范围要大。高分辨率遥感影像中解译出的上述4个礁的地貌类型可涵盖南海珊瑚礁遥感地貌分类体系中的所有类型(图2)。

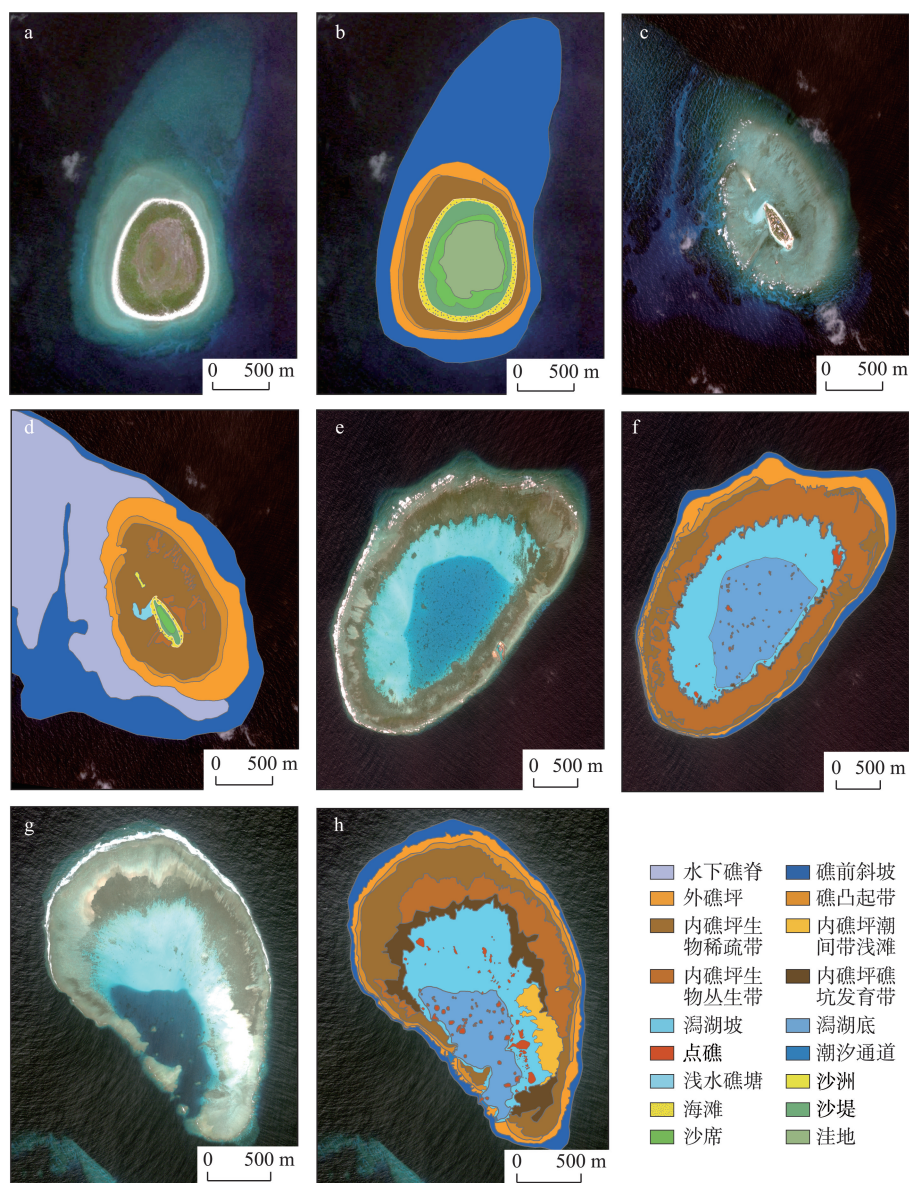


图2 南海珊瑚礁高分辨率遥感影像地貌制图

(a. 甘泉岛遥感影像 b. 甘泉岛地貌图 c. 敦谦沙洲遥感影像 d. 敦谦沙洲地貌图 e. 簸箕礁遥感影像 f. 簸箕礁地貌图 g. 安乐礁遥感影像 h. 安乐礁地貌图)

Fig.2 Geomorphic mapping of coral reefs in the South China Sea based on high-resolution satellite images

(a. Ganquan Island satellite image, b. Ganquan Island geomorphic map, c. Dunqian Cay satellite image, d. Dunqian Cay geomorphic map, e. Boji Reef satellite image, f. Boji Reef geomorphic map, g. Anle Reef satellite image, h. Anle Reef geomorphic map)

图2表明珊瑚礁地貌类型多样,珊瑚礁之间均存在差异性,单个或少数珊瑚礁地貌类型所构建的遥感地貌分类体系代表性较差。本文综合46个南海珊瑚礁高分辨率遥感影像,补充了水下礁脊、内礁坪潮间带浅滩、浅水礁塘等地貌类型,构建的遥感地貌分类体系更完备,在地貌类型较多的珊瑚礁地貌制图中应用性更好,如敦谦沙洲。与构建的遥感地貌分类体系相对应,通过地貌图可以统计每个地貌类型的长、宽、面积等属性及空间分布状况,根据其动力特征、出露程度、沉积类型等指标,推断作用于地貌类型的海洋动力过程。地貌图中将灰沙岛作为一级地貌类型(如甘泉岛和敦谦沙洲),相比仅将其作为礁坪的次级类型,该地貌分类体系突出了珊瑚礁当前所处的演化阶段,为人类提供了生存条件,对社会经济具有重要的意义。敦谦沙洲地貌图中也表明西北侧礁坪中沙洲的形成值得关注。此外,内含珊瑚覆盖度信息的内礁坪生物稀疏带和生物丛生带在每个珊瑚礁的空间分布和面积,对珊瑚礁的调查、管理和保护具有重要的意义。

4 讨论

4.1 各种分类方案的对比及可行性分析

基于南海46个珊瑚礁(环礁、台礁)的高分辨率遥感影像,本文构建了3级19类的南海珊瑚礁地貌分类体系并制图。与前人实地调查以及基于高分辨率遥感影像构建的地貌分类体系(表1)相比,此遥感地貌分类体系不仅等级最多,涵盖的地貌类型数量也最多。同时,遥感地貌分类体系构建中采用的分级标准更统一,第一等级和第二等级均以所处礁体位置和动力环境进行划分,第三等级包含少量生境信息进行划分。每个地貌类型均结合实地调查对其形态、动力特征、出露程度、沉积类型进行了描述,保证了遥感地貌分类体系的尽可能完备和系统。

其次,将沙洲和灰沙岛作为一级地貌类型,并与水下礁体部分共同构建遥感地貌分类体系,相比目前国外珊瑚礁地貌分类体系中将水下礁体和水上灰沙岛相区分的研究(Phinn et al, 2012),以及仅将沙洲或灰沙岛作为礁坪的次级类型的研究(Leon et al, 2011),可以明确珊瑚礁演化的最终阶段,突出了沙洲和灰沙岛的重要性。

此外,南海珊瑚礁遥感地貌分类体系构建中命名了内礁坪生物稀疏带和内礁坪生物丛生带,补充了水下礁脊、潮间带浅滩、浅水礁塘等类型,使得南海珊瑚礁地貌分类体系更为完备。在实地调查中

发现,内礁坪生物稀疏带珊瑚覆盖度较低,而内礁坪生物丛生带珊瑚覆盖度较高。由于大量的研究表明,珊瑚覆盖度在解释专门以珊瑚栖居的物种、鱼的丰富度和依赖珊瑚生境进行繁殖的物种中具有非常重要的作用(Munday, 2002; Pratchett et al, 2006; Komyakova et al, 2013),因此这2个带以生物稀疏带和生物丛生带进行命名,表明珊瑚和生物的分布。浅水礁塘为礁坪上常积水的很浅的低洼地,沉积物多以生物质的砂砾为主,与潟湖坡颜色相近,可作为与潟湖并列的地貌单元,也可能是潟湖发育的下一个阶段,在分析中推断其有几种不同的成因:一是潟湖演变至衰退阶段,生物碎屑堆积变浅,成浅水礁塘,如南沙群岛华阳礁中部不规则浅水礁塘,也可称残存潟湖;二是海滩外侧礁坪内缘低洼地,退潮后仍积水形成环滩分布的浅水礁塘;三是当沙堤堆积之初,沙堤围圈的礁坪低洼地积水为浅水礁塘,随沙席的扩展,礁塘萎缩消亡。珊瑚礁中浅水礁塘的类型可结合珊瑚礁整体地貌特征进行判别。

遥感地貌分类体系中的地貌单元均与实地调查对照,建立了高分辨率遥感影像解译标志,表明该遥感地貌分类体系应用于南海珊瑚礁遥感地貌制图的可行性。同时,本文所建立的遥感地貌等级体系反映出遥感传感器的制图能力,可满足不同的用户需求和遥感数据源。低等级的地貌类型适用于高分辨率影像和航空影像地貌制图,高等级的地貌类型适用于空间尺度在数十米的卫星影像地貌制图。

4.2 分类体系的局限性

南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌等级分类体系适用于目前大多数南海珊瑚礁遥感地貌制图,但是遥感本身的一些局限性可能影响基于该遥感地貌分类体系的制图。首先,光学遥感在最清澈的水中最大穿透深度仅为25 m(Mumby et al, 1999),因此所建立的地貌体系适用性不超过此深度范围。南海发育了众多的暗礁、暗沙、暗滩,其动力特征、出露程度、沉积类型与低潮出露珊瑚礁存在着差异性(王黎等, 2018),由于遥感穿透性的制约,这些暗礁等的地貌单元需作进一步研究。

其次,由于珊瑚礁遥感影像获取时受到潮汐、大气、水柱的影响,同一珊瑚礁的不同位置或不同珊瑚礁的相同地貌类型都存在差异性,因此本文建立的地貌体系是一个定性而非定量的标准,在应用过程中可以与实地相结合,给定标准。

此外,各因素共同作用形成的地貌类型的水动

力及沉积等特征存在区域性,当依据南海自然环境建立的遥感地貌分类体系应用到全球其他区域的珊瑚礁时,还应根据当地的环境进行具体分析。

5 结论

本文基于目前珊瑚礁遥感地貌分类体系的构建标准、合理性及完备性等方面存在的一些不足,应用中国南海46个珊瑚礁(环礁、台礁)的高分辨率遥感影像,结合西沙群岛15个岛礁的地貌实地调查数据进行南海高分辨率遥感地貌分类体系的构建研究。研究的主要结论为:

(1) 基于所处礁体位置、动力特征、出露程度和沉积类型,提出自海向内部潟湖或灰沙岛方向的3级珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系。第一等级和第二等级均以所处礁体位置和动力环境为划分标准,第三等级包含少量生境信息进行划分,解决了构建标准不统一、命名多元化的问题。同时,将沙洲和灰沙岛作为一级地貌类型,明确了珊瑚礁演化的最终阶段,突出了沙洲和灰沙岛的重要性。其多等级多尺度性适用于分辨率由低到高的遥感影像地貌制图,可满足不同的用户需求。

(2) 采用自上而下的地貌类型划分方法,共解译出地貌类型19类。命名了内礁坪生物稀疏带和生物丛生带2个地貌类型,内含珊瑚和生物的覆盖度信息,对珊瑚礁的调查、管理和保护具有重要意义;补充了水下礁脊、内礁坪潮间带浅滩、浅水礁塘地貌类型,使得遥感地貌分类体系更加完备,便于直观理解和推断不同尺度的海洋和生态相互作用过程。

本文研究表明,完备的遥感地貌分类体系的构建可通过采用多个珊瑚礁的高分辨率遥感影像获取地貌类型的方法而实现,构建的遥感地貌分类体系在地貌类型越多的珊瑚礁地貌制图中应用性越强。当将该遥感地貌分类体系应用于整个南海的环礁和台礁时,需进一步根据具体珊瑚礁的水动力环境及沉积特征对地貌类型描述进行验证。应用验证后的遥感地貌分类体系指导生成的南海珊瑚礁地貌产品将在珊瑚礁保护和管理等方面发挥重要作用,例如显示各地貌单元的组分、监测地貌的演变、评估适宜珊瑚生长的区域、辅助珊瑚礁白化监测和长棘海星控制,以及辅助珊瑚礁生物生态模拟等方面。

未来的研究将关注南海暗礁、暗沙、暗滩等的遥感地貌分类体系构建工作,由于受遥感穿透性的

制约,目前对这些珊瑚礁的地貌研究尚处于空白。

参考文献(References)

- 龚剑明, 朱国强, 杨娟, 等. 2014. 面向对象的南海珊瑚礁地貌单元提取[J]. 地球信息科学学报, 16(6): 997-1004. [Gong J M, Zhu G Q, Yang J, et al. 2014. A study on the object-oriented model for geomorphic unit extraction of coral reefs in the South China Sea[J]. Journal of Geo-information Science, 16(6): 997-1004.]
- Д. В. 纳乌莫夫, 颜京松, 黄明显, 等. 1960. 海南岛珊瑚礁的主要类型[J]. 海洋与湖沼, 3(3): 157-178. [Haymob Д В, Yan J S, Huang M X, et al. 1960. Hainandao shanhu jiao de zhuyao leixing[J]. Ocenologia et Limnologia Sinica, 3(3): 157-178.]
- 孙宗勋, 赵焕庭. 1996. 南沙群岛珊瑚礁的动力地貌特征[J]. 热带海洋, 15(2): 53-60. [Sun Z X, Zhao H T. 1996. Features of dynamic geomorphology of coral reefs in Nansha Islands[J]. Tropic Oceanology, 15(2): 53-60.]
- 王黎, 张永战. 2018. 九章环礁水下暗礁脊槽地貌分布与形态[J]. 第四纪研究, 38(2): 485-495. [Wang L, Zhang Y Z. 2018. Distribution and morphological characteristics of spur and groove on submerged reefs of Jiuzhang Atoll, South China Sea[J]. Quaternary Sciences, 38(2): 485-495.]
- 曾昭璇. 1982. 中国环礁的类型划分[J]. 海洋通报, (4): 46-53. [Zeng Z X. 1982. Zhongguo huanjiao de leixing huafen[J]. Marine Science Bulletin, (4): 46-53.]
- 赵焕庭. 1996. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社. [Zhao H T. 1996. Physical geography of Nansha Islands [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 赵焕庭, 宋朝景, 朱袁智. 1992. 南沙群岛“危险地带”腹地珊瑚礁的地貌与现代沉积特征[J]. 第四纪研究, 12(4): 368-377. [Zhao H T, Song C J, Zhu Y Z. 1992. Geomorphic and modern sedimentary features of coral reefs in the hinterland of "dangerous ground": Nansha Islands[J]. Quaternary Sciences, 12(4): 368-377.]
- 赵焕庭, 温孝胜, 孙宗勋, 等. 1996. 南沙群岛珊瑚礁自然特征[J]. 海洋学报, 18(5): 61-70. [Zhao H T, Wen X S, Sun Z X, et al. 1996. Nansha qundao shanhu jiao ziran tezheng[J]. Acta Oceanologica Sinica, 18(5): 61-70.]
- 赵美霞, 姜大朋, 张乔民. 2017. 珊瑚岛的动态演变及其稳定性研究综述[J]. 热带地理, 37(5): 694-700. [Zhao M X, Jiang D P, Zhang Q M. 2017. Review on the study of coral cay dynamics and its stability[J]. Tropical Geography, 37(5): 694-700.]
- 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.]

- 朱海天, 冯倩, 梁超, 等. 2015. 基于随机森林的南沙岛礁分类方法研究[C]//中国海洋学会. 中国海洋学会2015年学术论文集. 北京: 海洋出版社: 99-104. [Zhu H T, Feng Q, Liang C, et al. 2015. Jiyu sui ji senlin de Nansha dao jiao fenlei fangfa yanjiu[C]//Chinese Society for Oceanography. Zhongguo haiyang xuehui 2015 nian xueshu lunwenji. Beijing, China: China Ocean Press: 99-104.]
- Ahmad W, Neil D T. 1994. An evaluation of Landsat Thematic Mapper (TM) digital data for discriminating coral reef zonation: Heron Reef (GBR)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 15(13): 2583-2597.
- Andréfouët S, Guzman H M. 2005. Coral reef distribution, status and geomorphology-biodiversity relationship in Kuna Yala(San Blas) archipelago, Caribbean Panama[J]. *Coral Reefs*, 24(1): 31-42.
- 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): 128-143.
- Andréfouët S, Muller-Karger F, Robinson J, et al. 2006. Global assessment of modern coral reef extent and diversity for regional science and management applications: A view from space[C]//Suzuki Y, Nakamori T, Hidaka M, et al. 2004. Proceedings of 10th international coral reef symposium. Okinawa, Japan: 1732-1745.
- Andréfouët S, Zubia M, Payri C. 2004. Mapping and biomass estimation of the invasive brown algae *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh and *Sargassum mangarevense* (Grunow) Setchell on heterogeneous Tahitian coral reefs using 4-meter resolution IKONOS satellite data[J]. *Coral Reefs*, 23(1): 26-38.
- Franklin E C, Ault J S, Smith S G, et al. 2003. Benthic habitat mapping in the Tortugas Region, Florida[J]. *Marine Geodesy*, 26(1-2): 19-34.
- Fuentes M, Limpus C, Hamann M. 2011. Vulnerability of sea turtle nesting grounds to climate change[J]. *Global Change Biology*, 17(1): 140-153.
- Goldberg W M. 1973. The ecology of the coral-octocoral communities off the southeast Florida coast: Geomorphology, species composition, and zonation[J]. *Bulletin of Marine Science*, 23(3): 465-488.
- Goreau T F. 1959. The ecology of Jamaican coral reefs I. Species composition and zonation[J]. *Ecology*, 40(1): 67-90.
- Green E, Mumby P, Edwards A, et al. 1996. A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources[J]. *Coastal Management*, 24(1): 1-40.
- Hamylton S M, Carvalho R C, Duce S, et al. 2016. Linking pattern to process in reef sediment dynamics at Lady Musgrave Island, southern Great Barrier Reef[J]. *Sedimentology*, 63(6): 1634-1650.
- Hochberg E J. 2011. Remote sensing of coral reef processes [M]//Dubinsky Z, Stambler N. *Coral reefs: An ecosystem in transition*. Dordrecht, Netherland: Springer: 25-35.
- Houston M. 1994. Biological diversity: The coexistence of species on changing landscapes[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kayanne H, Aoki K, Suzuki T, et al. 2016. Eco-geomorphic processes that maintain a small coral reef island: Ballast Island in the Ryukyu Islands, Japan[J]. *Geomorphology*, 271: 84-93.
- Kinzie R A. 1973. The zonation of west Indian Gorgonians[J]. *Bulletin of Marine Science*, 23(1): 93-155.
- Komyakova V, Munday P L, Jones G P. 2013. Relative importance of coral cover, habitat complexity and diversity in determining the structure of reef fish communities[J]. *PLoS One*, 8(12): e83178.
- Kordi M N, O'Leary M. 2016. Geomorphic classification of coral reefs in the north western Australian shelf[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 7: 100-110.
- Leon J, Woodroffe C D. 2011. Improving the synoptic mapping of coral reef geomorphology using object-based image analysis[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(6): 949-969.
- Loya Y. 1972. Community structure and species diversity of hermatypic corals at Eilat, Red Sea[J]. *Marine Biology*, 13(2): 100-123.
- Maeder J, Narumalani S, Rundquist D C, et al. 2002. Classifying and mapping general coral-reef structure using IKONOS data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(12): 1297-1305.
- 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): 248-257.
- Mumby P J, Harborne A R. 1999. Development of a systematic classification scheme of marine habitats to facilitate regional management and mapping of Caribbean coral reefs [J]. *Biological Conservation*, 88(2): 155-163.
- 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): 219-228.
- Munday P. 2002. Does habitat availability determine geographical-scale abundances of coral-dwelling fishes?[J]. *Coral Reefs*, 21(1): 105-116.
- Naseer A, Hatcher B G. 2004. Inventory of the Maldives' coral reefs using morphometrics generated from Landsat ETM+ imagery[J]. *Coral Reefs*, 23(1): 161-168.
- Perry C T, Kench P S, Smithers S G, et al. 2011. Implications of reef ecosystem change for the stability and maintenance of coral reef islands[J]. *Global Change Biology*, 17(12): 3679-3696.
- Phinn S R, Roelfsema C M, Mumby P J. 2012. Multi-scale, object-based image analysis for mapping geomorphic and

- ecological zones on coral reefs[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12): 3768-3797.
- Pratchett M S, Wilson S K, Baird A H. 2006. Declines in the abundance of *Chaetodon* butterflyfishes following extensive coral depletion[J]. *Journal of Fish Biology*, 69(5): 1269-1280.
- Roelfsema C, Kovacs E, Ortiz J C, et al. 2018. Coral reef habitat mapping: A combination of object-based image analysis and ecological modelling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 208: 27-41.
- Roy P, Connell J. 1991. Climatic change and the future of atoll states[J]. *Journal of Coastal Research*, 7(4): 1057-1075.
- Shen J, Johnson M E, Fu F, et al. 2018. Seasonal wind patterns influence the configuration and geomorphology of insular reef systems: Yongxing Island, Xisha Islands, China[J]. *Geological Journal*, 53: 754-766.
- Xu J P, Zhao J, Li F, et al. 2016. Object-based image analysis for mapping geomorphic zones of coral reefs in the Xisha Islands, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(12): 19-27.
- Zuo X L, Su F Z, Zhao H T, et al. 2017. Regional hard coral distribution within geomorphic and reef flat ecological zones determined by satellite imagery of the Xisha Islands, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(3): 501-514.

Development of a geomorphic classification scheme for coral reefs in the South China Sea based on high-resolution satellite images

ZUO Xiuling^{1,2,3}, SU Fenzhen^{1*}, ZHAO Huanting⁴, FANG Yue¹, YANG Juan¹

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Nanning 530004, China; 3. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Coral reef geomorphic classification scheme plays an important role in coral reef geomorphic mapping based on remote sensing images. At present, there are various problems in the coral reef geomorphic classification schemes for remote sensing, such as inconsistent construction standards, unreasonable levels of some important geomorphic types, and incomplete geomorphic type coverage, which limit the application of geomorphic mapping for coral reef science and management. This article advocates a systematic and hierarchical geomorphic classification scheme for reefs in the South China Sea for remote sensing, which concludes three levels and 19 classes from the sea to the lagoon or island. It is constructed based on high-resolution satellite images (WorldView-2, Quickbird) of 46 reefs (atolls, table reefs) and field survey data of 15 reefs in the Xisha Islands. Geomorphic types are derived and described according to the criteria of reef location, hydrodynamic characteristics, exposure degree and sediments. Geomorphic types are placed at the same level when they possess similar scale and importance. Cay and island are placed in the first level to show their importance. The scheme has consistent standardization, the highest hierarchical structure, and the largest number of geomorphic types. In the scheme, biotic sparse zone of the inner reef flat, biotic dense zone of the inner reef flat are named; submerged reef ridge, intertidal sand zone, and shallow reef pond are supplemented. The classification scheme facilitates the intuitive understanding and inference of the processes and importance of marine ecological interaction across different scales. This hierarchical geomorphic classification scheme with multi-scale characteristic is applicable to the coral reef geomorphic mapping from low-resolution to high-resolution satellite images, contributing to the change analysis, management, and protection of China's coral reefs in the South China Sea.

Key words: remote sensing; high resolution; coral reef; geomorphology; classification scheme; South China Sea