基于 WorldView-2 和 GF-2 遥感影像的赵述岛礁坪底质变化研究

万佳馨^{1,2},任广波²,马 毅²

(1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:以西沙群岛海域赵述岛礁坪为研究区域,应用 2010年的 WorldView-2 和 2015年的 GF-2 两期高 分辨率卫星遥感影像数据,结合现场水下珊瑚礁照片和视频资料,建立了赵述岛礁坪底质类型遥感分 类体系,分别构建了针对 WorldView-2 遥感影像和 GF-2 遥感影像的珊瑚礁底质分类决策树模型,并 通过对两期遥感影像的底质类型提取结果的变化分析,完成了赵述岛礁坪退化区域的提取。结果表 明:(1)WorldView-2 影像的分类决策树具有 91%的总体分类精度和 0.89 的 Kappa 系数, GF-2 影像的分 类决策树具有更高的分类精度;(2)6 年期间研究区大约 1/4 的珊瑚礁分布区发生了退化;(3)最突出的自 然变化是礁前区大面积的珊瑚丛生区转变成藻脊,结合相关资料认为东北季风、热带气旋和温度上升 的综合影响是驱动因素;(4)赵述岛西侧的藻脊、珊瑚沉积区大面积转化为珊瑚砂和深水区域,原因是航 道和码头的开发活动。研究分析了 6 年间赵述岛礁坪底质的退化状况,并分析原因,为珊瑚礁底质分 类提供方法,并为西沙群岛的珊瑚礁监测和保护提供了有效资料和手段。

关键词:珊瑚礁;遥感;决策树;退化 中图分类号:TP79 文献标识码:A DOI:10.11759/hykx20190103001

珊瑚礁是指由造礁珊瑚群体经过长时间的碳酸 钙分泌和积累构成的岩体^[1]。近 50 年来,由于气温 升高、环境污染以及过度捕捞等人类活动破坏、全球 多处珊瑚礁生态系统发生了严重退化, 主要体现在 珊瑚礁覆盖率持续下降[2-3]。当珊瑚面临巨大的生存 压力时, 虫黄藻将会脱离珊瑚本体, 以致珊瑚逐渐 显露其骨骼的颜色——白色,这一珊瑚礁退化现象 称为珊瑚礁白化。珊瑚礁的白化状况是珊瑚礁健康 评估的重要指标。迄今为止,全球范围内已经发生了 3 起有记录的大规模珊瑚礁白化事件,分别发生于 1998年、2002年和 2016年^[4]。珊瑚礁健康状况监测 是珊瑚礁资源保护和可持续利用的基础。遥感技术 能够提供长时间序列、大空间范围和高空间分辨率 的数据资料^[5],是珊瑚礁监测的重要手段,不仅可获 取珊瑚礁分布和变化信息,还可以评估珊瑚礁的生 境类型和健康状况。

尽管已有不少对珊瑚礁健康评价的研究,但是 大多基于珊瑚礁生态系统,采用指示体系法和生物 指标法进行评价^[6-7]。利用遥感手段开展的珊瑚礁健 康状态监测评估以研究珊瑚礁白化为主。对珊瑚礁 的遥感监测可以追溯到20世纪70年代,国际珊瑚礁 研讨会报道了航空遥感监测珊瑚礁的工作^[8]。90年代 文章编号: 1000-3096(2019)10-0043-12

开始,相关学者发现海水表层温度(sea surface temperature, SST)上升是珊瑚礁白化监测的重要指标,并用来分析美国波多黎各^[9]、阿联酋首都阿布扎比^[10] 近海珊瑚礁的白化现象。2005年,NOAA CRW (coral reef watch)开发了基于 SST 数据的"珊瑚礁卫星白化 预警系统",将珊瑚礁白化预警级别分为 5 级。国内 学者利用 SST 数据导出的周热度和热点数据,发现 近期南海大部分海域已达 CRW 的第 3 个白化警告的 级别^[11-12]。光谱信息能够区分不同健康状态的珊瑚 礁^[13-15],通过对比分析处理后的珊瑚礁光谱,发现 白化珊瑚、砂反射率明显高于健康珊瑚^[16],尤其在 500~650 nm 范围内提升明显,且存在光谱曲线变平 滑的现象。包括 Sentinel-2、MODIS、SPOT、ETM+

收稿日期: 2019-01-03; 修回日期: 2019-02-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405600); 国家自然科学基金(51839002); 高分海岸带遥感监测与应用示范

[[]Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFC1405600; National Natural Science Foundation of China, No.51839002; High Resolution Remote Sensing Monitoring and Application Demonstration of Coastal Zone]

作者简介:万佳馨(1994-), 女,山东青岛人,硕士研究生,研究方向为 海洋遥感与应用,电话:15205420057, E-mail: wanjiaxin0826@163.com: 马毅,通信作者,研究员, E-mail: mayimail@fio.org.cn

等在内的多光谱遥感数据多用于珊瑚礁健康状况监 测^[17-18] 研究表明 Sentinel-2 具有更好的识别珊瑚礁 底栖生物组成和探测白化的能力。徐兵[19]提出了基 于多时相影像的空间自相关统计方法,该方法不需 提前获取底质信息,即可对珊瑚礁生态系统进行动 态监测。21 世纪以来, 珊瑚礁遥感影像分类的相关 探究逐渐受到国内外学者的重视, 多平台、多尺度等 多源多维度遥感数据应用于珊瑚礁分类,采用的方 法包括 ISODATA 非监督分类方法^[19-20]、SVM 等监 督分类方法^[21-25]、分类精度从最初的 50%提高到了 80%左右^[26-27]。综上、遥感可见光和红外信息已广泛 应用于珊瑚礁监测,但 SST 只是单维度信息,多用 来分析珊瑚礁白化与温度的相关性。光谱信息维度 较高,适合于珊瑚礁精细分类,但目前分类精度大 多处于 50%~80%、难以满足实际应用的需求。同时、 近年来国产高分系列卫星投入业务运行,为珊瑚礁 分类、变化监测和分析提供了更为丰富的多光谱高 分辨率卫星遥感数据源。

本文面向西沙群岛珊瑚礁健康状况监测的需 求,针对珊瑚礁底质遥感分类精度有待提高的问 题,综合利用米级分辨率的国产 GF-2 和国外商业 WorldView-2 多光谱卫星,拟发展综合光谱和纹理特 征信息的珊瑚礁决策树分类方法,通过光谱及其导 出指数和纹理特征的联合约束,以期获得较高的分 类精度,并在西沙群岛赵述岛礁盘开展实例应用, 开展 2010 到 2015 年赵述岛礁坪健康状态变化分析。

表 1	WorldView-2	GF-2 卫星参数 表
Tab	1 WorldView 1	and CE 2 satallits no

研究工作的主要目的是为珊瑚礁底质分类和健康状态监测提供方法,研究成果也为西沙群岛赵述岛生态评估和治理提供参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区域

本文的研究区为我国南海西沙群岛七连屿中的赵 述岛,该岛为纪念明太祖遣使赵述至三佛齐而命名。赵 述岛位于西沙群岛西北部,具体位置是 16°58'~16°59N, 112°16'~112°17'E。赵述岛是七连屿中面积最大的珊瑚 岛,岸线长度 1.58 km,面积 0.16 km²。礁盘大部分区 域水深在 1~2 m,近岸海域海水水质为一类,水体较 为清澈^[28]。赵述岛礁盘属于典型的珊瑚礁地貌体发育 形态,其礁盘主要包含 3 个分带,分别为礁前带、礁 核带、礁后带。另外,赵述岛为有居民海岛,主要在 2010 到 2015 年间岛陆西侧修建了人工建筑,并开挖 航道,上述人类活动对周边珊瑚礁的生长产生影响。

1.2 数据与处理

1.2.1 遥感数据与处理

研究使用的卫星数据有两种,其一为美国 DigitalGlobe公司于2009年10月8日发射的商用卫 星WorldView-2,数据采集时间为2010年2月7日; 其二为我国于2014年8月19日发射的GF-2卫星,数 据采集时间为2015年12月14日,传感器为PMS1。 GF-2、WorldView-2卫星参数如表1所示,本文应用 其中的多光谱数据开展礁坪底质分类。

卫星名称	波段名称	波段编号	波段范围/μm	空间分辨率/m	重访天数/d	
	全色	_	0.45~0.80			
	海岸	1	0.40~0.50			
	蓝	2	0.45~0.51		1.1	
	绿	3	0.51~0.58	会布 0.5		
WorldView-2	黄	4	0.58~0.63	主已 0.5,		
	红	5	0.63~0.69	夕九间 1.0		
	红边	6	0.70~0.75			
	近红1	7	0.77~0.89			
	近红 2	8	0.86~1.04			
	全色	—	0.45~0.90			
	蓝	1	0.45~0.52			
GF-2	绿	2	0.50~0.59	王巳 I, 名坐逆 A	5	
	红	3	0.63~0.69	夕儿归 4		
	近红	4	0.77~0.89			

注: "一"表示无波段编号。

研究论文 • Linn → ARTICLE

遥感图像处理主要包括大气校正、几何校正和 图像掩膜。利用 ENVI 的 FLAASH 模块完成大气校 正,将卫星传感器入瞳处的辐亮度转化为遥感反射 率,为保证后续处理过程中的数据精度,反射率乘 以 10 000 并取整数。由于现场测量的像控点时间与 GF-2 影像获取时间相近,首先使用现场测量的已知 控制点对 GF-2 影像进行几何校正,然后利用校正后 的 GF-2 影像对 WorldView-2 影像进行配准,配准误 差在 0.5 个像元以内。礁盘外面的点礁和海水不属于 礁盘区,故对其进行掩膜处理。

1.2.2 现场调查数据

分别于 2014 年 5 月和 2016 年 11 月开展了现场 调查,应用 CORS 差分 GPS 采集了两个厘米级定位 精度的像控点(位置见图 1),作为遥感图像地理配准 的控制点;通过水下摄像机和人工潜水摄影的方式 获取了珊瑚礁底质类型现场视频和照片(图 1,图 2), 作为本文珊瑚礁礁坪遥感分类体系构建的依据,并 应用于分类结果的验证。



图 1 赵述岛现场调查站点信息 Fig. 1 Geographical position of the Zhaoshu Island

2 研究方法

决策树分类是一种经典的监督分类方法,具有 灵活、直观、运算效率高等特点,在各种分类方法中 表现出独特的优势。本文首先建立珊瑚礁分类体系, 采用综合光谱和纹理特征信息的决策树分类方法对 赵述岛礁坪开展分类,并进行精度评价。在此基础上, 开展 2010 年和 2015 年两期影像的变化检测,分析底 质类型变化特征。



图 2 赵述岛现场调查相关照片



2.1 珊瑚礁礁坪分类体系

分类体系的建立是开展珊瑚礁底质监测的基础 性工作,当前较为完备的是 Mumby 和 Harborne 等针 对加勒比海珊瑚礁提出的分层分类体系^[29]。该分类 体系经过美国大气与海洋管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)改进以后, 已被应用于美国珊瑚礁生态状况的调查。综合国内 外相关文献,结合现场采集的影像资料和专家知识, 在地貌学基础上建立了针对赵述岛礁坪底质类型的 分类体系(表 2),将礁坪底质分为珊瑚砂、藻脊、珊 瑚丛生区、珊瑚沉积区等 4 类。为了保证分类结果 在空间上的完整性,将岛陆作为补充类别纳入。表 2 给出了分类体系中各类型的遥感图像截图、现场照 片和特征描述,遥感影像由 GF-2 多光谱红、绿、蓝 三波段真彩色合成。

2.2 分类决策树构建

基于专家知识的决策树是一个典型的多级分类 器,它由一系列二叉树组成,每个分支决策树可以 根据一个分类规则表达式将图像分为两类,每个新 生成的类别再根据下一级决策树的规则继续分类。 分类规则主要来源于遥感光谱及其导出指数数据、 图像纹理数据、空间邻接关系等。决策树分类的方 法具有灵活、直观、运算效率高等特点,在各种分类 方法中表现出独特的优势。研究区珊瑚礁底质比较 复杂,包括珊瑚砂、珊瑚丛生区、藻脊、珊瑚沉积区 4类,受多光谱遥感影像空间分辨率的限制,会导致误 分类现象。因此,本文考虑采用空谱信息联合的方式,

研究论文 · ┃:⑪ ARTICLE

表 2 赵述岛珊瑚礁礁坪底质类型分类体系及特征描述

ab.2	Classification	system and	feature desc	ription of cor	al reef substrate	types at the	Zhaoshu Island
	Cimbonite action i		reacter e acoc				

	č k	U 1	
地物类型	特征描述	遥感影像	现场照片
珊瑚砂	珊瑚礁白化死亡破碎形成的砂状物质。颗粒 细小,反射率较高。	in the second seco	
珊瑚丛生区	处于藻脊内侧, 珊瑚总体色调偏暗, 颜色较 均匀, 珊瑚生长发育良好。		
藻脊	多为硬底质堆积和珊瑚砂,有零星珊瑚生 长,多为带锯齿的竖条纹理。		
珊瑚沉积区	位于珊瑚丛生带内侧, 白色珊瑚砂中混杂着 沉积的珊瑚礁, 呈点状分布。		a de la comercia de la comerc
植被	位于岛陆,图像中较易区分,在真彩色图像 中呈现绿色,色调纹理较一致。		

合理构建决策树分类规则,其中,空间信息主要是 指灰度共生矩阵计算得到的纹理量,光谱信息包括 光谱强度和光谱指数等,通过空间和光谱信息的联 合应用,以达到减小混合像元导致的礁坪底质遥感 分类误差的目的。

联合空谱特征进行图像分类的方法已经广泛应 用于高光谱图像分类中,通过空谱特征图像层融合、 特征层融合和分类决策层融合,结合使用机器学习、 深度学习的分类器^[30-32],有效提升图像分类精度。由 于不同的礁坪底质类型具有相异的纹理特征,使用 纹理信息可以进一步改进本文分类结果。本文使用 了基于灰度共生矩阵方法得到的 8 个基于二阶矩阵 的纹理特征,包括:均值(mean)、方差(variance)、协 同性(homogeneity)、对比度(contrast)、相异性(dissimilarity)、信息熵(entropy)、二阶矩(second moment)和相 关性(correlation),编号按次序编为 1—8,纹理计算窗 口是 3×3。

可见光的蓝、绿波段具有较大的大气透过率和 较小的水体衰减系数,其透水性能较红光波段强, 适合于水下珊瑚礁成像,因此本文选取遥感影像蓝、 绿波段的光谱信息,事实上,从分类体系真彩色合 成遥感图像可以看出,不同珊瑚礁底质的信息差异 主要来源于蓝、绿波段;考虑到岛陆植被也是待分类的地物,使用归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)来区分植被和其他地物类型;同时,利用归一化差值水体指数(normalIzed difference water index, NDWI)对水体敏感的特性,挖掘藻脊、珊瑚沉积区的分类能力。由于每个波段均可生成8个纹理特征量,为了聚焦可分性,本文针对每一种纹理量进行 PCA 变换,选取第一主分量,并进行归一化处理,由于各类别数值差异不大,为了扩大差异以区分目标类别,将数值统一乘以1000。

本文应用基于光谱标准差(standard deviation, SD)阈值的地物特征光谱分析提取方法。对于地物类型*i*,分析并计算其可与地物类型*j*区分的反射率光谱, 若在光谱波段 λ 处,地物类型*i*与*j*光谱反射率均值的 差值 $\sigma_{\lambda,i,j}$ 大于两种地物的光谱样本集合分别在该波 段处反射率值的标准差 $\sigma_{\lambda,i,SD}$ 和 $\sigma_{\lambda,i,SD}$ 之和,即:

$$\left|\sigma_{\lambda,i,j}\right| > \sigma_{\lambda,i,\text{SD}} + \sigma_{\lambda,j,\text{SD}},\tag{1}$$

这时,可认为两种地物类型在该波段处具有足够大的差别,足以被用来作为两种地物高光谱识别的特征波段^[33]。本文将此方法应用于各底质类型光谱可分性分析,统计得到赵述岛 5 种典型地物两两区分特征波段查找表(表 3)。结合各类地物波谱特征曲线

研究论文 • <u>linn</u> ARTICLE

(图 3),发现第 1、2 波段的出现频率最高,其光谱可 分性较大,对于各类底质类型的区分度较高。考虑到 第 1 波段(海岸波段)受大气散射影响较大,因此选用 第2波段(蓝波段 B2)作为特征波段。另外,对于藻脊和珊瑚沉积区两类,各波段均无法达到光谱可分性 要求,故使用纹理特征解决这一问题。

Tab.3 Look-up table of distinguished characteristics bands of five typical objects in the Zhaoshu Island Worldview-2 image

抽物米刑	波段号								
地初天空	珊瑚砂	珊瑚丛生区	藻脊	珊瑚沉积区	植被				
珊瑚砂	—	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 4, 5, 7, 8				
珊瑚丛生区	1, 2, 3, 4, 5		1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 6, 7, 8				
藻脊	1, 2, 3	1, 2, 3, 4, 5	—	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8	无				
珊瑚沉积区	1, 2, 3	1, 2, 3, 4	无	—	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8				
植被	1, 2, 4, 5, 7, 8	1, 2, 3, 6, 7, 8	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8	_				







表 4 是珊瑚礁礁坪底质类型 WorldView-2 数据 蓝波段统计值,作为分类决策树选取各结点分类阈 值的数值依据。从图 3、表 4 均可看出,珊瑚沉积区、 藻脊两种类型光谱曲线相近,区分难度较大,因此 增加纹理信息作为分类依据。绘制各纹理特征数值 折线图(图 4),发现仅有第 7 个纹理特征(相关性,决 策树中记为 Co)可以较好区分两类。但仅用这一特征 会有植被被错分为其他类,因此增设对植被敏感的 NDVI 特征。Worldview-2 礁坪底质类型影像决策树 如图 5。决策树分类算法如下:

If B2>0

If 450<B2<800 then 类别为珊瑚丛生区

- Else if B2>1700 then 类别为珊瑚砂
- Else if Correlation<170 or NDVI>0

If NDVI<0 then 类别为藻脊

Else 类别为植被

End if

Else 类别为珊瑚沉积区

Else if B2=0 then 类别为掩膜

Else 类别为背景

End if

针对 GF-2 影像,选择对水体穿透性较强的蓝 (B1)、绿(B2)波段数值作为光谱信息,利用 NDVI 值 区分植被和珊瑚丛生区。为了区分光谱曲线相近的 珊瑚沉积区和藻脊两类,引入对水体敏感的 NDWI 特征,构建 GF-2 礁坪底质类型影像决策树(图 6)。

表 4	珊瑚礁礁坪底质类型 WorldView-2 数据蓝波段反射率统计值
Tab.4	Blue-band reflectance statistics for WorldView-2 image of coral reef substrate types

抽物米刑	反射率							
地初天空	最小值	最大值	平均值	标准差				
珊瑚砂	1 304	4 870	2 469	683				
珊瑚丛生区	449	822	634	71				
藻脊	860	1 965	1 255	255				
珊瑚沉积区	782	2 213	1 438	238				
植被	290	446	35	43				
掩膜	0	0	0	0				
背景	无值	无值	无值	无值				

表 3 赵述岛 Worldview-2 影像 5 种典型地物两两区分特征波段查找表





图 4 各类地物纹理曲线











2.3 变化检测方法

本文分类体系建立时主要考虑的是赵述岛周边的礁坪底质类型,赵述岛上生长有密集的植被,归

为一类,但岛陆西南侧的建筑错分为珊瑚丛生区, 为了进行准确的底质类型变化分析,通过目视判读 2010 年和 2015 年研究区影像,结合现场踏勘记录, 将错分的类型调整属性,得到更加准确的分类结果。

为了定量研究各类珊瑚礁底质的面积变化,利 用转移矩阵进行变化分析。转移矩阵反映了某一区 域某一时段期初和期末各地类面积之间相互转化的 动态过程,它不仅包括静态某时间点的各地类面积 数据,而且有各地类面积期初转出和期末转入的信 息。转移矩阵数学形式为:

$$\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{i}\boldsymbol{j}} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{vmatrix},$$
(2)

式中: *S* 表示面积; *n* 代表土地利用的类型数; *i*, *j* 分别 代表研究期初和研究期末的土地利用类型。通过 2010 和 2015 年变化检测分析,得到各类型的转移矩阵。

3 结果与分析

3.1 分类结果与精度分析

利用构建的决策树分别对两幅影像分类、得到 赵述岛海域 2010 年和 2015 年珊瑚礁底质分类结果 图(图 7, 图 8)。应用现场调查数据选择验证样本,采用 混淆矩阵对两幅分类结果进行精度评价(表 5, 表 6), 其中, WorldView-2影像分类精度为 91.76%, GF-2 分 类精度为 92.68%。从分类结果和混淆矩阵可以看出, 无论 WorldView-2 影像还是 GF-2 影像, 分类总体精 度都达到了较高的数值、均在90%以上。这验证了本 文遥感分类体系构建的合理性和分类方法的准确 性。从分类结果中发现、珊瑚从生区、珊瑚沉积区占 据礁坪的主体且分布较广,对其分类精度较高,均 在 95%以上; 珊瑚砂和藻脊分类精度仍然保持在 84%以上,除了 WorldView-2 影像中的藻脊,其空间 分布稀疏,对分类整体效果影响不大;另外,由于海 岛植被属于强反射地物,其光谱纹理特征与其他地 物类型区别较大, 故对其的分类精度最高。

3.2 珊瑚礁底质类型变化分析

为了研究从 2010 到 2015 年各类珊瑚礁底质变化 量, 计算 2010—2015 年赵述岛礁坪底质类型转移矩 阵(表 7), 并制作了礁坪底质类型面积变化图(图 9)。





图 7 赵述岛礁坪 2010 年 WorldView-2 分类结果图

Fig.7 WorldView-2 classification result for the Zhaoshu Island reef flat in 2010



图 8 赵述岛礁坪 2015 年 GF-2 分类结果图

Fig.8 GF-2 classification result for the Zhaoshu Island reef flat in 2015

表 5	2010 年 WorldView-2 分类图像精度分析结果
Tab.5	Accuracy analysis of 2010 WorldView-2 classification image

抽物米刑	地面真实样本数						雄分素	漏分玄	上产老糖度/%
地彻天生	珊瑚砂	珊瑚丛生区	藻脊	珊瑚沉积区	植被	总计	пл-	砌力千	王) 有相反//0
珊瑚砂	422	0	0	1	0	423	0.24	11.34	88.66
珊瑚丛生区	0	1 313	0	0	0	1 313	0	0.23	99.77
藻脊	50	2	343	5	0	400	14.25	32.61	67.39
珊瑚沉积区	4	1	166	246	0	417	41.01	4.28	95.72
植被	0	0	0	5	122	127	3.94	0.00	100.00
总计	476	1 316	509	257	122	2 840	—	—	

注:"一"表示没有总计。表6同。

表 6 2015 年 GF-2 分类图像精度分析结果

Tab.6 Accuracy analysis of 2015 GF-2 classification image

抽物米刑	地面真实样本数							混公兹	止 本 耂 桂 宙 /0/
地切天空	珊瑚砂	珊瑚丛生区	藻脊	珊瑚沉积区	植被	总计	-	砌力平	主)有相反//0
珊瑚砂	566	0	0	0	0	566	0	15.27	84.73
珊瑚丛生区	0	500	2	24	0	526	4.94	1.96	98.04
藻脊	42	0	661	0	0	703	5.97	10.19	89.81
珊瑚沉积区	60	10	73	731	0	874	16.36	3.18	96.82
植被	0	0	0	0	100	100	0	0.00	100.00
总计	668	510	736	765	100	2 883	—	_	_

表 7 2010-2015 年赵述岛礁坪底质类型面积转移矩阵

Tab.7 2010–2015 transition matrix of the coral reef flat substrate types at the Zhaoshu Island

2010 在抽物米刑		肖计 1/hm ²				
2010 平地初关室	珊瑚丛生区	珊瑚砂	藻脊	珊瑚沉积区	其他	
珊瑚丛生区	138.66	10.34	94.45	31.67	0.02	275.14
珊瑚砂	3.58	19.41	7.01	40.36	0.45	70.81
藻脊	15.66	7.53	35.20	15.56	0.00	73.95
珊瑚沉积区	38.86	14.32	27.60	83.85	0.00	164.63
其他	0.13	0.88	0.03	0.13	14.24	15.41
总计 2/hm ²	196.89	52.48	164.29	171.57	14.71	599.94

注: 底质类型面积转移是指,从 2010 年地物类型到 2015 年地物类型面积转化量。总计 1:2010 年底质类型面积总和;总计 2:2015 年底质 类型面积总和。







2010 年珊瑚丛生区所占面积最大,共 275.14 hm²,约占总研究区的 50%;珊瑚沉积区次之,为 164.63 hm²;珊瑚砂分布区和藻脊面积差异不大,分别为 70.81 和 73.95 hm²;其他面积共 15.41 hm²。2015 年,珊瑚丛 生区约占总面积的 1/3,共 196.89 hm²;藻脊和珊瑚 沉积区各占约 1/4,分别为 164.29 hm²和 171.57 hm²; 珊瑚砂共 52.48 hm²。

对比 2010 年和 2015 年的礁坪底质分布情况,可 以看出:从 2010 年到 2015 年,大面积的珊瑚丛生区 逐渐砂化,逐渐转变为藻脊,约 94.45 hm²。结合当 地的气候条件,可能的原因有以下几点:(1)该区域 位于赵述岛礁盘迎风面,长期受东北季风的影响; (2)在本文研究时段内的 2012 年南海地区遭受高频 率的热带气旋侵袭^[34];(3)海表面温度呈振荡上升趋 势,大量珊瑚礁健康状况受到威胁^[35]。同时,赵述岛 西侧的珊瑚砂面积显著增大,结合相关资料,主要 原因是近几年赵述岛南部的吹填活动,从岛周围挖 取大量珊瑚砂开展填海造陆工程。

3.3 珊瑚礁退化情况分析

为了方便统计和研究,本文把珊瑚礁退化区定 义为珊瑚礁相对较多的珊瑚丛生区和珊瑚沉积区转 变为珊瑚礁较少的珊瑚砂和藻脊。另外,还分为未变 化区域和其他变化区域。

由转移矩阵可得,从 2010 年到 2015 年, 珊瑚礁 退化总面积为 143.44 hm²,未变化区域有 274.41 hm², 其他变化区域为 156.01 hm²,岛礁开发区为 18.60 hm²。

结合转移矩阵(表 7)和珊瑚礁退化情况专题 图(图 10),可以发现:从2010年2月到2015年12月, 研究区近一半区域属于未变化区域,主要分布于赵 述岛礁后区,尤其是海岛东侧最为集中;约 1/4 的珊 瑚礁生活区发生了退化,主要分布在礁前区,礁前 区位于礁盘东北侧,常年受东北季风影响,波浪、风暴 潮上掀堆积礁砾,大量珊瑚丛生区转变成藻脊;航道 和码头开发的区域变化最为明显,主要由藻脊、珊瑚沉 积区变为珊瑚砂。本文收集了多时相 Worldview-2、 SPOT、GF-1 和 GF-2 等高分辨率遥感影像,完整记 录了从 2010 年 2 月到 2015 年 12 月赵述岛礁坪变化 情况,图 11 是赵述岛东北侧礁前区珊瑚礁退化情况, 2010 年是基期状态,2013 年退化明显,2014、2015 年 仍然没有好转;图 12 是赵述岛西侧航道码头开发情 况,2010 年处于初始的未开发状态,2013、2014 年开 始开发,2015 年基本成型,约 10.81 hm² 的区域整体 转变为珊瑚砂。









4 结论与讨论

本文利用 2010 年的 WorldView-2 和 2015 年的 GF-2 影像,以西沙群岛海域赵述岛礁坪为研究对象, 发展了综合光谱和纹理特征信息的珊瑚礁决策树

研究论文 • lim ARTICLE



图 12 赵述岛西侧礁坪变化 Fig.12 Coral reef changes on the west side of the Zhaoshu Island

分类方法,并开展了2010到2015年珊瑚礁退化状况 分析。取得的结论如下:在建立赵述岛礁坪底质分类 体系的基础上,分别构建了针对WorldView-2遥感 影像和GF-2遥感影像的分类决策树,其中,World-View-2影像获得了91%的总体分类精度和0.89的 Kappa系数,GF-2影像具有更高的分类精度;通过对 2010和2015分类后影像进行转移矩阵计算,得到近 6年中赵述岛礁坪底质类型的变化情况,并着重分析 珊瑚礁退化信息,该研究时段内研究区珊瑚礁退化 的区域约占总面积的1/4,其中大部分是由珊瑚丛生 区转化为藻脊。

本文是基于遥感手段的珊瑚礁健康状况监测, 与常用的基于生态的评估手段以及评价标准有所区 别。本文仅对西沙群岛赵述岛珊瑚礁礁坪进行研究, 该区域礁盘较为发育,水深较浅,易于进行图像解 译,由于光学遥感的穿透能力有限,该方法是否适 用于深度较大、礁体不清晰的珊瑚礁研究还有待证 明。研究区多为珊瑚礁、珊瑚砂、珊瑚碎屑混合区,受 本研究所用遥感影像空间分辨率的限制,会存在混 合像元,基于高光谱解混的分类方法可能会获得更 精确的监测结果。

参考文献:

- 安振振,李广雪,马妍妍,等. 珊瑚礁地质稳定性研 究现状[J]. 海洋科学, 2018, 42(3): 113-120.
 An Zhenzhen, Li Guangxue, Ma Yanyan, et al. Research on coral reefal geological stability[J]. Marina Sciences, 2018, 42(3): 113-120.
- [2] 孙有方, 雷新明, 练健生, 等. 三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统现状及其健康状况评价[J]. 生物多样性, 2018, 26(3): 258-265.
 Sun Youfang, Lei Xinming, Lian Jiansheng, et al. Eco-

system status and health assessment of Sanya Coral Reef National Nature Reserve[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(3): 258-265.

- [3] De'Ath G, Fabricius K E, Sweatman H, et al. The 27year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(44): 17995-17999.
- [4] Hughes T P, Kerry J T, ÁlvarezNoriega M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. Nature, 2017, 543(7645): 373.
- [5] 李晓敏,张杰,马毅,等.基于无人机高光谱的外来 入侵种互花米草遥感监测方法研究:以黄河三角洲 为研究区[J].海洋科学,2017,41(4):98-107.
 Li Xiaomin, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Study on monitoring alien invasive species *Spartina alterniflora* using unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing: A case study of the Yellow River Delta[J]. Marina Sciences, 2017, 41(4): 98-107.
- [6] 李元超,杨毅,郑新庆,等.海南三亚后海海域珊瑚 礁生态系统的健康状况及其影响因素[J]. 生态学杂 志,2015,34(4):1105-1112.
 Li Yuanchao, Yang Yi, Zheng Xinqing, et al. Health status and influencing factors of coral reef ecosystems in Houhai waters, Sanya, Hainan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1105-1112.
- [7] 吴钟解,陈石泉,陈敏,等. 海南岛造礁石珊瑚资源 初步调查与分析[J]. 海洋湖沼通报, 2013(2): 44-50.
 Wu Zhongjie, Chen Shiquan, Chen Min, et al. Preliminary survey and analysis of the resources of hermatypic corals in Hainan Island[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(2): 44-50.
- [8] Hopley D, Steveninck A. Infrared aerial photography of coral reefs[C]//University of Miami. Proceedings of Third International Coral Reef Symposium. Miami, Florida: University of Miami, 1977: 305-311.
- [9] Armstrong R A. Changes in a Puerto Rican coral reef from 1936-1979 using aerial photo analysis[C]//University of the Philippines. Proceedings of the 4th International Coral Reef SymposiumVol1. Manila, Philippines: University of the Philippines, 1981: 309-316.

研究论文 • ∭ ARTICLE

- [10] Shuail D, Wiedenmann J, D'Angelo C, et al. Local bleaching thresholds established by remote sensing techniques vary among reefs with deviating bleaching patterns during the 2012 event in the Arabian/Persian Gulf[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 105(2): 654-659.
- [11] 潘艳丽, 唐丹玲. 卫星遥感珊瑚礁白化概述[J]. 生态 学报, 2009, 29(9): 5076-5080.
 Pan Yanli, Tang Danling. General introduction to satellite remote sensing of coral reef bleaching[J]. Acta Ecological Sinica, 2009, 29(9): 5076-5080.
- [12] 孙旋, 蔡玉林, 索琳琳, 等. 基于 SST 的珊瑚礁白化 监测技术综述[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 21-28.
 Sun Xuan, Cai Yulin, Suo Linlin, et al. Review of coral reef bleaching monitoring technology based on SST[J].
 Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(2): 21-28.
- [13] Holden H, Ledrew E. Spectral discrimination of healthy and non-healthy corals based on cluster analysis, principal components analysis, and derivative spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(2): 217-224.
- [14] Clark D C, Mumby P J, Chisholm J R M, et al. Spectral discrimination of coral mortality states following a severe bleaching event[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(11): 2321-2327.
- [15] 陈启东,邓孺孺,秦雁,等.不同生长状态珊瑚光谱 特征[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3394-3402.
 Chen Qidong, Deng Ruru, Qin Yan, et al. Analysis of spectral characteristics of coral under different growth patterns[J]. Acta Ecological Sinica, 2015, 35(10): 3394-3402.
- [16] 陈永强,陈标,雷新明,等.三亚鹿回头海域珊瑚、 团扇藻和砂反射率光谱分析[J].光谱学与光谱分析, 2018,38(11):3483-3488.

Chen Yongqiang, Chen Biao, Lei Xinming, et al. Reflectance analysis of coral, *Padina pavonica* and coral sand at Luhuitou of Sanya Bay[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(11): 3483-3488.

- [17] Hedley J, Roelfsema C, Koetz B, et al. Capability of the Sentinel 2 mission for tropical coral reef mapping and coral bleaching detection[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120(6): 145-155.
- [18] Shuail D, Wiedenmann J, D'Angelo C, et al. Local bleaching thresholds established by remote sensing techniques vary among reefs with deviating bleaching patterns during the 2012 event in the Arabian/Persian Gulf[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 105(2): 654-659.
- [19] 徐兵. 珊瑚礁遥感监测方法研究[D]. 南京: 南京师 范大学, 2013.
 Xu Bing. Study on remote sensing monitoring method

for coral reef[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.

- [20] Call K, Hardy J, Wallin D. Coral reef habitat discrimination using multivariate spectral analysis and satellite remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(13): 2627-2639.
- [21] Kutser T, Miller I, Jupp D L B. Mapping coral reef benthic substrates using hyperspectral space-borne images and spectral libraries[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2006, 70(3): 449-460.
- [22] Caras T, Karnieli A. Ground-level spectroscopy analyses and classification of coral reefs: Using a hyperspectral camera[J]. Coral Reefs, 2013, 32(3): 825-834.
- [23] Eugenio F, Marcello J, Martin J. High-resolution maps of bathymetry and benthic habitats in shallow-water environments using multispectral remote sensing imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(7): 3539-3549.
- [24] 胡蕾秋, 刘亚岚, 任玉环, 等. 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, 2010, 25(4): 493-501.
 Hu Leiqiu, Liu Yalan, Ren Yuhuan, et al. Research on the extraction method of coral reef at spratly islands using SPOT5[J]. Remote Sening Technology and Application, 2010, 25(4): 493-501.
- [25] 周旻曦, 刘永学, 李满春, 等. 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, 2015, 34(4): 677-690.
 Zhou Minxi, Liu Yongxue, Li Manchun, et al. Geomorphologic information extraction for multi-objective coral islands from remotely sensed imagery: A case study for Yongle Atoll, South China Sea[J]. Geographical Research, 2015, 34(4): 677-690.
- [26] Hochberg E J, Andrefouet S, Tyler M R. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments[J].
 IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(7): 1724-1729.
- [27] Palandro D A, Andréfouët S, Hu C, et al. Quantification of two decades of shallow-water coral reef habitat decline in the Florida Keys National Marine Sanctuary using Landsat data (1984–2002)[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(8): 3388-3399.
- [28] 李丽. 基于 WorldView-2 数据的西沙群岛遥感水深反 演: 以赵述岛和南岛为例[J]. 国土资源遥感, 2016(4): 170-175.

Li Li. Remote sensing bathymetric inversion for the Xisha Islands based on WorldView-2 data: A case study of Zhaoshu Island and South Island[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2016(4): 170-175.

[29] Mumby P J, Harborne A R. Development of a system-



atic class ification scheme of marine habitats to facilitate regional management and mapping of Caribbean coral reefs[J]. Biological Conservation, 1999, 88(2): 155-163.

[30] 李铁, 孙劲光, 张新君, 等. 高光谱遥感图像空谱联合分类方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1379-1389.
Li Tie, Sun Jinguang, Zhang Xinjun, et al. Spectral-

spatial joint classification method of hyperspectral remote sensing image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1379-1389.

[31] 付琼莹, 余旭初, 张鹏强, 等. 联合空谱信息的高光 谱影像半监督 ELM 分类[J]. 华中科技大学学报(自然 科学版), 2017(7): 89-93.

Fu Qiongying, Yu Xuchu, Zhang Pengqiang, et al. Semi-supervised ELM combined with spectral-spatial features for hyperspectral imagery classification [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2017(7): 89-93.

 [32] 肖倩. 结合空间信息与光谱信息的高光谱图像分类 研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
 Xiao Qian. Combination of spatial information and spectral information for hyperspectral imagery classification[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

 [33] 任广波,张杰,马毅.黄河三角洲典型植被地物光谱 特征分析与可分性查找表[J].海洋环境科学,2015, 34(3): 420-426.
 Ren Guangbo, Zhang Jie, Ma Yi. Spectral discrimina-

tion and separable feature lookup table of typical vegetation species in Yellow River Delta wetland[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 420-426.

[34] 李元超, 兰建新, 郑新庆, 等. 西沙赵述岛海域珊瑚 礁生态修复效果的初步评估[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(3): 348-353.
 Li Yuanchao, Lan Jianxin, Zheng Xinqing, et al. Preli-

minary assessment of the coral reef restoration in areas of Zhaoshu Island, Xiasha Islands[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(3): 348-353.

[35] 贾丹丹, 王纪坤, 马小雨, 等. 南海珊瑚礁区 34 年卫 星遥感海表温度变化的时空特征分析[J]. 海洋学报, 2018, 40(3): 112-120.
Jia Dandan, Wang Jikun, Ma Xiaoyu, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface temperature variabilities over the past 34 years in coral reef areas of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(3): 112-120.



Study on substrate changes of Zhaoshu reef flat based on WorldView-2 and GF-2 remote sensing images

WAN Jia-xin^{1, 2}, REN Guang-bo², MA Yi²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Received: Jan. 3, 2019

Key words: coral reef; remote sensing; decision tree; degradation

Abstract: Coral reefs are one of the most biologically diverse ecosystems in the ocean with primary productivity. Under the dual pressures of natural and human factors, coral reefs are facing a huge risk of disease and degradation. In this paper, the Zhaoshu Island coral reef flat in the Xisha Island waters was considered as the research area. Based on high-resolution WorldView-2 and GF-2 satellite remote sensing image data obtained in 2010 and 2015 combined with underwater coral reef photographs and video data, a remote sensing classification system for the Zhaoshu Island reef flat substrate types was established. The decision-tree model of coral reef substrate classification based on WorldView-2 and GF-2 remote sensing image was established. The change of coral reef substrate type at the Zhaoshu Island was analyzed using a two-stage change detection method, and the degradation region was analyzed. The results show that (1) the decision tree of the WorldView-2 image has 91% overall classification accuracy with 0.89 Kappa coefficient and that of the GF-2 image has higher classification accuracy; (2) about 25% of the coral reef distribution area under study has been degraded during the six-year period; (3) the most prominent natural change is observed in the large area of reef-clumping to algal ridge in front of the reef flat. The combined relevant data indicates that the driving factors are the effects of the northeast monsoon, tropical cyclones, and temperature rise; (4) algal ridge and reef-deposition area on the west side of the Zhaoshu Island have been transformed into large coral sand and deep-water areas due to the development of waterways and wharfs. The study analyzed the reasons for the degradation of the reef substrates at the Zhaoshu Island over the past six years to provide methods for the classification of coral reefs and effective information and means for the monitoring and protection of coral reefs in the Xisha Islands.

(本文编辑: 刘珊珊)