

郑金辉, 任广波, 胡亚斌, 张飞飞, 马毅, 李明杰, 王瑞富. 2023. 生物天敌暴发导致珊瑚礁退化的高分遥感监测与分析——以南海太平岛为例. 热带地理, 43 (10): 1856-1873.

Zheng Jinhui, Ren Guangbo, Hu Yabin, Zhang Feifei, Ma Yi, Li Mingjie, and Wang Ruifu. 2023. High Resolution Remote Sensing Monitoring and Analysis of Coral Reef Degradation Caused by Outbreaks of Biological Natural Enemies: A Case Study of the Taiping Island in the South China Sea. *Tropical Geography*, 43 (10): 1856-1873.

生物天敌暴发导致珊瑚礁退化的高分遥感监测与分析——以南海太平岛为例

郑金辉^{1,2,3}, 任广波^{2,3,4}, 胡亚斌^{2,3,4}, 张飞飞^{2,3}, 马毅^{3,4}, 李明杰^{5,6}, 王瑞富¹

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510300; 3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061; 5. 自然资源部南海发展研究院, 广州 510310; 6. 海南南沙珊瑚礁生态系统国家野外科学观测研究站, 广州 510399)

摘要: 珊瑚生物天敌黑皮海绵、长棘海星在世界范围内暴发严重威胁珊瑚礁生态健康, 然而目前珊瑚礁领域尚缺乏生物天敌暴发后对珊瑚礁地貌类型影响的定量研究。文章利用太平岛珊瑚生物天敌黑皮海绵、长棘海星2次暴发事件前后, 覆盖太平岛2016—2022年的26期Sentinel-2遥感影像, 结合高分辨率GF-2 (PMS) 遥感影像和卫星遥感影像地理信息系统Google Earth平台中的数据, 开展中国南海太平岛珊瑚礁地貌类型遥感影像分类实验, 对密集珊瑚沉积区、稀疏珊瑚沉积区、珊瑚丛生区、沙坪、浅礁前斜坡等珊瑚礁地貌类型演变进行特征分析。结果表明: 1) 结合专家解译知识和支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 分类算法开展的太平岛珊瑚礁地貌类型分类, 最高总体精度和Kappa系数分别为96.46%和0.94。2) 在2种珊瑚生物天敌暴发期间, 太平岛的珊瑚礁丛生区、密集珊瑚沉积区、稀疏珊瑚沉积区等珊瑚礁地貌类型面积有显著下降; 黑皮海绵暴发后对密集珊瑚沉积区影响最大, 其面积减少72.92%; 长棘海星暴发后对珊瑚丛生区影响最大, 其面积减少59.17%。3) 2016—2022年, 太平岛珊瑚礁退化率高于恢复率, 其中2017年3—6月珊瑚礁退化率最高, 为23.88%; 在2017年6—9月珊瑚礁恢复率最高, 为18.03%。

关键词: 珊瑚礁; 黑皮海绵; 长棘海星; 高分遥感; 太平岛

中图分类号: P715.7; P737.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)10-1856-18

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003762

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



珊瑚礁主要是以造礁石珊瑚石灰质骨骼为主干, 附着珊瑚藻、仙掌藻、软体动物壳、有孔虫等钙质生物的岩石体 (余克服等, 2018)。珊瑚礁是海底及整个地球的重要生态系统, 具有极高的初级生产力 (黄荣永等, 2019), 其面积仅占海洋面积的0.25%, 但却是25%的海洋鱼类和其他生物的栖息地, 具有巨大的生物资源和社会价值。

20世纪60年代以来, 黑皮海绵、长棘海星、食珊瑚蜗牛 (Julianna et al., 2022)、藤壶 (Jennie et

al., 2016) 等珊瑚生物天敌暴发导致主要珊瑚分布区大面积受损, 由此造成海洋生物多样性降低、珊瑚礁生态系统退化等一系列环境问题 (李元超等, 2019)。黑皮海绵和长棘海星是2种最常见的珊瑚生物天敌, 其中, 黑皮海绵以间接包裹侵入方式破坏珊瑚, 1971年在关岛暴发后造成该地区30%~80%珊瑚礁死亡 (Brayn et al., 1973), 随后在印度洋—太平洋地区的多个地点也发现有黑皮海绵的暴发现象, 造成该地区20%~90%的珊瑚礁损毁 (Diraviya

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2023-09-06

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金课题 (MESTA-2022-B008); 中国高分辨率对地观测专项项目 (41-Y30F07-9001-20/22); 海洋领域融合应用示范项目 (RHYJKF02)

作者简介: 郑金辉 (1996—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事珊瑚礁遥感研究, (E-mail) huihuizheng922@gmail.com;

通信作者: 王瑞富 (1975—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士, 主要从事海洋GIS研究, (E-mail) Wrf@263.net.

et al., 2018; Masashi et al., 2017; Liao et al., 2007); 而长棘海星以直接啃噬方式破坏珊瑚, 导致活珊瑚覆盖率^①急剧下降, 对珊瑚礁生态系统结构组成和功能将产生长期影响, 如1985—2012年大堡礁一项有关活珊瑚覆盖率的研究发现, 在长棘海星暴发后活珊瑚覆盖面积下降达50% (Glenn et al., 2012); 2002—2010年巴布亚新几内亚的布特莱斯湾 (Bootless Bay) 的实地调查发现, 在长棘海星暴发事件后超过55%的活珊瑚死亡, 珊瑚覆盖率从2005年的42.4%下降到2006年的19.1% (Pratchett et al., 2009)。综上, 珊瑚生物天敌暴发具有扩张速度快、对珊瑚礁损毁程度高的特点 (Mohsen et al., 2012), 在活珊瑚覆盖率大幅下降的区域, 珊瑚砂、珊瑚碎屑等底质急剧增多, 可通过长时序、高频次监测高分遥感影像中珊瑚礁地貌类型的变化, 来评估珊瑚礁退化现象, 进而开展珊瑚礁健康状态监测。

高空间分辨率遥感影像具有长时间、大范围区域覆盖的能力, 能精细表征珊瑚礁地貌的空间、结构等信息, 在珊瑚礁地貌类型提取和健康状况监测等方面具有应用价值 (John et al., 2018; Xu et al., 2021)。Zuo (2017)、董娟 (2020)、张飞飞 (2023) 等基于覆盖南海西沙群岛的GF-2、WorldView-2高分辨率遥感影像开展珊瑚礁地貌类型分类, 证明了利用遥感影像研究珊瑚礁的可行性, 为相关研究提供了新方法。在此基础上, 可进一步开展珊瑚礁健康状况研究, 如逢今朝等 (2021) 基于长时序QuickBird、WorldView-2多源遥感影像, 结合机器学习开展了中国西沙群岛中永乐群岛的珊瑚礁底质类型分类, 并评定了研究区的珊瑚礁白化等级, 研究发现总体时段内14个岛礁中有11个达到重度白化及以上等级, 导致珊瑚礁退化的因素有厄尔尼诺现象、人为活动等; La等 (2022) 使用Landsat TM、Landsat ETM+、Landsat 8多源遥感影像进行了Tiworo海峡保护区珊瑚礁退化研究, 结果发现活珊瑚覆盖面积从1994年的78.30 hm²减少到2019年的8.01 hm², 珊瑚礁退化速率为2.81 hm²/a, 该研究综合评估了经济、生态、社会、法律、技术、制度等因素对珊瑚礁的影响, 认为生态因素为主要致灾因素。上述研究对珊瑚礁退化因素进行了较为系统的探讨, 但多为海表面升温、人类活动影响等综合因素, 对珊瑚生物天敌暴发导致短期珊瑚

礁地貌类型退化探讨较少。

2017年, 南海太平岛珊瑚礁受到黑皮海绵入侵, 最密集处黑皮海绵的覆盖度达27.4% (Yang et al., 2018); 2021年, 长棘海星持续暴发 (Konstantin et al., 2022), 最高密度可达1 920个/hm², 远远高于15个/hm²的暴发阈值, 导致活珊瑚覆盖率从2017年的33%降低到2021年的0.9% (Wei et al., 2022)。在短短5年内发生2次不同种类的珊瑚生物天敌暴发事件, 严重威胁了太平岛的珊瑚礁生态健康。上述相关学者对太平岛黑皮海绵、长棘海星2次暴发事件进行的调查研究, 侧重于单一时间节点的活珊瑚覆盖率状况监测, 未对持续的生物天敌暴发后珊瑚礁地貌变化过程开展详细分析。而通过开展长时序珊瑚礁地貌类型监测, 可反映珊瑚礁覆盖度整体变化, 进而评估珊瑚礁生态系统健康状况。因此, 本文针对太平岛2016—2022年黑皮海绵和长棘海星暴发事件, 选取覆盖太平岛的26期Sentinel-2遥感影像, 结合GF-2 (PMS) 和Google Earth平台的高分辨率遥感影像数据, 开展生物天敌暴发前后珊瑚礁地貌类型分类实验, 从珊瑚礁地貌的类型变化、面积变化、退化率与恢复率等角度分析珊瑚礁地貌类型变迁特征, 评估生物天敌暴发事件对太平岛珊瑚礁生态系统退化的影响。以期为太平岛海域珊瑚礁生态资源保护与研究提供理论依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

中国南海太平岛位于南沙群岛西北部, 具有重要的地理位置和战略意义。本研究区为太平岛及其周边礁盘 (图1), 其地理坐标为10°22′38″ N、114°21′59″ E。太平岛是南沙群岛中最大的、拥有淡水资源的天然岛屿, 出露水面的岛屿由东至西长约1 289.3 m, 南北宽约365.7 m; 海岸线长度为3 470 m, 总面积为360 870 m²; 平均海拔3.8 m, 东部最高达4.18 m, 低潮时可显露出环礁宽约30 m的珊瑚带 (夏小明等, 2012); 水下礁盘大而连续, 平均水温为28.98℃, 其上孕育着丰富的珊瑚礁生态系统。据报道, 2018年太平岛活珊瑚覆盖率在60%~80%, 包括至少9种大型无脊椎动物、35种藻类和46种珊瑚礁^②。有学者曾对南沙群岛55个岛礁从自然、经济、航运、政治、军事、灾害等6个方

^① 活珊瑚覆盖率: 指珊瑚生长覆盖的面积占岛礁总体面积的百分比。

^② 资料来源: <https://www.agriharvest.tw/archives/20987#:~:text=%E5%8D%97%E6%B2%99%E5%A4%AA%E5%B9%B3%E5%B3%B6%E5%91%A8%E9%82%8A%E6%B5%B7,UCN%E6%98%93%E5%8D%B1%E7%89%A9%E7%A8%AE>

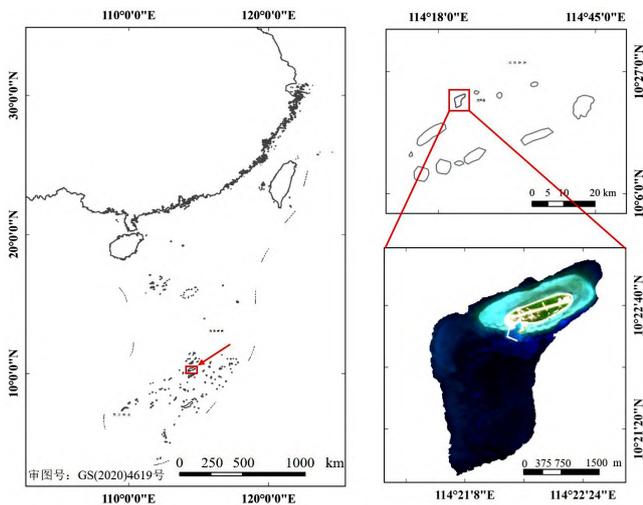


图1 南沙太平岛区位和遥感影像示意

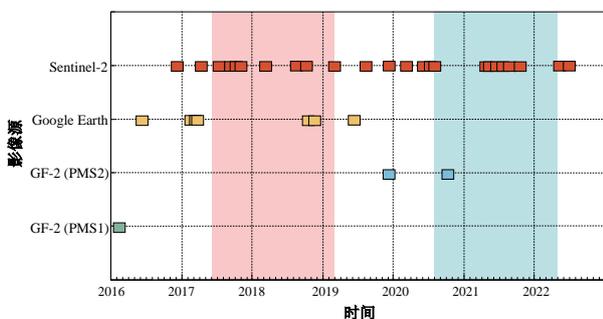
Fig.1 Schematic diagram of the location and remote sensing images of the Taiping Island in Nansha

面的综合价值进行研究, 得出其综合价值评估分值排第四位(李弘毅等, 2018)。

1.2 数据与处理

本文所用遥感数据有空间分辨率为10 m的Sentinel-2影像、4 m GF-2 (PMS) 影像和1 m的Google Earth平台的影像数据, 不同年份对应影像数量分布情况见图2, 影像详细信息见表1。

分类实验数据为Sentinel-2遥感数据, 影像来源为欧空局哥白尼数据中心^③。Sentinel-2影像具有较高的时间分辨率和空间分辨率, Sentinel-2A与Sentinel-2B两颗卫星互补使得重访周期为5 d, 空间分辨率为10 m, 在这种时间分辨率与空间分辨率的



图注: 浅红色底色代表黑皮海绵暴发期; 浅蓝色底色代表长棘海星暴发期。

图2 不同遥感影像数量与成像时间统计

Fig.2 Statistics of the number and imaging time of different remote sensing images

配合下, 可以刻画出较精细的珊瑚礁地貌类型, 适用于面向小尺度上具有高度异质性的珊瑚礁监测。Sentinel-2 L1C (Level-1C) 级数据是经过几何校正的大气表观反射率产品, Sentinel-2 L2A (Level-2A) 级数据是经过辐射定标、大气校正和几何校正的标准数据产品, 对L1C数据进行辐射定标和大气校正处理为L2A级数据后, 所得影像数据可满足本研究需求。Sentinel-2遥感影像的波段2(中心波长为0.490 nm的蓝光波段)、3(中心波长为0.560 nm的绿光波段)可较好穿透水体, 表征水下珊瑚礁地貌信息; 4(中心波长为0.665 nm的红光波段)、8(中心波长为0.842 nm的近红外波段)可有效监测出露水面的珊瑚礁地物信息, 因此选用这4个波段开展2016—2022年珊瑚礁地貌类型长时间序列变化监测。

还采用GF-2 (PMS) 与Google Earth平台的

表1 遥感影像信息

Table 1 Remote sensing image information

影像源	波段号	波段范围/nm	幅宽/km	空间分辨率/m	影像数/景
Sentinel-2	2	458~523	290	10	26
	3	543~578			
	4	650~680			
	8	785~900			
GF-2(PMS)	2	450~520	45	4	3
	3	520~590			
	4	630~690			
GF-2(PMS)	5	770~890	—	—	—
	3	—			
Google Earth	3	—	—	1	8

影像数据作为验证数据的源数据, 其中, GF-2 (PMS) 卫星影像来源于中国海洋卫星数据服务系统, Google Earth平台的影像数据来源于 <https://earth.google.com>, 二者空间分辨率分别为4和1 m, 优于Sentinel-2影像。结合专家解译知识和GF-2 (PMS)、Google Earth平台的高分辨率影像数据, 获取的珊瑚礁地貌类型专家解译结果作为验证数据。

利用ENVI软件中的Radiometric Correction、FLAASH Atmospheric Correction工具对GF-2 (PMS) 数据进行辐射定标、大气校正, 利用Registration工具以Google Earth平台的影像数据为基准对GF-2 (PMS) 数据进行几何校正, 配准误差 < 0.5 像元。最后对太平岛礁体外的区域进行掩膜, 完成影像预处理。

③ <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

2 研究方法

选用2016—2022年覆盖太平岛的26期 Sentinel-2 遥感影像数据作为实验分类数据，基于构建的珊瑚礁地貌类型分类体系，采用SVM分类方法开展珊瑚礁地貌类型分类实验，结合11期 GF-2 及 Google Earth 平台的高分辨率影像获取的专家解译结果，进行珊瑚礁地貌类型分类修正后结果精度评价；在长时间序列珊瑚礁地貌类型分类实验结果的基础上，从珊瑚礁地貌类型变迁、转移面积、珊瑚礁退化率与恢复率等角度开展黑皮海绵和长棘海星暴发影响下的珊瑚礁地貌类型特征变化分析。技术流程如图3所示。

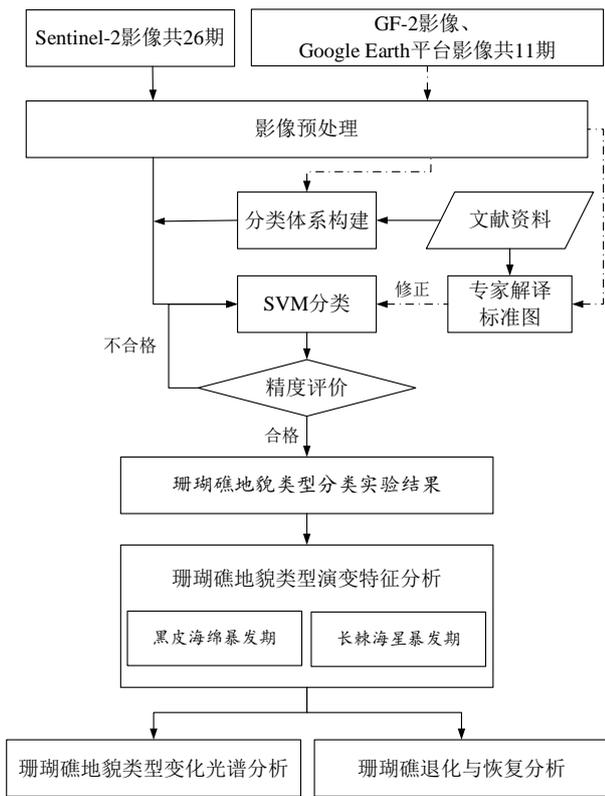


图3 技术流程

Fig.3 Technical flowchart

2.1 太平岛珊瑚礁地貌类型分类体系构建

珊瑚礁地貌类型的分类体系众多，Sarah等(2016)从物理指标如沉积物类型和海水动力成因角度，将其划分为砂质前礁、活珊瑚、固结碎石、藻平面等9类；程益锋等(2018)则从物理指标结合生物指标如生物生长状况角度将其划分为潟湖、礁坪、灰沙岛、礁脊等6个一级类及潟湖盆、点礁、

内礁坪、沙滩等10个二级类；董娟等(2020)将活珊瑚覆盖率纳入分类标准，划分地貌类型为礁坪、向海坡、潟湖、灰沙岛等4个一级类和礁前阶地、礁脊、珊瑚丛生区、珊瑚沉积区等11个二级类。在以上学者分类体系基础上，本文结合太平岛实际情况构建太平岛珊瑚礁地貌类型分类体系(表2)，包括深礁前斜坡、浅礁前斜坡、珊瑚丛生区、稀疏珊瑚沉积区、密集珊瑚沉积区、沙坪、陆地等7类，不同地貌类型示意图4所示。由于黑皮海绵与长棘海星暴发均会造成珊瑚礁退化(Konstantin et al., 2022)，因此通过分析遥感影像中不同珊瑚礁地貌类型的变化，可进行生物天敌暴发下的珊瑚礁生态系统退化监测研究。

结合董娟(2021)活珊瑚覆盖率与珊瑚礁地貌类型的关系，在本文构建的珊瑚礁地貌类型分类体系中，确定活珊瑚覆盖率由高到低的地貌类型顺序为：珊瑚礁丛生区>浅礁前斜坡>密集珊瑚沉积区>稀疏珊瑚沉积区>深礁前斜坡>沙坪=陆地。

2.2 基于SVM的珊瑚礁地貌类型分类方法

2.2.1 分类方法 确定研究区珊瑚礁地貌不同类别后，对预处理后的遥感影像选取不同类别影像区域制作样本，采用ENVI软件的SVM模块进行分类实验。SVM是一种结合核函数和优化理论的线性分类器，通过训练算法建立模型，将选取的训练样本表示为空间上的点，根据映射函数将不同样本划分出尽可能宽的分类平面，测试样本在映射到相同空间后，便可在训练好模型的基础上预测所属类别，从而对影像提供多种类别分类(Nyan et al., 2021)。其公式可表达为：

$$\max_{\alpha} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j K_e(x_i, x_j) \right\} \quad (1)$$

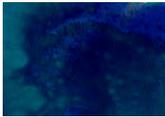
其中， $0 \leq \alpha_i \leq C$ ， $\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0$

式中： $\{x_i, y_j\}$ 为训练样本，其中 x_i 为向量， y_i 属于 $\{-1, +1\}$ ； K_e 为核函数，又称映射函数，可将输入样本映射为更高维样本； α 为拉格朗日系数，其作用是将目标函数与对应的限制条件整合为一个函数， α_i 、 α_j 为对应约束条件的系数； C 为惩罚系数，其大小影响算法的正则化程度。该公式表示对于给定的一组样本 $\{x_i, y_j\}$ 和对应 K_e 、 C ，每个 $y_i = \{-1, +1\}$ 被分为两种类别之一。

该分类方法主要优势为：1) 采用非线性算法将线性不可分样本转化至高维特征空间，重新构建最优分割超平面；2) SVM更适合中小样本数据量

表2 太平岛珊瑚礁地貌类型分类解译标志

Table 2 Classification and interpretation signs of coral reef geomorphology types of the Taiping Island

序号	研究区地貌类型	定义	所含底质	解译标志(Sentinel-2影像)	解译特征
1	深礁前斜坡	岛礁最外缘,坡度0~40°入海,洋流冲刷作用强,极少珊瑚生长,沉积物堆积质较多	生物碎屑、砂石		位于岛礁外侧。深水呈现深蓝色、浅水呈绿色,由于含有暗礁,故有网状纹理特征
2	浅礁前斜坡	深礁前斜坡内,坡度>40°,坡面伴有沟槽,有珊瑚分布及沉积物	礁块、珊瑚碎屑、活珊瑚		位于深礁前斜坡内侧,整体呈深蓝绿色,对岛礁呈现包围状
3	珊瑚丛生区	密集珊瑚沉积区内部,以珊瑚礁及活珊瑚为主	礁块、生物碎屑、活珊瑚		片状分布,整体呈暗绿色,纹理有明显分界
4	稀疏珊瑚沉积区	位于浅礁前斜坡内部,位置较分散,珊瑚礁块沉积较少	珊瑚砂、活珊瑚		面状分布,整体呈较亮的蓝绿色,有棕黑色点状分布
5	密集珊瑚沉积区	围绕珊瑚丛生区形成,坡度较缓,其底部沉积有较多珊瑚断枝	珊瑚砂、活珊瑚、珊瑚碎屑		面状分布,整体呈现灰绿色,有模糊黑色纹状
6	沙坪	浅海处砂质,低潮时出露海面,随海流堆积而成,位置多变	陆源碎屑、生物碎屑、砂石、珊瑚砂		块状分布,整体呈现极亮的淡蓝色,无明显纹理特征
7	陆地	海岸线内,出露于海面之上,表面附有土壤,生长有陆生植物	土壤、植被、砂石		位于岛礁中央,包含较纯净的绿色和白色

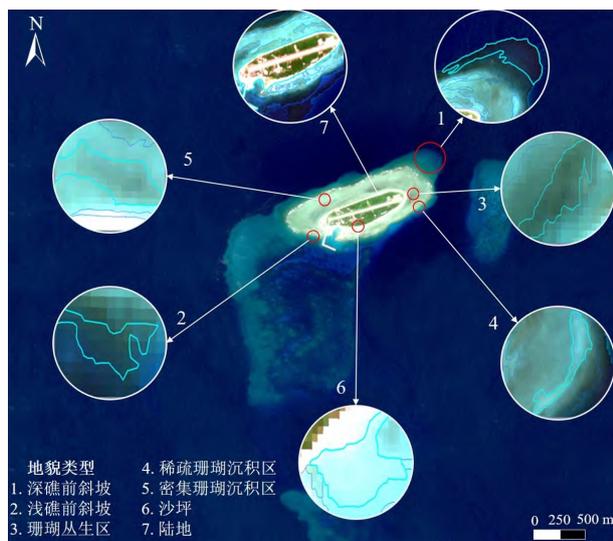


图4 珊瑚礁地貌类型示意(以 Sentinel-2 影像为例)

Fig.4 Schematic diagram of coral reef landform types (Taking Sentinel-2 image as an example)

注: Sentinel-2影像波段组合方式: 3(红)、2(绿)、1(蓝)。

分类,能在样本量较小的情况下更快达到较高精度(Liu et al., 2017)。太平岛研究区珊瑚礁地貌类型的

面积分布,决定其分类样本属于不平衡样本,且不同类型区域在交界处存在相近的颜色、纹理特征,由此采用SVM分类方法,在保证分类精度和分类速度的同时,与专家解译结合从而较好完成分类。对 Sentinel-2 遥感影像进行 SVM 分类后,利用先验地学分类知识,即影像中珊瑚礁地貌类型的空间分层特性、颜色、纹理、位置等解译标志,对分类结果中明显错分的图斑进行修正与优化。

2.2.2 精度评价方法 主要评价指标包括总体精度 (Overall Accuracy, OA)、Kappa 系数,其中 OA 评估分类正确的样本数与总样本数量的比例,OA 值越高,表示分类模型的整体性能越好。Kappa 系数是一种综合评估分类模型分类准确性和随机分类差异的指标,该值越接近 1,表示模型分类准确性越高;越接近 0,表示模型分类结果接近随机分类;越接近 -1,表示模型分类准确性越低。通常, Kappa 系数 > 0.8 被认为是较好的分类结果, 0.6~0.8 为中等, < 0.6 表示分类结果较差。

2.3 珊瑚礁地貌类型时空变化监测方法

对太平岛珊瑚礁地貌类型变化监测主要方式为统计2016—2022年各地貌类型面积，结合马尔科夫转移矩阵（transition matrix by Markov）计算不同地貌类型间相互转移量。转移矩阵各行元素均为非负数，表示不同类型的转移状态，在一定条件下是相互转移的，其本质特征不仅可反映单个地貌类型时空变化情况，还可反映不同类型之间随时间变化的相互转化量，从而进行更深入的珊瑚礁地貌类型变化定量分析（徐新良等，2014）。转移矩阵原理如图5所示。

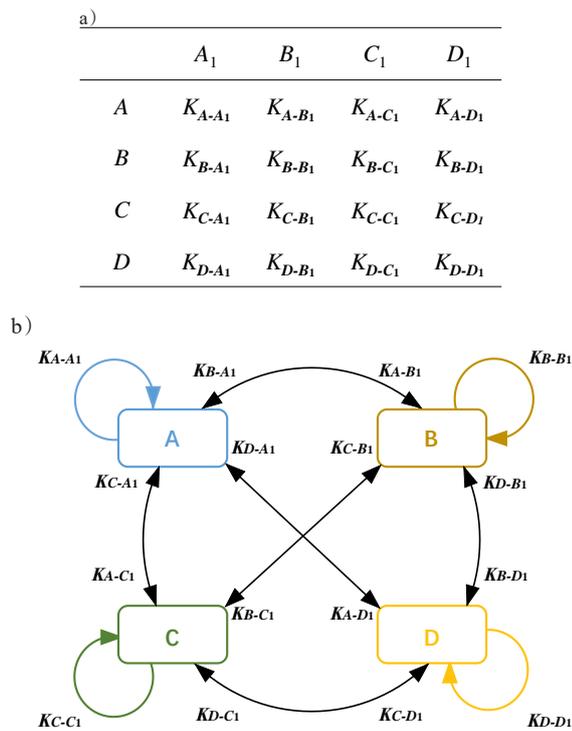


图5 转移矩阵原理 (a. 珊瑚礁地貌类型转移矩阵；
b. 珊瑚礁地貌类型转移量示意)

Fig.5 Schematic diagram of transfer matrix principle (a. Coral reef landform type transfer matrix; b. Schematic diagram of coral reef landform type transfer)

注：K为前一时段至后一时段珊瑚礁地貌转移量，A、B、C、D为前一时段珊瑚礁地貌类型面积， A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 为后一时段珊瑚礁地貌类型面积，由转移矩阵可计算前一时段向后一时段珊瑚礁地貌类型转移量。

2.4 退化与恢复定量计算方法

利用转移矩阵分析不同珊瑚礁地貌类型变化情况，再依据逢今朝等（2021）的方法，将地貌类型由珊瑚礁覆盖率^④高转化为低的过程定义为珊瑚礁

退化，退化面积为DA（Degradation Area），反之为珊瑚礁恢复，恢复面积为RA（Recovery Area）。珊瑚礁退化率DR（Degradation Rate）计算公式为：

$$DR = DA/TA \quad (2)$$

珊瑚礁恢复率（Recovery Rate, RR）计算公式为：

$$RR = RA/TA \quad (3)$$

式中：TA（Total Area）为珊瑚礁地貌类型总面积。

3 结果与分析

3.1 分类结果精度分析与评价

采用专家解译知识和高分辨率遥感影像相结合的方式，针对26期Sentinel-2遥感影像中7种不同的珊瑚礁地貌类型开展SVM分类实验。为保证样本数量，提高分类精度，依据每种珊瑚礁地貌类型的解译特征，最终选择训练样区3 640个，测试样区1 560个，每个样区包含3~6个像元。

不同的珊瑚礁地貌类型在遥感影像中位置、颜色、纹理均呈现明显差异，如浅礁前斜坡与深礁前斜坡相邻，位于内环；沙坪在影像中反射率、亮度较高且位于礁盘之上；稀疏珊瑚沉积区、密集珊瑚沉积区、珊瑚丛生区的亮度依次降低，纹理明显；陆地处于岛礁上中心位置，覆有植被，特征明显，故不同珊瑚礁地貌类型可分性较高。

实验处理过程见图6。选用2种珊瑚礁生物天敌暴发前后6期影像（2016-11-20、2017-06-28、2018-08-27、2019-08-12、2020-06-22、2021-07-12）的分类结果为例，结果见图7。由图7可知，各珊瑚礁地貌类型分类精度存在较为明显的差异性，深礁前斜坡、陆地受珊瑚礁变化影响最小，且解译时区分度较高，故精度稳定且较高；而珊瑚丛生区、沙坪（部分时期）面积占比较小，样本选择时像元数量少，属于小样本分类，影响SVM分类精度。

为保证对太平岛黑皮海绵、长棘海星天敌暴发后珊瑚礁地貌类型影响的后续研究，需结合专家解译知识，对SVM分类后的珊瑚礁地貌类型分类结果进行修正，由此可最大程度去除错分区域（图8）。对该修正后珊瑚礁地貌类型分类结果进行精度评定，得到6期珊瑚礁地貌类型总体精度和Kappa系数均值分别为95.30%和0.89，其中最高分类精度和Kappa系数达96.46%和0.94（表3）。这证明采用

④ 珊瑚礁覆盖率：指有活珊瑚生长覆盖的地貌类型面积占岛礁总体面积的百分比。

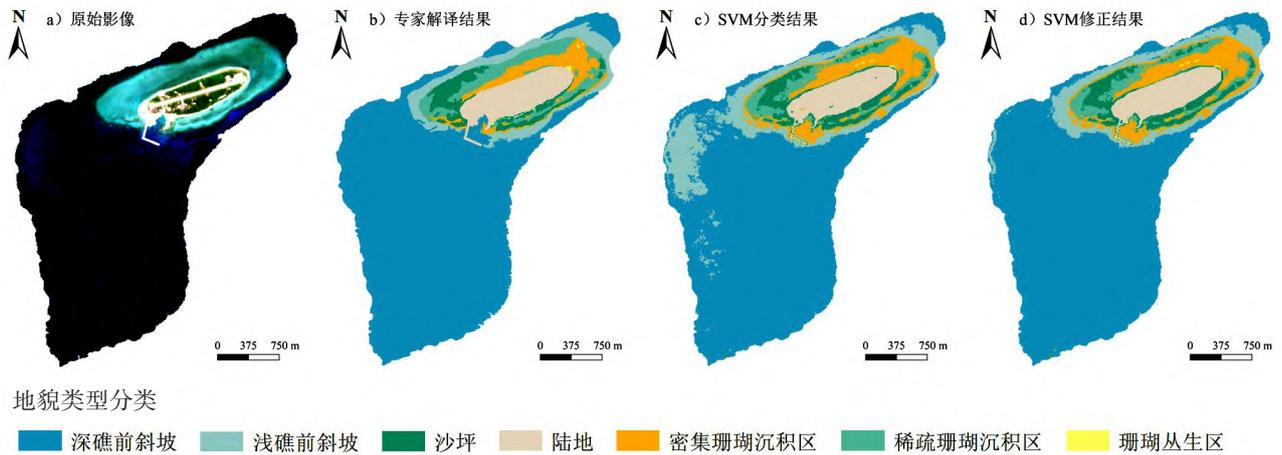


图6 太平岛珊瑚礁地貌类型分类过程 (以2017-06-28所选影像为例)

Fig.6 Classification process of coral reef landform types in Taiping Island (taking the image selected on June 28th, 2017 as an example)

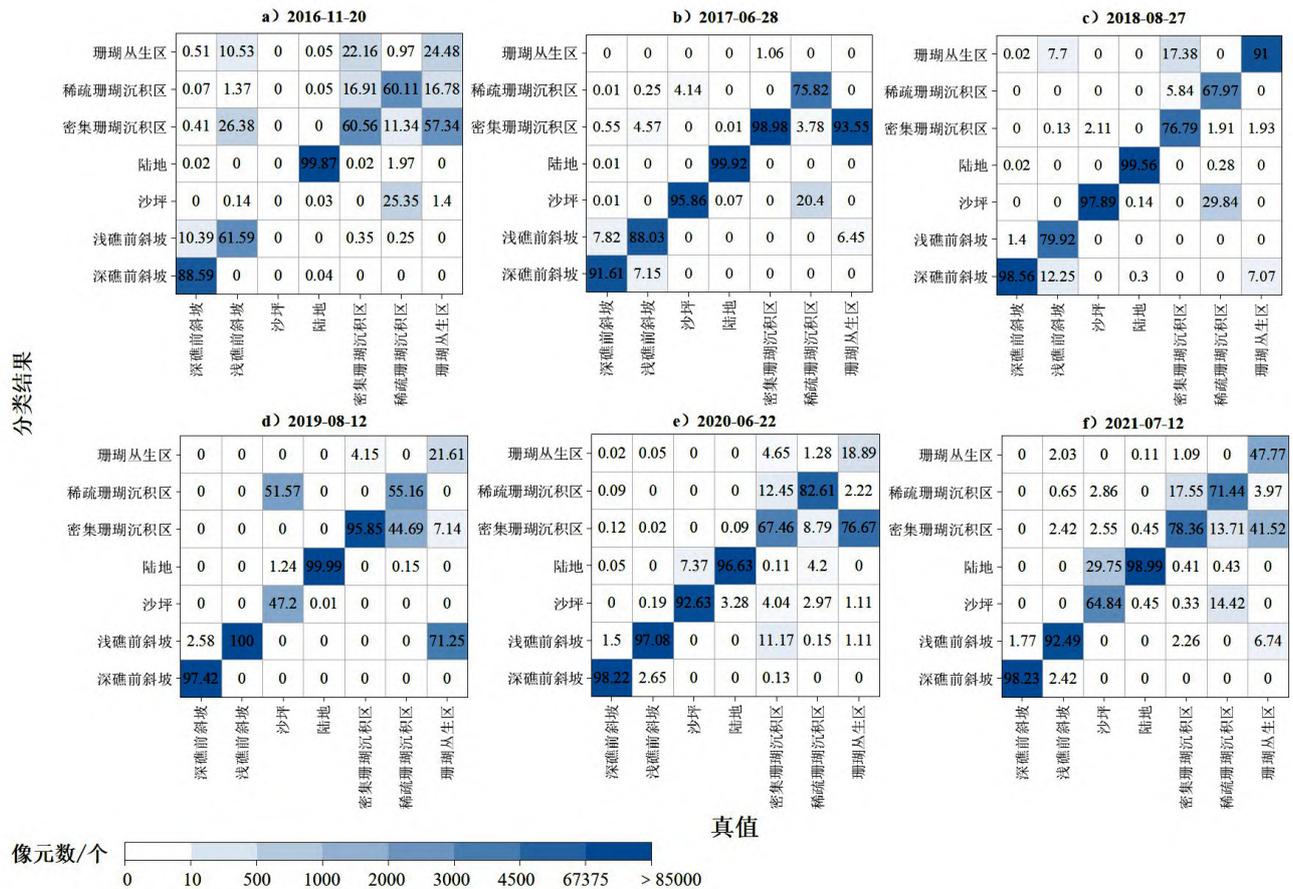


图7 6景影像分类后珊瑚礁地貌类型精度

Fig.7 Accuracy of coral reef landform types after classification of 6 images

SVM结合专家解译进行太平岛珊瑚礁地貌类型分类具有较高准确性,可用于监测珊瑚生物天敌暴发造成的珊瑚礁退化现象。

3.2 黑皮海绵暴发下珊瑚礁地貌类型演变特征分析

2017年5月,在南海太平岛监测到黑皮海绵暴

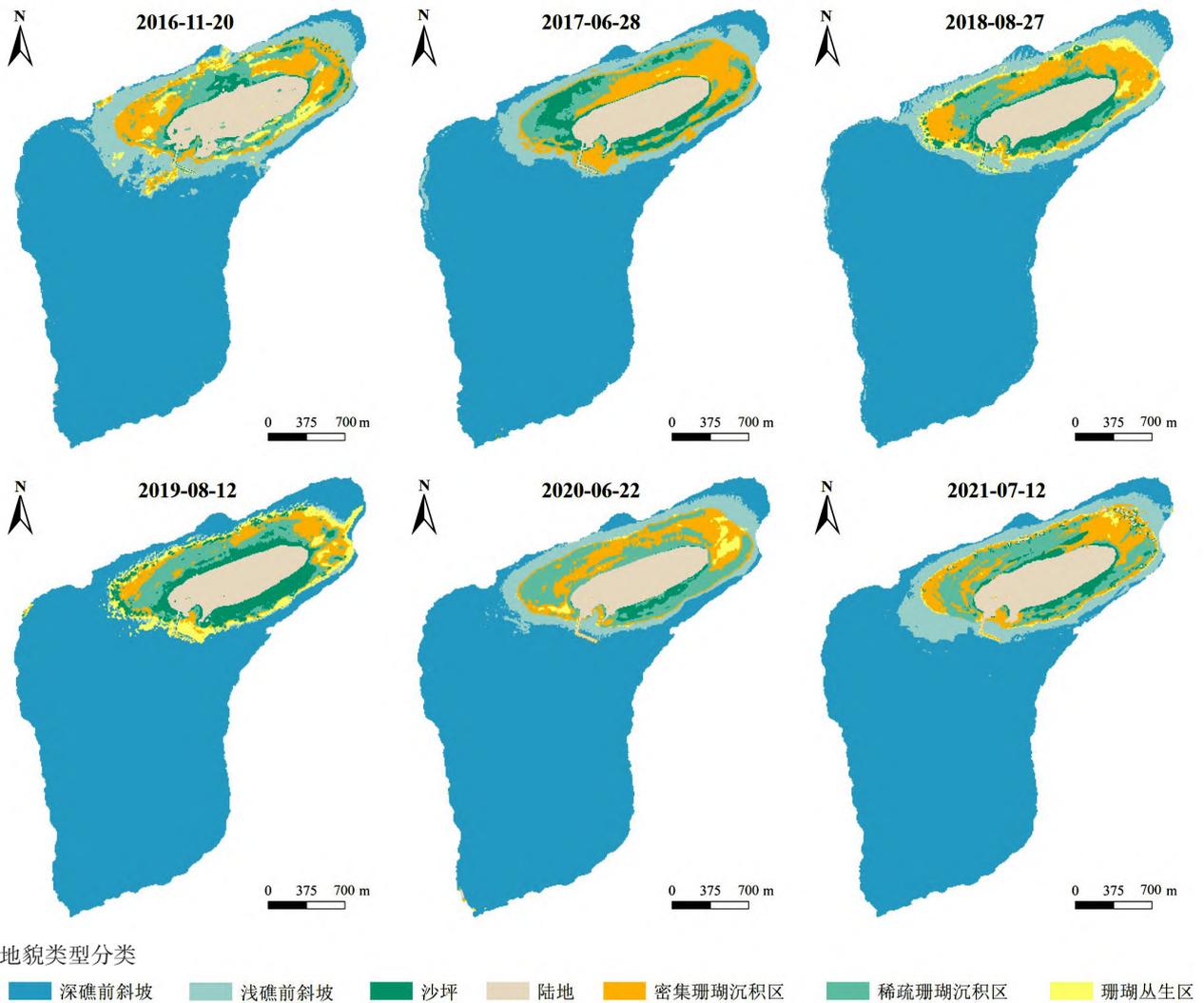


图8 选取影像分类结果

Fig.8 Selected image classification result graph

表3 太平岛珊瑚礁地貌类型精度评定 (专家解译修正后)

Table 3 Precision evaluation table for the landform types of the Taiping Island coral reef (after expert interpretation and correction)

时间	OA/%	Kappa 系数
2016-11-20	92.29	0.87
2017-06-28	95.70	0.93
2018-08-27	96.46	0.94
2019-08-12	94.87	0.91
2020-06-22	96.45	0.86
2021-07-12	96.02	0.85
均值	95.30	0.89

发 (Yang et al., 2018), 通过对该地珊瑚礁生物多样性调查, 得出黑皮海绵的过度扩张覆盖率接近 27.4%。相关研究证明, 黑皮海绵暴发期通常持续 1 月至 1 年, 最长可达 3 年 (Chow et al., 2022), 因

此, 基于 2016-11-20—2019-12-20 的 13 幅影像, 使用 SVM 开展黑皮海绵暴发下珊瑚礁退化遥感监测与分析。需要指出的是, 深礁前斜坡珊瑚覆盖率极低, 实验对比发现, 长期的时间序列影像中其位置、形状变化不明显, 对后续珊瑚礁地貌类型监测与分析影响较小, 故只针对其他 6 种类型进行变化分析。

由图 9 可知, 在 2017-06-28 影像中珊瑚礁覆盖率相对较高的地貌类型受灾严重, 稀疏珊瑚沉积区面积的变化趋势与密集珊瑚沉积区并不完全一致, 但在之后下一时段的 2017-09-16 统计中的面积也经历了明显减少, 相比均值 (38.26 hm²) 下降了 18.10 hm²; 密集珊瑚沉积区面积在 2017-06-28 影像中显示有明显下降, 相较于均值 (57.64 hm²) 下降

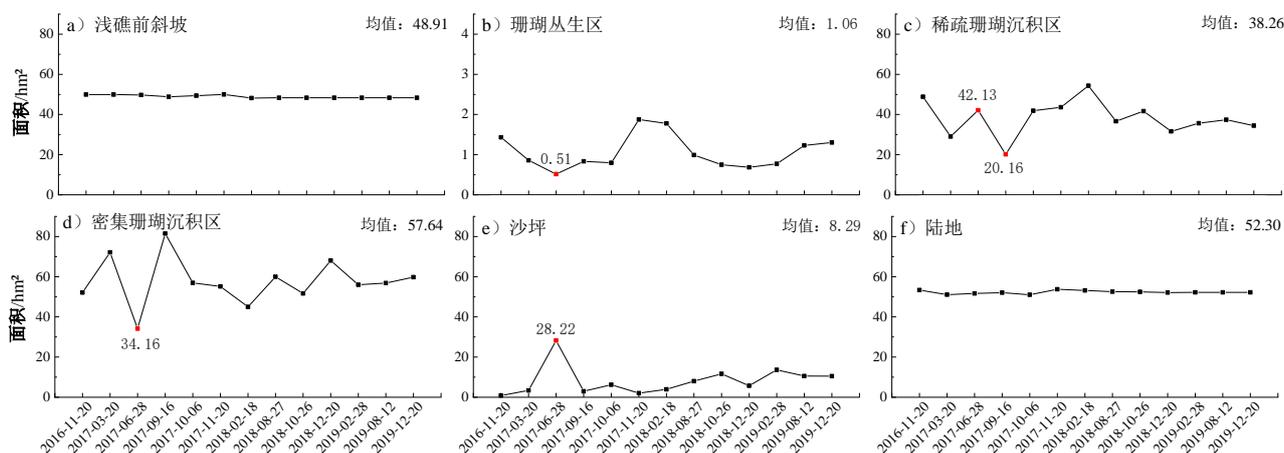


图9 2016—2019年太平岛珊瑚礁地貌类型面积变化

Fig.9 Statistics of changes in the area of the Taiping Island coral reef landform types from 2016 to 2019

了23.48 hm²；而沙坪则在2017-06-28有明显上升，指示沙坪面积有异常增加，相较均值（8.29 hm²）增加了19.93 hm²；珊瑚丛生区活珊瑚覆盖率最高，在2017-06-28该地貌类型的面积有较明显的下降，2017-11-20—2018-02-18珊瑚丛生区有一增加的峰值随后回落至均值（1.06 hm²）；因陆地周围围绕沙坪，故其面积受沙坪影响略有变化；浅礁前斜坡面积无较大变化。

与2016-11-20初始状态相比，2017-6-28后太平岛各珊瑚礁地貌类型变化达到峰值：珊瑚丛生区面积降低64.10%，密集珊瑚沉积区降低34.43%，稀疏珊瑚沉积区降低13.71%，即珊瑚礁覆盖率高的地貌类型都受到较大破坏；而无活珊瑚覆盖的沙坪面积有激增情况，增幅达3327.59%。陆地、浅礁前斜坡变化较小，为-1.6%、-0.39%。因此以影像2017-06-28为黑皮海绵暴发节点^⑤。

根据影像分类结果，得到珊瑚礁地貌类型变迁转移矩阵（表4、5，对应转移矩阵变迁情况请见附件-a）。

由表4可知，起始监测时间2016-11-20与时间节点2017-06-28相比，变化较大的珊瑚礁地貌类型集中于稀疏珊瑚沉积区、沙坪、密集珊瑚沉积区。密集珊瑚沉积区向沙坪转移量为12.66 hm²，稀疏珊瑚沉积区向沙坪转移量12.97 hm²，而沙坪向密集/稀疏珊瑚沉积区转移量合计不足1 hm²。除此之外，面积占比较小的珊瑚丛生区在转移为沙坪量为0.51 hm²，也证实了该时段呈珊瑚覆盖率高的珊瑚礁地

表4 2016-11-20—2017-06-28太平岛珊瑚礁地貌类型变迁转移矩阵

Table 4 Transition matrix of changes in coral reef geomorphic types on the Taiping Island during November 20th, 2016 to June 28th, 2017

面积转化量 2016-11-20 地貌类型	2017-06-28地貌类型						总计
	陆地	密集珊瑚沉积区	浅礁前斜坡	沙坪	珊瑚丛生区	稀疏珊瑚沉积区	
陆地	50.46	0.52	0	1.55	0.16	0.39	53.08
密集珊瑚沉积区	0	19.16	1.02	12.66	0.25	19.01	52.10
浅礁前斜坡	0	0.59	48.71	0.25	0	0.38	49.93
沙坪	0	0	0	0.28	0	0.54	0.82
珊瑚丛生区	0.03	0.43	0	0.51	0	0.46	1.43
稀疏珊瑚沉积区	0.94	13.46	0	12.97	0.11	21.35	48.83
总计	51.43	34.16	49.73	28.22	0.51	42.13	206.19

表5 2017-06-28—2019-12-20太平岛珊瑚礁地貌类型变迁转移矩阵

Table 5 Transition matrix of changes in coral reef geomorphic types on the Taiping Island during June 28th, 2017 to December 20th, 2019

面积转化量 2017-06-28 地貌类型	2019-12-20地貌类型						总计
	陆地	密集珊瑚沉积区	浅礁前斜坡	沙坪	珊瑚丛生区	稀疏珊瑚沉积区	
陆地	50.17	0.04	0	1.07	0	0.25	51.52
密集珊瑚沉积区	0.26	19.77	0.08	3.00	0.49	10.56	34.16
浅礁前斜坡	0	1.84	47.18	0	0	0.71	49.73
沙坪	1.03	16.12	0.45	4.17	0.02	6.42	28.22
珊瑚丛生区	0.11	0.17	0	0.15	0	0.09	0.51
稀疏珊瑚沉积区	0.55	21.80	0.47	2.13	0.79	16.40	42.13
总计	52.11	59.74	48.19	10.51	1.30	34.43	206.28

⑤ 不等于实际暴发时间，影像获取时间代表的是这一时间点的状况信息，而具体一段时间的整体情况及变化趋势须通过多时相以及多源数据才能完整掌握。

貌类型向低珊瑚覆盖率高的珊瑚礁地貌类型转移的趋势。由表 5 可知，2017-06-28 至监测时段末 2019-12-20，珊瑚礁覆盖率有所提高，沙坪向其他珊瑚礁地貌类型转移总量为 28.22 hm²，其他转为沙坪总量则为 10.51 hm²，沙坪整体呈现减少趋势，珊瑚礁在黑皮海绵暴发后有逐年恢复趋势。

通过统计 2016—2019 年黑皮海绵暴发后的珊瑚礁地貌类型变化增减情况（表 6）发现，研究区珊瑚礁地貌类型在黑皮海绵暴发前后的 3—10 月变化显著，2017-03-20 影像中已有密集珊瑚沉积区和稀疏珊瑚沉积区剧烈变化。这与 Siti 等（2021）的研究相吻合：黑皮海绵扩展速率在暖季（4—10 月）较快，凉季（11 至次年 3 月）较慢，即黑皮海绵在不同月份和不同季节的扩展速率可能存在差异。

表 6 黑皮海绵暴发研究时段太平岛珊瑚礁地貌类型增减统计

Table 6 Changes in coral reef geomorphic types on the Taiping Island during the period of Terpios hoshinota sponge outbreak study hm²

时间	陆地	密集珊瑚沉积区	浅礁前斜坡	沙坪	珊瑚丛生区	稀疏珊瑚沉积区
2016-11-20	53.35	52.10	49.93	0.82	1.43	48.83
2017-03-20	-2.29	20.05	-0.02	2.57	-0.57	-19.78
2017-06-28	0.59	-37.99	-0.18	24.83	-0.34	13.09
2017-09-16	0.43	47.34	-0.90	-25.23	0.32	-21.97
2017-10-06	-1.05	-24.55	0.53	3.23	-0.04	21.72
2017-11-20	2.72	-1.78	0.61	-4.17	1.08	1.72
2018-02-18	-0.56	-10.16	-1.79	1.89	-0.10	10.72
2018-08-27	-0.62	14.97	0.13	4.10	-0.79	-17.66
2018-10-26	-0.09	-8.33	0	3.63	-0.24	5.04
2018-12-20	-0.33	16.38	0	-5.92	-0.06	-10.06
2019-02-28	0.06	-12.03	0	7.88	0.09	4.00
2019-08-12	0	0.86	0	-3.06	0.46	1.74
2019-12-20	0	2.91	0	-0.04	0.07	-2.94

注：正值表示以 2016-11-20 面积为基准增加；负值表示以 2016-11-20 面积为基准减少；加粗显示表示面积变化量超过对应珊瑚礁地貌类型基准面积的 20%。

以 2016-11-20 中各珊瑚礁地貌类型面积为基准（见表 6）进行分析，可知密集珊瑚沉积区的减少比例最高，为 72.92%；珊瑚礁丛生区次之，为 55.24%；稀疏珊瑚沉积区第三，为 44.99%。

3.3 长棘海星暴发下珊瑚礁地貌类型演变特征分析

由 Wei 等（2022）的 2021 年 4 月实地考察记录显示，太平岛上 6 个站点、共 12 个样带（样带长度为 50 m）发现长棘海星分布的平均密度为 630 个/hm²，最高可达 1 920 个/hm²，大规模暴发的长棘海

星使得珊瑚礁遭到严重破坏，该现象引发的珊瑚礁地貌类型变化在遥感影像上体现更为直观。在本文实验中选用 2020-02-13—2022-06-07 共 13 幅影像作为研究时段二。

由图 10 可知，珊瑚礁覆盖率高的地貌类型面积在 2021 年 3 月开始有不同程度的变化。图 10-c 所示，稀疏珊瑚沉积区面积在 2021-03-29 有一谷值，面积减少了 7.43 hm²，相当于稀疏珊瑚沉积区在该时段面积均值（41.19 hm²）的 36.08%，在 2021-04-28 有一暂时性的增加，随后呈下降趋势；而密集珊瑚沉积区面积在 2021-03-29 出现异常升高，但在之后的 2021-04-21 急剧下降，下降了 13.56 hm²，表明该珊瑚礁地貌类型在受到强扰动后面积有所减少，到同年 9 月份缩减至最低，较均值（50.55 hm²）减少近 1/4；沙坪面积在 2021-03-29—07-21 呈递增趋势，增加了 17.16 hm²，接近原面积的 3 倍；珊瑚丛生区的面积变化有所滞后，于 2021-07-21 达最低，但同年 9 月 25 日有一异常升高，与稀疏珊瑚丛生区的变化一致，这一异常可能是长棘海星暴发后种群聚集，导致影像中产生与珊瑚礁地貌类型相似特征。进一步分析可发现，与 2020-02-13 初始状态相比，2021-06-28 后，珊瑚礁覆盖率较高的密集珊瑚沉积区下降量最大，为 22.46%，但降幅较黑皮海绵暴发后小；沙坪面积增加最多，达到 70.52%。

根据影像分类结果，得到珊瑚礁地貌类型变迁转移矩阵（表 7、8，对应转移矩阵变迁情况图请见附图-b）。

由表 7、8 可知，在长棘海星暴发影响下，面积最大变化集中于密集珊瑚沉积区、稀疏珊瑚沉积区、沙坪。长棘海星暴发前期（2020-02-13—2021-06-27），密集珊瑚沉积区转移为稀疏珊瑚沉积区占比较大，转移量为 20.42 hm²，稀疏珊瑚沉积区向密集珊瑚沉积区转移量为 12.11 hm²；同时稀疏珊瑚沉积区和密集珊瑚沉积区向沙坪转移量在长棘海星暴发后有所减少。长棘海星暴发后期（2021-06-27—2022-06-07）珊瑚礁覆盖率高的地貌类型转移为珊瑚礁覆盖率低的类型面积均未超过 10 hm²，且珊瑚礁覆盖率高的地貌类型面积开始有所增加，如最高增加量为由稀疏珊瑚沉积区转移为密集珊瑚沉积区的 18.23 hm²。

以 2020-02-13 中各地貌类型面积为基准（表 9）分析发现，珊瑚丛生区的减少量占原本面积比例最高，达 59.17%，稀疏珊瑚沉积区减少量次之，达 34.91%，密集珊瑚沉积区减少量第三，为 23.97%。

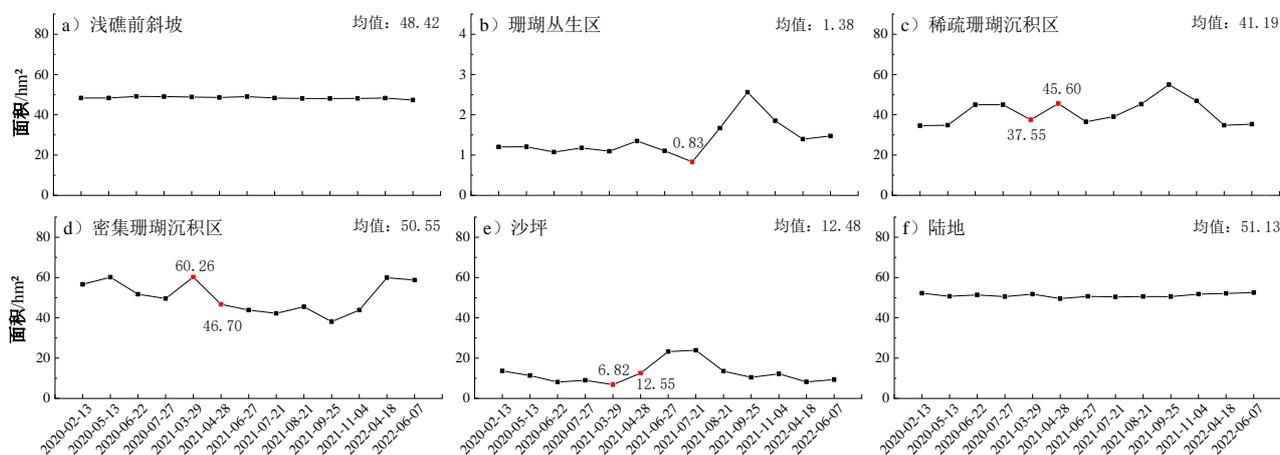


图10 2020—2022年太平岛珊瑚礁地貌类型面积变化统计

Fig.10 Statistics of changes in the area of the Taiping Island coral reef landform types from 2020 to 2022

表7 2020-02-13—2021-06-27 太平岛珊瑚礁地貌类型变迁转移矩阵

Table 7 Transition matrix of changes in coral reef geomorphic types on the Taiping Island during February 13th, 2020 to June 27th, 2021

面积转化量	2021-06-27地貌类型						总计
	陆地	密集珊瑚沉积区	浅礁前斜坡	沙坪	珊瑚丛生区	稀疏珊瑚沉积区	
2020-02-13地貌类型							
陆地	48.75	0.51	0	2.38	0	0.20	51.85
密集珊瑚沉积区	0.06	29.81	2.92	2.53	0.76	20.42	56.5
浅礁前斜坡	0	0	45.92	0	0	0.32	46.24
沙坪	1.15	0.65	0	10.52	0	1.30	13.63
珊瑚丛生区	0	0.80	0	0.02	0.34	0.03	1.20
稀疏珊瑚沉积区	0.31	12.11	0.15	7.78	0	14.25	34.6
总计	50.28	43.88	48.99	23.24	1.11	36.52	204.02

表8 2021-06-27—2022-06-07 太平岛珊瑚礁地貌类型变迁转移矩阵

Table 8 Transition matrix of changes in coral reef geomorphic types on the Taiping Island during June 27th, 2021 to June 7th, 2022

面积转化量	2022-06-07地貌类型						总计
	陆地	密集珊瑚沉积区	浅礁前斜坡	沙坪	珊瑚丛生区	稀疏珊瑚沉积区	
2021-06-27地貌类型							
陆地	49.98	0.06	0	0.46	0	0.15	50.65
密集珊瑚沉积区	0.15	31.40	0.54	1.29	0.74	9.76	43.88
浅礁前斜坡	0	2.19	46.38	0	0	0.45	49.02
沙坪	1.73	6.43	0.05	6.16	0	8.86	23.24
珊瑚丛生区	0	0.38	0	0	0.72	0	1.11
稀疏珊瑚沉积区	0.44	18.23	0.36	1.38	0	16.12	36.52
总计	52.30	58.70	47.32	9.29	1.47	35.34	204.42

这与长棘海星的食性高度吻合，珊瑚礁覆盖率高的地貌类型成为受灾最为严重的区域。

综上所述，黑皮海绵与长棘海星暴发前后太平岛珊瑚礁地貌类型的变化过程中，与活珊瑚覆盖率呈正相关的密集珊瑚沉积区、稀疏珊瑚沉积区、珊瑚丛生区在实地调查报道时间点前后均有异常，以减少为主，黑皮海绵对密集珊瑚沉积区的破坏程度达72.92%，该珊瑚礁地貌类型退化面积约为37.99 hm²；而长棘海星对珊瑚丛生区破坏程度达59.17%，该珊瑚礁地貌类型退化面积约为0.71 hm²。这说明2

种珊瑚生物天敌暴发后对太平岛的珊瑚礁地貌类型影响显著，生态健康状况有明显退化趋势。

4 讨论

4.1 珊瑚生物天敌暴发致不同珊瑚礁地貌类型变化光谱对比

选取太平岛 Sentinel-2 影像中4个包含不同珊瑚礁地貌类型的区域，进行典型区域光谱变化对比分析。由于多光谱影像中每个波段光谱标准差可表现像元反射率在空间中的变化，进而反映珊瑚礁健康

表9 长棘海星暴发研究时段太平岛各珊瑚礁地貌类型增减统计

Table 9 Changes in each coral reef geomorphic type on the Taiping Island during the period of crown-of-thorns starfish outbreak study hm²

时间	陆地	密集珊瑚沉积区	浅礁前斜坡	沙坪	珊瑚丛生区	稀疏珊瑚沉积区
2020-02-13	52.20	56.58	48.32	13.63	1.20	34.60
2020-05-13	-1.55	3.60	0	-2.29	0.01	0.23
2020-06-22	0.71	-8.47	0.79	-3.21	-0.13	10.16
2020-07-27	-0.85	-2.14	-0.08	0.89	0.10	-0.01
2021-03-29	1.27	10.68	-0.19	-2.19	-0.08	-7.43
2021-04-28	-2.25	-13.56	-0.26	5.72	0.25	8.05
2021-06-27	1.15	-2.82	0.46	10.69	-0.24	-9.07
2021-07-21	-0.31	-1.66	-0.69	0.67	-0.27	2.53
2021-08-21	0.19	3.26	-0.24	-10.37	0.84	6.26
2021-09-25	-0.02	-7.41	0	-3.10	0.89	9.64
2021-11-04	1.23	5.76	0.05	1.73	-0.71	-8.08
2022-04-18	0.35	16.09	0.13	-3.94	-0.46	-12.08
2022-06-07	0.42	-1.19	-0.93	1.06	0.08	0.55

注：正值表示以2020-02-13面积为基准增加；负值表示以2020-02-13面积为基准减少；加粗显示表示面积变化量超过对应珊瑚礁地貌类型基准面积的20%。

与退化变化规律，即珊瑚退化后可见光反射率升高，光谱标准差先波动变化后波形趋于平滑（陈启东等，2015），该现象可指示珊瑚礁地貌类型发生不同变化。由典型区域影像及反射率标准差变化可知，典型区 I ~IV 在黑皮海绵暴发期间有 3 次较明显的光谱标准差波动升高，参考线①、②、③分别对应 2017-06-28、2018-02-18、2019-02-18；长棘海星暴发期间有 2 次较明显的光谱标准差波动升高，参考线④、⑤分别对应 2021-03-29、2021-09-25（图 11）。

在起始时间 2016-11-20 影像中，典型区 I 主要地貌类型为密集珊瑚沉积区和稀疏珊瑚沉积区，典型区 II 包含较多地貌类型：陆地、稀疏珊瑚沉积区、密集珊瑚沉积区、珊瑚丛生区、浅礁前斜坡，典型区 III 包含大部分密集珊瑚沉积区和少部分稀疏珊瑚沉积区、浅礁前斜坡，典型区 IV 全部为密集珊瑚沉积区。

在黑皮海绵暴发期，典型区 I、III 在参考线①处有光谱标准差波动升高现象，与起始时间 2016-11-20 影像中个典型区的主要地貌类型相比，2 个典型区的稀疏珊瑚沉积区有所扩大；在参考线②处典型区 I、IV 有明显光谱标准差波动升高现象，典型区 I 主要地貌类型转移为稀疏珊瑚沉积区和沙坪，典型区 IV 转移为密集珊瑚沉积区与稀疏珊瑚沉积区各占一半，由此说明，参考线①、②对应的时间节点有珊瑚礁退化现象；在参考线③处典型区 III、IV 有明显光谱标准差波动升高现象，典型区 III 在该时间节点影像中密集珊瑚沉积区占主体，典型区 IV 则除密集珊瑚沉积区与稀疏珊瑚沉积区外，还新增了

沙坪，说明该时间节点不同典型区珊瑚礁恢复与退化同时发生。

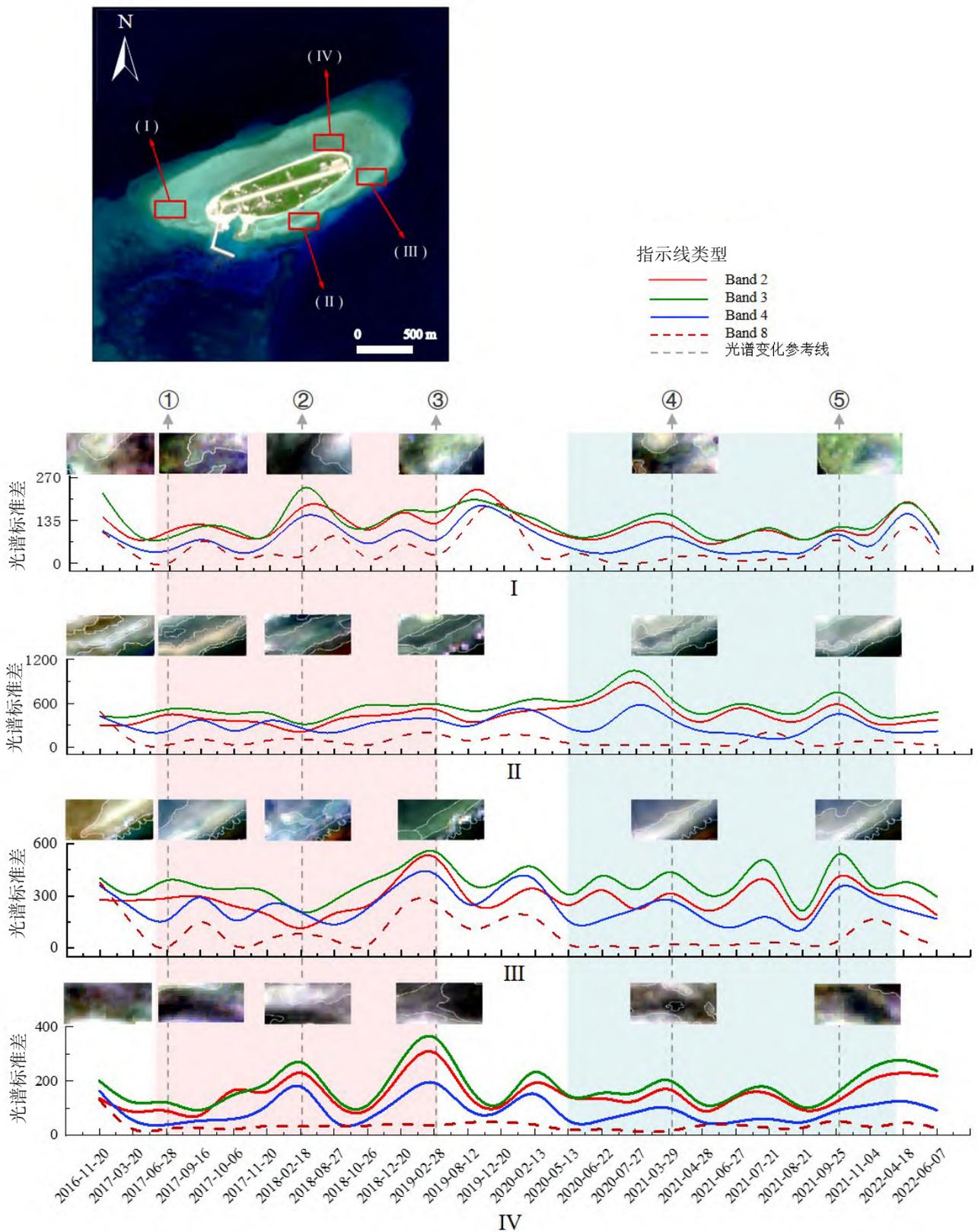
在长棘海星暴发期，典型区 I、II、III 在参考线④处均有光谱标准差波动变化，典型区 I 转移为起始类型（位置有所变化），表明珊瑚礁有所恢复，典型区 II 多了沙坪，典型区 III 为稀疏珊瑚沉积区占主体，表明珊瑚礁有所退化；典型区 II、III 在参考线⑤处均达到峰值，典型区 II 沙坪有所扩大，典型区 III 不含有珊瑚丛生区、沙坪地貌类型，表明珊瑚礁既有退化也有恢复现象。

以上地貌类型转移指示参考线①、②、④处的时间段珊瑚礁有退化现象，参考线③、⑤处对应珊瑚礁既有退化也有恢复现象。由此证明黑皮海绵与长棘海星暴发前期珊瑚礁以退化为为主，而后期珊瑚礁既有退化也有恢复趋势。

4.2 珊瑚礁退化与恢复分析

基于太平岛 SVM 分类实验珊瑚礁地貌类型特征演变结果，进一步分析南海太平岛珊瑚礁地貌类型总体退化与恢复率（图 12）。

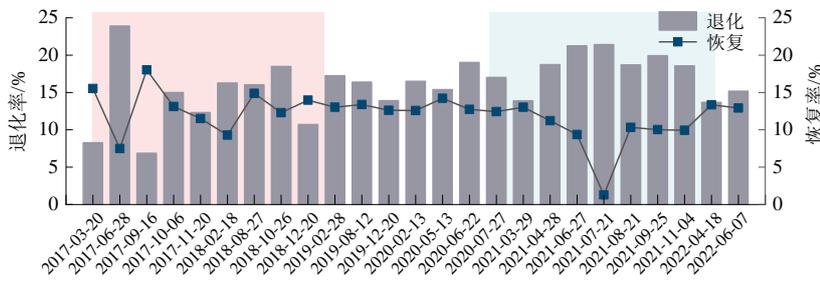
由图 12 可知，2016—2022 年太平岛珊瑚礁总体退化率高于恢复率，平均珊瑚礁退化率为 16.18%，平均珊瑚礁恢复率为 11.94%；其中 2016—2019 年黑皮海绵暴发期间，太平岛的珊瑚礁退化率最高达到 23.76%，在峰值之后珊瑚礁退化率有所下降，而珊瑚礁恢复率由较低水平升至 22.48%。这说明黑皮海绵在暴发后接近 2 年时间内，对珊瑚的影响有所减弱，或是珊瑚的适应性有所增强，部分珊瑚从退化中恢复。在 2020—2021 年长棘海星暴发前期的珊瑚礁退化率为最高为 17.32%，珊瑚礁恢复



图注：浅红色底色表示黑皮海绵暴发期；浅蓝色底色表示长棘海星暴发期。

图 11 典型区域影像及反射率标准差变化

Fig.11 Typical regional images and changes in reflectance standard deviation



图注：浅红色底色：黑皮海绵暴发期，浅蓝色底色：长棘海星暴发期。

图 12 珊瑚生物天敌暴发期间太平岛珊瑚礁退化率与恢复率统计

Fig.12 Statistical graph of coral reef degradation and recovery rates on the Taiping Island during the outbreak period of coral biological predators

率与黑皮海绵暴发前期相近；在 2021—2022 长棘海星暴发后期珊瑚礁退化率最高达 21.25%，珊瑚礁恢复率有所上升但不及黑皮海绵暴发后期。黑皮海绵暴发事件后，长棘海星暴发，此时的珊瑚礁虽有所恢复但其群落结构发生较大变化，供给长棘海星的珊瑚礁食物已大幅减少。在 2016—2022 年，太平岛珊瑚礁总体退化率高于恢复率，其中 2017 年 3—6 月珊瑚礁退化率最高，为 23.88%；在 2017 年 6—9 月珊瑚礁恢复率最高，为 18.03%。

综上，可以发现不同生物天敌暴发对珊瑚的影响存在差异。黑皮海绵暴发后珊瑚礁退化率较高，对珊瑚礁地貌类型的影响程度较大，而长棘海星暴发后珊瑚礁退化率和恢复率均较低，对珊瑚礁地貌类型的影响程度相对较小。因此，珊瑚在面对不同暴发天敌种类时表现出不同的适应性和反应机制，这些差异可能与珊瑚的生物学特性、暴发天敌的生态位、以及珊瑚和暴发天敌之间的相互作用等因素有关。

由图 13 可知，太平岛沙坪经历珊瑚生物天敌暴发事件后面积显著增加，由总面积的 0.4% 增至 4.5%；稀疏珊瑚沉积区面积有较明显减少，由 23.6% 降至 17.3%，密集珊瑚沉积区有微小增加，而珊瑚丛生区、陆地和浅礁前斜坡变化较小。

4.3 其他潜在因素对 2016—2022 年太平岛珊瑚礁退化影响分析

珊瑚礁生态系统健康的其他潜在因素主要有海表面

温度 (Surface Sea Temperature, SST)、人类活动、台风及风暴潮等。

4.3.1 SST 影响 温度是导致珊瑚礁退化的重要因素之一，同时温度升高对黑皮海绵大量繁殖和长棘海星幼虫孵化也有促进作用，易引起季节性生物种群暴发。根据 2016—2022 年的太平岛 SST 数据统计表明，SST 具有周期变化规律，温度最低值位于 2—3 月，5—6 月达到最大值 (图 14)。

造礁珊瑚最适宜生长温度为 25~29℃，36℃ 为最高极限温度，在黑皮海绵与长棘海星暴发的 2 个关键时间段 (2017 年 4 月—2019 年 2 月、2020 年 7 月—2022 年 4 月) 处于珊瑚礁生长的适宜温度，并且超过 29℃ 的天数热累

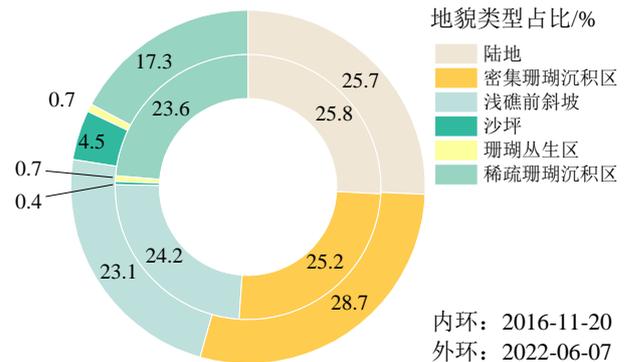
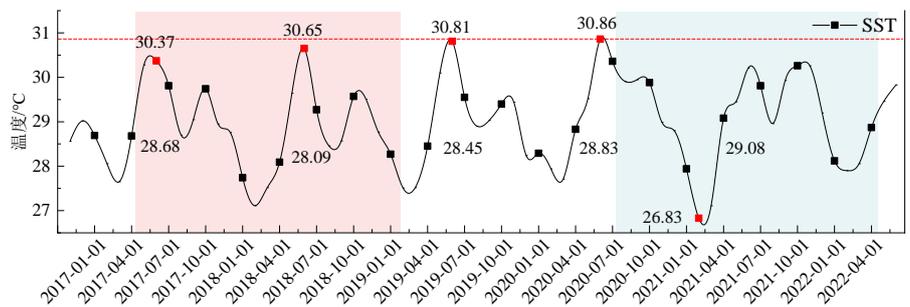


图 13 2016—2022 年太平岛珊瑚礁地貌类型占比统计
Fig.13 Statistical analysis of coral reef geomorphic type proportions on the Taiping Island from 2016 to 2022



图注：红线表示最高温参考线，浅红色底色表示黑皮海绵暴发期，浅蓝色底色表示长棘海星暴发期。

图 14 2016—2022 年中国南海太平岛 SST 年均变化
Fig.14 Annual average change of SST on the Taiping Island in the South China Sea from 2016 to 2022

积效应未达到珊瑚礁热阈值（高于全球长期最热月海温 1°C ），因此在研究时间段内，温度不是导致太平岛珊瑚礁地貌类型退化的主要因素。

4.3.2 人为活动影响 太平岛在2016—2022年人迹罕至，岛上建筑设施较为稳定，无人扩张（见图9-f、10-f）；岛上有驻扎人员，但没有以养殖为主的渔民，因而大范围破坏珊瑚礁群的人类捕捞活动极少。故人为影响也不是造成珊瑚礁在某一时间点发生急剧退化的主要因素。

4.3.3 台风及风暴潮影响 中央气象台·台风网^⑥记录了2016—2022年经过中国海域的全部台风路径信息。当台风经过珊瑚岛礁附近时，其能量通过海流、海浪传播到珊瑚岛礁区域，受到地形的影响，会产生较大消耗，从而减少对珊瑚礁的冲击，对珊瑚礁地貌类型影响较小；同时珊瑚礁生态系统本身具有一定的抗风浪的能力，故在本文认为台风也不是造成2016—2022年太平岛珊瑚礁急剧退化现象的主要因素。

综上，SST、人为活动和台风及风暴潮灾害不是2016—2022年影响太平岛珊瑚礁受损退化主要因素。

5 结论

以南海太平岛为研究区，基于2016-11-20—2022-06-07的26期Sentinel-2遥感影像，利用SVM分类方法，开展了7种珊瑚礁地貌类型信息提取。在此基础上，分析珊瑚礁地貌类型变迁特征，评估生物天敌暴发事件对珊瑚礁生态系统退化的影响。结果表明：1）结合专家解译知识和SVM分类算法获取的珊瑚礁地貌类型分类结果，最高总体精度和Kappa系数分别为96.46%和0.94。2）2017年4月—2019年2月是黑皮海绵暴发期，至2017年6月黑皮海绵对太平岛珊瑚礁地貌类型影响程度达到最大，造成密集珊瑚沉积区、珊瑚礁丛生区和稀疏珊瑚沉积区分别减少72.92%、55.24%、44.99%。3）2020年7月—2022年4月是长棘海星暴发期，至2021年6月长棘海星对太平岛珊瑚礁地貌类型影响程度最大，造成珊瑚丛生区、稀疏珊瑚沉积区、密集珊瑚沉积区分别减少59.17%、34.91%、23.97%。4）在2016—2022年太平岛珊瑚生物天敌暴发事件期间，平均珊瑚礁退化率为16.18%，最高达23.88%，发生在2017年3—6月；平均珊瑚礁恢复

率为11.94%，最高达18.03%，发生在2017年6—9月。总体珊瑚礁退化率高于恢复率。

在生物天敌暴发期间，珊瑚礁地貌类型处于退化和恢复动态过程，整体上呈现退化趋势。本文对太平岛珊瑚生物天敌暴发造成的珊瑚礁地貌类型变化总体情况进行量化分析，表明遥感手段结合珊瑚礁地貌类型分类方法可作为监测珊瑚礁突发事件的有效手段，从而为太平岛珊瑚礁健康状况研究提供科学依据。

参考文献 (References):

- Brayn Patrick G. 1973. Growth Rate, Toxicity, and Distribution of the Encrusting Sponge *Terpios* sp. (Hadromerida: Suberitidae) in Guam, Mariana Islands. *Micronesica*, (9): 237-242.
- 陈启东, 邓孺孺, 秦雁, 熊龙海, 何颖清. 2015. 不同生长状态珊瑚光谱特征. *生态学报*, 35 (10): 3394-3402. [Chen Qidong, Deng Ruru, Qin Yan, Xiong Longhai, and He Yingqing. 2015. Analysis of Spectral Characteristics of Coral under Different Growth Patterns. *Acta Ecologica Sinica*, 35(10): 3394-3402.]
- 程益锋, 黄文寿, 吴迪, 罗兴潮. 2018. 基于高分一号卫星影像的珊瑚岛礁分类方法. *海洋测绘*, 38 (6): 49-53. [Cheng Yifeng, Huang Wenqian, Wu Di, and Luo Xingchao. 2018. Research on the Technique of Image Processing of Five Combination of Wide Angle Camera. *Hydrographic Surveying and Charting*, 38(6): 49-53.]
- Chow Savanna Wenhua, Shashank Keshavmurthy, James Davis Reimer, Nicole de Voogd, Huang Hui, Wang Jihterng, Tang Senlin, Peter Schupp J, Tang Chunhong, Liew Hockchark, Keryea Soong, Beginer Subhan, Hawis Madduppa, and Chao lun Allen. 2022. Population Genetics and Demography of the Coral-Killing Cyanobacteriosponge, *Terpios* Hoshinota, in the Indo-West Pacific. *PeerJ*, 10: 1-26.
- Diraviya Raj K, Selva Bharath M, Mathews G, Aeby Greta S, and Patterson Edward J. K. 2018. Coral-Killing Sponge *Terpios* Hoshinota Invades the Corals of Gulf of Mannar, Southeast India. *Current Science (Bangalore)*, 114(5): 1117-1119.
- 董娟, 任广波, 胡亚斌, 逢今朝, 马毅. 2020. 基于高分辨率遥感的珊瑚礁地貌单元体系构建和分类方法——以8波段Worldview-2影像为例. *热带海洋学报*, 39 (4): 116-129. [Dong Juan, Ren Guangbo, Hu Yabin, Pang Jinzhao, and Ma Yi. 2020. Construction and Classification of Coral Reef Geomorphic Unit System Based on High-Resolution Remote Sensing: Using 8-Band Worldview-2 Image as an Example. *Journal of Tropical Oceanography*, 39(4): 116-129.]
- 董娟. 2021. 基于高分辨率卫星遥感的西沙群岛活珊瑚覆盖率估算与分析. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所. [Dong Juan. 2021. Estimation and Analysis of Living Coral Cover in Xisha Islands Based on High Resolution Satellite Remote Sensing. Qingdao: First Institute of Oceanography Ministry of Natural Resources.]

⑥ <http://typhoon.nmc.cn>

- Glenn De'ath, Katharina E Fabricius, Hugh Sweatman, and Marji Puotinen. 2012. The 27-Year Decline of Coral Cover on the Great Barrier Reef and its Causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44): 17995-17999.
- 黄荣永, 余克服, 王英辉, 刘嘉懿, 张惠雅. 2019. 珊瑚礁遥感研究进展. *遥感学报*, 23 (6): 1091-1112. [Huang Rongyong, Yu Kefu, Wang Yinghui, Liu Jialiu, and Zhang Huiya. 2019. Progress of the Study on Coral Reef Remote Sensing. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1091-1112.]
- John Hedley D, Chris Roelfsema, Vittorio Brando, Claudia Giardino, Tiit Kutser, Stuart Phinn, Peter J Mumby, Omar Barrilero, Jean Laporte, and Benjamin Koetz. 2018. Coral Reef Applications of Sentinel-2: Coverage, Characteristics, Bathymetry and Benthic Mapping with Comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 216: 598-614.
- Julianna Renzi J, Elizabeth C Shaver, Deron Burkepile E., and Brian Silliman R. 2022. The Role of Predators in Coral Disease Dynamics. *Coral Reef*, 41(2): 405-422.
- Konstantin Tkachenko S, and Duong Thuy Hoang. 2022. Concurrent Effect of Crown-of-Thorns Starfish Outbreak and Thermal Anomaly of 2020 on Coral Reef Communities of the Spratly Islands (South China Sea). *Marine Ecology*, 43 (e12717): 1-13.
- Liao Minghui, Tang Senling, Hsu Chiaming, Wen Kouchang, Wu Henry, Chen Wenming, Wang Jihtrng, Meng Peijie, Twan Wenhung, Lu Chungkuang, Dai Changfeng, Soong Keryea, and Chen Chaolun Allen. 2007. The Black Disease of Reef-Building Corals at Green Island, Taiwan-Outbreak of a Cyanobacteriosponge, *Terpios Hoshinota* (Suberitidae; Hadromerida). *Zoological Studies*, 46(4): 520.
- Liu Wenchien Jennie , Jens Thorvald Høeg, and Chan Benny K K Chan. 2016. How Do Coral Barnacles Start Their Life in Their Hosts?. *Biology Letters*, 12(6): 1-5.
- Liu Peng, Choo Kim-Kwang Raymond, Wang Lizhe, and Huang Fang. 2017. SVM or Deep Learning? A Comparative Study on Remote Sensing Image Classification. *Soft Computing*, 21(23): 7053-7065.
- 李弘毅, 刘永学, 张思宇, 孙超, 孙佳琪. 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. *地理科学进展*, 37 (11): 1454-1462. [Li Hongyi, Liu Yongxue, Zhang Siyu, Sun Chao, and Sun Jiaqi. 2018. Progress and Prospects on Coral Reefs Research in the South China Sea Based on the Application of Geographic Information Technologies. *Progress in Geography*, 37 (11): 1454-1462.]
- 李元超, 梁计林, 吴钟解, 陈石泉. 2019. 长棘海星的暴发及其防治. *海洋开发与管理*, 36 (8): 9-12. [Li Yuanchao, Liang Jilin, Wu Zhongjie, and Chen Shiquan. 2019. Outbreak and Prevention of *Acanthaster Planci*. *Ocean Development and Management*, 36 (8): 9-12.]
- La Ode Muhammad Yasir Haya, Baru Sadarun, Muslim Tadjudah, Analuddin Kangkuso, La Ode Alirman Afu, Asrin Ginong Pratikino, Amadhan Takwir, and Masahiko Fujii. 2022. Assessing Long-term Coral Reef Degradation in Indonesia's Tiworo Strait Marine Conservation Area Using Remote Sensing and Rapid Appraisal for Fisheries Approaches. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4): 4731-4748.
- Mohsen Kayal, Julie Vercelloni, Thierry Lison de Loma, Pauline Bosserelle, Yannick Chancerelle Sylvie Geoffroy, Ce'line Stievenart, Francois Michonneau, Lucie Penin, Serge Planes, and Mehdi Adjeroud. 2012. Predator Crown-of-Thorns Starfish (*Acanthaster Planci*) Outbreak, Mass Mortality of Corals, and Cascading Effects on Reef Fish and Benthic Communities. *PLoS One*, 7(10): 1-9.
- Masashi Yomogida, Masaru Mizuyama, Toshiki Kubomura, and James Davis Reimer. 2017. Disappearance and Return of an Outbreak of the Coral-Killing Cyanobacteriosponge *Terpios hoshinota* in Southern Japan. *Zool Studies*, 56(7): 1-10.
- Nyan Linn Tun, Alexander Gavrilov, Naing Min Tun, Do Minh Trieu, and Htet Aung. 2021. Remote Sensing Data Classification Using a Hybrid Pre-Trained VGG16 CNN-SVM Classifier. *IEEE*, 9396706: 2171-2175.
- Pratchett M.S, Schenk T.J, Baine M, Syms C, and Baird A H. 2009. Selective Coral Mortality Associated with Outbreaks of *Acanthaster planci* L. in Bootless Bay, Papua New Guinea. *Marine Environmental Research*, 67(4/5): 230-236.
- 逢今朝, 任广波, 施祺, 朱海天, 胡亚斌, 董娟, 马毅. 2021. 基于底质类型变化监测的2005-2018年西沙永乐群岛珊瑚礁白化分析. *海洋科学*, 45 (6): 92-106. [Pang Jinzhao, Ren Guangbo, Shi Qi, Zhua Haitian, Hu Yabin, Dong Juan, and Ma Yi. 2021. Analysis of Coral Reef Bleaching in Yongle Islands of Xisha from 2005 to 2018 Based on Sediment Types Change Monitoring. *Marine Sciences*, 45(6): 92-106.]
- Sarah Hamylton M., Rafael Carvalho C, Stephan Duce, Chris Roelfsema M, and Ana Vila-Conceog. 2016. Linking Pattern to Process in Reef Sediment Dynamics at Lady Musgrave Island, Southern Great Barrier Reef. *Sedimentology*, 63(6): 1634-1650.
- Siti Aini N, Tang Senlin and Hideyuki Yamashiro. 2021. Monthly Progression Rates of the Coral-killing Sponge *Terpios Hoshinota* in Sesoko Island, Okinawa, Japan. *Coral Reef*, 40(3): 973-981.
- Wei Khangheng, Ho Mingjay, Kuo Chaoyang, Huang Yayi, Ko Chiaying, Jeng Mingshiou, and Chen Chaolun Allen. 2022. Crown-of-Thorns Starfish Outbreak at Taiping Island (Itu Aba), Spratlys, South China Sea. *Bulletin of Marine Science*, 98(1): 101-102.
- 夏小明. 2012. 中国海岛(礁)名录. 北京: 海洋出版社. [Xia Xiaoming. 2012. *List of Islands (Reefs) in China*. Beijing: China Ocean Press.]
- 徐新良, 庞治国, 于信芳. 2014. 土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用. 北京: 科学技术文献出版社. [Xu Xinliang, Pang Zhiguo, and Yu Xinfang. 2014. *Land Use/Cover Change Spatiotemporal Information Analysis Method and Application*. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press.]
- Xu Jingping, Zhao Jianhua, Wang Fei, Chen Yanlong, and Lee Zhongping. 2021. Detection of Coral Reef Bleaching Based on Sentinel-2 Multi-Temporal Imagery: Simulation and Case Study. *Frontiers in Marine Science*, 56(7): 1-15.

- 余克服. 2018. 珊瑚礁科学概论. 北京: 科学出版社. [Yu Kefu. 2018. *Introduction to the Science of Coral Reefs*. Beijing: Science Press.]
- Yang Sungyin, Chen Hsingju, Ho Mingjay, Chen Yenja, Huang Yayi, Chow Wenhua Savanna, Tang Senlin, Jeng Mingshiou, and Chen Chaolun Allen. 2018. Outbreak of Coral-Killing Cyanobacteriasponge, *Terpios hoshinota*, in Taiping Island (Itu Aba), Spratlys, South China Sea. *Bulletin of Marine Science*, 94 (4): 1543-1544.
- Zuo Xiuling, Su Fenzhen, Zhao Huanting, Zhang Junjue, Wang Qi, and Wu Di. 2017. Regional Hard Coral Distribution within Geomorphic and Reef Flat Ecological Zones Determined by Satellite Imagery of the Xisha Islands, South China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(3): 501-514.
- 张飞飞, 任广波, 胡亚斌, 马毅. 2023. 融合地理空间认知的珊瑚

礁地貌单元高分遥感分类方法. 海洋技术学报, 42 (1): 1-15. [Zhang Feifei, Ren Guangbo, Hu Yabin, and Ma Yi. 2023. A High-Resolution Remote Sensing Classification Method of Coral Reef Geomorphic Units Integrating Geospatial Cognition. *Journal of Ocean Technology*, 42(1): 1-15.]

作者贡献声明:

郑金辉: 进行研究构思和设计、数据收集与分析以及论文撰写工作;

任广波、马毅: 参与论文的审阅与修订工作;

胡亚斌: 参与实验与论文的指导工作;

张飞飞: 参与实验数据收集分析及论文修改工作;

李明杰: 参与论文的核实与验证工作;

王瑞富: 参与论文的监督与指导工作。

High Resolution Remote Sensing Monitoring and Analysis of Coral Reef Degradation Caused by Outbreaks of Biological Natural Enemies: A Case Study of the Taiping Island in the South China Sea

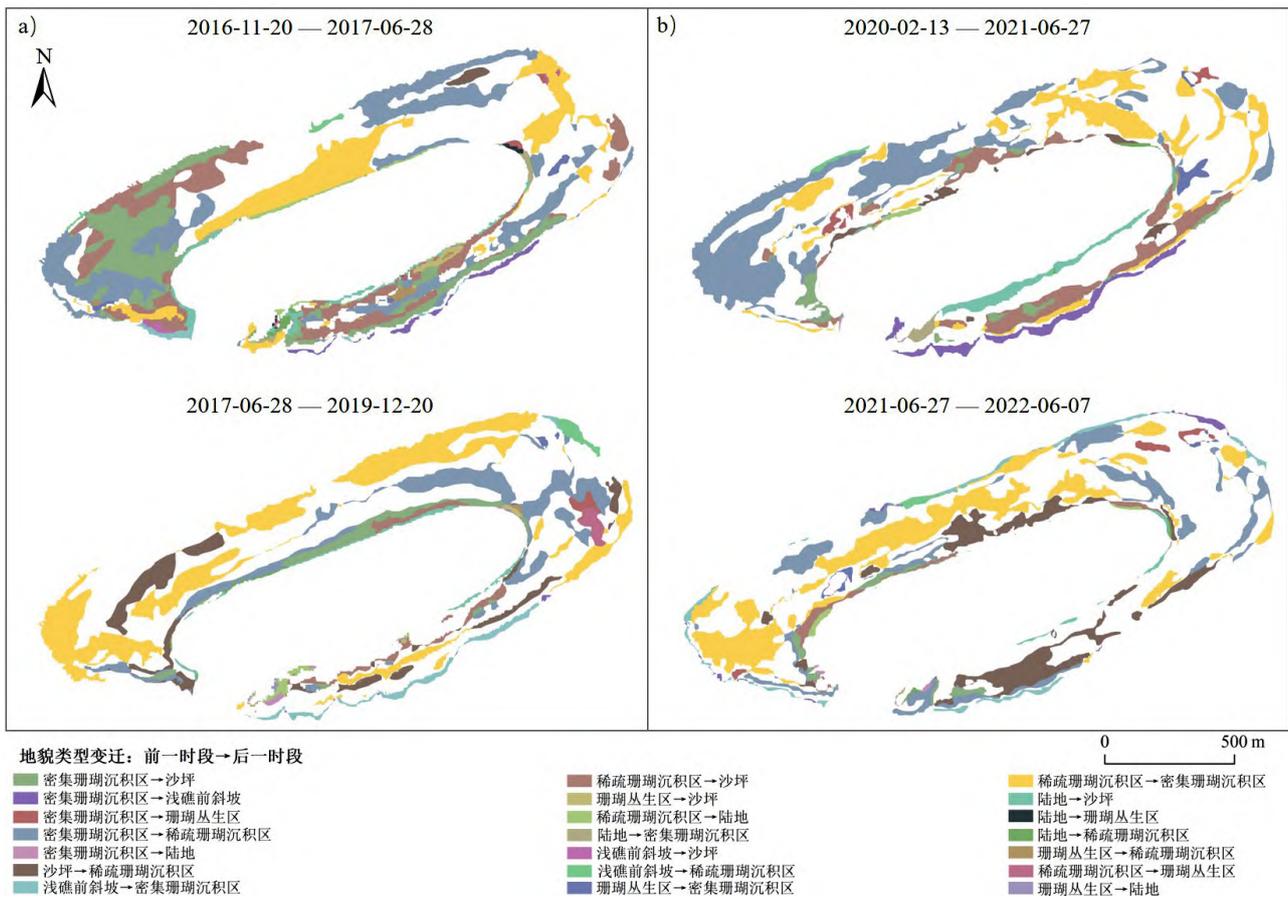
Zheng Jinhui^{1,2,3}, Ren Guangbo^{2,3,4}, Hu Yabin^{2,3,4}, Zhang Feifei^{2,3}, Ma Yi^{3,4}, Li Mingjie^{5,6}, and Wang Ruifu¹

(1. College of Geodesy and Geomatics, ShanDong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment Detection Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 3. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4. Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 5. South China Sea Development Research Institute, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China; 6. Nansha Islands Coral Reef Ecosystem National Observation and Research Station, Guangzhou 510399, China)

Abstract: The global proliferation of natural predators, including *Terpios hoshinota* sponge and crown-of-thorns starfish, poses a significant threat to the ecological vitality of coral reefs. However, coral reef research currently lacks comprehensive quantitative studies on the ramifications of predator outbreaks in various coral reef landform types. To bridge this knowledge gap, this study utilized a dataset comprising 26 Sentinel-2 remote sensing images spanning the years 2016 to 2022, both pre- and post-two distinct episodes of natural predator outbreaks involving the *Terpios hoshinota* sponge and crown-of-thorns starfish, within the vicinity of Taiping Island. High-resolution GF-2 (PMS) remote-sensing images and satellite data were used to augment the analysis. Based on data obtained from the Google Earth platform of the Geographic Information System for remote sensing imagery, we conducted an experiment involving the classification of coral reef landform types in Taiping Island in the South China Sea. During the Support Vector Machine (SVM) classification experiments, we performed a meticulous examination of the image interpretation outcomes, making comparisons and rectifications in consultation with domain experts. Classification was performed by analyzing remote sensing images, and the identified landform types included areas characterized by dense coral sedimentation, sparse coral sedimentation, coral clusters, sand flats, and shallow reef front slopes. Subsequent analyses focused on discerning distinctive characteristics and tracing their evolutionary patterns. The findings reveal that (1) this study effectively integrates expert interpretation knowledge and an SVM classification algorithm to classify the various landform types present in Taiping Island's coral reef ecosystem. Remarkably, the classification achieved an unprecedented level of accuracy, with an overall accuracy rate of 96.46% and a kappa coefficient of 0.94. (2) The analysis showed that during the two natural predator

outbreaks, the coral reef landforms on Taiping Island, which included dense coral reef areas, dense coral sedimentation areas, and sparse coral sedimentation areas, displayed significant decreases in their respective areas. The outbreak of *Terpios hoshinota* sponge had the most profound impact on the dense coral sedimentation area, resulting in a 72.92% decrease in the total area. Meanwhile, the outbreak of crown-of-thorns starfish had the most significant effect on the coral cluster area, causing a 59.17% reduction in total area. (3) Over the period spanning from 2016 to 2022, the degradation rate of the coral reefs on Taiping Island exceeded the recovery rate. Notably, the highest degradation rate (23.88%) occurred between March-June 2017. Conversely, the highest rate of recovery (18.03%) was observed from June-September 2017. We analyzed the dynamic characteristics of coral reef landform types, including changes in type distribution, areal extent, degradation rate, and recovery rate. Furthermore, we assessed the influence of natural disturbances on the degradation of coral reef ecosystems, thereby providing valuable insights for conservation and scientific inquiries pertaining to coral reef ecological resources in the waters surrounding Taiping Island. This effort is underpinned by a solid theoretical foundation. The Chinese and English literature cited in this article have contributed significantly to various facets, including coral reef monitoring methodologies, construction of coral reef classification systems, and assessment of coral reef ecosystem health.

Keywords: coral reef; *Terpios hoshinota* sponge; crown-of-thorns starfish; high-resolution remote sensing; Taiping Island



附图 典型珊瑚礁地貌类型变迁情况 (a. 黑皮海绵暴发研究时段; b. 长棘海星暴发研究时段)
Appendix Fig. Changes in typical coral reef landform types (a. *Terpios hoshinota* sponge outbreak research period; b. crown-of-thorns starfish outbreak research period)