

【调查与研究】

基于高分遥感的西沙群岛珊瑚礁沙洲稳定性评估

李晓敏^{1,2}, 马毅², 张杰^{2,3}, 吕喜玺¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古呼和浩特 010021; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061; 3. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东青岛 266580)

摘要:珊瑚礁沙洲是珊瑚岛形成的前地貌类型, 大多无植被生长, 易受气候条件和水文动力条件的影响, 位置不稳定, 形态多变。本研究利用 2005—2020 年多期高分辨率遥感影像, 分析了西沙群岛珊瑚礁沙洲的大小、形状变化以及平面位置移动过程, 评估了珊瑚礁沙洲稳定性, 并对其影响因素进行了初探。结果表明: (1) 北沙洲、中沙洲、盘石屿和筐仔北岛相对稳定, 而西新沙洲、三峙仔、全富岛和银屿仔尚不稳定; (2) 珊瑚礁沙洲稳定性是沙洲沉积物供应、海洋动力环境条件和珊瑚礁地形地貌综合作用的结果, 在相同的季风浪和台风浪作用下, 各个沙洲由于在礁坪中所处位置和岸滩沉积物类型等不同, 在不同的水动力作用下, 形成了 8 个沙洲不同的演变过程和稳定状态; (3) 建议在相对稳定的北沙洲、中沙洲、盘石屿和筐仔北岛上人工种植抗风、抗盐碱的植被(如木麻黄), 促使其更快地由珊瑚礁沙洲发育成为珊瑚岛。西沙群岛珊瑚礁沙洲监测与评估结果可为南海珊瑚礁沙洲发育研究和西沙群岛岛礁建设与保护管理提供数据支撑。

关键词:珊瑚礁沙洲; 动态变化; 沙洲稳定性; 高分遥感; 西沙群岛

中图分类号: TP79; X87

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)01-0048-11

Assessing the stability of coral reef sandbanks in the Xisha Islands using high-resolution satellite images

LI Xiao-min^{1,2}, MA Yi², ZHANG Jie^{2,3}, LU Xi-xi¹

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Coral reef sandbanks are the former landforms of the formation of coral islands. Most of them have no vegetation growth and are easily affected by climatic and hydrodynamic conditions. They are unstable in position and changeable in area and shape. Using the high-resolution remote sensing images from 2005 to 2020, the area and shape changes as well as the movement process of the horizontal position of coral reef sandbanks in the Xisha Islands were analyzed, the stability of the sandbanks was assessed and its influencing factors were discussed. The results show that: (1) Bei Sandbank, Zhong Sandbank, Panshiyu and Kuangzaibei Island are relatively stable, while Xixin Sandbank, Sanzhizai, Quanfu Island and Yinyuzai are yet in an unstable stage. (2) The stability of the coral reef sandbanks come from the integrated effect of sediment supply, marine dynamic environmental conditions and coral reef topography. Under the same monsoon wave and typhoon wave, each sandbank is affected by different hydrodynamic forces due to the different position of each sandbank in the reef flat and the different beach sediment types, resulting in individual evolution process and

收稿日期: 2020-09-28, 修订日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51839002)

作者简介: 李晓敏(1982—), 女, 内蒙古通辽人, 蒙古族, 硕士, 主要研究方向为海岛遥感调查技术, E-mail: lixiaomin@fio.org.cn

stable state of eight sandbanks. (3) It is suggested that the wind and salt resistant vegetation (e.g. *Casuarina equisetifolia*) can be planted on relatively stable Bei Sandbank, Zhong Sandbank, Panshiyu and Kuangzaibei Island, so as to accelerate the development of coral reef sandbanks into coral islands. The monitoring and assessment results of coral reef sandbanks in the Xisha Islands can provide data support for the study on the development of coral reef sandbanks in the South China Sea and the construction and protection management of islands and reefs in the Xisha Islands.

Key words: coral reef sandbanks; dynamic change; stability of sandbanks; high-resolution remote sensing; the Xisha Islands

珊瑚礁是浅水造礁石珊瑚和其他附礁生物的遗骸经过堆积作用自然形成的, 珊瑚礁受侵蚀产生的礁岩块、砾石、卵石和生物骨壳碎屑物, 部分被波浪抛掷或推送到礁顶的礁坪, 在礁坪上次生堆积成潮间带浅滩, 并在风的作用下堆积成潮上带沙洲和灰沙岛^[1]。珊瑚礁沙洲是珊瑚岛(灰沙岛)形成的前一地貌类型, 海拔极低, 大多无植被生长, 少数长有稀疏植被, 极易受气候条件(如季风、台风等)和水文动力条件(如波浪、海流等)的影响, 流动性强, 位置不稳定, 形态多变。

我国南海珊瑚礁北起东沙的北卫滩, 南达南沙的曾母暗沙, 跨纬度 17°以上, 绵延约 1800 km; 西起南沙的万安滩, 东至中沙的黄岩岛, 跨经度 11°以上, 伸展约 900 km^[2]。南海珊瑚礁分布范围广, 礁体面积大, 发育有较多的珊瑚礁沙洲和珊瑚岛, 因其特殊的地理区位和生态功能而对我国海洋权益维护和珊瑚礁生态系统保护具有独特的作用, 战略地位和意义重大。珊瑚礁沙洲和珊瑚岛的位置、形状和大小的变化既能反映珊瑚礁的发育演变过程, 也能体现珊瑚礁生态环境特征变化及其与珊瑚礁区社会经济发展和政策体制的博弈关系, 珊瑚礁沙洲和珊瑚岛动态变化分析, 是进行珊瑚岛岛礁资源开发和可持续管理的基础。然而受地理位置和自然环境条件等因素的限制, 南海这些珊瑚礁沙洲和珊瑚岛现场调查较为困难: 一是因为远离大陆, 且珊瑚礁周边珊瑚丛生, 礁滩水浅, 调查船和测量人员不易进行实地测量; 二是由于我国南海的部分岛礁及附近海域被周边国家非法侵占, 开展现场实地测量存在困难。

遥感具有能大面积同步覆盖、对同一区域进行重复监测、有长时间序列历史存档数据、不受

区域可达性限制和现势性强等优势, 尤其是高分辨率遥感还具有较高的空间分辨率和定位精度, 不同时相遥感影像叠加分析可快速、有效地监测沙洲的动态变化, 因此, 遥感是进行珊瑚礁沙洲监测与动态分析的重要技术手段。目前, 大多数沙洲遥感动态分析都是利用多时相遥感影像, 通过提取不同时期的沙洲海岸线或水边线进行对比, 进而分析沙洲平面位置移动和形态变化^[3-7]; 个别利用遥感影像结合 DEM 数据, 除分析沙洲平面位置、形状和面积变化外, 还研究沙洲的垂向高度和体积的变化, 进而全面揭示沙洲的三维变化^[8-9]。本文利用多期高分辨率遥感影像, 结合现场实测数据, 分析了 2005—2020 年西沙群岛珊瑚礁沙洲的动态变化过程, 评估了珊瑚礁沙洲的稳定性情况, 研究结果可为南海珊瑚礁沙洲发育研究和西沙群岛岛礁建设与保护管理提供数据支撑和决策支持服务。

1 材料与方法

1.1 研究区域

西沙群岛位于南海西北部, 海南岛东南方, 分布在 15°47'N—17°08'N、111°10'E—112°55'E, 以永兴岛为中心, 距三亚市榆林港和文昌市清澜港都是 330 km^[10]。西沙群岛共有国家公布标准地名的海岛礁 56 个, 其中, 44 个岛礁标准地名在中国地名委员会于 1983 年 4 月授权公布的《我国南海诸岛部分标准地名》中公布, 12 个岛礁标准地名在自然资源部和民政部于 2020 年 4 月发布的《关于公布我国南海部分岛礁和海底地理实体标准名称的公告》中公布。

西沙群岛海区为典型的热带海洋性季风气候, 每年 10 月至次年 3 月为东北季风盛行期, 5 月至 9 月为西南季风盛行期, 平均每年发生

6~7 次台风,有时达 10 余次;受季风影响,海流夏季流向东北,抵达西沙群岛时流速为 0.56~1.48 km/h,冬季流向西南,到达西沙群岛时流速为 0.93~1.85 km/h;冬季盛行偏北浪,夏季盛行偏南浪,全年平均有效波高 1~2 m,最大有效波高达 9.5 m;潮汐类型为不规则日潮,潮差小,一般为 2 m 以下^[11]。

由于植被的作用和海滩岩的保护,灰沙岛和有植被覆盖的沙洲相对稳定,而无植被或仅有零星植被分布的裸沙洲则更易受台风和季节性风、浪、流的影响,沙洲形状和位置变化显著,面积急剧增加或减少。根据西沙群岛珊瑚礁沙洲特征和遥感影像监测能力,本文选择北沙洲、中沙洲、西新沙洲、三峙仔、全富岛、银屿仔、盘石屿和筐仔北岛 8 个裸沙洲作为研究对象。北沙洲、中沙洲、西新沙洲和三峙仔分布在七连屿南部的礁坪上,北沙洲和中沙洲^[12]形成较早,东西两侧已有海滩岩发育,沙洲上有零星植被分布;西新沙洲^[12]是在 1972 年第 20 号台风中由于波浪冲刷和洋流搬运而形成的,沙洲上无植被;三峙仔^[13]上无植被,白沙一片,为 2020 年 4 月自然资源部和民政部新公布标准名称的岛礁。全富

岛和银屿仔^[12]位于永乐环礁北部的两个礁坪上,沙洲上均无植被,位置、形状和面积变化剧烈。盘石屿^[12]面积较大,独立分布于华光礁东南方的一个环礁的西北部,环礁内部发育有封闭潟湖,沙洲上基本无植被,偶有零星草生长,但台风一过,沙洲剧烈变形,草便不见了。筐仔北岛^[13]位于羚羊礁礁坪上,在筐仔沙洲北侧,没有植被生长,也是 2020 年 4 月自然资源部和民政部新公布标准名称的岛礁。

1.2 研究数据与处理

遥感影像的选取原则包括两个方面:一是影像上所研究沙洲区域无云覆盖,影像质量清晰;二是影像成像时间避开台风过境和风暴潮增水发生前后,因为台风过程和风暴潮增水对沙洲的短期变化影响极大。基于上述两个原则确定了所研究的 8 个珊瑚礁沙洲的各期高空间分辨率遥感影像(表 1)。另外,本文使用了赵述岛和北岛的高精度地面控制点数据以及各个沙洲的现场调查资料,调查要素包括基础地理要素、岸线、植被、海滩侵蚀与退化、周边海域地形地貌等;还参考了西沙群岛海图、南海地形图、南海渔场作业图以及各类历史调查报告等。

表 1 珊瑚礁沙洲的高空间分辨率遥感影像

Tab.1 List of high-resolution remote sensing images of coral reef sandbanks

名称	遥感卫星	空间分辨率/m	成像时刻	潮位(永兴岛站)/cm
北沙洲	QuickBird	0.61	2008-01-10 11:21:24	53
	WorldView-2	0.5	2010-02-07 11:05:26	90
	QuickBird	0.61	2012-02-26 10:29:38	94
西新沙洲	GF-2	1.0	2015-12-14 11:16:55	59
三峙仔	GF-2	1.0	2017-02-15 11:31:22	85
	GF-1	2.0	2020-03-02 11:30:37	102
	QuickBird	0.61	2007-02-17 11:31:51	76
盘石屿	GeoEye	0.5	2009-10-13 11:10:32	101
	QuickBird	0.61	2012-04-08 10:35:27	139
	GF-1	2.0	2016-01-08 11:24:52	75
	GF-2	1.0	2019-08-26 11:28:06	74
	QuickBird	0.61	2005-07-13 11:18:59	131
全富岛	QuickBird	0.6	2010-07-19 10:56:28	86
银屿仔	WorldView-2	0.5	2011-10-11 11:26:45	104
	GF-1	2.0	2015-05-17 11:36:53	134
	GF-1	2.0	2018-03-07 11:41:57	108

续表

名称	遥感卫星	空间分辨率/m	成像时刻	潮位(永兴岛站)/cm
筐仔北岛	QuickBird	0.61	2006-05-10 11:27:25	103
	WorldView-2	0.5	2011-01-05 11:26:42	62
	QuickBird	0.61	2012-04-20 10:31:53	126
	GF-1	2.0	2015-05-17 11:36:53	134
	GF-1	2.0	2018-03-07 11:41:57	108

为了准确地监测珊瑚礁沙洲的动态变化过程,必须确保不同时期的遥感影像定位具有可比性,因此,在对沙洲进行信息提取之前必须对沙洲不同时期的遥感影像进行几何校正或图像配准。由于珊瑚礁沙洲的流动性强,且沙洲上无基础设施,缺少固定的、明显可用的地物控制点,因此只能利用卫星遥感影像的几何连续性^[7],通过同景影像中其他海岛的精确校正来实现对沙洲的准确定位。对于北沙洲、中沙洲、西新沙洲和三峙仔这 4 个沙洲,利用同属于七连屿的赵述岛和北岛 2012 年实测的高精度地面控制点,先对 2012 年的 QuickBird 影像进行几何校正,然后以校正后的 2012 年影像配准其他 5 期影像;对于全富岛、银屿仔、盘石屿和筐仔北岛,因无可用的实测地面控制点,只能利用自主定位精度高的影像来对其他时相的影像进行配准,以达到位置的相对一致性。同时,为了能更好地反映各个珊瑚礁沙洲信息,对不同时期、不同类型的遥感影像进行了不同的波段组合和适当的图像增强处理,以提高遥感影像对珊瑚礁沙洲的探测能力。

1.3 信息提取

鉴于所研究的珊瑚礁沙洲面积较小,而且进行沙洲变化分析又要求精准提取沙洲信息,因此,本研究采用人机交互解译的方式进行不同时期的沙洲信息提取。珊瑚礁沙洲一般定义为出

露于平均大潮高潮面之上的小块陆地,平均大潮高潮面也是沙洲岸线的起算面^[8]。因此,珊瑚礁沙洲的范围可基于平均大潮高潮面来计算,也可根据沙洲岸线位置来确定,本文根据沙洲岸线位置来确定各个珊瑚礁沙洲的分布范围。西沙群岛珊瑚礁沙洲的岸线类型均为砂质岸线,珊瑚沙滩暴露在水中的时间长短不同导致其含水量不同,在遥感影像上表现为不同的灰度色阶和彩色特征信息,在影像上沙滩色调突然变亮处被确定为岸线的位置^[5],以此为解译标志,提取 8 个珊瑚礁沙洲不同时期的岸线信息。

另外,岸滩沉积物类型对沙洲的稳定性起到至关重要的作用,本文结合现场调查数据,提取了各个珊瑚礁沙洲的岸滩沉积物类型信息。岸滩沉积物类型主要有海滩岩和珊瑚砂,海滩岩由珊瑚砂和砾岩胶结而成,可对沙洲起到较大的保护作用,减缓台风和巨浪对沙洲的侵蚀和破坏。

2 结果与讨论

2.1 沙洲大小和形状变化

根据 8 个珊瑚礁沙洲各时期的岸线信息确定了各个沙洲的分布范围,本研究估算了各个沙洲不同时期的基本信息参数(表 2),分析了不同时段各个沙洲的面积和岸线长度变化趋势(图 1)以及各个沙洲的动态变化过程(图 2)。

表 2 不同时期遥感影像提取的珊瑚礁沙洲基本信息

Tab.2 Coral reef sandbanks information extracted from remote sensing images at different times

名称	成像时间	长轴方向	长度/m	短轴方向	宽度/m	岸线长/m	面积/m ²
北沙洲	2008-01-10	NW—SE	161	NE—SW	55	452	7818
	2010-02-07	NW—SE	176	NE—SW	52	512	9592
	2012-02-26	NW—SE	192	NE—SW	53	541	10929
	2015-12-14	NW—SE	254	NE—SW	57	659	14496
	2017-02-15	NW—SE	192	NE—SW	53	534	10702
	2020-03-02	NW—SE	225	NE—SW	64	654	13406

续表

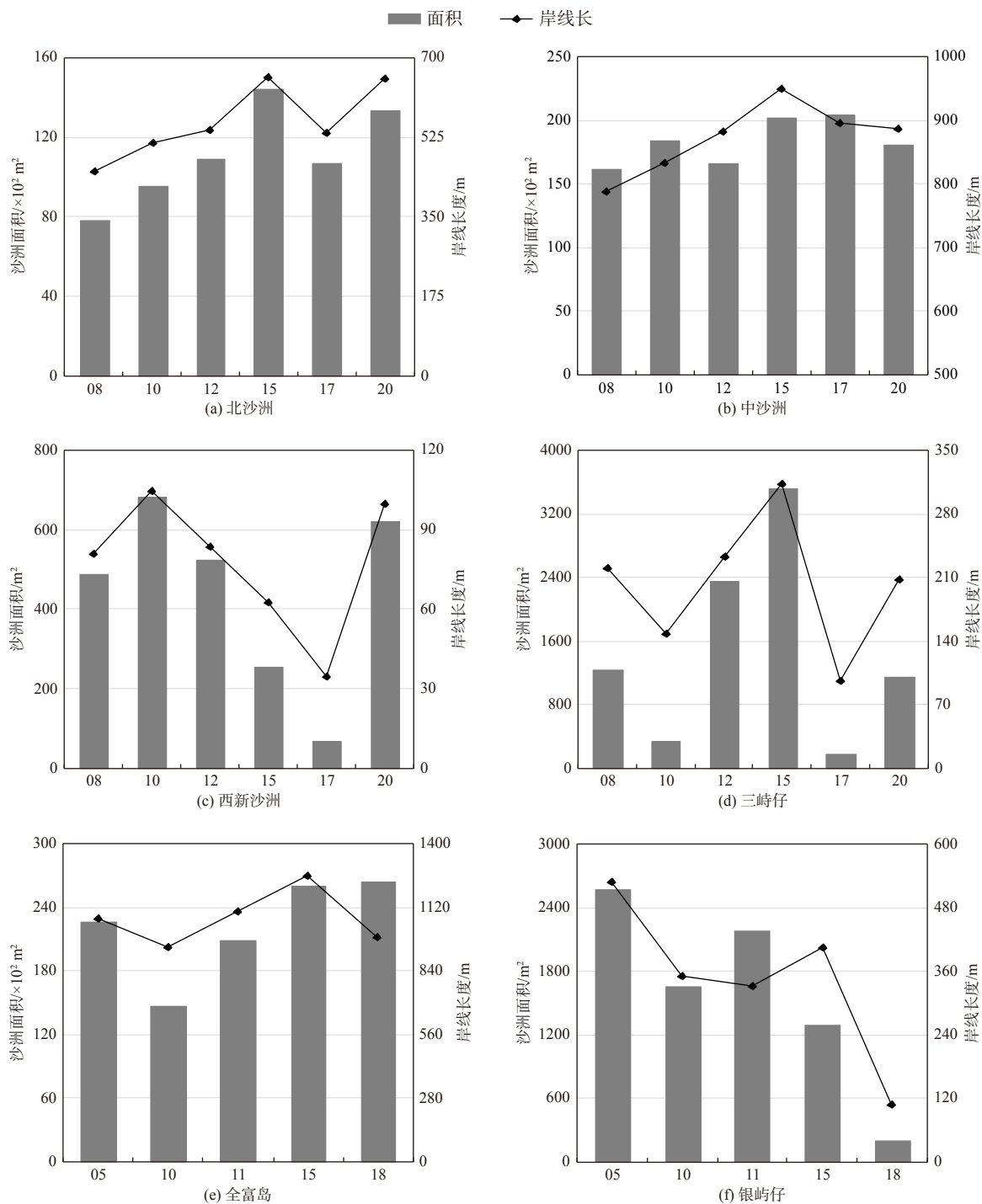
名称	成像时间	长轴方向	长度/m	短轴方向	宽度/m	岸线长/m	面积/m ²
中沙洲	2008-01-10	NNW—SSE	318	NEE—SWW	43	788	16219
	2010-02-07	NNW—SSE	342	NEE—SWW	55	833	18396
	2012-02-26	NNW—SSE	320	NEE—SWW	40	882	16634
	2015-12-14	NNW—SSE	345	NEE—SWW	50	951	20263
	2017-02-15	NNW—SSE	329	NEE—SWW	54	897	20510
	2020-03-02	NNW—SSE	321	NEE—SWW	48	887	18136
西新沙洲	2008-01-10	NW—SE	28	NE—SW	20	81	492
	2010-02-07	NWW—SEE	42	NNE—SSW	18	105	684
	2012-02-26	NW—SE	30	NE—SW	21	84	528
	2015-12-14	NW—SE	24	NE—SW	11	63	258
	2017-02-15	W—E	14	N—S	6	35	68
	2020-03-02	NW—SE	33	NE—SW	20	100	622
三峙仔	2008-01-10	NW—SE	88	NE—SW	11	221	1244
	2010-02-07	N—S	50	W—E	5	148	341
	2012-02-26	NNW—SSE	103	NEE—SWW	27	233	2356
	2015-12-14	NNW—SSE	132	NEE—SWW	31	314	3527
	2017-02-15	NW—SE	42	NE—SW	5	97	186
	2020-03-02	NW—SE	94	NE—SW	13	209	1149
全富岛	2005-07-13	NEE—SWW	352	NNW—SSE	103	1075	22699
	2010-07-19	NE—SW	436	NW—SE	42	949	14768
	2011-10-11	NE—SW	477	NW—SE	45	1105	20968
	2015-05-17	NE—SW	453	NW—SE	108	1262	26095
	2018-03-07	NE—SW	318	NW—SE	98	993	26451
	2005-07-13	NW—SE	252	NE—SW	12	530	2586
银屿仔	2010-07-19	W—E	121	N—S	19	351	1668
	2011-10-11	NW—SE	153	NE—SW	15	332	2189
	2015-05-17	NW—SE	185	NE—SW	6	407	1299
	2018-03-07	NW—SE	49	NE—SW	4	109	208
	2007-02-17	NW—SE	473	NE—SW	233	1405	103033
	2009-10-13	NWW—SEE	515	NNE—SSW	276	1392	120534
盘石屿	2012-04-08	W—E	451	N—S	103	1281	30898
	2016-01-08	NW—SE	534	NE—SW	181	1294	74115
	2019-08-26	NW—SE	803	NE—SW	185	1773	87990
筐仔北岛	2006-05-10	NW—SE	33	NE—SW	3	83	102
	2011-01-05	NW—SE	69	NE—SW	14	159	717
	2012-04-20	NW—SE	64	NE—SW	8	140	337
	2015-05-17	NW—SE	68	NE—SW	7	157	367
	2018-03-07	NW—SE	80	NE—SW	10	176	652

北沙洲大致呈西北—东南向分布。沙洲宽度基本稳定, 范围为 52 ~ 64 m; 沙洲长度、岸线长度和面积在 2008—2015 年呈持续增加趋势, 2015 年分别达到 254 m、659 m 和 14496 m², 之后呈明显下降趋势, 2017 年沙洲大小和范围与 2012 年相当, 之后又开始增加, 但至 2020 年还未达到 2015 年最大时的状态。

中沙洲大致呈西北偏北—东南偏南方向分

布。沙洲宽度也比较稳定, 范围为 43 ~ 55 m, 特别是东侧弧形岸段基本保持不变, 变化主要发生在西南一侧; 因西北和东南两端不断变化, 沙洲长度不稳定, 变化范围为 318 ~ 345 m; 沙洲岸线长度呈先增加后减少的变化趋势, 2015 年最长, 为 951 m; 沙洲面积则在 1.62 ha 和 2.05 ha 之间反复变化。

西新沙洲 2008 年、2012 年、2015 年和 2020



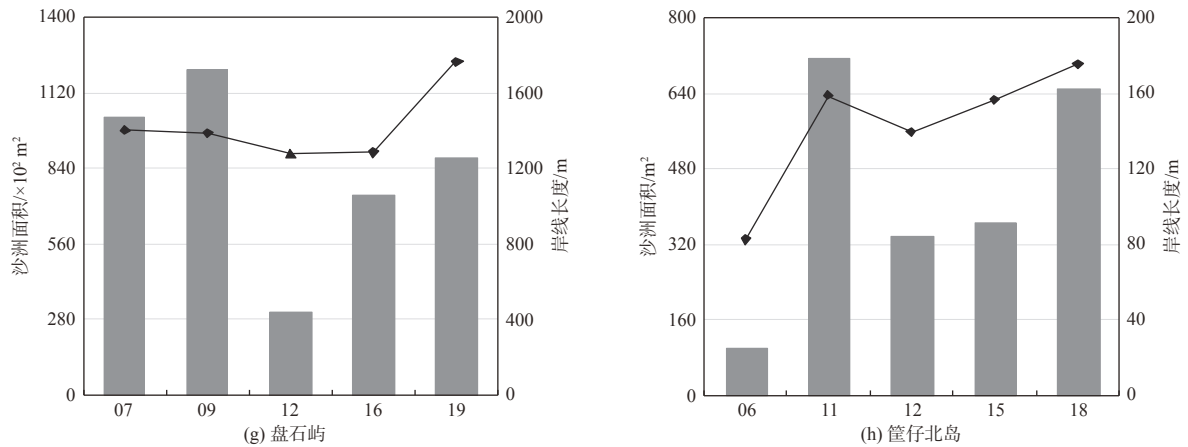


图1 珊瑚礁沙洲面积和岸线长度变化

Fig. 1 Area and coastline length change of coral reef sandbanks

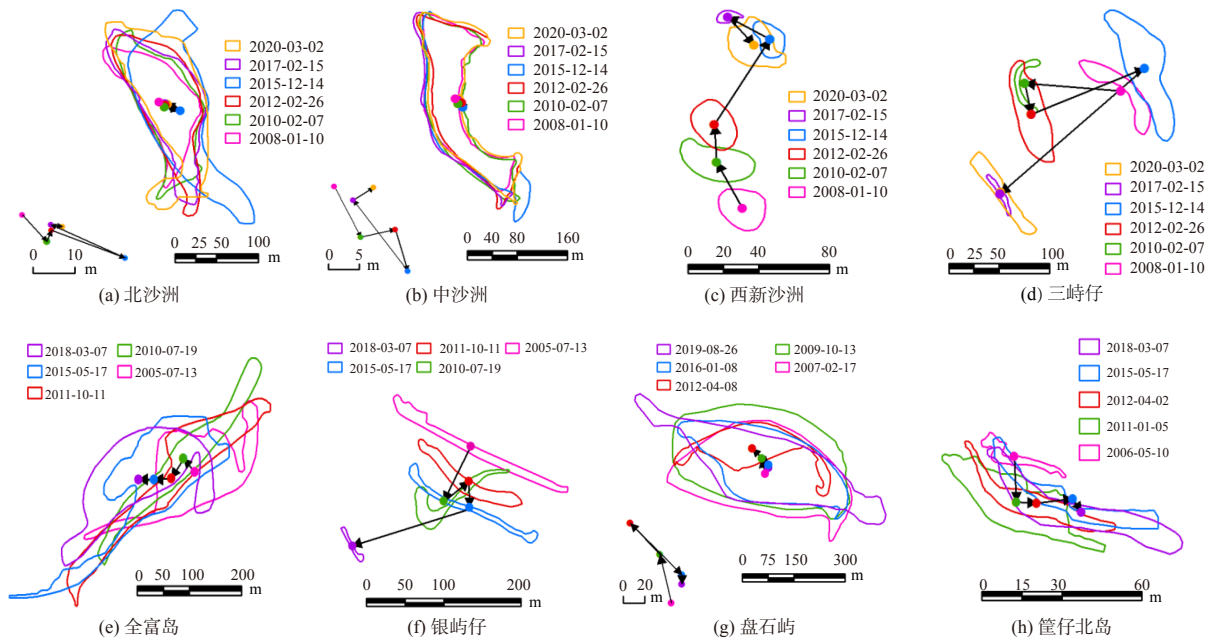


图2 珊瑚礁沙洲变化过程和中心位置移动轨迹

Fig. 2 Change process of coral reef sandbanks and the moving track of their center position

年主要为西北—东南向分布,2010年为西北偏西—东南偏东向分布,2017年则呈现东—西向分布。沙洲长度为14~42 m,宽度为6~21 m;岸线长度和沙洲面积呈先增后减再增的趋势,2010年最大,分别为105 m和684 m^2 ,2017年则处于较低水平,岸线长度为35 m,而沙洲面积仅为68 m^2 ,不足2010年面积的十分之一。

三峙仔2008年、2017年和2020年主要为西北—东南向分布,2012年和2015年为西北偏北—东南偏南向分布,2010年则呈现南—北向弧形展布。沙洲大小变化不规则,2015年时达

到最大,沙洲长度为132 m,宽度为31 m,岸线长314 m,沙洲面积达3527 m^2 ;而2010年和2017年则处于较低水平,沙洲宽度仅有5 m,沙洲面积在2017年仅为186 m^2 ,约为2015年面积最大时的二十分之一。

全富岛2005年呈东北偏东—西南偏南向分布,2010—2018年主要为东北—西南向分布。沙洲长度为318~477 m,2005年、2015年和2018年沙洲中间宽、两头窄,平均宽度为100 m左右,而2010年和2011年则呈细条形分布,沙洲宽度不到50 m;岸线长度为949~1262 m,沙洲面积

在2010年不到1.5 ha, 2005年、2011年、2015年和2018年则在2.0 ha以上, 达到2.10~2.65 ha。

银屿仔2010年呈东西向分布, 形似烟袋锅, 其他时段则为西北—东南向细长条形分布。2005—2015年沙洲长度为121~252 m, 2018年长度仅有49 m; 沙洲很窄, 平均宽度不到20 m, 2015年和2018年仅有5 m左右; 2005—2015年岸线长度为332~530 m, 面积为1299~2586 m², 至2018年沙洲则变得较小, 面积仅有208 m², 不足2005年时的十二分之一。

盘石屿2007年、2016年和2019年主要为西北—东南向分布, 2009年呈现西北偏西—东南偏东向分布, 2012年则为东西向弧形展布。沙洲长度为451~803 m, 宽度为103~276 m, 岸线长度为1281~1773 m, 但沙洲面积变化极大, 2007年和2009年分别约为10 ha和12 ha, 2012年骤降至约3 ha, 减少了近四分之三, 之后的2016年和2019年面积又逐渐增加, 2019年达到8.8 ha。

筐仔北岛大致呈西北—东南向分布。2006年沙洲较小, 沙洲长度为33 m, 宽度仅有3 m, 岸线长度为83 m, 面积为102 m²; 2011—2018年, 沙洲长度平均约为70 m, 宽度平均约为10 m, 岸线长度为140~176 m, 沙洲面积为337~717 m²。

2.2 沙洲平面位置移动

除大小和形状变化外, 珊瑚礁沙洲的位置变化也非常明显。位置移动变化通常采用质心法来分析^[4, 7], 质心是指物体质量集中的一个假想点, 是物体质量分布的一个平均位置^[8]。本文基于8个沙洲不同时期的岸线范围计算各个时期每个沙洲的质心位置, 进而获得每个沙洲的位置移动轨迹(图2), 以便于分析各个沙洲的平面位置移动情况。

2008—2020年, 北沙洲和中沙洲相对稳定, 质心总体上向东移动不超过10 m, 最大的位置变化发生在2015年前后, 北沙洲2012—2015年和2015—2017年分别移动19 m和20 m, 中沙洲2012—2015年和2015—2017年分别移动8 m和15 m。西新沙洲和三峙仔平面位置移动则较大, 西新沙洲质心位置总体呈现向北移动的轨迹, 2008—2020年移动了约100 m, 其间, 2008—2010年移动方向为北西向, 2010—2012年转为

正北向, 2012—2015年转为北东向, 2015—2017年又转为北西向, 但2017—2020年反转成了东南向, 其中, 2012—2015年移动了约60 m, 其他时段移动距离不到30 m; 三峙仔质心位置移动不规律, 2008—2010年移动方向基本为正西向, 2010—2012年转为南向, 2012—2015年转为北东向, 2015—2017年又转为西南向, 2017—2020年质心位置基本未变, 2008—2020年总体上向西南移动了约150 m。

2005—2018年, 全富岛质心位置大致呈现出持续向西移动的轨迹, 总位移超过100 m, 各时段移动距离约30 m。银屿仔质心位置变化则比较复杂, 2005—2010年向西南移动, 而2010—2011年则反向东北移动, 2011—2015年转为南向, 2015—2018年又转为向西南移动, 2005—2018年总体上向西南移动了近200 m。

2007—2019年, 盘石屿质心位置呈现出先向西北再反向东南移动的轨迹, 总位移不到20 m, 2007—2009年和2009—2012年移向西北, 而2012—2016年和2016—2019年则移向东南。2006—2018年, 筐仔北岛质心位置呈现出先向南再向东的移动轨迹, 各时段移动距离为5~15 m, 总体上向东南移动了约30 m。

2.3 沙洲稳定性的影响因素探析

珊瑚礁沙洲稳定性取决于沙洲沉积物供应、海洋动力作用和珊瑚礁地形地貌的动态平衡^[14-15]。西沙群岛远离大陆, 珊瑚礁沙洲物质组成主要是松散的珊瑚贝壳砂砾, 由礁坪边缘大浪打碎珊瑚枝体, 在礁坪上逐渐堆积而成的, 这种物质组成从根源上决定了珊瑚礁沙洲形成阶段的不稳定性, 但是只要有连续的沉积物供应, 充足的物质来源能使珊瑚礁沙洲维持甚至扩展, 即使遭受了台风、巨浪等强动力过程, 沙洲在经历剧烈变化后也能再次恢复。本文研究的8个珊瑚礁沙洲所在的礁坪及邻近的礁坡和潟湖坡有大量的活珊瑚, 这些活珊瑚可为沙洲的形成提供充足的物质来源。

珊瑚礁沙洲易受到水动力环境的影响而发生动态变化, 在影响珊瑚礁水动力环境的海洋动力因素(如风、波浪、海流和潮汐等)中, 波浪被广泛认为是塑造珊瑚礁地貌形态的关键动力因

素^[8]。季风是南海海域的主导天气系统,是影响南海波浪变化的主要因素^[16],受风的季节变换影响,波浪也具有显著的季节性;同时,南海是全球台风活动的主要海区之一,台风造成的波浪巨大,破坏力强^[17-18]。季风浪和台风浪都对礁坪上珊瑚碎屑的发育和珊瑚礁沙洲的形成产生了重大的影响,这得益于波浪在礁缘的破碎和在礁坪的汇聚,珊瑚礁礁缘处深度明显变浅,外海波浪在此发生破碎,波能大幅削减,在礁坪前端或外礁坪和礁突起带形成高波能汇聚区,使珊瑚枝、珊瑚块等珊瑚碎屑物质在这些地方堆积,逐渐发展形成沙洲^[8];同时,波浪在礁坪上传播时,会在沙洲的不同方位上形成波能差^[14],强大的波能差推动珊瑚碎屑物向波能小的方向移动,长时间持

续作用造成了沙洲的位移。

海滩岩对珊瑚礁沙洲的稳定性起到至关重要的作用,海滩岩是沙堤地形的保护者,能固定沙堤,可减缓台风和巨浪对沙洲的侵蚀和破坏。海滩岩发育良好的沙洲,其形状、大小和位置基本稳定;而未有海滩岩发育的沙洲,一旦有台风过境或遇到强季风作用,其形态就会发生复杂变化。从各个沙洲的岸滩沉积物类型信息提取结果(图 3)可以看出,北沙洲东西两侧已发育有海滩岩,但还不完整;中沙洲东半周发育有较完整的海滩岩,西半周只有零星的海滩岩发育;筐仔北岛在东北半周有大片的海滩岩发育,相对较完整;西新沙洲、三峙仔、全富岛、银屿仔和盘石屿周边还尚无海滩岩发育。

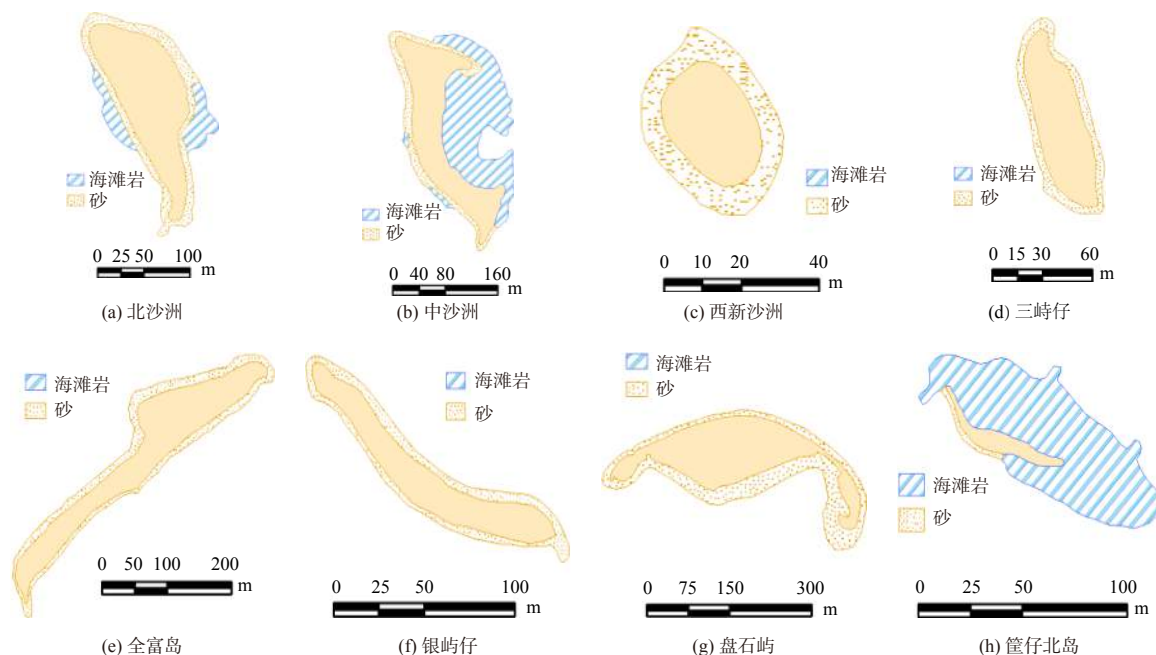


图 3 珊瑚礁沙洲岸滩沉积物类型(2012)

Fig. 3 Beach sediment types of coral reef sandbanks (2012)

在同一成像时刻,西沙群岛珊瑚礁沙洲基本处在相同的季风浪和台风浪作用下,但由于各个沙洲在礁坪中所处位置和岸滩沉积物类型等不同,各个沙洲经受不同的水动力作用,从而形成了 8 个珊瑚礁沙洲不同的演变过程和稳定状态。

北沙洲、中沙洲、西新沙洲和三峙仔位于七连屿南端礁坪上,礁坪基本呈西北—东南向分布,礁坪东北侧为外海,这 4 个沙洲位于礁坪偏西南一侧,大多呈西北—东南向分布。由于受海

滩岩的保护,北沙洲和中沙洲相对稳定,受季风浪的作用,沙洲西北和东南两端发生季节性变化;西新沙洲位于礁坪的南部顶端,直接受到来自偏南向季风浪的作用,沙洲南侧的动力条件较强,因此,西新沙洲总体上表现为向北方向移动;三峙仔西北距北岛 400 多米、东南距中岛 100 多米,主要受东北和西南向波浪能量相对强弱控制,因此,2008—2020 年三峙仔表现为北东—西南向的反复移动,因其东北侧为外海,整体上东

北侧的动力条件要强于西南侧,所以,三峙仔总体呈向西南方向的移动。

全富岛分布在永乐环礁北部偏西的一个礁坪上,礁坪呈东北—西南走向,西北和东南两侧都临海,直接受到来自偏北向和偏南向季风浪以及东向台风浪的作用。全富岛位于礁坪的东北部顶端,距东侧礁缘的距离要小于距西北和东南两侧礁缘的距离,故东侧礁缘传来的波浪能量相对较大,使得全富岛总体上表现为向西方向的持续移动。银屿仔则分布在永乐环礁北部偏东的一个礁坪上,礁坪呈西北—东南走向,礁坪东北侧为外海,西南侧为潟湖,东北向季风浪直接作用到礁坪上,而西南向季风浪受潟湖的阻挡,相对于东北向季风浪强度明显减弱,故银屿仔在2005—2018年总体表现为向西南潟湖方向的移动。

盘石屿位于华光礁东南方一个独立环礁的西北部,环礁内部发育有封闭潟湖,各个方向的季风浪和台风浪都对其有直接作用,且各个方向传播来的波浪能量相当,使得盘石屿虽分布在独立环礁之上但位置相对稳定。筐仔北岛位于羚羊礁东南端、筐仔沙洲以北400多米处,由于其东北半周有大片发育相对较完整的海滩岩保护,加之南侧筐仔沙洲对波浪作用的阻挡和消减,筐仔北岛位置相对稳定。

综上所述,只有在沙洲周边发育形成较为完整的海滩岩,且沙洲上有林木生长,沙洲才趋于稳定,之后才能经过漫长演变逐渐进入珊瑚岛阶段。根据历史调查和研究成果,裸沙洲出露水面后,淡水积存和人工种植植被等方式能够促进沙洲的稳定,促使其由沙洲发育成为珊瑚岛,如位于西沙群岛西南端的中建岛。中建岛的组成物质为珊瑚贝壳砂,刚脱离沙洲阶段时岛上无草木生长,礁坪中部还保存了浅潟湖^[19],后经驻防官兵栽种植被,促进了珊瑚岛的形成,目前已发育成为西沙群岛的第三大岛。因此,建议在相对稳定的北沙洲、中沙洲、盘石屿和筐仔北岛上人工种植抗风、抗盐碱的植被(如木麻黄),促使它们更快地由珊瑚礁沙洲发育成为珊瑚岛;对于尚不稳定的西新沙洲、三峙仔、全富岛和银屿仔,则需进行更长时间的监测和周边自然环境调查。

本文所用的遥感影像是在不同时刻获取的,潮汐会在一定程度上影响珊瑚礁沙洲的提取精度,虽然在信息提取时已严格按照砂质岸线的解译标志来进行,但结果与实际情况可能还会有偏差;同时,受收集高分遥感影像的限制,对各个沙洲的研究时长较短,且研究时段不统一,无法开展各个沙洲的年际变化分析,还不能完整地认识珊瑚礁沙洲发育演变的全过程;此外,与遥感影像时相相匹配的珊瑚礁区海洋动力环境数据的缺乏,导致无法揭示影响珊瑚礁沙洲动态变化过程的具体因素和详细作用机制。未来,随着遥感影像时间和空间分辨率的不断提高、国产自主卫星遥感数据和产品的不断增加以及遥感技术应用的逐步成熟,上述问题将会得到解决。

3 结论

(1)本研究基于2005—2020年多期高分辨率遥感影像,实现了对西沙群岛珊瑚礁沙洲的稳定性评估。结果表明,北沙洲、中沙洲、盘石屿和筐仔北岛相对稳定,质心总位移均不足30 m;西新沙洲、三峙仔、全富岛和银屿仔尚不稳定,位置变化不规律,质心总位移均超过100 m。

(2)珊瑚礁沙洲稳定性的影响因素分析表明,珊瑚礁沙洲稳定性是沙洲沉积物供应、海洋动力环境条件和珊瑚礁地形地貌综合作用的结果,在相同的季风浪和台风浪作用下,由于各个沙洲在礁坪中所处位置和岸滩沉积物类型等不同,经受不同的水动力作用,形成了8个珊瑚礁沙洲不同的演变过程和稳定状态。

(3)根据历史调查和研究成果,本研究建议在相对稳定的北沙洲、中沙洲、盘石屿和筐仔北岛上人工种植抗风、抗盐碱的植被(如木麻黄),促使其更快地由珊瑚礁沙洲发育成为珊瑚岛;而对于尚不稳定的西新沙洲、三峙仔、全富岛和银屿仔,则还需进行更长时间的监测和周边自然环境调查。

参考文献:

- [1] 赵焕庭,王丽荣,宋朝景.南海珊瑚礁地貌模型研究[J].海洋学报,2014,36(9):112-120.
- [2] 郗笃刚,张哲,赵忠东,等.基于OSG的南海岛礁三维地理信息系统的设计与实现[J].海洋测绘,2010,30(6):67-70.

- [3] HAMYLTON S M, NURDIN N, CARVALHO R C, et al. Mangrove and sand cay dynamics on Australian and Indonesian low wooded islands: A 45 year comparison of changes from remote sensing[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106912.
- [4] ZHU H T, JIANG X W, MENG X L, et al. A quantitative approach to monitoring new sand cay migration in Nansha Islands[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(3): 102-107.
- [5] 李晓敏, 张 杰, 马 毅, 等. 罗斗沙岛动态变化的遥感监测[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(2): 52-58.
- [6] 冯永玖, 刘 丹, 韩 震. 遥感和GIS支持下的九段沙岸线提取及变迁研究[J]. *国土资源遥感*, 2012 (1): 65-69.
- [7] 刘永学, 张忍顺, 李满春. 应用卫星影像系列海图叠合法分析沙洲动态变化——以江苏东沙为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 199-204.
- [8] 周胜男, 施 祺, 郭华雨, 等. 2009—2017年南沙群岛珊瑚礁砾洲演变[J]. *热带地理*, 2020, 40(4): 694-708.
- [9] WANG Y X, LIU Y X, JIN S, et al. Evolution of the topography of tidal flats and sandbanks along the Jiangsu coast from 1973 to 2016 observed from satellites[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 150: 27-43.
- [10] 三沙市人民政府网. 西沙群岛: 南海陆地最多的群岛 [EB/OL]. [2021-11-26]. <http://www.sansha.gov.cn/sansha/ssgk/201402/af324e22c7034d8e977023c0dfac2155.shtml>
- [11] 叶锦昭. 西沙群岛环境水文特征[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 1996, 35(增刊): 15-21.
- [12] 海南省地方志办公室. 海南省志·西南中沙群岛志[M]. 海口: 南海出版公司, 2008: 17-30.
- [13] 自然资源部、民政部. 自然资源部 民政部关于公布我国南海部分岛礁和海底地理实体标准名称的公告[EB/OL]. [2021-05-09]. http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200419_2509115.html.
- [14] KAYANNE H, AOKI K, SUZUKI T, et al. Eco-geomorphic processes that maintain a small coral reef island: Ballast Island in the Ryukyu Islands, Japan[J]. *Geomorphology*, 2016, 271: 84-93.
- [15] PERRY C T, KENCH P S, SMITHERS S G, et al. Implications of reef ecosystem change for the stability and maintenance of coral reef islands[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(12): 3679-3696.
- [16] 裴沙怡, 梁楚进, 董昌明, 等. 南海海面风、浪场时空变化特征及其关系分析[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(4): 1-9.
- [17] 许林之. 南海波浪场的分析与预报[J]. *海洋预报*, 1987, 4(3): 48-52.
- [18] 王绿卿, 夏运强, 梁丙臣, 等. 南海灾害性波浪基本特征研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(3): 23-34.
- [19] 中国科学院南海海洋研究所. 西沙群岛海区综合调查初步报告[R]. 广州: 广东省科学技术出版社, 1975: 1-26.

(上接第 39 页)

- [38] RAHAYU Y P, SOLIHUDDIN T, KUSUMANINGTYAS M A, et al. The sources of organic matter in seagrass sediments and their contribution to carbon stocks in the Spermonde Islands, Indonesia[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2019, 25(3/4): 161-178.
- [39] XIA P, MENG X W, LI Z, et al. Late Holocene mangrove development and response to sea level change in the northwestern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(11): 111-120.
- [40] 焦念志. 蓝碳行动在中国[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [41] RAI L C, KUMAR H D, MOHN F H, et al. Services of algae to the environment[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2000, 10(2): 119-136.
- [42] ROSENTERTER J A, MAHER D T, ERLER D V, et al. Methane emissions partially offset "blue carbon" burial in mangroves[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaao4985.
- [43] 周云轩, 田 波, 黄 颖, 等. 我国海岸带湿地生态系统退化成因及其对策[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1157-1166.
- [44] HE Q, BERTNESS M D, BRUNO J F, et al. Economic development and coastal ecosystem change in China[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5995.
- [45] LI X Z, BELLERBY R, CRAFT C, et al. Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration[J]. *Anthropocene Coasts*, 2018, 1(1): 1-15.
- [46] WAYCOTT M, DUARTE C M, CARRUTHERS T J B, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(30): 12377-12381.
- [47] DUARTE C M, DENNISON W C, ORTH R J W, et al. The charisma of coastal ecosystems: addressing the imbalance[J]. *Estuaries and Coasts*, 2008, 31(2): 233-238.