



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

海南东方近岸海底活动沙波的地球物理特征及其迁移机制

李勇航, 牟泽霖, 倪玉根, 苏明, 潘冬阳, 蔡鹏捷, 陈志坚

Geophysical characteristics and migration mechanism of active submarine sand waves off the coast of Dongfang, Hainan

LI Yonghang, MU Zelin, NI Yugen, SU Ming, PAN Dongyang, CAI Pengjie, and CHEN Zhijian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020082602>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北部湾东南海域海底沙波发育分布特征及控制因素

DISTRIBUTION PATTERN AND CONTROL FACTORS OF SAND WAVES IN SOUTHEAST BEIBU GULF

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 67

海底泥火山的甲烷迁移与转化及其对海洋碳输入的影响

Methane migration and consumption in submarine mud volcanism and their impacts on marine carbon input

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 1

声学水面无人艇在浅水海底地貌调查中的应用

Application of acoustic unmanned surface vehicle to submarine geomorphology survey in shallow water

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 219

海底水合物冰丘的特征及意义

THE CHARACTERISTICS AND IMPLICATIONS OF SUBMARINE HYDRATE PINGO

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 117

冲绳海槽南部海底热液活动区地形地貌特征及成因分析

Topographic features of the hydrothermal field and their genetic mechanisms in southern Okinawa Trough

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 12

南黄海废黄河口近岸海域近底部悬沙输运观测

Observation of near-bottom transport of suspended sediment in the offshore area of abandoned Yellow River mouth

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 38



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020082602

海南东方近岸海底活动沙波的地球物理特征及其迁移机制

李勇航^{1,2}, 牟泽霖¹, 倪玉根¹, 苏明², 潘冬阳¹, 蔡鹏捷¹, 陈志坚¹

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082

摘要: 海南东方近岸海底发育有大量沙波, 利用多波束测深、侧扫声呐、浅地层剖面、单道地震资料综合分析了活动沙波的地球物理特征, 探讨了沙波的分布特征、迁移机制、活动性及形态演变特征。结果表明, 研究区海底沙波分布和规模具有显著空间差异性, 大中型沙波主要发育于沙脊上, 小型沙波主要发育于沙脊两侧, 坑槽区发育近对称沙波, 研究区西南部沙波不发育。受潮流和科氏力约束, 在海底沙脊西侧沙波迁移方向主要为向北(略偏东), 在沙脊东侧主要为向南(略偏西); 受地形制约, 坑槽区近对称沙波迁移可能停止或方向发生改变。沙波活动性强的标志主要包括: ① 形态呈不对称的“脊尖槽缓”, ② 叠置小沙波与沙纹发育, ③ 浅部有透明层, ④ 陡坡面反射模糊, ⑤ 内部斜交前积结构。分析认为, 沙波活动性与其形态密切相关, 包括弱运动、强运动、不运动 3 个演变阶段。

关键词: 海底沙波; 海底沙丘; 沙波迁移; 形态演变; 活动沙波; 海底地貌

中图分类号:P737.2 文献标识码:A

Geophysical characteristics and migration mechanism of active submarine sand waves off the coast of Dongfang, Hainan

LI Yonghang^{1,2}, MU Zelin¹, NI Yugen¹, SU Ming², PAN Dongyang¹, CAI Pengjie¹, CHEN Zhijian¹

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China

2. School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: A large numbers of sand waves are developed on the seafloor off the coast of Dongfang, Hainan. This paper is devoted to the study of the geophysical characteristics of active submarine sand waves by means of multi-beam echo-sounding, side-scan sonar, sub-bottom profile, and single-channel seismic, and to the discussion on the distribution pattern, migration mechanism, activity, and morphologic evolution of the sand waves. The results show that there are significant spatial differences in the distribution and scale of submarine sand waves, for examples, large and medium-sized sand waves are mainly developed on the top of sand ridges, small sand waves developed mainly on the two sides of sand ridges, and near-symmetrical sand waves developed in the areas of pits. Submarine sand waves are not developed in the southwest of the study area. Constrained by tidal current and Coriolis force, the migration direction of the sand wave on the west side of the submarine sand ridge is mainly northwards with a few towards east, while those on the east side is mainly southwards with a few slightly towards west. Restricted by topography, the migration of near-symmetric sand waves may stop or change direction. Strongly active submarine sand waves are characterized by the features as follows. (a) Asymmetric shape with "sharp ridge and gentle trough"; (b) Small sand waves and sand ripples superimposed on sand waves; (c) Sub-bottom profile shows transparent layers; (d) Blank reflection on the steep slope; (e) Internal oblique progradation configuration. The analysis shows that the movement of the sand waves is closely related to its morphology, and three stages of evolution from inactive to highly active to motionless are recognized.

Key words: submarine sand waves; submarine dunes; sand waves migration; morphological evolution; active sand waves; submarine geomorphology

资助项目:中国地质调查局项目“海南福建等近海重点区矿产资源调查”(DD20201175), “海南岛东北部沿海地区综合地质调查”(DD20190308); 国家重点研发计划项目“天然气水合物高分辨率三维地震探测系统整体设计”(2017YFC0307402)

作者简介:李勇航(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事海洋地质与地球物理调查研究, E-mail: leo_hang@qq.com

收稿日期:2020-08-26; 改回日期:2020-10-26。文凤英编辑

在海洋浪、潮、流等水动力作用下,波脊线垂直于主水流方向的一种韵律形的海床地貌形态称为海底沙波^[1-2],由现代河流入海沉积或原地和邻近海底较老沉积物形成。我国南海北部^[3-4]、东海北部^[5]和渤海东部^[6]等近岸和浅海发育有大量海底沙波。海底沙波快速迁移可能造成航道淤积、海底管道的悬空或掩埋,更严重可能导致海底管道和光缆断裂、海上平台倾斜,给经济和环境带来巨大损失^[7-8]。此外,海底沙波与古气候、古环境、古岸线的重建与反演密切相关^[9-11]。因此,研究沙波具有重要的应用价值和科学意义。国内外学者对海底沙波的形态特征^[12-16]、稳定性^[17]、迁移速率^[18-20]和发育与形成条件^[21]等进行了研究。受测量方法综合性、资料分辨率、测量精度等不足所限,专门针对海底活动沙波地球物理特征的分析较少。本文利用多波束测深、侧扫声呐、浅地层剖面及单道地震资料对研究区海底沙波的分布、微地貌、外部形态和内部结构等进行了综合分析,揭示其迁移方向、活动性及形态演变特征,为快速判定海底沙波迁移方向及其活

动性强弱提供参考和借鉴意义。

1 区域背景

海南岛西南近岸海域海底沙脊与海底沙波等地貌十分发育。沙脊分布范围为近岸到岸坡边缘水深35 m的区域,多数呈狭长条状,走向以NW-SE为主,少数近岸沙脊呈不规则条状,呈NE-SW走向(图1a)。沙波是分布最广泛的地貌类型,与沙脊普遍存在共生关系。研究区(图1a所示红色框)是海南岛西南近岸海域典型的海底沙脊与沙波发育区域(图1b),位于东方岸外海域,距离感恩角约20 km,面积3.5 km×6 km,属于浅海半封闭性的陆架海,附近有罗带河、感恩河等小型河流入海。钻孔资料显示海底沙脊上全新统厚度具有明显的空间差异性,从几米到几十米不等;沙脊槽部遭受潮流、波浪的冲刷侵蚀,全新统厚度薄,甚至直接出露更新统。附近两口钻孔显示MIS1期沉积速率分别为16.7和35.4 cm/ka。研究区地质构造上属于莺歌海盆地

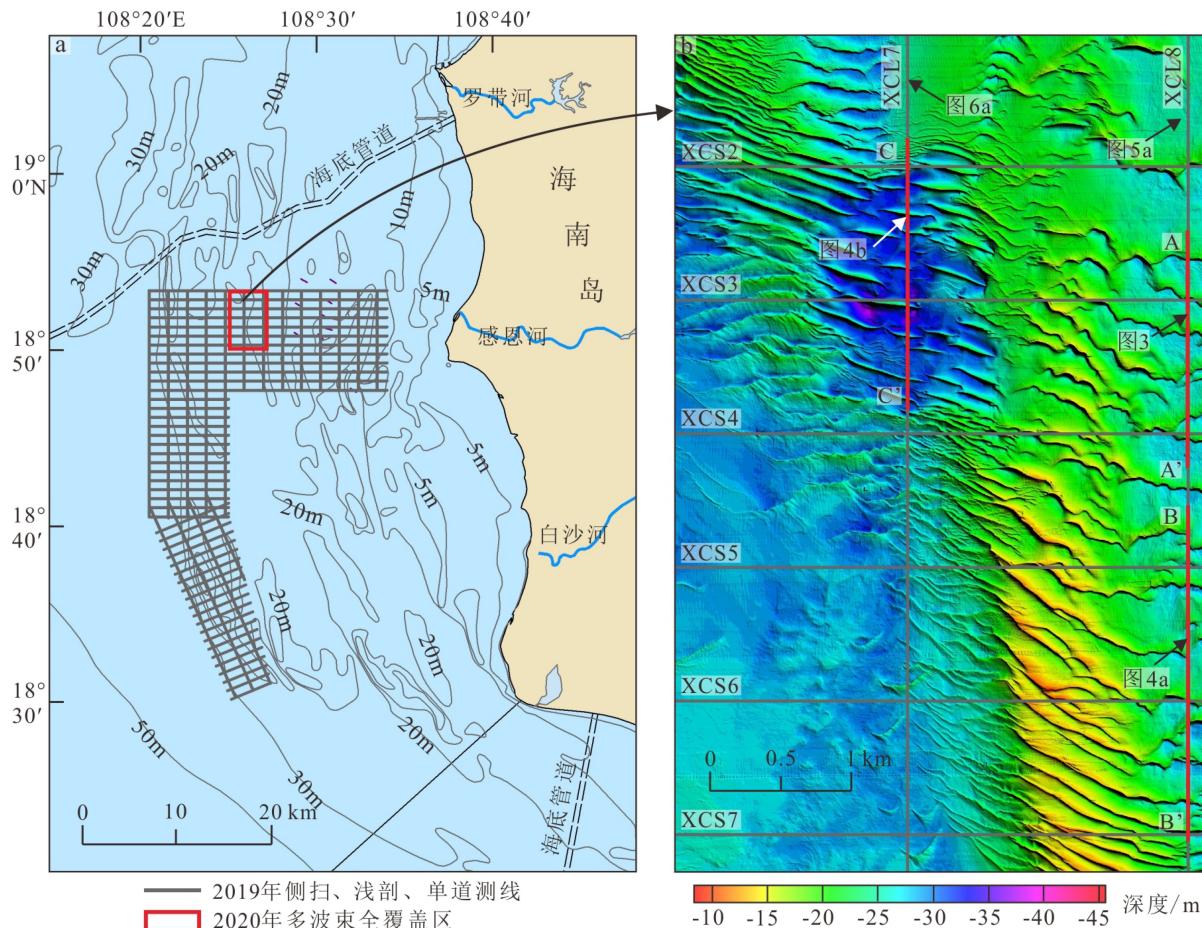


图1 海南西南近岸海域水下沙脊和调查测线分布(a)以及研究区地形和图3—6所在位置(b)

Fig.1 Distribution of submarine sand ridges and survey lines in coastal waters of southwestern Hainan (a), and topographic map of study area and the location of Fig.3-6 (b)

东缘。研究表明 20~50 m 水深的沙脊区在第四纪海侵前为陆地, 海平面快速上升期间沿岸沉积被没入海水中接受改造^[22]。海底表层沉积物多是河流输入、海流运输及近岸侵蚀的混合沉积物^[23]。近岸潮流主要为近南北向往复流, 流向与岸线基本平行, 近岸涨、落潮流分别为北向和南向^[12]。研究区实测大潮涨潮最大底层流速 68 cm/s, 平均流速 42 cm/s; 落潮最大底层流速 69 cm/s, 平均流速 40 cm/s。西北太平洋及南海生成的热带气旋或台风引起的风暴潮、台风浪, 对海岸形态及海底底形也产生较大影响。

2 数据与方法

广州海洋地质调查局 2019 年利用“奋斗四号”船在海南岛西南海域进行了大范围的浅地层剖面、单道地震、侧扫声呐调查(图 1a)。2020 年又利用“奋斗五号”在选定区域(图 1b)进行了高精度多波束测深调查。声速值使用 1520 m/s, 导航定位使用 SF3050 DGPS 接收机, 定位误差小于 0.5 m, 多波束及浅剖使用 Octans 进行姿态校正, 船只保持 4~5 kn 匀速直线行驶, 使用的调查设备及采集参数见表 1。多波束测深、侧扫声呐、浅地层剖面、单道地震数据处理分别使用 Caris 11.2、SonarWiz 5.0、ISE 2.9.5 及 Geosuite Allworks 2.6 软件, 图表制作使用 CorelDRAW X7、ArcMap10.5 软件。

3 结果

地球物理数据综合揭示了研究区沙波分布、大小、迁移方向、微地貌、外部形态和内部结构等特征。

3.1 多波束测深

多波束测深数据揭示研究区沙波分布、规模、形态及迁移方向具有显著的空间差异性。按照波

高不同, 波高 7.5~40 cm 为小型沙波, 40~75 cm 为中型沙波, 75~500 cm 为大型沙波, 波高大于 500 cm 的沙波称巨型沙波^[24]。

研究区在近南北走向的海底沙脊上(水深 10~25 m)主要发育大中型沙波, 巨型沙波也有出现(图 2a-S1、S2、S5), 波高 0.8~13.2 m, 平均 4.9 m, 整体高于全区沙波平均值。沙波脊线弯曲, 呈韵律的条带状; 剖面呈“脊尖槽缓”的波状排列, 成群出现。沙脊侧翼部发育小型沙波(图 2a-S3)。研究区西南部沙波不发育, 地形较平坦(图 2a-S4 和图 2b)。在海底沙脊东侧沙波总体为向南(略偏西)迁移, 西侧总体为往北(略偏东)迁移(图 2b)。研究区北部海底坑槽(水深 30~45 m)发育近对称沙波, 其迁移方向不明显(图 2a-S6 和图 2b)。

表 2 为海南西南海域沙波形态参数的文献对比统计, 其中第一列为研究区 202 个主要沙波形态参数的统计结果, 沙波脊线展布见图 2b。研究区沙波最大波高 13.2 m, 最大陡坡倾角 25°, 最大对称指数 12.8, 与前人研究结果相比数值偏大, 表现出强活动性的特征。

3.2 侧扫声呐

侧扫声呐是基于声学反向散射原理的二维成像, 可对小高差的微地貌单元(如小沙波、沙纹等)进行定量化的观测(图 3a)。测线 A-A'(位置见图 1b)经过海底沙波发育区, 沙波脊槽相间, 槽部有明显小起伏, 翼部较为平坦(图 3a)。图 3b 海底线呈“竹节状”变化同样指示沙波脊槽相间的地形变化特征; 沙波背部对声波的屏蔽导致脊线两侧回波强度差异大, 甚至形成声影区; 槽部和翼部密集发育小沙波与沙纹。图 3c 为图 3b 的局部视图, 进一步揭示沙波上叠置的小沙波和沙纹的形态和分布特征。叠置小沙波和沙纹表现为尺寸细小、排列紧密, 呈直线形或分叉状, 与其下伏沙波走向一致。从分布特征上看, 沙纹似乎多在两翼发育, 而小沙

表 1 主要调查设备及数据采集参数
Table 1 Main parameters of the surveying systems

参数	多波束测深	侧扫声呐	浅地层剖面	单道地震
设备型号	EM710S	EdgeTech4200	SES2000Medium	SIG 2Mille 震源 Geo-sense 48 电缆
中心频率/kHz	120	110	6	0.6~1
量程/m	通常为水深的 3~4 倍	单侧 100	60	海底以下 100
声源发射率/Hz	大于 5	约为 7	约为 12	1
观测系统	船底安装	拖曳于船尾后约 120 m, 近底观测	船底安装	沉放约 0.5 m, 拖曳于右船尾后约 45 m

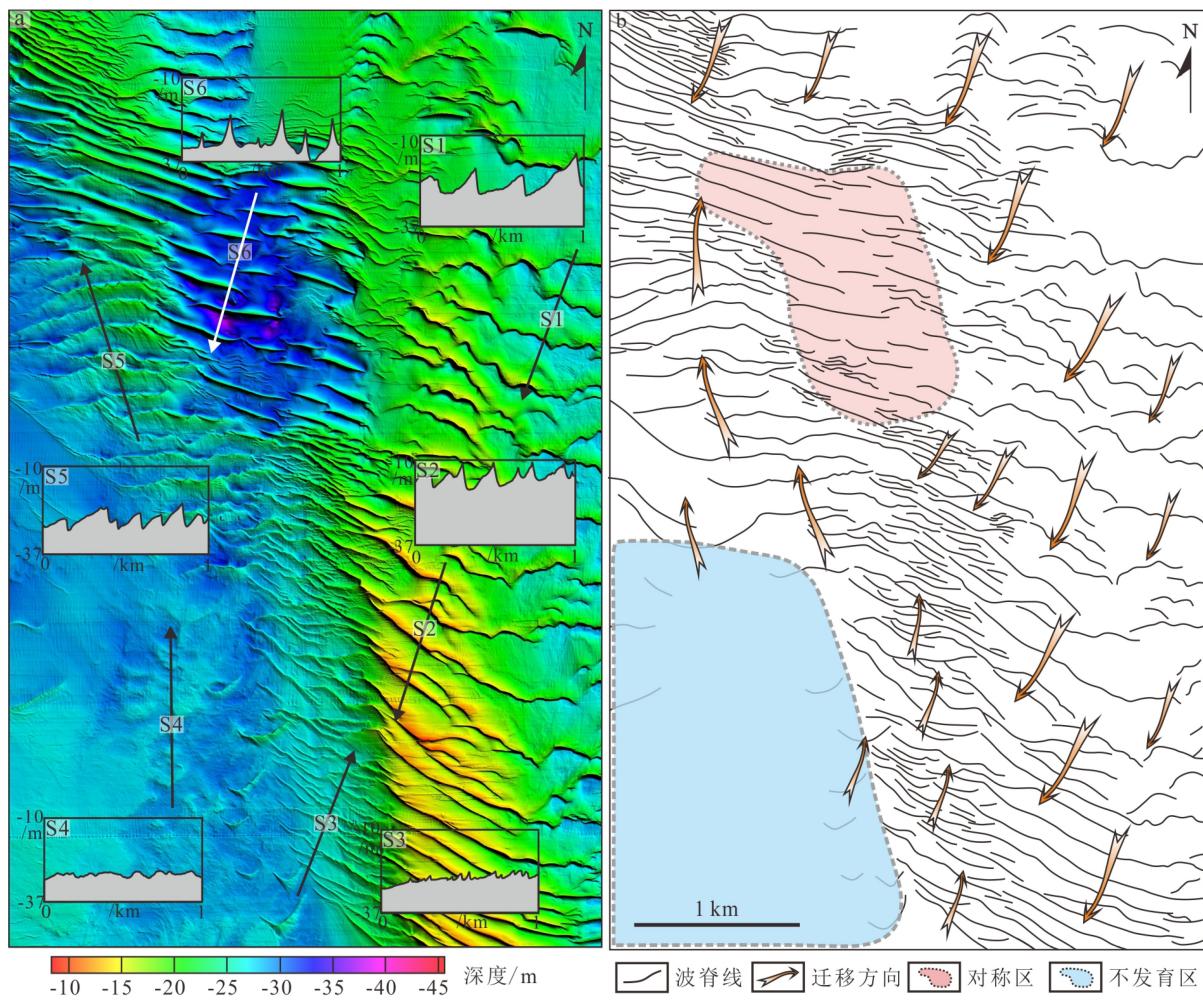


图2 多波束测深揭示典型沙波分布与形态 (a) 及沙波迁移方向 (b)

Fig.2 Distribution, shape (a), and migration direction (b) of typical sand waves revealed by multi-beam echo-sounding data

表2 海南岛西南近岸海域海底沙波形态参数统计

Table 2 Morphological parameters of submarine sand waves in the southwestern offshore area of Hainan

形态参数	研究区	海南岛西部VI区 ^[7]	东方岸外东区 ^[12]	海南岛西南海域 ^[25]	海南岛东方海域 ^[26]
水深/m	9~46, 平均25	19.3~21.3	20~50	30~40	平均15
波长/m	7.1~329, 平均93.3	41~148	-	5.8~91.8	41.5~719.7
波高/m	0.3~13.2, 平均4.7	1.7~5.9	2~10	0.1~4.3	0.84~9.9
垂直形态参数	5.5~54, 平均22	16~29	18~44	-	14.5~196.2
缓坡倾角/ (°)	3.2~13, 平均5	2.7~5.1	-	-	0.34~8.05
陡坡倾角/ (°)	3.2~25, 平均10.7	10.4~16.8	10~20	-	2.0~13.3
对称指数	1.0~12.8, 平均4.5	3.1~4.6	7~12.6	0.32~6.52	0.67~9.63

注: 缓坡水平距离 (a) , 陡坡水平距离 (b) , 波长 ($L=a+b$) , 波高 (H) , 垂直形态参数 (L/H) , 对称指数 (a/b) 。

波则在槽部发育。

3.3 浅地层剖面

浅地层剖面 B-B' (测线位置见图 1b) 显示沙波呈波形不对称的波状排列。沙波缓坡面海底线连

续清晰, 浅部有一层厚约 2 m 的透明层; 陡坡面反射散乱, 下伏亚平行状的迁移底界面(图 4a), 指示沉积物从缓坡被侵蚀并在陡坡面堆积, 沙波沿底床不断前移。

浅地层剖面 C-C' (测线位置见图 1b) 经过研究

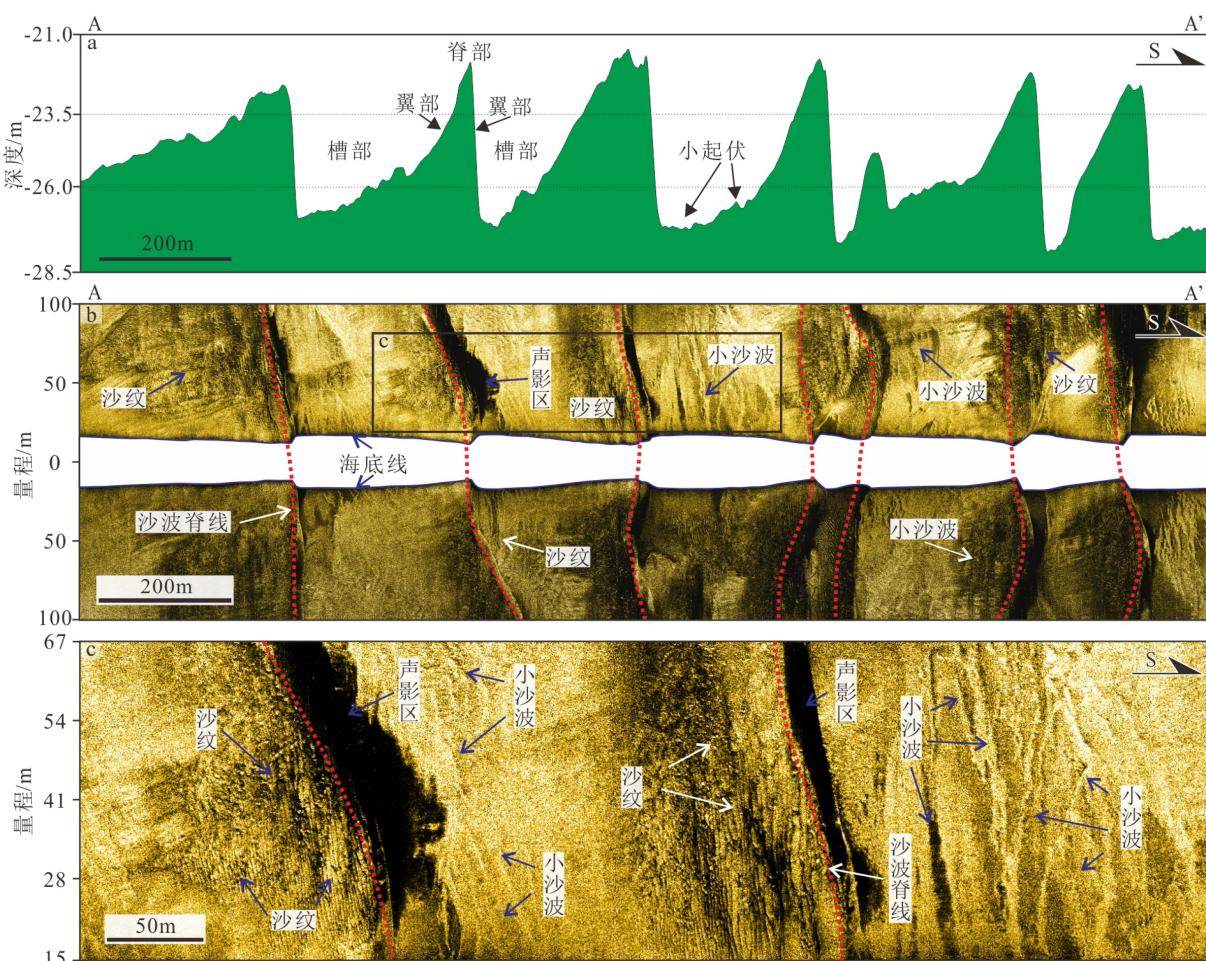


图 3 侧扫声呐揭示的沙波剖面形态 (a) 与平面形态 (b) 及微地貌分布特征 (c)
Fig.3 Profile shape (a), plane shape (b), and micro-geomorphologic distribution characteristics (c) of sand waves revealed by side-scan sonar

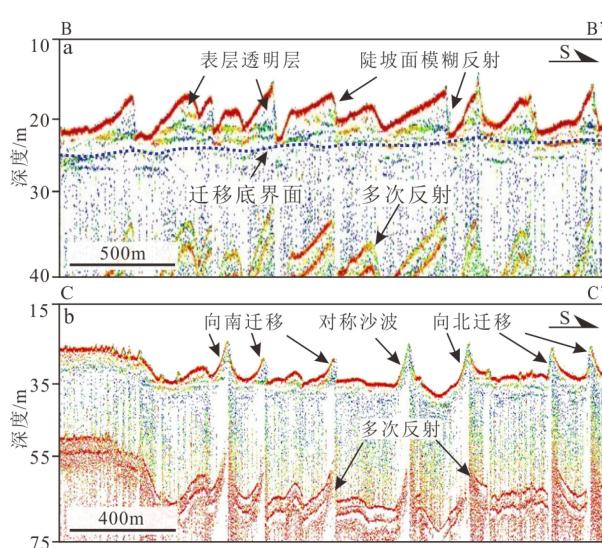


图 4 浅地层剖面揭示活动沙波特征 (a) 和坑槽中对称沙波特征 (b)

Fig.4 Characteristics of active sand waves (a) and symmetric sand waves in the pit (b) revealed by sub-bottom profile

区北部坑槽区, 同样可见陡坡海底界面呈模糊反射, 剖面中段近对称沙波发育, 其两侧沙波迁移方向相反(图 4b)。

3.4 单道地震

单道地震揭示了海底沙波的外部及内部形态结构。测线 XCL8 单道剖面(图 5a)经过沙脊区(测线位置见图 1b), 可见沙波呈波形不对称波状排列, 成群出现, 波脊尖锐。图 5b 为图 5a 的局部视图, 缓坡面表层反射为连续强振幅, 陡坡面反射模糊, 沙波内部可见呈断续丘状弱振幅反射的斜交前积结构(黑线), 表明该处沉积物从缓坡侵蚀, 并向陡坡不断堆积迁移。下伏地层呈连续中振幅亚平行反射(蓝色和绿色虚线), 其中最上层与沙波槽部相切, 为沙波迁移的底界面(蓝线)。未见埋藏(消亡)的多期次沙波或沙脊结构。

测线 XCL7 单道剖面(图 6a)经过研究区北部的坑槽区(测线位置见图 1b), 剖面北段显示为平坦地

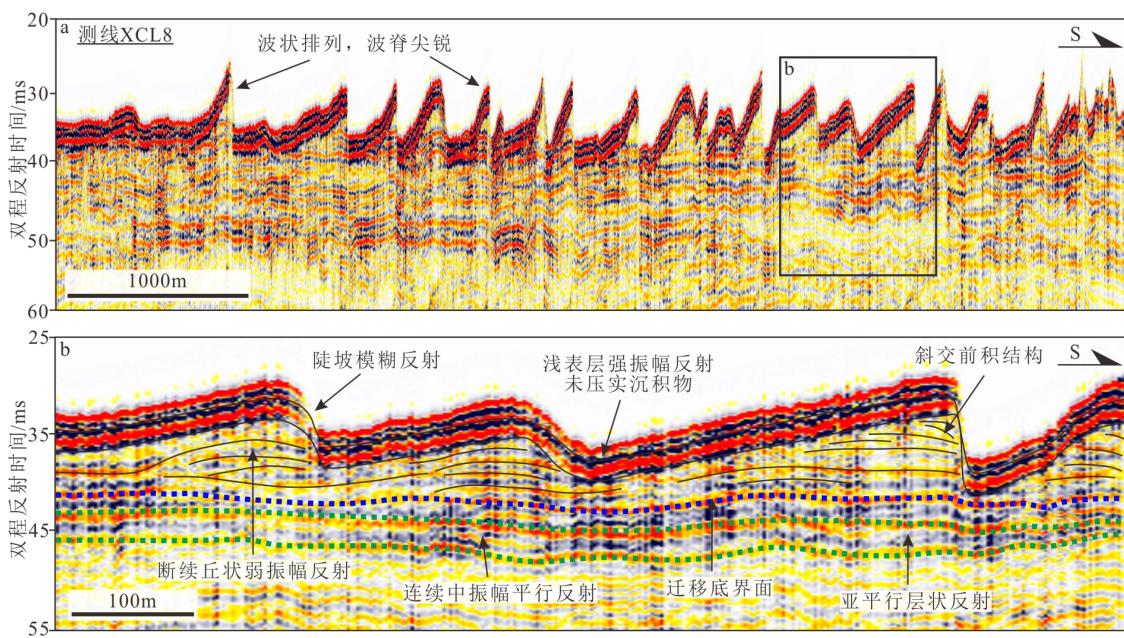


图5 单道地震剖面揭示测线XCL8沙波群形态（a）及沙波结构特征（b）

Fig.5 Shape of sand wave group of line XCL8 (a) and structure characteristics of sand waves (b) revealed by single-channel seismic profile

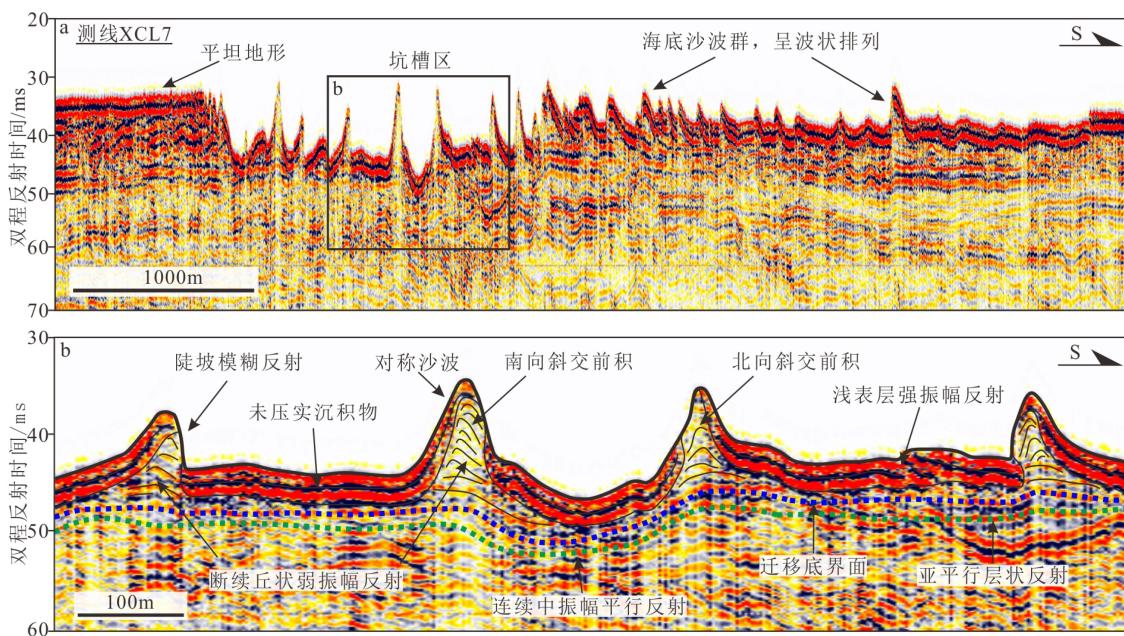


图6 单道地震剖面揭示测线XCL7沙波群形态（a）及坑槽中对称沙波内部结构特征（b）

Fig.6 Shape of sand wave group of line XCL7 (a) and structure characteristics of symmetric sand waves in the pit (b) revealed by single-channel seismic profile

形，沙波不发育，中段坑槽区的对称沙波发育，南段发育呈北向迁移沙波群。图6b为图6a的局部视图，左侧与右侧的沙波对比，其内部斜交前积结构以及反射模糊的陡坡面，朝向皆相反，指示底流在此处达到平衡或方向发生转换。越靠近对称沙波区，沙波波高越高。表层强振幅、下部连续中振幅亚平行反射，与图5b所显示的类似，分别表征了未

压实的沉积物和迁移底界面。

4 讨论

4.1 沙波分布特征和迁移机制

海南岛东方岸外沙波的形成和发育主要受潮

流场控制, 热带风暴对其有改造作用^[7]。研究区海底沙波分布广泛, 大中型沙波主要发育于沙脊上以及沙脊两侧, 沙脊西南部沙波不发育, 坑槽发育近对称沙波(图 2a), 不同部位沙波规模和形态具有明显空间差异。这种差异与沙波受水动力、地形、可供沉积物多少的控制有关。

在潮控陆架上, 利用沙波波形不对称可判断沉积物的迁移方向。研究区沙波形态参数统计结果(表 2)表明, 研究区沙波对称指数为 1.0~12.8, 平均为 4.5, 具有明显的不对称性。利用这种不对称性识别了研究区沙波迁移方向(图 2b)。如前所述, 研究区海底沙脊西侧沙波主要呈向北(略偏东), 东侧沙波主要呈向南(略偏西)两个方向迁移(图 2b)。研究区潮流为正规全日潮型的往复流, 涨潮时潮流主体向北运动, 在科氏力影响下流动向右偏转, 水体能量在沙脊西侧相对聚集, 使得沙脊西侧的沉积物向北(略偏东)迁移; 退潮时潮流主体向南运动, 在科氏力影响下水流向右偏转, 水体能量在沙脊的东侧相对聚集, 使得沙脊东侧的沉积物向南(略偏西)迁移。因此, 研究区沙脊两侧沙波的迁移特征是潮流与科氏力综合作用的结果。

受控于地形这一主要因素, 研究区北部坑槽区发育近对称性沙波(图 2a-S6)。朝向相反的陡坡面及斜交前积结构(图 4b 和图 6b)一方面反映了沉积物从坑槽外向坑槽内汇聚, 另一方面反映了涨、落潮流在此达到平衡, 其迁移可能停止或方向发生改变。

4.2 沙波活动性特征

在现代水动力条件下形成的沙波大多是活动的, 其形态随水动力条件变化而改变^[27]。陆架水下沙波的稳定性标志表现在海底状况、外部形态、粒度结构、水动力和迁移速率等方面^[17]。前人统计不同沙波发育区的水动力大小, 认为 20~100 cm/s 的底流速度是形成陆架沙波的动力条件, 底流速度大于 50 cm/s 是强活动沙波形成的特征标志之一^[17, 21]。

研究区实测大潮期涨、落潮最大底流速度分别为 68 和 69 cm/s, 这一结果满足强活动沙波形成的底流条件。虽然仅凭沙波的形态特征和参数尚难以定量计算沙波迁移速率, 但可定性地评估沙波活动性强弱及迁移方向。

研究区海底沙波“脊尖槽缓”波状排列(图 2), 波高、陡坡倾角、对称指数等形态参数数值较大(表 2), 沙波上叠加发育与其迁移方向相同的小沙波、沙纹微地貌单元(图 3c), 表征了沙波具有较强的活动性。沙波的活动性与浅地层剖面特征密切相关^[12-13]。单道地震剖面缓坡表层的强振幅反射(浅地层剖面表现为一层透明层)指示尚未被压实的沉积物。陡坡呈反射模糊特征(图 4、图 5), 以及表现为断续丘状弱振幅反射的斜交前积内部结构(图 5b、图 6b), 反映从缓坡侵蚀的沉积物在陡坡处堆积, 并不断向前迁移。沙波陡坡越陡则其活动性越强, 迁移速度越快。坑槽区的对称沙波对称指数小, 反映涨、落潮流流速相近, 沙波比较稳定。对活动沙波的水深、形态结构、微地貌分布、剖面反射特征等综合分析(图 2—6), 其特征归纳见表 3。

4.3 沙波活动性与形态演变

通常平坦宽阔的海底地形及充足的沉积物供应是海底沙波形成的主要内因, 而潮汐、海浪、波浪、内波等水动力条件则是主要外因。海底沙波、沙纹以及沙脊、沙带等不同(底形)地貌单元, 随着条件的改变可发生互相转化、共存和叠置。海底沙波形态特征反映海底动力、底沙丰寡、沙波尺度大小及运动的相对强弱^[17]。研究区沙波活动性与其形态密切相关。主要考虑水动力条件及沉积物供应因素, 将研究区沙波活动性强弱与形态特征进行耦合, 分为弱运动、强运动、不运动 3 个主要阶段。

第一阶段沙波处于弱运动(图 7a)。在平坦开阔的海底, 随着潮流动力逐渐增强, 对原地或邻近海底沉积物的侵蚀能力增强, 但由于沉积物供应缺乏, 这一阶段中小型沙波稀疏发育, 波高较小, 初步

表 3 研究区海底活动沙波地球物理特征

Table 3 Geophysical characteristics of active submarine sand waves in the study area

观测方法	地球物理特征
多波束测深	平面上呈韵律的新月形条带状; 剖面上呈“脊尖槽缓”的波状排列, 成群出现。
侧扫声呐	海底线呈“竹节状”变化, 波脊线两侧回波强度变化明显; 发育叠置小沙波与沙纹。
浅地层剖面	波状排列, 通常波形不对称; 浅部有一层透明层; 缓坡面反射连续清晰, 陡坡面反射模糊; 内部可见迁移活动底界面。
单道地震	波状排列, 波形陡缓分明; 缓坡面表层为连续强振幅反射, 陡坡面表层反射模糊。沙波内部为斜交前积反射结构, 下伏为亚平行的层状反射。

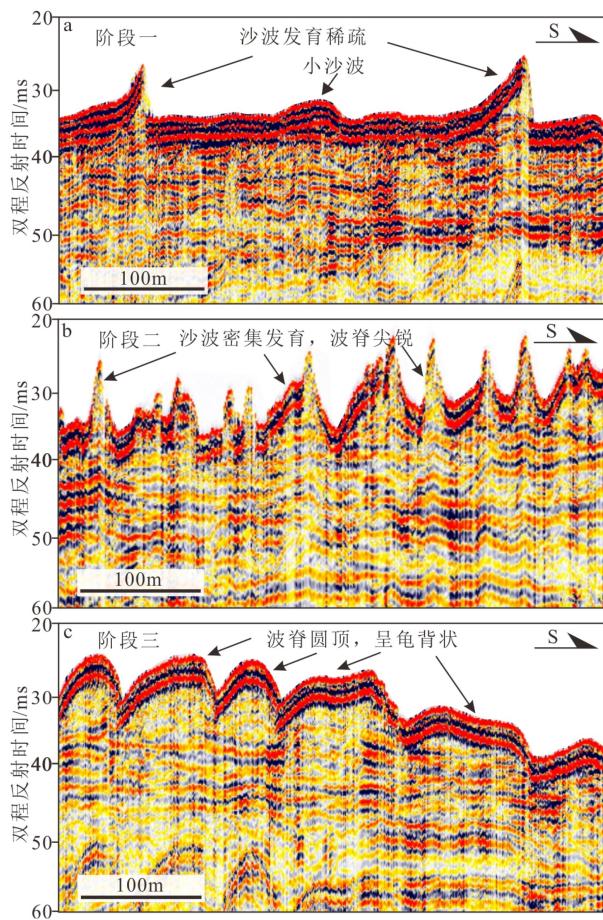


图7 海底活动沙波形态演变阶段一(a)、阶段二(b)和阶段三(c)的特征

Fig.7 The characteristics of stage 1(a), stage 2(b), and stage 3(c) of the morphologic evolution of active submarine sand waves

表现出活动性和定向迁移特征。第二阶段沙波处于强运动(图7b)。随着沉积物供应增多及潮流动力增强,侵蚀和堆积作用同时进行,且以堆积作用为主。大中型沙波密集发育,波高与坡度大,波脊尖锐,沙波活动性强,可快速迁移。第三阶段沙波变得逐渐不运动(图7c)。沉积物供应减少,潮流动力减弱或极大增强,沙波形态难以维持,波脊呈圆顶的龟背状,两坡交切圆浑,坡度较小,沙波持续退化,活动性减弱,沙波难以迁移。

5 结论

(1)研究区沙波分布和规模具有空间差异特征,大中型沙波主要发育于沙脊上,小型沙波主要发育于沙脊两侧,西南部沙波不发育,坑槽区发育近对称沙波。受潮流场与科氏力制约,在沙脊西侧的沙波趋于向北(略偏东)迁移,东侧的沙波趋于向南(略偏西)迁移。中部坑槽区内的近对称性沙波,

迁移可能停止或方向发生改变。

(2)研究区沙波的形态参数特征与地球物理特征共同表征了沙波的强活动性。沙波平均波高4.7 m,平均陡坡倾角10.7°,平均对称指数4.5,与前人研究结果相比偏大。活动特征表现为“脊尖槽缓”的波状排列,叠置发育小沙波与沙纹,浅部含透明层,迁移活动底界面清楚,内部为斜交前积结构。

(3)研究区沙波形态与其活动性密切相关,对应弱运动、强运动、不运动3个主要演变阶段。弱运动阶段沙波发育稀疏,初步表现出活动和定向迁移特征。强运动阶段沙波发育密集,波脊尖锐,活动性强,沙波可快速迁移。不运动阶段波脊浑圆,坡度较小,沙波开始退化,活动性弱。

参考文献 (References)

- [1] Allen J R L. Developments in Sedimentology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1982: 953.
- [2] Besio G, Blondeaux P, Vittori G. On the formation of sand waves and sand banks [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 557: 1-27.
- [3] 冯文科,黎维峰,石要红.南海北部海底沙波地貌动态研究[J].海洋学报,1994,16(6): 92-99. [FENG Wenke, LI Weifeng, SHI Yaohong. Study on seafloor sandwaves dynamics in the northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(6): 92-99.]
- [4] 王尚毅,李大鸣.南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆坡海底沙波动态分析[J].海洋学报,1994,16(6): 122-132. [WANG Shangyi, LI Daming. Analysis on submarine sand waves dynamics of shelf-slope and continental slope in the Pearl River Mouth Basin of the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(6): 122-132.]
- [5] 叶银灿,宋连清,陈锡土.东海海底不良工程地质现象分析[J].东海海洋,1984,2(3): 34-39. [YE Yincan, SONG Lianqing, CHEN Xitu. An analysis of geotechnical hazards of the East China Sea floor [J]. *Donghai Marine Science*, 1984, 2(3): 34-39.]
- [6] 刘振夏,汤毓祥,王揆洋,等.渤海东部潮流动力地貌特征[J].黄渤海海洋,1996,14(1): 7-21. [LIU Zhenxia, TANG Yuxiang, WANG Kuiyang, et al. Tidal dynamic geomorphic system in the east part of the Bohai Sea [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1996, 14(1): 7-21.]
- [7] 曹立华,徐继尚,李广雪,等.海南岛西部岸外沙波的高分辨率形态特征[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(4): 15-22. [CAO Lihua, XU Jishang, LI Guangxue, et al. High-resolution morphological characteristics of sand waves off the west Hainan island [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26 (4): 15-22.]
- [8] 单红仙,沈泽中,刘晓磊,等.海底沙波分类与演化研究进展[J].中国海洋大学学报,2017,47(10): 73-82. [SHAN Hongxian, SHEN Zezhong, LIU Xiaolei, et al. Classification and evolution of submarine sandwave: a review [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 73-82.]
- [9] Dalrymple R W. Morphology and internal structure of sandwaves in

- the Bay of Fundy [J]. *Sedimentology*, 1984, 31(3): 365-382.
- [10] Doré A, Bonneton P, Marieu V, et al. Numerical modeling of subaqueous sand dune morphodynamics [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(3): 565-587.
- [11] 蔺爱军, 胡毅, 林桂兰, 等. 海底沙波研究进展与展望[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1366-1377. [LIN Ajun, HU Yi, LIN Guilan, et al. Progress and perspective of submarine sand waves researches [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1366-1377.]
- [12] 夏东兴, 吴桑云, 刘振夏, 等. 海南东方岸外海底沙波活动性研究[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(1): 17-24. [XIA Dongxing, WU Shangyun, LIU Zhenxia, et al. Research on the activity of submarine sand waves off Dongfang, Hainan island [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2001, 19(1): 17-24.]
- [13] 王琳, 吴建政, 石巍. 海南乐东陆架海底沙波形态特征及活动性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007(S1): 53-59. [WANG Lin, WU Jianzheng, SHI Wei. Research on the shape character and activity of submarine sand waves off Ledong, Hainan island [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(S1): 53-59.]
- [14] 郭兴杰, 程和琴, 莫若瑜, 等. 长江口沙波统计特征及输移规律[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 148-158. [GUO Xingjie, CHENG Heqin, MO Ruoyu, et al. Statistical characteristics and transport law of sand waves in the Yangtze Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(5): 148-158.]
- [15] 余威, 吴自银, 周洁琼, 等. 台湾浅滩海底沙波精细特征、分类与分布规律[J]. 海洋学报, 2015, 37(10): 11-25. [YU Wei, WU Ziyin, ZHOU Jieqiong, et al. Meticulous characteristics, classification and distribution of seabed sand wave on the Taiwan bank [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(10): 11-25.]
- [16] Zheng S W, Cheng H Q, Wu S H, et al. Discovery and implications of catenary-bead subaqueous dunes [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59(3): 495-502.
- [17] 庄振业, 曹立华, 刘升发, 等. 陆架沙丘(波)活动量级和稳定性标志研究[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(6): 1001-1007. [ZHUANG Zhenye, CAO Lihua, LIU Shengfa, et al. Activity level and balance signs of subaqueous dunes (Waves) in the continental shelf [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(6): 1001-1007.]
- [18] 林缅, 范奉鑫, 李勇, 等. 南海北部沙波运移的观测与理论分析[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3): 776-784. [LIN Mian, FAN Fengxin, LI Yong, et al. Observation and theoretical analysis for the sand-waves migration in the North Gulf of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(3): 776-784.]
- [19] Li Y, Lin M, Jiang W B, et al. Process control of the sand wave migration in Beibu Gulf of the South China Sea [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2011, 23(4): 439-446.
- [20] Jiang W B, Lin M. Research on bilateral reverse migration of one-group seabed sand waves in a small shallow shelf sea [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 111: 70-82.
- [21] 庄振业, 林振宏, 周江, 等. 陆架沙丘(波)形成发育的环境条件[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(4): 5-10. [ZHUANG Zhenye, LIN Zhenhong, ZHOU Jiang, et al. Environmental conditions for the formation and development of sand dunes (waves) in the continental shelf [J]. *Marine Geology Letters*, 2004, 20(4): 5-10.]
- [22] 王文介. 南海北部的潮波传播与海底沙脊和沙波发育[J]. 热带海洋, 2000, 19(1): 1-7. [WANG Wenjie. Propagation of tidal waves and development of sea-bottom sand ridges and sand ripples in Northern South China sea [J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(1): 1-7.]
- [23] 谭文化. 海南岛周边海域底质碎屑矿物分布及其物源分析[D]. 北京: 中国地质大学硕士学位论文(北京), 2007. [TAN Wenhua. Study on the distribution and origin of the seafloor detrital minerals in the offshore water of Hainan Island [D]. Beijing: Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2007.]
- [24] Ashley G M. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1990, 60(1): 160-172.
- [25] 张洪运, 栾振东, 李近元. 海南东方岸外风电场海底地形地貌特征[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(9): 1-6. [ZHANG Hongyun, LUAN Zhendong, LI Jinyuan. Research of submarine topography and geomorphology in Dongfang offshore wind farm, Hainan [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(9): 1-6.]
- [26] 王伟伟, 范奉鑫, 李成钢, 等. 海南岛西南海底沙波活动及底床冲淤变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 23-28. [WANG Weiwei, FAN Fengxin, LI Chenggang, et al. Activity of submarine sand waves and seafloor erosion and deposition in the sea area to the southwest of Hainan island [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(4): 23-28.]
- [27] Daniell J J, Hughes M. The morphology of barchan-shaped sand banks from western Torres Strait, northern Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(4): 638-652.