DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020050903

厦门湾口外近岸陆架区海底沙波发育特征

孙美静1.2,罗伟东1.2,钟和贤1.2,伊善堂1.2,刘杰3,郭丽华1.2

1. 广州海洋地质调查局, 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州), 广州 511458

3. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640

摘要:利用 2014-2017 年在台湾海峡西部采集的多波束、单道地震剖面、沉积物粒度样品及海流监测资料,在厦门湾近岸陆架 区识别出一系列海底沙波,并对沙波的形态特征、分布规律和沉积物组成特征进行分析,探讨水动力条件及其对沙波发育的 影响。结果表明沙波发育区水深一般为 10~60 m,地形较平缓开阔,坡度一般为 0°~1°;平面上沙波区呈一系列 NW-SE 向条 带状坡地,波脊呈线性或新月形,波脊轴线为 SW-NE 方向,沙波波长为 120~800 m,波高 2~12 m,沙波指数较大(>30)。地 震剖面显示,波形形态主要分为三类:近对称性沙波、非对称性沙波及叠合沙波。近对称性沙纹的波高较大,沙波指数小;非 对称性沙波的波长较长,沙波指数大;稳定沙波经后期水流"改造、激活"形成叠合沙波。砂含量较高,沉积物类型以砂、粉砂 质砂及砂质粉砂为主,多为细砂—中砂。厦门湾口外的近岸陆架区水动力较强,流系复杂,总体受浙闼沿岸流、南海表层流和 黑潮分支的影响。本区为不正规半日潮,流速为 0.3~0.7 m/s,落潮流以 S 向为主,涨潮流向以 NNE 向为主,潮流作用对沙波的 发育和改造起重要影响。

关键词:海底沙波;分布;形态特征;分类;厦门湾口

中图分类号: P737.2 文献标识码: A

Sand waves in the shelf area off Xiamen Bay

SUN Meijing^{1,2}, LUO Weidong^{1,2}, ZHONG Hexian^{1,2}, YI Shantang^{1,2}, LIU Jie³, GUO Lihua^{1,2}

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Key Laboratory of Seabed Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China

3. Guangzhou Institute of Energy, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Natural Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Based on the multi-beam and single-channel seismic data, sediment grain size distribution data and current data collected from the period of 2014–2017, seafloor sand waves are discovered on the shelf off Xiamen Bay. This paper deals with the morphological features, distribution patterns and sediment composition of the sand waves. Hydrodynamic conditions and their bearing on sand waves are discussed. The results show that the sand waves are mainly developed in the offshore area of $10\sim60$ m in water depth with a slope of $0\sim1$ degree, where the sea bottom is relatively gentle and open. Crests of sand waves show a parallel pattern extending in a NW-SE direction. The axis of the sand wave ridge is SW-NE. Most of the sand waves are $2\sim12$ m high and $0.12\sim0.8$ km long with large sand wave index (> 30). In the seismic profiles, there are three types of waves i.e. symmetric sand waves, asymmetric sand waves and superimposed sand waves. The symmetrical sand wave index. The stable sand wave is a kind of superimposed sand wave reformed and reactivated by the flow in later stage. The offshore shelf of Xiamen Bay and its adjacent waters are rich in sand. The bottom sediments are dominated by silt and fine-medium sand, controlled by hydrological dynamics of the area. Affected by the Zhejiang-Fujian coastal current, the surface current of the South China Sea and the branch of Kuroshio current, the current system of the study area is strong and complicated. With regard to the tidal system, the study area is dominated by irregular semi-diurnal tides with a velocity of $0.3\sim0.7m/s$. Tidal currents play an important role in the development and transformation of sand waves. This paper clarified the distribution pattern, and sediment characteristics of the seafloor sand wave, and provided useful foundation for submarine engineering construction in the study area.

Key words: submarine sand waves; distribution; morphological characteristics; classification; Xiamen Bay

作者简介:孙美静(1986一), 女, 工程师, 主要从事海洋地质研究, E-mail: sunmeijing0411@163.com 收稿日期: 2020-05-09; 改回日期: 2020-07-29. 文凤英编辑

资助项目:中国地质调查局项目(DD20160138, DD20190627, DD20191002, DD201910216);国家自然科学基金重点项目"花东海盆及其东西部板 块边界的跨圈层综合地震探测"(91958212);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项"南海深海盆区莫霍面地震反 射空间分布研究"(GML2019ZD0207)

海底砂质沉积物在波浪、潮汐、底层流等多种 水动力条件作用下,堆积形成高低起伏的丘状或新 月状底床形态地貌,其波脊垂直于主水流方向,统 称为沙波。沙波的发育非常普遍,如河口、陆架、 陆坡,甚至到海盆区。我国沙波主要分布于近海陆 架,如黄海^[1-3]、扬子浅滩^[4]、台湾浅滩^[58]、南海北部 陆架^[9-12]和海南岛周缘陆架区^[13-16]。其中台湾浅滩 是我国近海沙波发育的典型区域,杜晓琴等^[6]分析 认为台湾浅滩底层水流单一,上层水流结构复杂, 潮致沉积物输入量大于输出量,沙波迁移较快,可 能是风暴事件影响;余威等^[7]从海平面波动、沉积 物源及区域动力角度分析了对沙波发育的影响;邱 燕等^[8]论述了沙波类型及发育特征。

在台湾海峡西部,广州海洋地质调查局2014— 2017 年采集了多波束测深、单道地震剖面、表层沉 积物样品资料及海流监测数据等,并进行了资料处 理和样品粒度测试。本文利用这些新资料,通过对 厦门湾口外的陆架区地形地貌、单道地震剖面精细 解译,从平面和剖面上识别沙波的形态特征、分布 规律,分析沙波的沉积物特征,因水动力对沙波发 育起绝对控制作用,因此着重论述本区水动力作用 类型及潮流流速,讨论水动力作用对沙波形成及迁 移的影响过程。

本文研究的沙波区处于台湾浅滩的北侧,是一 个崭新区域,前人未有工作基础,是将台湾浅滩沙 波研究区域向北扩大,并与此有着密切联系,可掌握台湾海峡区域更大范围沙波分布特征。同时本 文特点是将地形剖面与单道地震剖面结合,来分析 沙波形态参数特征,因而更准确,又拥有足够的沉 积物样品数据,能够明确沙波区沉积物粒度、岩石 类型的特征。对比前人研究^[17-18]资料更详实,从点 (多站位点的表层沉积物特征及潮流流速)—线(地 形剖面和单道地震剖面测线)—面(地貌特征)相结 合的研究思路,分析结果更加全面。沙波的形成受 控于水动力环境的变化而改变,因发生改变而产生 的不稳定因素,对浅水陆架区海底铺设电缆等施工 建设产生影响,尤其台湾海峡是联接中国大陆与中 国台湾之间最重要的通道,因此掌握海底沙波的分 布规律、形态及底质特征,对海底工程建设有重要 意义。

1 研究区概况

研究区位于台湾海峡西部,为厦门湾口外的近岸陆架区(图1)。台湾海峡正处于欧亚板块东缘,临近欧亚板块与菲律宾海板块的汇聚边界,其地质构造十分复杂,是欧亚板块与太平洋板块碰撞时所产生的台湾岛与大陆间的前陆盆地,其构造格局、地层展布和地形轮廓大都以NE向为主,与两岸一致。研究区水深范围约为10~60m,坡度为0°~1°,



等深线整体为 NE 向。

台湾海峡属亚热带型季风气候,冬季由于受西 伯利亚或蒙古冷气流的影响,盛行东北季风,平均 风速大,常为大浪;夏季盛行西南季风,平均风速 小,多为小浪—中浪。台湾海峡的潮流呈往复流, 涨落潮流流向近 NE-SW 向,与水深等值线走向基 本一致。本区受两股洋流影响,分别是浙闽沿岸流 和台湾暖流。浙闽沿岸流沿福建省沿岸向西南流, 其主要受冬季风的影响,在冬季最明显,春秋减弱, 夏季几乎不存在,台湾海峡西侧的台湾暖流则常年 存在。台湾暖流是黑潮的分支,自澎湖水道向北 流。受云彰隆起地形的影响,台湾暖流分支,一支 从云彰隆起上部穿过继续向北,另一支绕过云彰隆 起,在台湾海峡中部向北流。浙闽沿岸流和台湾暖 流控制着台湾海峡沉积物的来源和搬运,对台湾海 峡现代沉积作用影响很大。

2 数据采集

研究区覆盖单波束和多波束测深,为能够更清晰明确地显示出沙波特征,主要选取利用多波束测 深数据构成的地貌图和地形剖面图。多波束水 深测量采用 EM710S 多波束测深系统,工作频率为 70~1000 kHz,测深范围为 5~1000 m,波束角 1°× 2°,最大覆盖角度为 150°,覆盖宽度可达水深的 3.5~5倍(最大为 2000 m),测深精度优于水深的 0.3%,本文选取多波束测深数据的处理后网格精度是 50 m×50 m。

单道地震测量采集系统为英国 AAE 公司的 CSP-6000 电火花系统,震源能量 800 J,采样频率 6000 Hz,垂向分辨率 2~5 m。海流测量数据是在 2016 年 5 月采集,采用美国 RTI 公司 300/1 200 kHz 双频直读式 ADCP 和 300 KHz 单频直读式 ADCP, 进行定点式实时测量模式。

表层沉积物样品采集时间是在 2014 年 5 月— 7月,利用"天龙号"船只,使用 50 cm×50 cm 的大型 蚌式抓斗完成。文中选取了 401 个站位样品进行沉 积物岩性、粒度等分析。根据样品的不同特点,分 别采用激光粒度仪法和综合法进行粒度分析。激 光粒度仪测量范围为 0.02~2 000 μm,综合法主要 指对大于 1000 μm 的颗粒用筛析法,小于1000 μm 的颗粒用 Mastersizer 2000 型激光衍射粒度分析仪 进行测试,将两者的分析数据合并,计算出各级粒 径颗粒的含量及相关参数。

3 结果

3.1 底形分布特征

台湾海峡盆地西部近岸的研究区属于近岸大 陆架区,地形较平缓,坡度为0°~1°。水深总体为 西浅东深,一般为10~60 m,等深线与沿岸走向近 一致,呈SW-NE向(图1)。本区地形典型特征是发 育了一系列 NW-SE 走向近乎平行排列的条带状坡 地(图 2a,图 3a),波脊与波谷相间,大致呈 NW-SE 走向,与等深线方向近于垂直。利用多波束测深和 单道地震资料,识别勾画出海底沙波范围,分布面 积约为 1000 km²,沙波沉积厚度基本为 6~7 m。 沙波地貌单元上主要呈二维弯曲形、三维新月形两 种类型特征。

在近岸 I 和 II 区(图 2a),水深大致为 30~60 m, 沙波多为二维弯曲形,呈孤立的雁列式紧密排列, 波长较短,波脊近于平行,走向总体一致,为 NW-SE 向,单个沙波规模相差无几,并分布有多组此类特 征弯曲形沙波群。整体呈条带状顺延等深线方向 发育,延伸距离超过 20 km,分布于坡度近于 0.1% 的坡面上(图 2b)。选取一条具有代表性的地形剖 面(垂直于弯曲形沙波走向),如图 3b,地形起伏在 3 m 以内,变化较小,波脊水深为 55.5~58 m,波脊 顶间距为 150~500 m,波长分布在 120~600 m 之间, 波高一般为 0.2~2 m,独立一个沙波的西南与东北 两侧坡度基本一致,多为对称沙波,个别显示东北 侧坡度较西南侧稍缓,坡角范围一般为 0.2°~0.8°。

在稍远岸的东南角Ⅲ区,如图 2a和图 3a的 HH'向东南方向显示,水深大致为 60~70 m,沙波地 貌平面形态由一排孤立的较短弯曲形过渡到波长 变长而连成长条状的新月形,沙波之间间距变大, 较稀疏,总体亦属于平行排列,呈 NW-SE 走向,但 较弯曲形沙波整齐度变差,沙波规模变大。地形很 平坦,坡面的坡度小于 0.1%。如图 3c 地形剖面(垂 直于新月形沙波走向)上显示,沙波多呈复合形态, 在大型沙波主体上,顶部分支出多个小型锯齿状沙 波,是稳定沙波在原地经水流后期改造而形成的。 地形起伏在 5 m 以内,较 I 区沙波的地形起伏稍微 变大,波脊水深分布于 60~63 m,波脊顶间距为 160~ 1000 m,波长分布于 150~800 m,波高一般为 0.2~ 5 m,西南侧缓坡坡角为 0.2°~0.7°, 东北侧陡坡坡角 为 0.3°~ 1.1°。







图 3 多波束显示的沙波地貌图(a)与沙波区海底地形剖面图(b和c) Fig.3 Multi-beam map of sand waves on plane (a) and cross sections (b and c)

3.2 地震剖面显示形态特征

利用 W-E 向和 SW-NE 向的单道地震剖面, 识 别出沙波的地震反射特征及波高、波长、沙波指数 等形态参数。

其中如图 4a(W-E向单道地震剖面),靠近西部 的①号位置,沙波形态呈锯齿状,为对称沙波特征, 波长主要为 120~390 m,波高分布于 3.6~11.4 m, 大多数处于 4~6 m(表 1)。两侧波面都较陡,迎流 面与背流面区分不明显,总体表现为生长特征,其 迁移特征不明显,由 AB 地震剖面测线①号位置,反 映其东西方向的水动力条件基本平衡。该测线靠 近东部②号位置为典型非对称性沙波形态,波长主 要为 300~465 m,波高分布于 3~4.5 m。对于一个 独立沙波,西侧坡度缓,是迎流面,东侧坡度陡,为 背流面,通常沙纹处于沙波迎流面一侧,本区水动 力条件相对稳定,根据沙波陡坡面、波纹与沙波所 处位置,较容易判断出主水流是向东流动。②号位 置沙波主要呈随水流方向迁移特征,而生长特征相 对不明显。

如图 4b 是 SW-NE 向单道地震剖面,该剖面沙 波特征与图 4a②表现一致,均是非对称性沙波特 征,表现出陡缓面,西南侧坡面较缓,东北侧坡面较 陡,因此推测向东北方向流动的水流为主导,沙波 不断随水流运动而迁移。

将近对称沙波与非对称性沙波作对比发现(表1), 前者的波长短,波高较高,沙波指数(波长/波高)较 小,后者非对称性沙波的波长较长,波高较小,沙波 指数较大,同时非对称沙波沉积位置较对称沙波区 水深要深,且粒度亦较粗,表明近对称沙波的波高 较大,粗径砂体随水流搬运走,较难沉积留下,仅有 细粒的砂岩沉积下来。非对称沙波的波形形态较 宽缓,沉积物较粗,顺着主水流方向,迎流面多受到 水流冲刷,越过波峰到较陡的背流面发生沉积。同 时揭示出对称沙波一般形成于非对称性沙波的水 流上游。

经过已有地形地貌和单道地震剖面两方面资料的相互印证,认为图1所画黑色图框研究区为海底沙波的分布区。

3.3 沉积物组成

台湾海峡西部近岸研究区有401个表层沉积物 采样点,沉积物组成主要以砂为主,其次是粉砂,黏 土(泥)含量较低,砾石较少。如图5所示,砂和粉 砂含量之和均超过50%,主体大于70%,其中含量 在90%~100%(包含100%)的样品有252个。





Fig.4 Single-channel seismic profiles showing the morphological characteristics of sand waves

海洋地质与第四纪地质

研究区沙波形态参数特征统计

表 1

Table 1 Statistical table of sand wave shape parameters in the study area									
测线名称	测线方向	水深/m	沙波类型	波形尺度/m			沉和枷米刑	潮流运动专向	夕计
				波长 (L)	波高 (H)	12 (X)目数(L/II)	0.000天至	彻视这种力问	田仁
AB	W-E	40	近对称沙波	120	3.6	33.3	粉砂质砂	EW向	最小波长
AB	W-E	42	近对称沙波	390	11.4	34.2	粉砂质砂	EW向	最大波长
BC	SW-NE	56	非对称沙波	300	3	100	砂	NE向	最小波长
BC	SW-NE	48	非对称沙波	465	4.5	103.3	砂	NE向	最大波长



Fig.5 Statistical histogram of sand contents

其中研究区的砂(指粒径 0.063~2 mm)百分含 量如图 6a 所示,砂含量分布于 5%~99%,普遍较 高,具有从西北向东南方向增高的趋势特征。其中 有 197 个站位点的砂含量超过 80%,基本达到了一 半的站位点,较集中分布在研究区的中部到东南 部,地形较平坦;而向西北方向靠近岸边区砂含量 降低,主要是小于 30%。对应前面有多波束资料显 示的沙波地貌区,该分布区砂含量主要为 60%~99%, 反映出从近岸向远岸陆架方向,砂含量明显增大, 沙波发育区沉积物以砂为主,含量较高(一般大于 60%),推测(无多波束资料区)向东部及东北方向依 然有沙波的发育。

如图 6b 所示, 粉砂(指粒径 0.004~0.063 mm) 百分含量分布于 0~82%, 具有从西北向东南方向 降低的特征, 与砂百分含量(图 6a)有较好的负相关 性。其中有 230 个站位点砂含量低于 20%, 超过了 一半的站位点, 较集中分布在研究区的中部到东南 部; 而向西北方向近岸边区粉砂含量增加, 大部分 高于 45%。对应前面有多波束资料显示的沙波地 貌区, 该分布区砂百分含量大多小于 30%。从近岸 向远岸陆架方向, 粉砂含量明显降低, 反映出沉积 物粒度变粗。 研究区沉积物类型以砂和粉砂质砂为主,其次 是砂质粉砂、粉砂及砾质泥质砂,部分含砾砂、含 砾泥质砂、砾质泥等。西部近岸区沉积物类型较多 且复杂,分布有砂、粉砂质砂、砂质粉砂、砾质泥质 砂、砾质泥、含砾砂等;东部沉积物类型较简单,分 布有砂、粉砂质砂、砂质粉砂,局部夹有含砾砂团。

平均粒径代表粒径分布的总体趋势,反映了沉 积物颗粒搬运的平均动能。如图 6c 是研究区沉积 物颗粒的平均粒径分布情况,范围为 0~8Φ,大部 分为 0~4Φ,只有西北部较小范围的平均粒径较 大,一般为 5~8Φ,向东南方向平均粒径变小,广泛 区域分布在 1~3Φ,主要为细砂—中砂,反映出西 北部近岸局部区域受近岸河流输入影响较大,搬运 砾、含砾砂等粗粒沉积物,并且呈粗细混杂状态,水 动力条件不稳定;而向东南方向稍远岸区水动力逐 渐趋于相对稳定的高能状态,一般是细砂-中砂沉 积,粒度分布均匀。

图 6 中可以看出,砂百分含量与平均粒径分布 规律明显,具有较好的负相关性。从近岸陆架向远 岸陆架,沉积物的砂百分含量增高,粉砂百分含量 降低,粒度明显变粗,平均粒径(Φ值)具有明显减 小的趋势,在研究区中部—东南部的相对远岸陆架 比西部近岸陆架的水动力能量强。

4 讨论

研究区紧邻厦门湾口,东北侧有陆地的九龙江 直接汇入,携带大量泥沙沉积物入海,其次南部台 湾浅滩砂质丰富,再者东侧为浊水溪,它们构成了 本区表层沉积物的基本物源,为海底沙波底形的发 育提供了物质基础。

前人研究认为,平坦开阔地形是海底沙波形成 的基础与必不可少的条件^[18]。在台湾海峡西部厦 门湾口外的近岸陆架区,海底坡度一般为0°~1°, 地形开阔平坦,起伏较小,发育了多个小范围沙波



Fig.6 Distribution characteristics of sediments in the study area

a. The spatial distribution of sands,b. the spatial distribution of silts, c. the spatial distribution of mean particle size (Φ).

区。Stow 等研究认为,海底底形的形成演化受底流 类型、强度、水深等因素控制^[8]。该区域底流活动 活跃,对沙波的形成影响至关重要^[20-24]。

海洋底流作用直接控制近岸陆架区泥沙运动 与分布。台湾海峡内海流主要受浙闽沿岸流、南海 表层流和黑潮分支的影响^[7](图1标示)。沿岸流与 表层流随季节变化,受季风影响,夏季是西北季风, 表层流波及台湾海峡;冬季是东北季风,沿岸流向 南进入台湾海峡;向北的黑潮分支全年影响本区; 底层海流流向稳定少变,终年向东北方向流动,持 续稳定方向的底层流对海底沉积搬运起着重要作用。

台湾海峡内的潮流运动非常强烈,并且很复杂,一方面是因海峡外传入的两支太平洋潮流在海峡内传播相汇,形成强烈的潮流运动;另一方面是

海峡内地形的复杂和岸线的曲折又使海峡内潮汐、 潮流的分布很复杂^[7]。

广州海洋地质调查局在研究区内布设有两个

海流监测点(1号和2号测站),于2016年5月20日 (农历四月十四)进行了大潮定点海流观测(图7), 2016年5月29日(农历四月二十三)进行了小潮定





点海流观测,利用实测的相关数据来分析沙波发育 与潮流的关系。

本区潮流性质为不正规半日潮流,一般实测最 大流速为大潮>小潮,实测最大涨潮流速大于落潮 流速。大潮期间:1号站实测涨潮最大流速为51.1 cm/s, 流向为 NE 向, 最大落潮流速为 48.6 cm/s, 流向为 S向;2号站实测涨潮最大流速为71.2 cm/s,流向为 NNE 向, 最大落潮流速为 57.7 cm/s, 流向为 S 向。 小潮期间:1号站实测涨潮最大流速为53.7 cm/s,流 向为 NNE 向, 最大落潮流速为 34.4 cm/s, 流向为 S向;2号站实测涨潮最大流速为66.5 cm/s,流向为 N向,最大落潮流速为30.2 cm/s,流向为SE向。潮 流实测资料显示,无论大潮还是小潮期,涨潮的流 向以NNE向为主,并伴有NE向和N向;落潮的流 向以S向为主,亦有SE向,此与沙脊走向(大约 SE向)近于垂直。1号和2号测站的涨潮和落潮的 大潮、小潮流速总体均以2号站位的速度较大(2号 站位相对1号离岸稍远)。结合该区沉积物粒度的 分析,总体是离厦门湾口外远的2号站位砂百分含 量高于1号,即2号站流速大、粒度粗,反映出2号 站水动力条件强于1号站。

Berne 认为一般小于 40 cm/s 的底流流速形成沙 痕, 40~75 cm/s 的底流流速形成直线形沙波, 而新 月形沙波则是由 75~100 cm/s 的底流流速形成的。 因此, 本区的海底定向流为形成直线形沙波提供了 适宜的水动力条件^[25]。

学者分析认为^[8],一般沉积物粒度为0.2~2.1 mm 且供应充足,水流流速为0.4~0.9 m/s,则易形成海 底沙波。厦门湾口外的近岸陆架区具有复杂的水 动力环境,携带的沉积物以细砂-中砂为主,粒度 主要分布在0.125~0.5 mm,实测潮流流速为0.3~ 0.7 m/s,方向呈 NNE向,潮流推动砂质沉积物向 NE方向堆积,形成高低起伏的波状底形。同时随 着涨潮、落潮等水流旋回波动,沙波发生改造作用, 如西部发育的对称性沙波特征,向东部逐渐改造为 非对称性沙波特征,亦有形成两者的叠合沙波。因 此,根据已有易形成海底沙波因素的研究认识,结 合本区潮流流速的实际观测结果,潮流作用可能是 沙波分布区的主控动力。

5 结论

(1)厦门湾口外的近岸陆架区,水深约30~70m, 发育一系列条带状坡地。地貌单元上主要为二维 弯曲形、三维新月形,波脊与波谷呈NW-SE走向, 相间排列,波脊轴线为SW-NE走向。

(2)地震剖面显示波形形态主要有三类:近对称性沙波、非对称性沙波及叠合沙波。波长一般为120~800 m,波高一般为2~12 m,沙波指数较大(>30)。近对称性沙波的波高较大,沙波指数小,非对称性沙波的波长较长,沙波指数大;稳定沙波经后期水流"改造、激活"形成叠合沙波。

(3)沙波区沉积物含砂量高,总体大于 60%,以砂、粉砂质砂及砂质粉砂为主,平均粒径主要为1~3Φ,以细砂—中砂为主。稍远岸的东部与西部比较,砂含量增加,粉砂较少,粒度相对变粗。

(4)海洋水动力作用直接控制近岸陆架区泥沙运动与分布,影响沙波的发育。本区水动力条件活跃,主要受浙闽沿岸流、南海表层流和黑潮分支的影响。潮流复杂,流速较大,一般为0.3~0.7 m/s,涨潮的流向以 NNE 向为主,并伴有 NE 向和 N 向;落潮的流向以 S 向为主,亦有 SE 向。水流主方向与沙波的轴线走向(大约 NE 向)近于一致,利于水动力推动砂质沉积物推积沙波形成及不断发生改造作用。

参考文献 (References)

- [1] 王嵘, 张永战, 夏非, 等. 南黄海辐射沙脊群海域底质粒度特征及其 输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 1-8. [WANG Rong, ZHANG Yongzhan, XIA Fei, et al. Grain size distribution and transportation trends of bottom sediments in the sand ridge field of the South Yellow Sea, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 1-8.]
- [2] 赵月霞, 刘保华, 李西双, 等. 胶州湾湾口海底沙波地形地貌特征及 其活动性研究[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(5): 464-471. [ZHAO Yuexia, LIU Baohua, LI Xishuang, et al. Topography feature and migration of submarine sand waves in Jiaozhoy Bay mouth [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2006, 37(5): 464-471.]
- [3] 王昆山,姜晓黎,叶青,等.南黄海潮流沙脊区表层沉积物重矿物分 布及来源[J].海洋地质与第四纪地质, 2013, 33 (5): 1-11. [WANG Kunshan, JIANG Xiaoli, YE Qing, et al. Distribution and source of heavy minerals in the surface sediment of the tidal sand ridges area in South Yellow Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33 (5): 1-11.]
- [4] 庄丽华, 阎军, 徐涛, 等. 扬子浅滩东南海域海底潮流沙脊、沙波特征[J]. 海洋科学, 2017, 41 (1): 11-17. [ZHUANG Lihua, YAN Jun, XU Tao, et al. Bedform of tidal sand ridges on the southeast Yangtze Shoal on continental shelf in the East Sea [J]. Marine Sciences, 2017, 41 (1): 11-17.]
- [5] 鲍晶晶. 台湾浅滩沙波动力特征研究[D]. 中国地质大学博士学位 论文, 2014. [BAO Jingijng. A dissertation submitted to China University of Geosciences for the Doctor Degree of Marine

geology[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2014.]

- [6] 杜晓琴, 李炎, 高抒. 台湾浅滩大型沙波、潮流结构和推移质输运特征[J]. 海洋学报, 2008, 30(5): 124-136. [DU Xiaoqin, LI Yan, GAO Shu. Characteristics of the large-scale sandwaves, tidal flow structure and bedload transport over the Taiwan Bank in southern China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(5): 124-136.]
- [7] 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.]
- [8] 邱燕, 彭学超, 王英民, 等. 南海北部海域第四系侵蚀过程与沉积响应[M]. 北京: 地质出版社, 2017, 143-146. [QIU Yan, PENG Xuechao, WANG Yingmin, et al. Erosive Process and Sedimentary Characteristics of the Quaternary Sediments in the Northern South China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017, 143-146.]
- [9] 彭学超, 吴庐山, 崔兆国, 等. 南海东沙群岛以北海底沙波稳定性分析[J]. 热带海洋学报, 2006, 25 (3): 21-27. [PENG Xuechao, WU Lushan, CUI Zhaoguo, et al. A stability analysis of seabed sand waves in waters north of Dongsha Islands of South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25 (3): 21-27.]
- [10] 栾锡武, 彭学超, 王英民, 等. 南海北部陆架海底沙波基本特征及属 性[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 233-245. [LUAN Xiwu, PENG Xuechao, WANG Yingmin, et al. Characteristics of sand waves on the northern South China Sea shelf and its formation [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 233-245.]
- [11] 张晶晶, 庄振业, 曹立华. 南海北部陆架陆坡沙波底形[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(7): 11-19. [ZHANG Jingjing, ZHUANG Zhenye, CAO Lihua. Bed forms on the northern shelf and slope of the South China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(7): 11-19.]
- [12] 吴建政, 胡日军, 朱龙海, 等. 南海北部海底沙波研究[J]. 中国海洋 大学学报, 2006, 36 (6): 1019-1023. [WU Jianzheng, HU Rijun, ZHU Longhai, et al. Study on the seafloor sandwaves in the northern South China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36 (6): 1019-1023.]
- [13] 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 and Quaternary Geology, 2006, 26(4): 15-22.]
- [14] 李泽文, 阎军, 栾振东, 等. 海南岛西南海底沙波形态和活动性的空间差异分析[J]. 海洋地质前沿, 2010, 26(7): 24-32. [LI Zewen, YAN Jun, LAN Zhendong, et al. Analysis on spatial differences of morphology and mobility of the submarine sand waves in southwest Hainan Island [J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(7): 24-32.]
- [15] 李近元.海南东方岸外海底沙波运移及浅地层结构分析研究[D].中

国科学院大学硕士学位论文, 2010. [LI Jinyuan. 2010. The analysis of sand wares and shallow seismic profile in the sea area to the southwest of Hainan Island[D]. Master Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2010.]

- [16] 郭立, 马小川, 阎军. 北部湾东南海域海底沙波发育分布特征及控制 因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(1): 67-76. [GUO Li, MA Xiaochuan, YAN Jun. Distribution pattern and control factors of sand waves in southeast Beibu gulf [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2017, 37(1): 67-76.]
- [17] 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 Aijun, HU Yi, LIN Guilan, et al. Progress and perspective of submarine sand waves researches [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1366-1377.]
- [18] 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.]
- [19] 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎, 等. 南海地质地球物理图系(1: 200万)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2015. [YANG Shengxiong, QIU Yan, ZHU Benduo, et al. Geological and Geophysical Maps of the South China Sea (1: 2000000)[M]. Tianjin: China Navigation Book Publishing House, 2015.]
- [20] 胡建宇. 台湾海峡及其邻近海区海洋动力环境特征的研究[D]. 厦 门大学博士学位论文, 2002. [HU Jianyu. A study on the characteristics of marine dynamic environment in the Taiwan Strait and its adjacent sea areas[D]. Doctor Dissertation of Xiamen University, 2002.]
- [21] 綦梦楠. 厦门湾及邻近海域潮汐潮流数值模拟与预报研究[D]. 中 国海洋大学硕士学位论文, 2014. [QI Mengnan. A study on numerical simulation and forecast of tides and tidal currents in Xiamen Bay and its adjacent waters[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [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 学报, 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] 张志欣. 中国近海沿岸流及毗邻流系的观测与分析研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2014. [ZHAO Zhixin. Observation and analysis of the coastal current and its adjacent current system in the China offshore waters[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [24] 关明.台湾海峡沙波数值模拟[D].大连理工大学硕士学位论文,2017.
 [GUAN Ming. Sand wave numerical simulation in Taiwan Strait[D].
 Master Dissertation of Dalian University of Technology, 2017.]
- [25] 刘振夏,夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京:海洋出版社, 2004. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.]