

doi: 10.12029/gc20200519

伊善堂, 吴承强, 林纪江, 胡小三, 罗伟东. 2020. 福建闽江口—三沙湾口近岸海域沙波群发育特征、成因及其对海洋工程应用的影响[J]. 中国地质, 47(5): 1554–1566.

Yi Shantang, Wu Chengqiang, Lin Jijiang<sup>4</sup> Hu Xiaosan, Luo Weidong. 2020. Development characteristics and genesis of sand wave groups and their influence on offshore engineering applications in Minjiang estuary-Sansha bay estuary coastal area, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 47(5): 1554–1566(in Chinese with English abstract).

## 福建闽江口—三沙湾口近岸海域沙波群发育特征、成因及其对海洋工程应用的影响

伊善堂<sup>1,2</sup>, 吴承强<sup>3</sup>, 林纪江<sup>4</sup>, 胡小三<sup>1,2</sup>, 罗伟东<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 2. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075; 3. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 4. 国家海洋局南海信息中心, 广东 广州 510310)

**摘要:**基于高精度多波束、单波束、侧扫声呐等资料研究发现, 福建近岸闽江口和三沙湾口外海域分别发育一处海底沙波群。本文详细分析了海底沙波地貌发育特征, 根据沙波发育形态及沙脊线走向将其分为挠曲型沙波、直线型沙波和过渡型沙波 3 类。调查区 2 处沙波群均呈迎潮面坡度缓而背潮面陡的特征, 沙波末端均存在分枝并伴随着一定程度的弯曲变形。沉积物质来源和水文动力环境是控制海底沙波群发育的两个主要因素, 研究区近岸基岩侵蚀物质、河流沉积物质和洋流输运物质来源减少打破了维持沙波动态平衡的物质供应, 底流冲刷提供了海底泥沙的起动条件。结合沙波纹、残留沙丘及海底沙波的发育特征, 本文认为沙波存在一定的活动性, 具有向坡陡一侧不断迁移的规律。最后, 通过对沙波活动性成因和演化规律进行分析, 并详细探讨了海底沙波的存在对海洋工程应用的影响, 提出了相应的防范措施, 为近岸海底工程建设及灾害预防提供了一定的借鉴意义。

**关键词:**近岸海域; 沙波群; 地貌特征; 控制因素; 起动流速; 海洋地质调查工程; 闽江口; 三沙湾口; 福建  
中图分类号: P714+.7; P736.21 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)05-1554-13

## Development characteristics and genesis of sand wave groups and their influence on offshore engineering applications in Minjiang estuary–Sansha bay estuary coastal area, Fujian Province

YI Shantang<sup>1,2</sup>, WU Chengqiang<sup>3</sup>, LIN Jijiang<sup>4</sup>, HU Xiaosan<sup>1,2</sup>, LUO Weidong<sup>1,2</sup>

(1. *Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510760, Guangdong, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510760, Guangdong, China*; 3. *Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, Fujian, China*; 4. *South China Sea Information Center of State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, Guangdong, China*)

收稿日期: 2020-04-03; 改回日期: 2020-07-07

基金项目: 自然资源部海底矿产资源重点实验室基金(KLMMR-2018-A-08)、中国地质调查局项目(DD20160138, DD20190209, DD20190627, DD20191002)联合资助。

作者简介: 伊善堂, 男, 1989年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事海底地形地貌和海洋工程环境地质研究; E-mail: yishantang1990@126.com。

通讯作者: 罗伟东, 男, 1977年生, 教授级高级工程师, 主要从事海洋地球物理调查研究工作; E-mail: loky\_luo@sina.com。

**Abstract:** Based on high-precision multi-beam, single-beam, side-scan sonar and other data, the authors found two submarine sand wave groups in the offshore areas of Fujian's Minjiang estuary and Sanshawan estuary, respectively. In this paper, the geomorphic characteristics of the development of the submarine sand wave were analyzed in detail. According to the shape of the development of the sand wave and the trend of the sand ridge line, it can be divided into three types: flexural sand wave, linear sand wave and transitional sand wave. Both sand wave groups show a slower slope on the tide and a steeper tide, which is characterized by branching at the end of the sand wave and is accompanied by a certain degree of bending deformation. Sources of sedimentary materials and hydrodynamic environment are two main factors that control the development of sand wave groups on the sea floor. The reduction of sources of near-shore bedrock erosion materials, river sediment materials and ocean current transport materials in the study area breaks the material supply that maintains the dynamic balance of sand waves. Underflow scouring provides the starting conditions for seabed sediments. Combined with the development characteristics of sand ripples, residual dunes and seabed sand waves, the authors hold that sand waves have certain activities and have a law of continuous migration to the steep side of the slope. Finally, through the analysis of the causes and evolution rules of sand wave activity, the authors discussed the influence of the existence of sand wave on the application of marine engineering in detail, and put forward the corresponding preventive measures, which provides a certain reference for the construction of offshore seabed engineering and disaster prevention.

**Key words:** offshore waters; sand wave group; geomorphological characteristics; controlling factor; starting velocity; Marine geological survey engineering; Minjiang estuary; Sansha bay estuary; Fujian

**About the first author:** YI Shantang, male, born in 1989, assistant engineer, mainly engages in submarine topography and marine engineering environment geology investigation; E-mail: yishantang1990@126.com.

**About the corresponding author:** LUO Weidong, male, born in 1977, professor, mainly engages in submarine topography research; E-mail: loky\_luo@sina.com.

**Fund support:** Supported jointly by the Key Laboratory of Submarine Mineral Resources of the Ministry of Natural Resources (No. KLMMR-2018-A-08) and Geological Survey Project (No. DD20160138, No. DD20190577, No. DD20190216, No. DD20190209).

## 1 引言

沙波是发育于河口近岸浅滩之上常见的一种水下微型沉积体,其发育演化是海底沙质沉积物在波浪、潮流和海流等复杂沉积动力环境下发生推移、悬浮和再沉积的反映,沙波形态特征主要呈线状,脊线多与海岸线平行,且沙波体往往具有一定的活动性。一般来说,按平面形态分类可将沙波分为3种类型,分别为挠曲型沙波、直线型沙波和过渡型沙波等(刘振夏等,2004)。

由于现代型沙波具有明显的活动性,对海底平台、海底油气管道等海洋工程建设影响较大,国内外学者对海底沙波的研究也是随着海底资源开发而逐渐开始的(白玉川等,2009)。国外学者早在19世纪初曾对海底沙波开展过相应研究(Cornish, 1901; Murphy, 1914),20世纪60年代后,随着人类开始对海岸带进行大规模开发,海底沙波和沙脊的研究逐渐成为热点,特别是单波束、多波束、旁侧声呐和浅地层剖面仪等海底探测技术的应用和高精度三维地形图的绘制,人们对海底沙波特征的认识也

逐渐清晰。受制于调查手段的落后,国内学者对海底沙波的研究起步较晚,无论从研究深度及研究范围等均无法与国外相比。自20世纪90年代开始,关于近岸沙波分布发育特征及成因的研究文章逐渐增多,特别是对中国近海潮流沉积体的发育规律、沙体形态与地形、水动力之间的关系,众多学者均进行过系统总结(王尚毅等,1994;董志华,2004;吴建政等,2006;栾锡武等,2010;叶银灿,2012;郭兴杰,2015)。随着国家海洋局908专项的开展,发现中国近岸河口区及三角洲地区发育有大量的海底沙波(蔡峰,2013),自北向南在莱州浅滩、胶州湾口、长江现代水下三角洲及杭州湾口、闽江口及珠江口等均存在各种形态的沙波群(边淑华等,2006;赵月霞等,2006;李近元等,2011;郭兴杰,2015;张晶晶等,2015;庄丽华等,2017;李磊等,2019;印萍等,2017)。

福建近岸海底地形地貌特征主要受闽浙沿岸流系和闽江入海径流控制,区内河流多以山溪性河流为主(吴承强,2011),对于闽江口外潮流沙脊群、沙坝等沉积体发育及成因演化,前人已作过相应研

究(卢惠泉等,2014;许艳等,2014),而本研究区沙波群为新发现沙波群,基于闽江口和三沙湾口外海域的多波束、单波束、侧扫声呐、海底表层沉积物和实测海流等资料,系统分析了研究区海底沙波群的发育特征,并对其成因和演化规律进行了探讨,以期在近岸海底工程建设及灾害预防提供一定的借鉴意义。

## 2 区域地质背景

闽江口—三沙湾口近岸海域位于福建东北部,构造上属于浙闽隆起带(刘光鼎等,1990),该区域海岸线曲折多变,岛礁众多,海底地形复杂多变。闽江是流经该区域的唯一大型入海河流,主要发源于武夷山,自西北向东南流入东海,并在入海口形成大范围水下三角洲(许艳等,2014)。三沙湾为紧邻宁德市东侧的海湾,受三都岛、青山岛和东冲半岛的狭束作用,潮流流速快,侵蚀沟槽高度发育,特别是三沙湾口处海底瞬时坡度降达 $14^\circ$ ,局部海底深度可达137 m。

研究区内的沙波群主要位于闽江口外的水下浅滩和三沙湾口外侧海域(图1,图2),该海域属亚热带季风气候区,季风特征明显。闽浙沿岸流和台湾暖流是研究区内的代表性海流,前人研究显示,浙闽沿岸流冬季强夏季弱,冬季流向向南,夏季向北。冬季,长江入海悬浮物质在沿岸流作用下顺岸向南移动,夏季,台湾暖流沿着闽浙沿岸向北流动,对长江入海物质扩散起着阻挡作用,使长江入海悬浮物质沉积于浙江和福建近海,并形成一条狭长的细颗粒沉积条带,这为近岸沙脊和沙波群的产生提供了条件(许东禹,1997)。

研究区水文动力条件受海湾地形影响明显,闽江口和三沙湾口潮汐性质略有不同,闽江口为典型正规半日潮,三沙湾口为非正规半日浅海潮(叶海桃,2007;蔡锋,2013)。闽江口最大潮差可达7~8 m(海洋图集编委会,1992),近岸最大流速可达150 cm/s以上;三沙湾附近最大潮差6~8 m,最大涨潮流速可达190 cm/s,最大落潮流速可达140 cm/s。研究区波浪以混合浪为主,平均波高1.0~1.5 m,台风期浪高可达4.0 m(陈坚等,2010)。

## 3 数据来源与方法

本文研究区调查资料主要来源于广州海洋地质调查局于2012—2014年在福州市近岸海域开展的海洋地质调查项目,其中,多波束测深、旁侧声呐、浅地层剖面和海流观测等野外采集工作实施单位均为原国家海洋局第三海洋研究所。

多波束水深地形测量调查设备采用R2SONIC 2024型浅海多波束测深系统,数据编辑及后处理系统采用Caris平台的Hips和Sips模块,经过声速改正、水深校正、交互除错等处理后形成网格化数据,最后采用Global Mapper绘制三维地形图并分析;旁侧声呐采用美国Klein公司生产的Klein 3000型声呐采集系统;浅地层剖面采用Edegetech 3200-XS浅层剖面系统;海流观测采用声学多普勒海流剖面仪ADCP系统;表层沉积物取样采用 $25\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 的小型蚌式抓斗,取得样品重量均在1 kg以上,样品测试采用筛分法和激光粒度仪法,其中,粒径大于 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒采用筛析法,粒径小于 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒采用Mastersizer 2000型激光衍射粒度分析仪进行测试,粒度分级采用尤登—温德华氏等比制

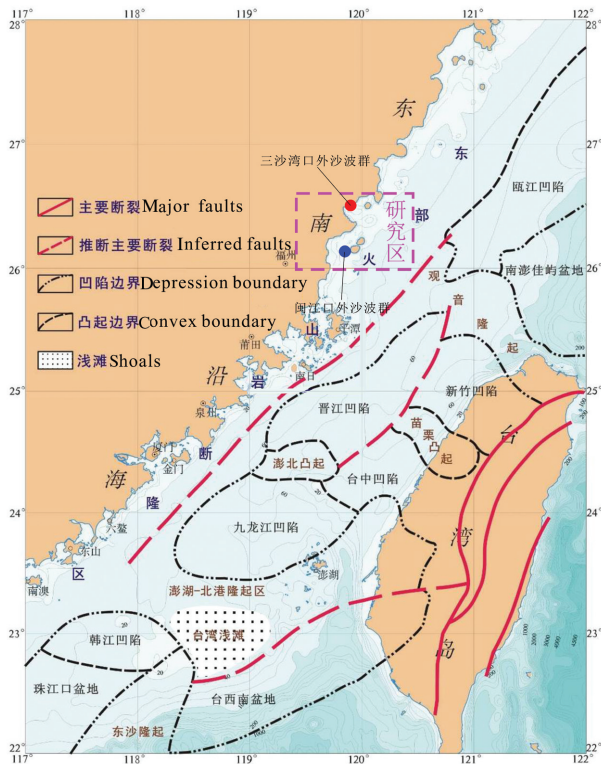


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area



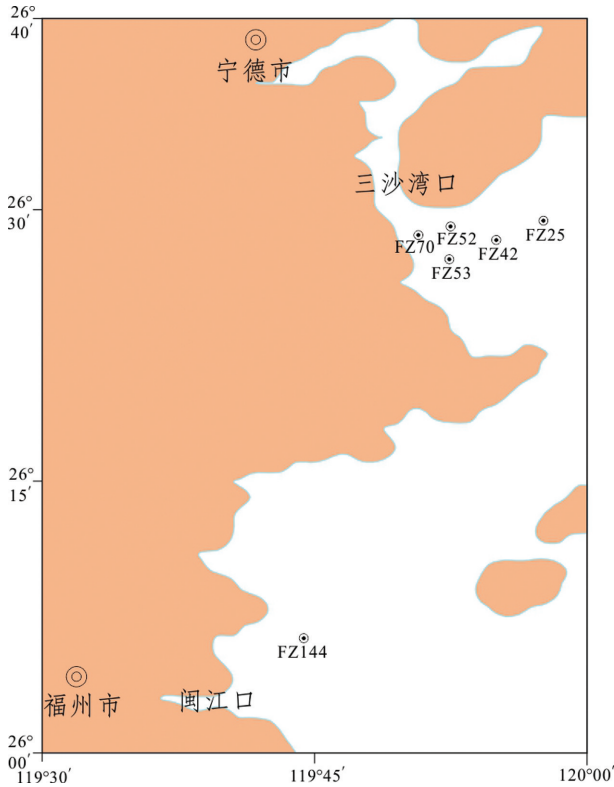


图2 表层沉积物调查站位图

Fig.2 Surface sediment investigation station

粒级标准表示。深度基准采用理论最低潮面,平面坐标系统采用CGCS2000国家大地坐标系。

## 4 沙波群地貌发育特征

### 4.1 闽江口外海域沙波群特征

闽江口水下三角洲平原沙坝末端之上发育有一定规模的海底沙波,距离葫芦岛东岸最近约12 km,东西向延伸约3.1 km,南北向延伸约1.1 km,分布面积约3 km<sup>2</sup>。利用多波束数据绘制的三维地形图(图3)详细展示了沙波群的精细发育特征:该沙波群海底地形自NW向SE呈不断下降趋势,发育规模也逐渐减小,海底水深变化介于7~12 m,单条沙波脊线基本平行排列,走向NW-SE向转为N-S向,长度介于0.15~2.0 km,各沙波脊线平均间距约0.15 km,最大间距约0.3 km,沙波平均高差约0.7 m,最大高差约2.0 m,两壁坡度最大约0.8°。

本文参照刘振夏等(2004)对海底沙波的分类方法,根据沙波群走向和大小将其分为3个类型:上部走向为NW-SE向的I型沙波为直线型沙波,该区域是整个沙波群的主体部分,中部走向近NNW-

SSE向的II型沙波为过渡型沙波,下部走向近N-S向的III型沙波为挠曲型沙波。I型沙波位于沙波群北部,发育在7~9 m水深段,宽100~200 m,长700~1400 m,单条沙波最大高差2 m,主体呈直线型,规模逐渐变小;II型沙波位于沙波群中部,与I型沙波末端相连,水深范围8~10 m,宽48~80 m,长500~700 m,高差1~1.5 m,沙波群内部可见少量挠曲现象,末端多呈分叉状态;III型沙波位于沙波群南部,与II型沙波末端相连,邻近水道,部分沙波尾端延伸进入水道,沙波走向与水道延伸方向垂直,沙波海底水深8~10 m,宽15~54 m,长100~400 m,最大高差1 m左右,沙波两端均有分叉现象。一般来说,潮流直接作用于沙波正面,造成迎潮面坡度较缓而背潮面较陡,通过沙波横切剖面A-A'可以明显看出I型沙波至III型沙波变化趋势均表现为SW侧均比NE侧缓,该区域SW向潮流占主导。

同多波束海底三维地形图反映的沙波群特征一致,旁侧声呐的图像也能够清晰反映调查区闽江口外海域的沙波群发育特征,各沙波脊线密集交错,平均间距约为10 m,为挠曲状沙波群(图4)。

### 4.2 三沙湾口外海域沙波群特征

高精度多波束数据显示(图5),在三沙湾口外水道出口左侧发育一处规模较大的浅滩,水深32~50 m,长约3.4 km,宽0.5~1.7 km,呈舌状向东延展,浅滩的南、北和东区均有沙波发育,沙波的形态各有不同,其发育类型有明显差异。同时,海底微地貌形态还发现三沙湾口门处发育大面积长条形或弧形深槽,说明该区域潮流作用十分强劲,对海底的冲刷作用较强,外侧浅滩和海底沙波群地貌形态的塑造正得益于潮流对沉积物的侵蚀和输运。

北区沙波位于三沙湾口东侧海域,水深45~60 m,沙波脊线走向近NE-SW向,长0.1~0.3 km,宽50~100 m,最大高差5 m左右。横切剖面A-A'显示,沙波NW侧较陡,平均坡度7.5°,SW侧较缓,平均坡度4°。该区域潮流主流向为NW向,因此,根据沙波两侧坡度发育形态可以看出,北区沙波主要受涨潮流影响,属于过渡型沙波,沙波正朝NW方向迁移,即具有朝坡陡一侧不断迁移的规律。

东区沙波与北区沙波末端分叉波痕相连,水深40~50 m,发育规模较大,沙波脊线走向近S-N向,长0.3~0.7 km,宽40~70 m,最大高差6 m左右。横



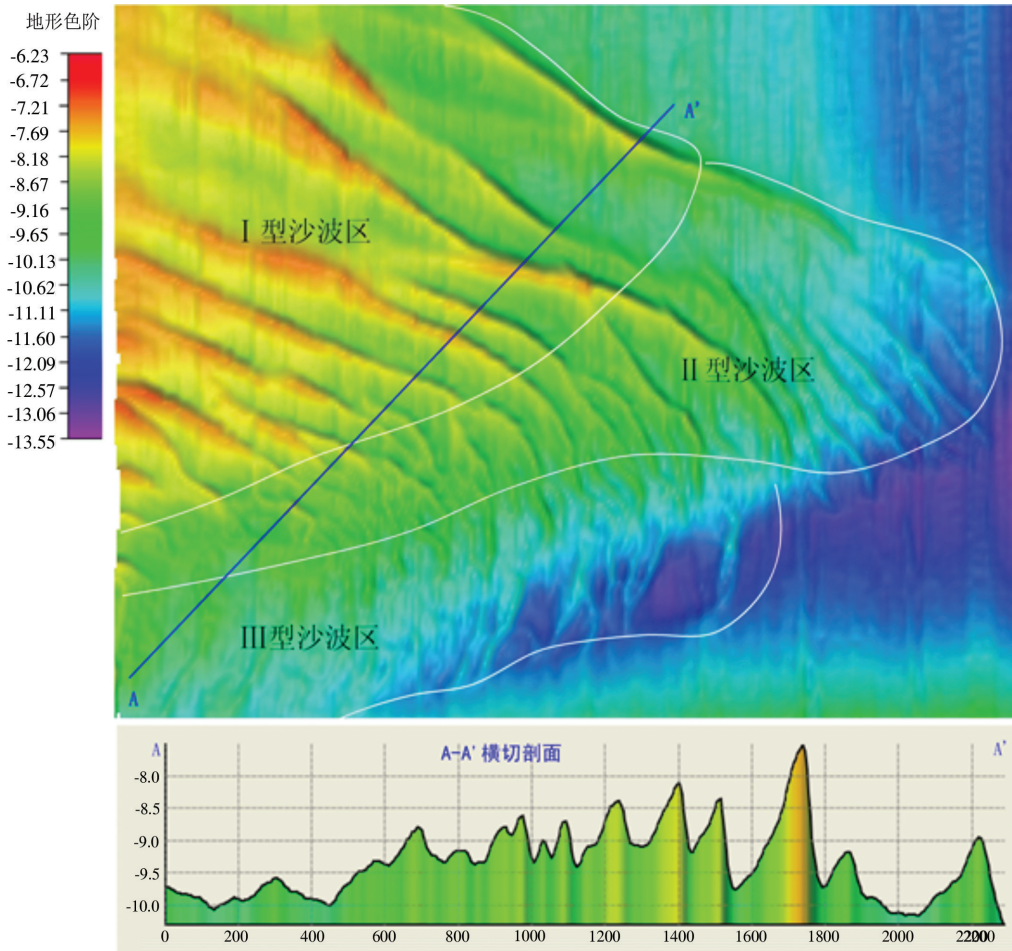


图3 闽江口外沙波群三维地形图

Fig.3 Three-dimensional topographic map of the sand wave group outside Minjiang estuary

剖面B—B'显示,沙波两侧坡度大致相同,平均坡度约 $8.2^{\circ}$ ,推测由于沙波区位于浅滩阴影区,处于涨落潮流均衡区,使得沙波两侧发育较对称,沙波形态稳定,属于直线型沙波。同时,部分沙波末端分枝并伴随着弯曲变形,且两沙波之间发育有波痕,长100~300 m,宽20 m左右,高差10~20 m。

南区沙波位于三沙湾水道出口外海域,脊线走向近NE—SW向,单条沙波长0.1~1 km,宽约100 m,最大高差10 m左右。横切剖面C—C'显示,沙波SE侧坡度较陡,平均坡度可达 $11^{\circ}$ ,NW侧坡度较缓,平均坡度 $8^{\circ}$ ,属于挠曲型沙波(图6)。自NW向至SE向沙波越来越高,说明该区沙波主要受SE向落潮流影响,并伴有朝SE向坡陡侧迁移的规律。该沙波区沙波发育规模由中部向两端逐渐变小,部分沙波亦有末端分枝相连的特征。

## 5 沙波发育控制因素探讨

### 5.1 沉积物质来源控制

正如前文所述,沉积物质是控制研究区海底沙波地貌的因素之一,研究发现,三沙湾口和闽江口外海域海岸线曲折,基岩海岸范围长(李刚等,2019),港湾众多,受台风影响几率大;近海波浪、潮汐、洋流作用强烈(管秉贤,2005),沉积环境复杂,入海物质来源较多,主要包括近岸基岩侵蚀物质、河流沉积物质和洋流输运物质。

#### 5.1.1 近岸基岩侵蚀物质

三沙湾口外海域紧邻东冲半岛南侧,在对研究区进行多波束、侧扫声呐等调查过程中发现,东冲半岛海岸类型基本以基岩海岸为主,近岸岩石风化程度高,海蚀地貌高度发育,在波浪侵蚀作用下,形

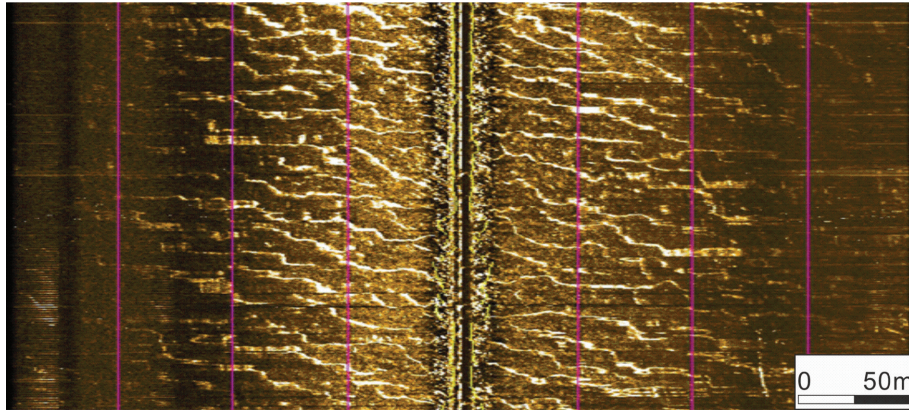


图4 闽江口外海域挠曲状沙波群侧扫剖面

Fig.4 Lateral scanning profile of flexural sand wave group outside Minjiang estuary

成了狭长宽阔的沙砾石滩,并伴有岬、礁、屿等海湾风貌。基岩海岸在波浪作用下不断被侵蚀,风化、剥离后的砾石在底流磨蚀作用下趋于圆滑并顺流搬运(薛春汀,2010)。表层沉积物粒度特征也验证了这一点,多个站位的表层沉积物样粒度资料显示,位于东冲半岛南部基岩海岸附近的F54站位颗粒组分主要以砾和砂等粗粒为主,而离岸较远的其他站位主要以砂和粉砂等细粒为主(表1),说明沉积物颗粒正在发生着一定程度的离岸搬运,基岩海

岸的粗颗粒为三沙湾口外海域海底浅滩和沙波发育提供了一定的物质来源。

#### 5.1.2 河流沉积物质

入海河流是陆源沉积物向海运输的重要通道,中国近海发育多条大型入海河流,如长江、黄河、珠江等,这些河流在入海口均形成了大规模的河口三角洲(李从先等,2008;陆勤等,2011)。闽江是研究区附近唯一的大型入海河流,发源于福建江西边界的武夷山脉,闽江径流量巨大,居全国河流第三位,

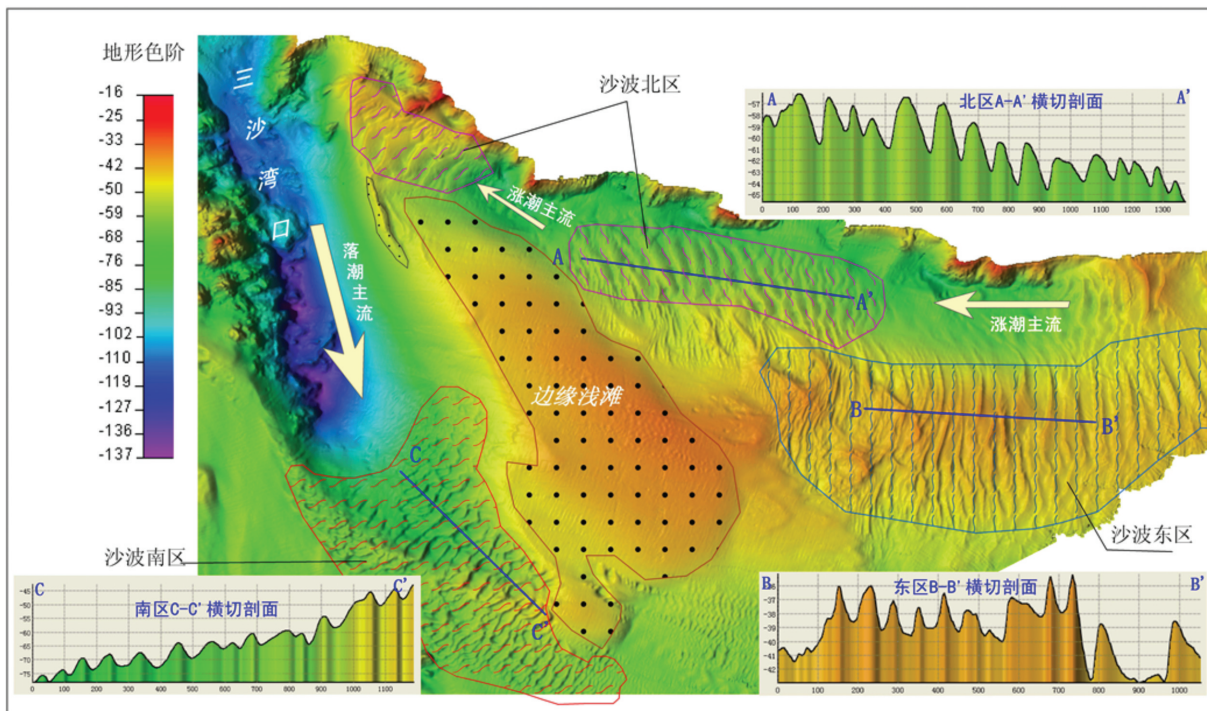


图5 三沙湾口外沙波群三维地形图

Fig.5 Three-dimensional topographic map of the sand wave group outside Sansha bay estuary



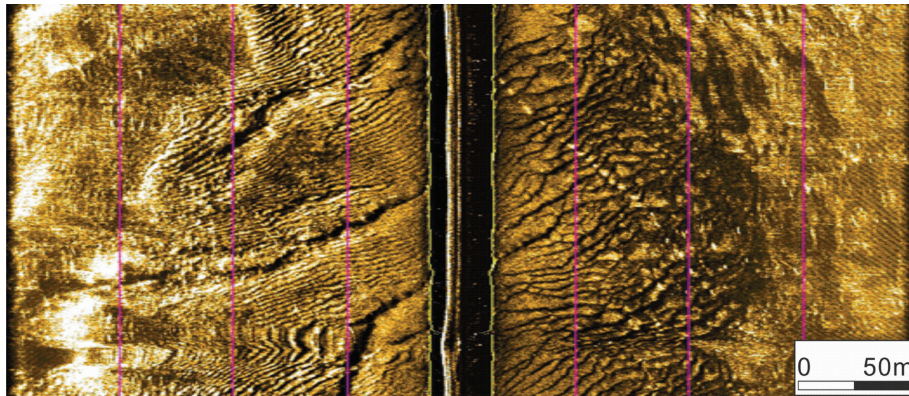


图6 三沙湾口外挠曲型沙波侧扫剖面

Fig.6 Lateral scanning profile of flexural sand wave group outside Sansha bay estuary

是典型的山溪性河流(许艳等, 2014; 卢惠泉等, 2014), 虽然闽江输沙量不及长江、珠江等河流, 但根据福建水文局竹歧站(1954—2011年)的观测资料, 自1954年以来, 闽江年均流量仍在  $268 \times 10^8 \sim 864 \times 10^8 \text{ m}^3$  波动, 平均值为  $527 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 携带了大量沉积物质(图7)。受入海口扩大的影响, 水流流速减小, 粗粒沉积物会在近岸沉积, 细粒沉积物质会在潮流作用下搬运至远海地区, 沙波形成的本质就是粗粒沉积物在外力作用下发生的规则变化。

闽江口外海域沙波群特征明显, 沙波线发育形态与沙脊线垂直, 符合由沙波向沙脊之间转变规律。近年来, 由于闽江年输沙量减少, 维持沙波形态的沉积物供给量也相应减少, 这会打破沙波原有的动态平衡, 导致沙波分布形态的改变, 研究区直线型沙波群和挠曲状沙波群相连, 说明沙波形态的变化是客观存在的。

### 5.1.3 洋流输运悬浮物质

中国东部近海大部分海域均受洋流影响, 苏鲁等长江入海口以北海区受苏北沿岸流、黄海暖流和部分小环流控制, 浙闽等长江口以南海区受浙闽沿

岸流和台湾暖流控制, 这些洋流的存在, 对于维持海洋水动力平衡、近岸及入海沉积物扩散、气候调节等方面具有非常关键的作用, 本文研究区正是浙闽沿岸流和台湾暖流的交汇区域之一。

浙闽沿岸流随季节变化比较明显, 秋冬强而春夏弱, 冬季流向向南, 夏季向北(图8, 图9); 台湾暖流是东海环流的重要组成部分, 该海流具有高温、高盐属性, 基本不受季节变化的较大影响, 流向主要向北为主, 随盛行风会发生细微偏移(许东禹等, 1997)。秋冬季节, 浙闽沿岸流顺岸自长江口向闽江口方向移动, 此时台湾暖流离海岸较远, 两种洋流相互影响较小, 浙闽沿岸流在向南流动过程中携带了大量长江入海悬浮物, 并在浙闽近岸沿途沉积形成沉积区, 本文三沙湾口和闽江口外沙波群中的部分沉积物便是来自于长江口悬浮物质; 春夏季节, 受东南盛行风影响, 台湾暖流西偏, 在二者作用下, 浙闽沿岸流转为向北流动, 对长江入海悬浮物质扩散起着阻挡作用, 使长江入海物质主要分布于浙江近海。

近年来, 受中上游建设大型水库、堤坝的影响, 长江的入海泥沙量锐减, 调查数据表明(丛宁, 2010), 20世纪末较20世纪60年代长江的入海泥沙量相对减少了1/3(图10), 致使长江口外的水下三角洲出现了明显侵蚀, 受入海泥沙量的减少的影响, 洋流携带的悬浮扩散物质在研究区的沉积也会相应减少, 打破原有的沙波沉积物质供需平衡, 促使沙波形态发生进一步改变。

### 5.2 水动力环境控制

前人通过调查研究发现, 由于受到海底底流、沉

表1 表层沉积物粒度颗粒组分

Table 1 Surface sediment particle size components

测站	百分含量/%				平均粒径 (MZ)/ $\phi$	中值粒径 (F50)/ $\phi$	名称
	砾石	砂	粉砂	黏土(泥)			
FZ25	0.00	42.56	39.02	18.41	5.68	0.64	砂质粉砂
FZ42	0.00	3.36	71.03	25.61	7.12	1.29	粉砂
FZ53	0.00	22.63	63.69	13.68	6.17	0.84	砂质粉砂
FZ54	0.15	99.86	0.00	0.00	0.75	0.92	含砾砂
FZ70	0.00	3.96	73.45	22.59	7.03	1.36	粉砂
FZ144	0.00	95.45	3.85	0.7	1.97	1.12	砂



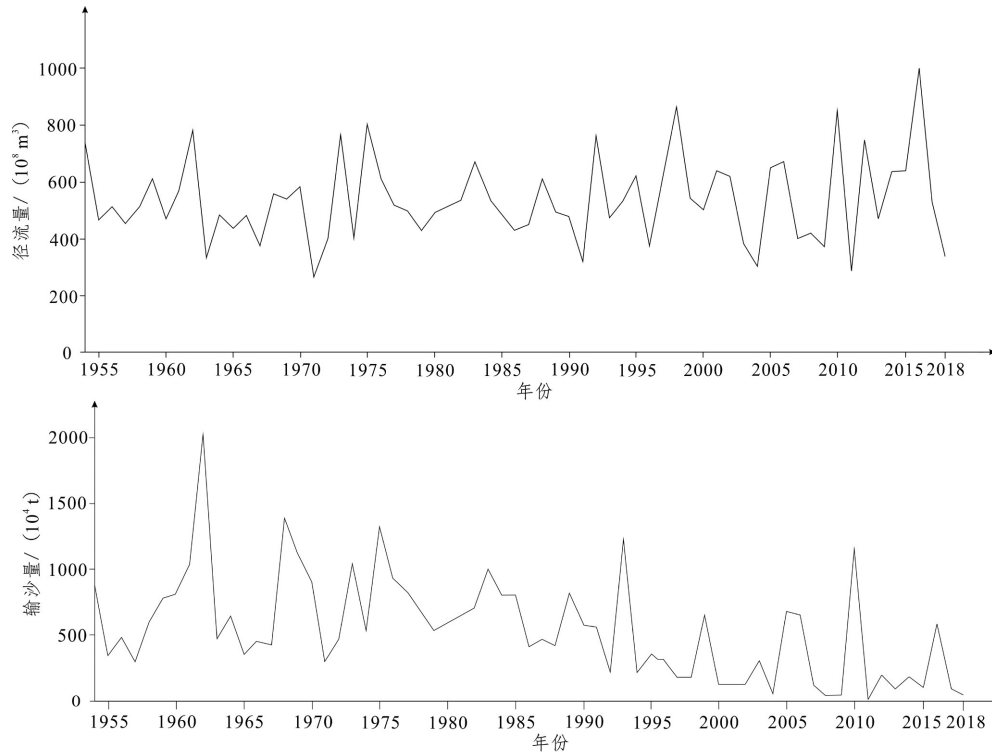


图7 闽江口竹歧站年径流量、年输沙量变化  
(数据来源:戴仕宝等,2007;中国河流泥沙公报,2005—2018)

Fig.7 Variation of annual runoff and sediment discharge at Zhuqi Station in Minjiang estuary  
(Data Sources: Dai Shibao, et al., 2007; China River Sediment Bulletin, 2005—2018)

积物供应和台风、风暴潮等自然灾害的影响,沙波在海底存在一定的活动性。为验证研究区沙波的活动及迁移特性,本文选择窦国仁(1999)提出的泥沙起动流速公式,对闽江口和三沙湾外海域海底沙波组成颗粒的起动流速进行了计算,该公式充分考虑了颗粒密度、粒径、综合黏结力及水压力等要素:

$$U_c = k' (\ln 11 \frac{h}{\Delta}) (\frac{d'}{d_*})^{1/6}$$

$$\sqrt{\frac{3.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + (\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}}) 5/2 \frac{\varepsilon_0 + g h \delta (\delta/d)^{1/2}}{d}}{d}}$$

$$\gamma_{0*} = 0.68 \gamma_s (d/d_0)^n$$

式中,  $k'$  为常量,取 0.32,代表泥沙状态为少量运动;  $h$  代表水深(mm);  $\Delta$  代表床面糙率高度,取  $2d_{50}$ ;  $d'$  根据粒径判断,取  $d_{50}$ ;  $d_*$  为常量,取 10 mm;  $\rho_s$  和  $\rho$  分别代表砂砾和水的密度;  $d$  为中值粒径;  $\delta$  为薄膜水厚度参数,取  $2.31 \times 10^{-5}$  cm;  $\varepsilon_0$  为综合黏结力参数,取  $1.75 \text{ cm}^3/\text{s}^2$ ;  $\gamma_0$  和  $\gamma_{0*}$  分别代表泥沙的干容重和稳定容重;  $\gamma_s$  代表泥沙比重,取  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ;  $n$  取 0.2。

F54 站位和 F144 站位分别位于三沙湾口外和闽

江口外海底沙波附近,本文利用这两个站位的表层沉积物样品测得的中值粒径(表 1),通过上述公式和参数计算得 F54 站位泥沙起动流速为 50.24 cm/s, F144 站位泥沙起动流速为 48.79 cm/s,通过对比研究区实测的定点式和走航式海流数据发现,三沙湾口和闽江口外海域底流实测和可能最大流速均大于 50 cm/s,部分区域大潮期间最大底层流速可达 89 cm/s,说明该区域海底泥沙具有被海流掀起的可能,但泥沙起动仅代表底流作用,是沙波迁移的充分条件,并不能完全说明沙波具有迁移性。

### 5.3 沙波活动迁移性特征

关于海底沙波的迁移性控制因素研究,前人认为主要受沉积物供应和水动力条件两个因素控制,并存在沙脊和沙波之间的转换(Sauermann et al.,2000)。沙质沉积体在发育过程中,不同因素占主导会导致沙体向不同的方向演化,当水动力强度占主导时,沉积沙体迎水面和背水面中部会逐渐拉伸,两侧逐渐内缩,最后形成顺水流方向发育的沙脊;当水动力减弱,沉积物供应占主导时,沉积沙体会在物源供应下向两

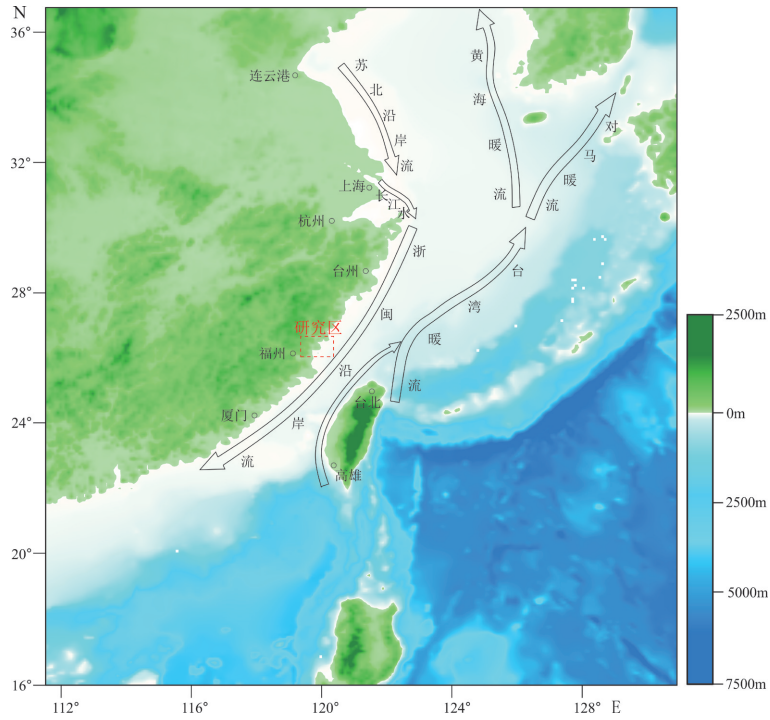


图8 中国东海主要海流分布图(冬季)  
 Fig.8 Distribution of major rivers in the East China Sea(in winter)

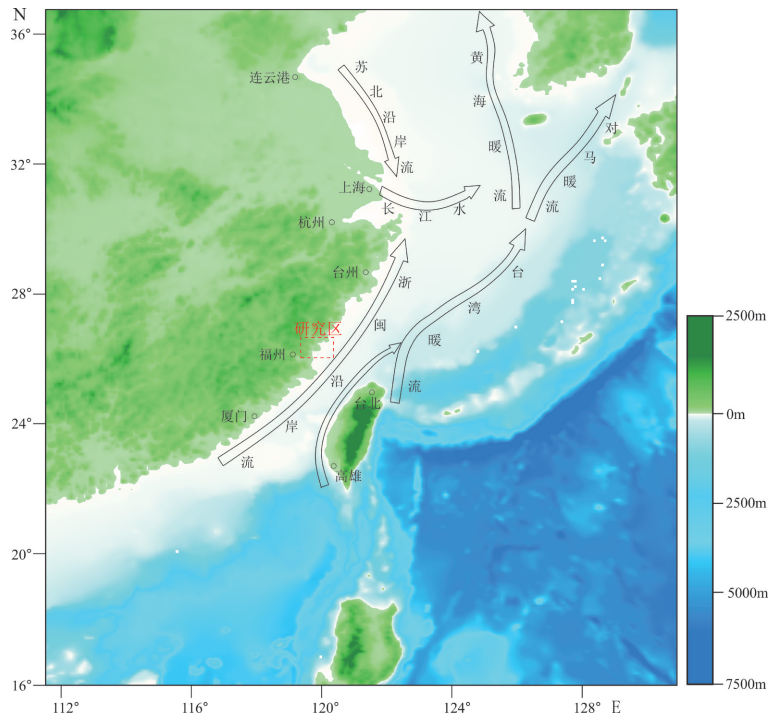


图9 中国东海主要海流分布图(夏季)  
 Fig.9 Distribution of major rivers in the East China Sea(in summer)

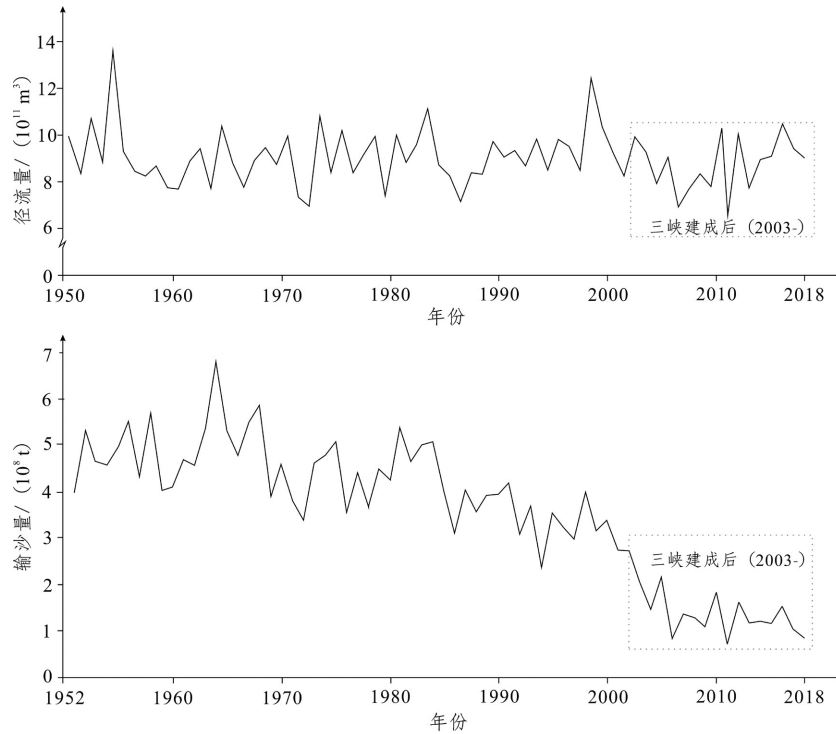


图10 长江大通水文站1953—2018年径流量、输沙量变化(据王利花,2017修改)

Fig.10 Variation of annual runoff and sediment discharge at Datong Hydrological Station in the Yangtze River (modified after Wang Lihua,2017)

侧延伸,迎水面和背水面逐渐变窄,最后形成垂直水流方向发育的沙波(栾锡武,2010)。

对于沙波迁移性判断,目前仅局限于原位连续观测和地貌特征预测两种方式,本次调查未进行原位连续观测,只能依据各种地球物理特征进行预

测。调查区内浅地层剖面也显示,相间排列的大型沙脊(图11)和残留沙丘(图12)广泛发育,在剖面图上表现为大型亮、暗条纹相间排列,沙脊两侧沙波纹发育不明显,在沙脊一侧局部可见20~30 m长的沙波纹,与沙脊走向垂直。一般来说,沙波纹是判断沙波活动的一个重要标志,而沙丘的存在往往是海底流速低、供沙量大的表现,当河流入海沉积物质和洋流输运物质减少,水动力增强,沙丘便会逐步向沙波转化,闽江口外海域沙波和三沙湾口外海域沙波均显示沙波背潮面陡迎潮面缓的特征,证实了沙波具有朝坡陡一侧不断迁移的规律。

#### 5.4 对海洋工程应用的影响及防范措施

海底沙波群作为一种受海洋水动力环境影响剧烈的地貌形态,在海洋工程建设过程中经常被视作影响海洋工程施工和运营稳定性的主要地质灾害类型之一。由于海底沙波普遍存在不同程度的活动性和迁移性,会改变海底浅表层工程设备或基础构筑物的原始状态,如对观测设备、钻探平台脚架等的掩埋等造成平台起拔困难,对海底输油、输水、输气管道及海底光缆底部支撑沙砾的掏空造成

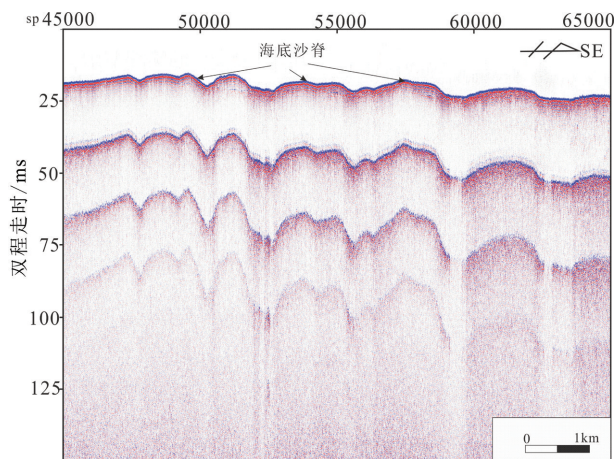


图11 浅地层剖面显示的海底沙脊群

Fig.11 Submarine sand ridge group shown in shallow seismic reflection section



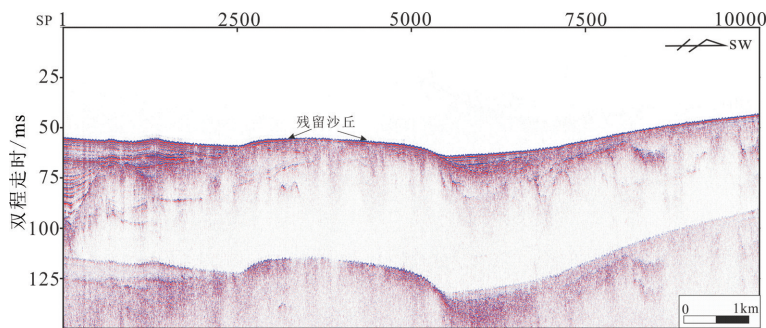


图 12 浅地层剖面显示的残留沙丘

Fig.12 Residual sand dunes shown in shallow seismic reflection section

管道、光缆断裂,对已疏浚码头、航道等的重新淤积等。海底管道、光缆等的建设均是服务于国家安全、维持国计民生的重要支柱,一旦发生损害,对国民经济、国防安全等会造成不可预估的影响,因此,在海洋工程建设和运营过程中,必须充分重视海底活动性沙波的危害。首先,在工程建设选址时,必须进行充分的海底路由勘察,尽量避开活动性沙波区,合理的铺设路径可以大幅度减少工程造价和后期维护成本;当设计路径无法避开沙波区时,必须对海底地形进行详细勘察,包括海底沙波的发育特征,水动力环境变化及活动性,以便为工程设计、施工及维护提供必要的依据。

## 6 结 论

(1)研究区闽江口外海域和三沙湾口外海域海底分别发育一处海底沙波群,根据沙波发育形态及沙脊线走向将其分为挠曲型沙波、直线型沙波和过渡型沙波3类,两处海底沙波群均呈迎潮面坡度较缓而背潮面较陡的特征。

(2)沉积物质是控制研究区海底沙波群地貌发育的因素之一,主要来源包括近岸基岩侵蚀物质、入海河流沉积物质和洋流运输物质,近年来,受河流输沙量、洋流悬浮物质等减少影响,打破了研究区原有的沙波沉积物质供需平衡,促使沙波形态发生一定程度改变。

(3)海底沙波群组成颗粒起流速计算结果显示,研究区泥沙起流速计算值小于海底底层实测流速和可能最大流速,说明海底泥沙具有被海流掀起的可能。沙波纹、残留沙丘及海底沙波的发育特征进一步证实了沙波具有朝坡陡一侧不断迁移的规律。

(4)海底沙波的存在会对钻井平台、海底管道

等海洋工程的施工和运营产生巨大的影响,必须受到充分的研究和重视。海洋工程在前期选址过程中,建议进行详细的路由勘察,查明调查区内的沙波发育特征及活动性,以便合理避开已有沙波区,保证海洋工程建设的安全性和稳定性。

## References

- Bai Yuchuan, Yang Xingen, Tian Qi, Zhang Bin. 2009. Evolution characteristics of wave in northern South China Sea[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 40(8):941-947,955(in Chinese with English abstract).
- Belderson R H, Johnson M A, Neil Kenyon. 1982. Offshore Tidal Sands:Processes and Deposits[M]. London: Chapman & Hall.
- Bian Shuhua, Xia Dongxing, Chen Yilan, Zhao Yuexia.2006. The classification characteristics and developing factors of the sandwaves at the Mouth of Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 36(2): 327-330(in Chinese with English abstract).
- Cai Feng. 2013. China Offshore Oceanography—Seabed Topography and Landform[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Chen Jian, Yu Xingguang, Li Dongyi, Lai Zhikun, Xu Xiaohui, Huang Caibin. 2010. Characteristics of underwater morphology evolution of the Minjiang Estuary in recent 100 years and its reasons[J]. Ocean Engineering, 28(2):82-89(in Chinese with English abstract).
- Cong Ning, Zhang Zhenke, Xia Fei.2010. A Study on Coastal Geomorphological Changes and Disasters of the Changjiang River Estuary under the Influences of Human Activities and Global Warming[J]. Henan Science, 28(5):605-611.
- Cornish V. 1901. On Sand-Waves in Tidal Currents[J]. Geographical Journal, 18(2):170-200.
- Dai Shibao, Yang Shilun, Gao Ang, Liu Zhe, Li Peng, Li Ming. 2007. Trend of sediment flux of main rivers in China in the past 50 years[J]. Journal of Sediment Research,(2):49-58(in Chinese with English abstract).
- Dong Zhihua. 2004. The Influence on Current Ridge, Sand Wave and Topography of Dongfang Offshore by Typhoon[D]. Ocean

- University of China(in Chinese with English abstract).
- Dou Guoren. 1999. Incipient Motion of Coarse and Fine Sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, (6):1-9.
- Guan Bingxian, Yuan Yaochu. 2005. Overview of studies on some eddies in the China seas and their adjacent seas—I. The South China Sea and the region east of Taiwan[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(3):1-16(in Chinese with English abstract).
- Guo Xingjie, Cheng Heqin, Mo Ruoyu, Yang Zhongyong. 2015. Statistical characteristics and transport law of sand waves in the Yangtze Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(5):148-158(in Chinese with English abstract).
- Li Congxian, Fan Daidu, Yang Shouye, Cai Jingong. 2008. Characteristics and formation of the Late Quaternary incised-valley sequences in estuary and delta areas in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(1):87-97(in Chinese with English abstract).
- Li Gang, Sun Guihua, Yao Yongjian, Zhu Boqin, Zhang Yaoming. 2019. Spatio-temporal evolution of the Sansha Bay coastline[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 49(1):187-196 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyuan, Fan Fengxin, Xu Tao, Luan Zhendong, Zhang Jieyang. 2011. The distribution characteristics and evolution of the sand wave in the east of Laizhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 35(7):51-54 (in Chinese with English abstract).
- Li Lei, Huang Lei, Hu Yunzhuang, Liu Pei, Wang Fu. 2019. Comprehensive Dataset of the Geological Environment in China's Coastal Zone[J]. *Geology in China*, 46(S2): 9-20(in Chinese with English abstract).
- Liu Guangding, Wang Xueyan, Lei Shoumin. 1990. Map series of geology - geophysics of China Sea waters and adjacent areas(on the scale of 1:2000000)[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (1):93-97(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenxia, Xia Dongxing. 2004. *Tidal Sands in the China Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 24-41(in Chinese).
- Lu Huiquan, Wu Chengqiang, Xu Yan. 2014. Characteristics and origin of the tidal sand ridges off the Minjiang River Estuary, Southeastern China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (2):27-36(in Chinese with English abstract).
- Lu Qin, Chen ShenLiang. 2011. Distribution of surface sediments on the subaqueous Delta of the Abandoned Yellow River Delta[J]. *Land and Resources of Shanghai*, (1):14-19(in Chinese with English abstract).
- Luan Xiwu, Peng Xuechao, Wang Yingmin, Qiu Yan. 2010. Characteristics of sand waves on the northern South China Sea shelf and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(2):233-245.
- Murphy E C. 1914. *The Transportation of Débris by Running Water*[M]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center.
- Wang Haipeng, Zhang Peihui, Chen Feng, Ye Yanyi, Zheng Zhifeng. 2000. Sedimentary characteristics and environment of underwater delta in Minjiang Estuary II. Sedimentary characteristics and environment since Late Pleistocene[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 19(2):132-140(in Chinese with English abstract).
- Wang Lihua, Lu Peng. 2017. Analysis of runoff and sediment change characteristics at Datong hydrometric station[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 37(4):266-270(in Chinese with English abstract).
- Wang Shangyi, Li Daming. 1994. The dynamic analysis of the seabed sand waves on the continental shelf and slope of the Pearl River Mouth Basin in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(6):122-132(in Chinese with English).
- Wu Chengqiang. 2011. *Study on Submarine Morphology of Fujian Offshore*[D]. Ocean University of China.
- Wu Jianzheng, Hu Rijun, Zhu Longhai, Ma Fang, Liu Jianlun. 2006. Study on the seafloor sand waves in the northern South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 36(6):1019-1023 (in Chinese with English abstract).
- Xu Dongyu, Liu Xiqing, Zhang Xunhua, Li Tanggen, Chen Bangyan. 1997. *Offshore Geology of China*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Xu Yan, Cai Feng, Lu Huiquan, Wu Chengqiang, Zheng Yongling, Bao Jingjing. 2014. The characteristics of linear sands of Minjiang Estuary and Jiulongjiang Estuary in Fujian, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(5):142-151(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting, Zhang Yong. 2010. Sediment Transportation of Longshore current and coastal current in China littoral zone[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (1):1-7(in Chinese with English abstract).
- Ye Haitao, Wang Yigang, Cao Bing. 2007. Tidal prism of Sansha Bay and its water exchange with the open sea[J]. *Journal of Hehai University(Natural Sciences)*, (1): 96-98(in Chinese with English abstract).
- Ye Yincan. 2012. *Marine Geo-Hazards in China*[M]. Beijing:China Ocean Press, 397-413(in Chinese).
- Yin Ping, Lin Liangjun, Chen Bin, Xiao Guoqiang, Cao Ke, Yang Jilong, Li Meina, Duan Xiaoyong, Qiu Jiandong, Hu Yunzhuang, Wang Lei, Sun Xiaoming. 2017. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China[J]. *Geology in China*, 44(5): 842-856 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jingjing, Zhuang Zhenye, Cao Lihua. 2017. Bed forms on the northern shelf and slope of the South China Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 31(7):11-19(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuexia, Liu Baohua, Li Xishuang, Wu Jinglong, Su Tianyun. 2006. Topography feature and migration of submarine sand waves in Jiaozhou Bay Mouth[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 37(5):464-471(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Lihua, Yan Jun, Xu Tao, Luan Zhendong. 2017. Bedform of tidal sand ridges on the southeast Yangtze Shoal on continental shelf in the East Sea[J]. *Marine Sciences*, 41(1):11-17(in Chinese

with English abstract).

## 附中文参考文献

- 白玉川,杨细根,田琦,张彬. 2009. 南海北部海域海底沙波演化特征[J]. 水利学报,40(8):941-947+955.
- 边淑华,夏东兴,陈义兰,赵月霞. 2006. 胶州湾口海底沙波的类型、特征及发育影响因素[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 36(2): 327-330.
- 蔡锋. 2013. 中国近海海洋—海底地形地貌[M]. 海洋出版社.
- 陈坚,余兴光,李东义,赖志坤,徐晓辉,黄财宾. 2010. 闽江口近百年来海底地貌演变与成因[J]. 海洋工程, 28(2):82-89.
- 丛宁,张振克,夏非. 2010. 人类活动与全球变暖影响下长江口海岸地貌动态与灾害趋势研究[J]. 河南科学, 28(5):605-611.
- 戴仕宝,杨世伦,邵昂,刘哲,李鹏,李明. 2007. 近50年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. 泥沙研究, (2):49-58.
- 董志华. 2004. 台风对东方岸外沙波沙脊和海底地貌的影响[D]. 中国海洋大学.
- 窦国仁. 1999. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, (6):1-9.
- 管秉贤,袁耀初. 2005. 中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述 I. 南海和台湾以东海域[J]. 海洋学报, 28(3):1-16.
- 郭兴杰. 2015. 长江口沙波统计特征及输移规律[J]. 海洋学报, 37(5): 148-158.
- 李从先,范代读,杨守业,蔡进功. 2008. 中国河口三角洲地区晚第四纪下切河谷层序特征和形成[J]. 古地理学报, 10(1):87-97.
- 李刚,孙桂华,姚永坚,朱博勤,张耀明. 2019. 三沙湾海岸线时空演变[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(1):187-196.
- 李近元,范奉鑫,徐涛,栾振东,张捷扬. 2011. 莱州湾东部沙波地貌分布特征及其形成演化[J]. 海洋科学, 35(7):51-54.
- 李磊,黄垒,胡云壮. 2019. 全国海岸带地质环境综合数据集[J]. 中国地质, 46(S2): 9-20.
- 刘光鼎,王学言,雷受旻. 1990. 中国海区及邻域地质——地球物理系列图[J]. 海洋地质与第四纪地质, (1):93-97.
- 刘振夏,夏东兴. 2004. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京:海洋出版社,24-41.
- 陆勤,陈沈良. 2011. 废黄河三角洲海域表层沉积物分布特征[J]. 上海国土资源, (1):14-19.
- 栾锡武,彭学超,王英民,邱燕. 2010. 南海北部陆架海底沙波基本特征及属性[J]. 地质学报, 84(2):233-245.
- 卢惠泉,吴承强,许艳. 2014. 闽江口外潮流沙脊群特征与成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, (2):27-36.
- 王海鹏,张培辉,陈峰,叶燕贻,郑志凤. 2000. 闽江口水下三角洲沉积特征及沉积环境 II. 晚更新世—全新世沉积特征和沉积环境[J]. 应用海洋学报, 19(2):132-140.
- 王利花,路鹏. 2017. 大通水文站水沙变化特征分析[J]. 水土保持通报, 37(4):266-270.
- 王尚毅,李大鸣. 1994. 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(中文版), 16(6):122-132.
- 吴建政,胡日军,朱龙海,马芳,刘剑伦. 2006. 南海北部海底沙波研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 36(6):1019-1023.
- 吴承强. 2011. 福建近岸海域海底地貌研究[D]. 中国海洋大学.
- 许东禹,刘锡清,张训华,李唐根,陈邦彦. 1997. 中国近海地质[M]. 北京:地质出版社.
- 许艳,蔡锋,卢惠泉,吴承强,郑勇玲,鲍晶晶. 2014. 福建闽江口和九龙江口外线状沉积沙体特征[J]. 海洋学报(中文版), 36(5):142-151.
- 薛春汀,张勇. 2010. 中国近岸海区沿岸流和海岸流对沉积物的搬运[J]. 海洋地质与第四纪地质, (1):1-7.
- 叶海桃,王义刚,曹兵. 2007. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换[J]. 河海大学学报(自然科学版), (1): 96-98.
- 叶银灿. 2012. 中国海洋灾害地质学[M]. 海洋出版社,397-413.
- 印萍,林良俊,陈斌,肖国强,曹珂,杨吉龙,李梅娜,段晓勇,仇建东,胡云壮,王磊,孙晓明. 2017. 中国海岸带地质资源与环境评价研究[J]. 中国地质, 44(5):842-856.
- 张晶晶,庄振业,曹立华. 2015. 南海北部陆架陆坡沙波底形[J]. 海洋地质前沿, 31(7):11-19.
- 赵月霞,刘保华,李西双,吴金龙,苏天赞. 2006. 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, 37(5): 464-471.
- 庄丽华,阎军,徐涛,栾振东. 2017. 扬子浅滩东南海域海底潮流沙脊、沙波特征[J]. 海洋科学, 41(1):11-17.