

湄洲湾北部海底地貌特征研究与分析

官士奇^{1,2}, 阎 军¹, 马小川¹, 栾振东¹, 陈长安¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 中科院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛, 266071; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘要: 为对湄洲湾北部海底地形地貌特征及其影响因素进行系统的研究, 作者利用多波束系统对湄洲湾北部海底地形进行探测, 结合研究区内沉积物及潮流特征, 对该区域海底地貌特征及其成因进行分析。研究区呈现中部低、南北高的地形格局, 其中中部深水区又为近岸深、中间浅的特征, 中轴为潮汐水道, 水道两侧发育浅滩的海底地貌特征。研究区沉积物组分以砂和粉砂为主, 由于研究区大部分表层沉积物中细粒沉积物占主要组分, 沉积物具有较强的黏性, 而实测资料显示潮流流速较小, 因此研究区在常态水动力条件下, 海底沉积物很难被冲刷, 海底地形变化受潮流影响较小。通过将 2012 年与 2013 年研究区的调查结果进行对比发现, 研究区海底地形整体变化不大, 个别区域地形起伏变化较大, 据推测可能是由于人为的挖沙、港口疏浚等因素造成的。因此, 短期内影响研究区海底地形变化的主要因素为人为因素。

关键词: 湄洲湾; 海底地形; 地形变化; 影响因素

中图分类号: P737.212 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)08-0061-09
doi: 10.11759/hyqx/20150109002

湄洲湾位于福建沿海中部, 泉州市和莆田市的交界处, 海域面积 500 km²[1]。其三面环陆, 是一个深入内陆的半封闭狭长型海湾, 自然条件优越, 被确定为中国 21 世纪重点建设的四大深水中转港之一[2-3]。中国科学院南海海洋研究所于 1959~1960 年对南海北部进行综合调查, 这是涉及福建近岸海域的首次现代调查研究。20 世纪 90 年代以后, 随着多波束、侧扫声呐等先进技术的引进, 对福建近岸海域海底地貌的研究取得了突破性的进展[4]。

随着近些年沿海地区不断地发展, 沿岸经济区不断扩张, 海底管道、海底电缆等人工设施不断增多, 海底地形变化对这些设施的安全有着最直接的影响。随着湄洲湾西岸开发区石化工业的发展, 湄洲湾水环境受到了极大的影响, 已有许多学者对湄洲湾水域石油类物质对环境的污染问题展开研究[1, 5-6]。海底管线泄漏对海洋环境造成污染的事件时有发生, 且后果是非常严重的[7], 所以保证海底管线安全对海洋生态环境的保护具有非常重要的意义[8]。

国外很早便开始了海底管线风险评估工作[9], 目前国内学者也对管线溢油事故的风险评估做了许多工作[10-12]。Arnold^[10]对美国密西西比河三角洲 1956~1965 年海底管线事故进行的研究表明, 海床运动和波流冲刷是海底管线失效的主要原因。国内

也有学者对海底地质灾害对海底管线安全性的影响进行了分析和讨论[13-14]。因此, 开展对海底地形地貌特征的调查及其影响因素的研究, 对保证海洋工程安全、防止安全事故的发生、海洋环境的保护具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 研究区概况

湄洲湾位于台湾海峡西岸中部, 水域南北长 33 km, 东西最宽 24 km, 海岸线总长面积约 516 km², 是一强潮岬湾型海湾[15]。由于湄洲湾内岛屿较多, 同时沿岸有许多岬角、半岛突出海岸, 致使湾内水下地形较为复杂。湄洲湾水下地形主要可分为沟槽与浅滩两类。位于湄洲湾中央有一条纵贯全湾、水深较深的沟槽, 是湄洲湾的主水道, 称为中央深槽; 在岛屿之

收稿日期: 2015-01-09; 修回日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(41306132); 中国科学院战略先导科技专项(XDA11030101, XDA11040305)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41306132; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11030101, XDA11040305]

作者简介: 官士奇(1992-), 男, 吉林梨树人, 在读硕士, 主要从事海底地形地貌方面的研究工作, 电话: 15063090223, E-mail: gongshiqi1991@163.com; 栾振东, 通信作者, 高级工程师, 电话: 0532-82898536, E-mail: luan@qdio.ac.cn

间有一些规模相对较小、水深较浅的水道,称为岛间沟槽。浅滩主要发育于岛屿和海岸周围,根据发育位置的不同,可分为岸边浅滩和岛屿浅滩^[16]。由于湾内半岛、岬角等地形的控制,湄洲湾被分成三大湾澳,此次的研究区主要位于北部的枫亭湾(图 1)。

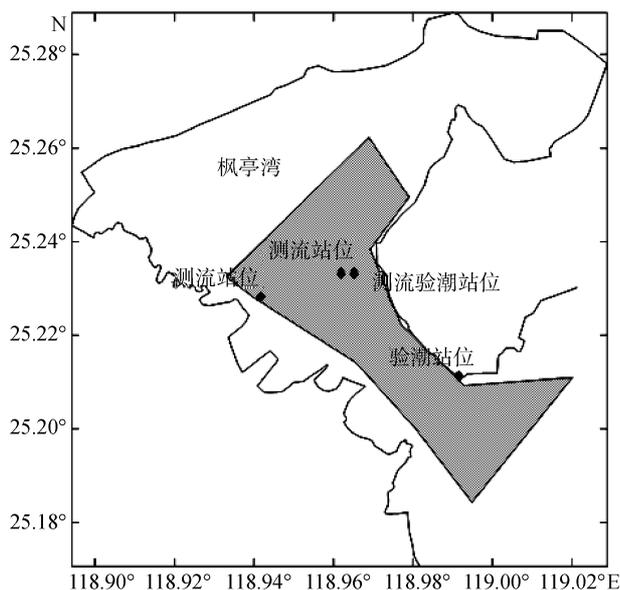


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

湄洲湾潮型属于正规半日潮^[17]。根据湾内不同测站的观测资料,湾内外高低潮出现时间几乎一致,各地潮位基本上同涨同落,高低潮出现时间同步,潮波属驻波型,涨急、落急出现在中潮位附近,转流出现在高低潮位附近。潮位的变化:高潮位自口外向口内沿程递增,低潮位则沿程递减,平均潮位自口外向口内递增。湾内潮流性质为正规的半日潮流,湾内的潮流受地形影响,基本为往复流。深槽部位涨、落潮流向基本上与槽向一致,浅滩部位流向略有分散。大潮流速大于小潮流速,表层流速大于底层流速。

湄洲湾自然条件良好、地理位置优越,是中国少有的天然深水良港^[3],因此研究区内人类活动频繁。近年来,湄洲湾海域由于港口建设^[18]、航道疏浚^[19]、围填海工程^[20]等开发活动,使得该海域的海岸线不断发生变迁^[21],自然环境也发生了变化。整个湄洲湾区域,像“妈祖城”这样需要大量使用海砂进行填海造地的工程陆续开展,大部分工程所需海砂量巨大,这就导致采砂船纷纷在近海盗采海砂,从而对海底环境造成极大的影响。

2 研究方法

为研究对湄洲湾 LNG 管线安全造成影响的地质环境因素,中国科学院海洋研究所组织相关研究人员于 2012 年和 2013 年先后对研究区进行了综合地质地球物理调查。调查主要采用 SONIC 2024 多波束测深系统对研究区水深进行高精度测量。定位采用星站差分 GPS 定位系统,高程基准选用国家 85 高程基准。为获取研究区表层沉积物类型及粒度参数,使用蚌式取样器对研究区的表层沉积物进行取样,取样站位共 23 个(图 2)。分别于 LNG 管线路由区的潮汐水道和秀屿码头附近布放 COMPACT EM 电磁自容式海流计和 COMPACT TD 自容式验潮仪,对研究区潮位及潮流流速进行测量(图 1)。

根据通过多波束系统获取的精确水深数据,应用 CARIS HIPS 等软件对水深数据进行处理,剔除噪声和干扰数据,进行潮位、声速校正,再通过 Surfer 等绘图软件绘制研究区三维地形图并提取地形参数。基于海底三维地形图和地层剖面图,结合实测海流数据与沉积物粒度参数数据等资料,对比 2012 年和 2013 年的数据,对研究区地貌特征及其影响因素进行研究。

3 结果与讨论

3.1 研究区地貌特征

通过对获得的多波束水深数据进行处理并成图,可以了解研究区高精度海底地形特征。从全区水深图(图 2)来看,调查区海底总体上呈现中部低、南北高的地形格局,其中中部深水区又为近岸深、中间浅的特征;中轴为潮汐水道,水道两侧发育浅滩。调查区局部发育不同地形,地形复杂多变。研究区最深处水深超过 30 m,分布在盐业码头外、蟹屿北侧及惠屿东北侧近岸区域,为不规则形状的洼陷,范围比较局限,规模也较小。杉行和盐业码头之间相对狭窄的水域水深约为 16~22 m,海底起伏不平,特别是在盐业码头和蟹屿之间,有洼陷发育。这一区域向北与浅滩相接,浅滩基本阻断水道向北的延伸,向南则有一水道与外海相连,水道两侧同样发育较大浅滩,水深最浅处小于 5 m。北部浅滩区位于肖厝-莆头村连线以北的区域,浅滩的水深小于 16 m,向北规模变大,水深变浅,但最浅处仅约 3 m。至管道路由处,浅滩之间才发育一个小型水道,水道水深超过 20 m,水道将浅滩分隔成东高西低的两部分,其中西部的

浅滩东西延伸长度几乎超过整个海湾的一半。

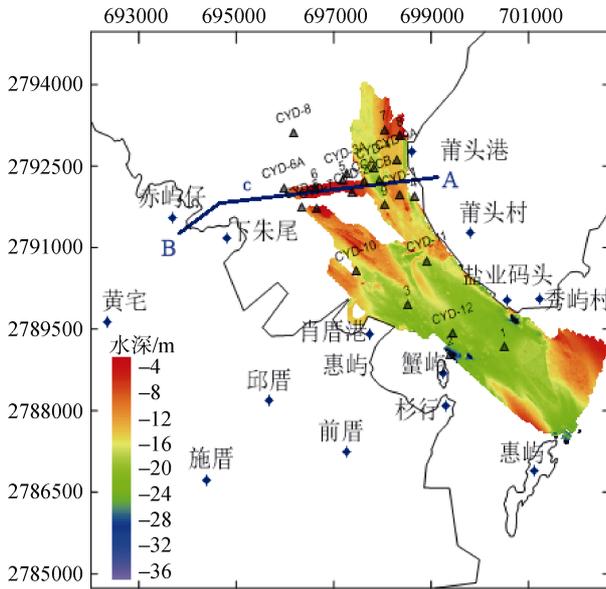


图 2 研究区水深图

Fig. 2 Bathymetric chart of study area

在现有调查区内，北部的浅滩表面凹凸不平，存在不规则分布的凹坑，凹坑并未影响整个浅滩的形态和分布，这些凹坑可能并不是水动力侵蚀自然形成，推测可能是人为挖沙造成的局部地形洼陷。调查区东侧的港口区及莆头码头外侧有多处规则的方形区域，水深明显较周边区域深，可能为港池疏浚区(图 3)。

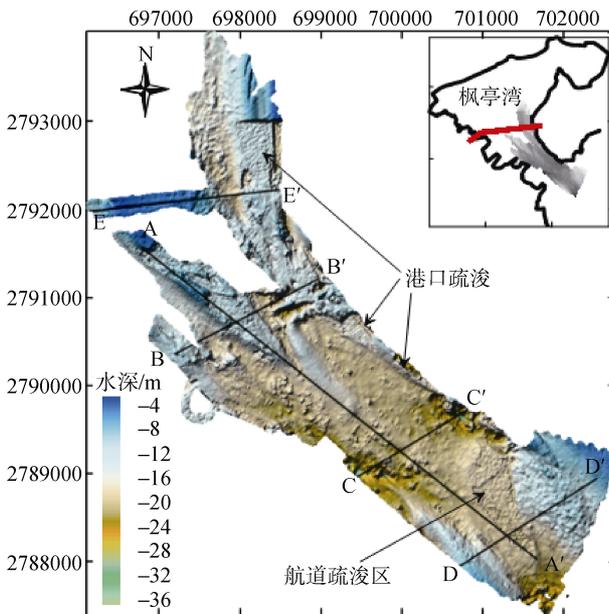


图 3 研究区三维地形图

Fig. 3 Three-dimensional topographic map of study area

为了能够对调查区海底地形有更直观的认识，对全区自北向南做了 4 个横切剖面并沿研究区中轴位置做了 1 个纵剖面(图 4)。从纵剖面 a 中可以看出，调查区南部水深较大，北部较小，地形起伏明显且底形发育，北部浅滩与南部的深水区分区明显，浅滩外缘水深急剧增大。北部剖面 b 显示了中部的浅滩和浅滩东西两侧的水道，其中东侧水道海底起伏更加强烈，有底形发育，而西侧水道海底则较平缓。另外，西南侧近岸水深要小于东岸，东北沿岸处于港口区，海底较平坦。中部剖面 c 位于研究区中部的深水区，剖面显示了该区中央高两侧低的地形变化趋势，其中东北侧地形变化较快。两侧较深的区域为秀屿及肖厝码头外侧的疏浚区。南部剖面 d 横切惠屿北部的水道，剖面显示，该水道的西南侧有侵蚀

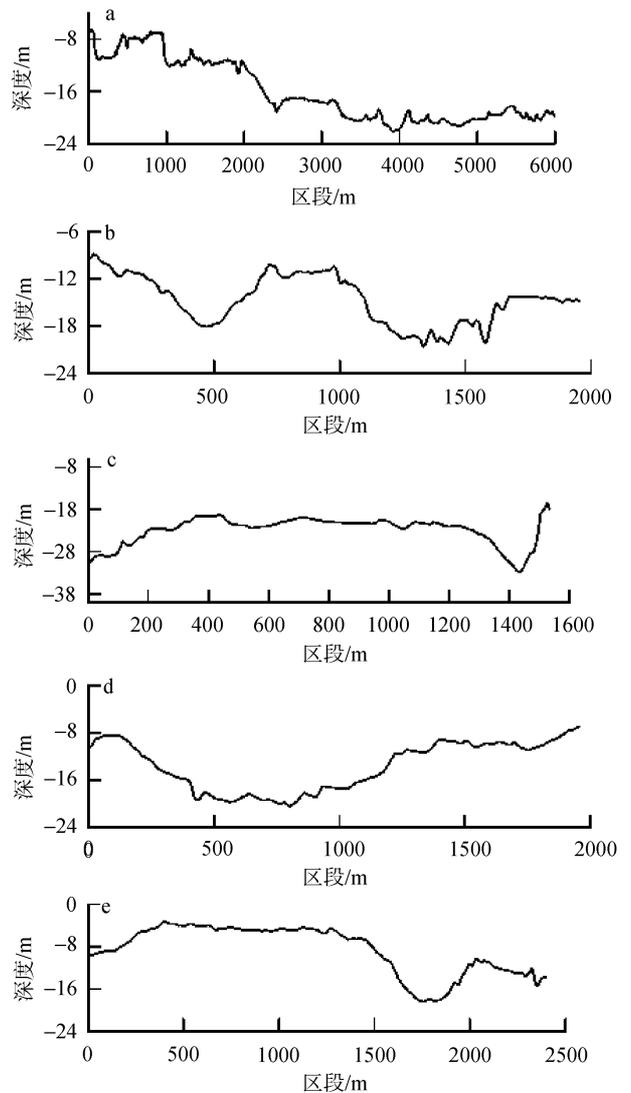


图 4 研究区海底地形剖面图

Fig. 4 Topographic profiles of study area

沟发育,水道中有底形发育,水道两侧的浅滩的水深相近,但东北侧的浅滩规模更大。北部剖面 e 显示中间和东岸发育浅滩,两侧为潮汐水道,其中东侧水道较大,宽约 500 m,水深可达 18 m。

3.2 海底沉积物的运移

潮汐和潮流是中国沿海陆架区最主要的水动力要素之一,它们对陆架区海洋环境、海岸带地貌的塑造、海底沉积物的搬运、大范围海岸的侵蚀和淤积起着重要的控制作用^[22]。为研究潮流冲刷对研究区海底地形的影响,作者在调查期间分别选取 2 个站位进行潮位测量和潮流流速测量,并对研究区表层沉积物进行取样分析,通过计算,研究潮流冲刷对沉积物搬运的影响。

3.2.1 潮汐及潮流特征

由实测的潮位变化数据(图 5)可知,调查区大、小潮潮差较大,最大可差 3.5~4 m,大潮周期约为 15 d 左右,潮汐为正规半日潮,潮波属驻波型,涨急、落急出现在中潮位附近,转流出现在高低潮位附近。大潮期涨潮潮流(图 6a)流速最大不超过 0.44 m/s,落潮流极值最大不超过 0.3 m/s,略小于涨潮流极值。潮流流速多分布在 0.1~0.3 m/s,高潮和低潮时的转潮

期流速几乎接近于 0。流向近北-西南向,涨潮流为 NNW 方向,流向主要分布于 325°~10°,落潮流为 100°~160°。小潮期涨潮流(图 6b)流速极值小于 0.35 m/s,大部分数值小于 0.3 m/s。落潮流极值最大超过 0.3 m/s,流速大都处于 0.2~0.3 m/s 范围。同样,转潮期流速均小于 0.05 m/s。流向为近南北向,涨潮流为 NNE 方向,流向主要分布于 350°~20°;落潮流为 SSE 方向,流向主要分布在 160°~180°,落潮流为 160°~180°。大潮和小潮的涨落潮流流速极值差别不大,但流向有较大变化,特别是落潮流,小潮时落潮流大部分为偏南向,而大潮时落潮流明显偏向东南。

3.2.2 沉积物特征

首先对取回实验室的采集到的样品进行预处理,之后采用筛析法和激光粒度仪相结合的方法对获得的沉积物样品进行粒度分析。分别用 1.7、1.43、1.2、1.0 mm 孔径筛进行筛分,并用天平分别称量,将小于 1.0 mm 的部分采用粒度仪测量,得出各不同粒径组分在样品中所占百分比,并计算出样品中不同粒径组分的质量。最后,把两部分合并得到完整粒度分布。沉积物分类和命名采用谢帕德沉积物粒度三角图解法。

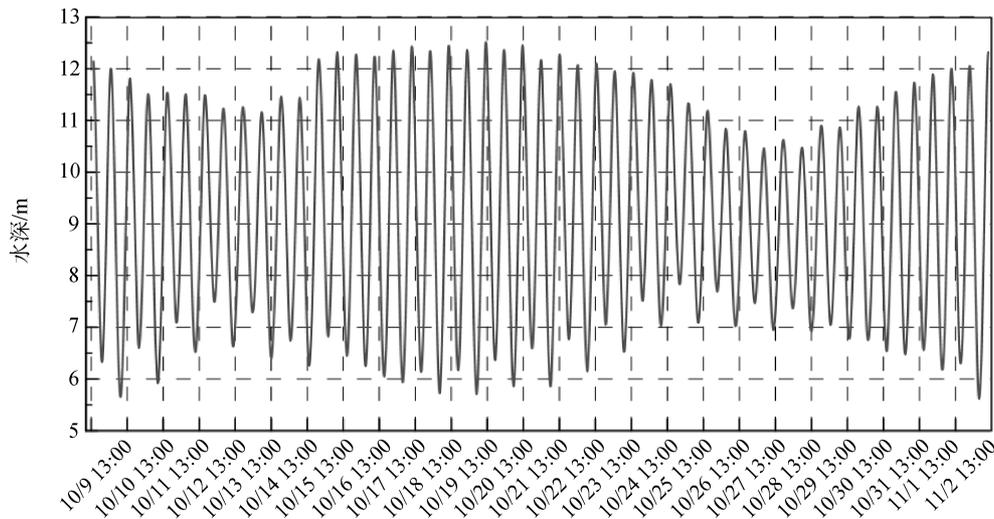


图 5 研究区水文数据

Fig. 5 Hydrologic data of study area

研究区沉积物可以分为砂、粉砂质砂、黏土质粉砂、砂质粉砂、黏土砂质粉砂 5 种。从取样站位来看,其中站位 CYD-4 的沉积物粒度最粗,中值粒径约为 1.06 mm,站位 9 的沉积物粒度最细,中值粒径约为 0.007 mm。研究区南部水深较大的区域沉积

物的主要为粉砂,同时含有较多黏土组分,砂组分较少。研究区中部深槽向浅滩过渡区域(CYD10、CYD11)沉积物组分主要为砂质沉积物,黏土含量迅速减少。浅滩上沉积物分布较为复杂,砂质沉积物和粉砂质沉积物交错分布。北部深槽内的沉积物

(CYD4、CCB)较粗,为砂质沉积物。研究区大部分采样站位的表层沉积物分选较差,组分以砂和粉砂为主,其中砂的平均含量达 43.29%,最高含量在 8 站位,含量达到 93.77%;粉砂的平均含量为 40.26%;砾石含量均很少,一般不超过 1.00%。

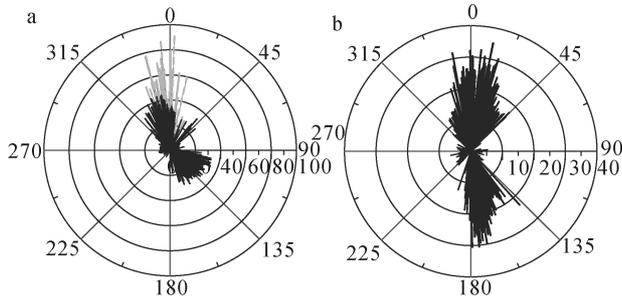


图 6 潮流流速流向分布
Fig. 6 Direction and velocity of tidal current
a. 大潮期间; b. 小潮期间
a. spring tide and b. neap tide

3.2.3 沉积物输运

对于稳定流条件,考虑了细粒泥沙的黏性作用,采用窦国仁^[23]泥沙起动流速公式

$$U_c = k' \left(\ln 11 \frac{h}{\Delta} \right) \left(\frac{d'}{d_*} \right)^{1/6} \times \sqrt{3.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}} \right)^{5/2} \frac{\varepsilon_0 + g h \delta (\delta/d)^{1/2}}{d}}$$

式中, k' 为常数,其值一般取 0.32; h 为水深; Δ 为床面粗糙高度; $d' = 0.5 \text{ mm}$, $d_* = 10 \text{ mm}$; ρ_s 和 ρ 为沙粒和水的密度; g 为重力加速度; d 为粒径,一般均指其中值粒径; γ_0 为床面泥沙干容重; γ_{0*} 为泥沙颗粒的稳定干容重; ε_0 为综合黏结力参数,其值为 $1.75 \text{ cm}^3/\text{s}^2$, δ 为薄膜水厚度参数,其值为 $2.31 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 。

假设不同水深位置地形均平整,底床粗糙度仅考虑了颗粒粗糙度,而未加入与地形和底床有关的糙度。另外,假设泥沙干容重等于泥沙稳定干容重,此时上式反映了粒径-水深-起动流速之间的关系。根据窦国仁^[24]起动流速公式,计算得到了研究区不同站位表层沉积物的起动流速,即当平均流速超过起动流速时,认为表层沉积物才能运动,如果实际流速低于起动流速值,表层沉积物将不会搬运,海底不会发生冲刷。

计算结果显示(表 1),由于研究区大部分表层沉积物中细粒沉积物占主要组分,沉积物具有较强的黏性,因此起动流速都很大,部分甚至超过 2 m/s。

调查资料显示,研究区大潮潮流流速最大仅约为 0.96 m/s(表层),由于向海底流速是减弱的,这也意味着在研究区常态水动力条件下,这些区域的海底沉积物很难被冲刷,以接受沉积物即淤积为主。部分水道及部分近岸浅滩上的沉积物为砂质组分,如站位 8、站位 CYD-1、CYD-2、CYD-10、CYD-11、CCB,沉积物含细粒组分少,黏性很小或不具有黏性,所需的起动流速也小很多,最低值仅为 0.38 m/s,站位 CYD-1 和 CYD-11 分布在调查区东部的近岸浅滩上。水道中的沉积物,如站位 CYD-4、CCB 和站位 1,同样具有较小起动流速(0.44~0.59 m/s)。管道附近站位 5、CCB、CYD1、CYD2、CYD5 的沉积物较容易搬运。

表 1 不同站位表层沉积物起动流速

Tab. 1 Incipient velocity of surface sediments at different stations

站位	中值粒径(mm)	水深(m)	起动流速(m/s)
1	0.134	21	0.45
2	0.015	22	1.75
3	0.009	22	2.50
4	0.024	14.5	1.06
5	0.031	4.5	0.62
6	0.009	3.1	1.15
7	0.01	9	1.56
8	0.595	14	0.45
9	0.007	13	2.32
CYD-1	0.401	11	0.38
CYD-2	0.669	6	0.43
CYD-3A	0.01	6	1.33
CYD-4	1.064	18	0.59
CYD-5	0.732	12	0.48
CYD-6A	0.106	11	0.42
CYD-7	0.016	5	0.94
CYD-8	0.016	4	0.88
CYD-9A	0.011	10	1.53
CYD-10	0.172	17	0.39
CYD-11	0.316	16	0.38
CYD-12	0.011	21	2.13
CCA	0.008	12	2.07
CCB	0.521	19.5	0.44

由于常态天气条件下自然潮流流速较小,对沉积物(推移质)的冲刷输运能力有限,过往船舶有可能增强海底局部的输运能力,但是这种增强是不确定的。已有的研究已经证实^[25],极端天气将导致沉积

物的强输运,极可能改变局部海底底形。2012年8月~2013年10月,共有4个台风过境研究区域,包括2012年8月3日“苏拉”、2013年7月14日“苏力”、2013年8月13日“潭美”及2013年10月7日“菲特”。从全区来讲,由于当地沉积物物源较少,本地沉积物粒度小且黏性很大,台风对较深水区域海底地形的影响并不严重,未见较大范围的冲刷现象。

总体来讲,该区沉积物多具有黏性,沉积物搬运需要很大的动力驱动,但观测表明研究区潮流较小,且已有研究表明该区域含沙量较少,物源供应不够充裕,因此,常态自然水动力作用下难以导致较大的冲刷坑发生,而一旦发生冲蚀,难以在短时间内通过自然沉积恢复^[26]。

3.3 人类活动影响

湄洲湾是中国重点建设的港口,人类活动频繁。在研究区范围内,人类活动主要包括航道疏浚、人工采砂、码头建设以及围填海工程建设等。人为因素往往会加剧自然因素的作用而对海底地形地貌产生影响。自然海底经过长期水流冲刷作用,可能已经达到动态平衡状态,而在因人为因素造成环境条件的改变后,打破了原有的平衡,就会造成新的海底冲刷,使海底地形发生改变^[4]。

湄洲湾是建设大型港口的天然港湾,在兴建大量码头的同时^[2],必须保证湾内航道的畅通,在湾内航道使用过程中不可避免地要进行航道清淤。在清淤过程中,需大范围地抽沙,这将直接引起海底地形的改变,从图中可以看出疏浚区与周围海底地形的明显差异(图3)。无序采砂是海底地形地貌发生变化的一个重大原因。湄洲湾被规划为国家级大石化基地,一大批填海造地项目陆续开展^[21],在此背后,开采海砂产业正急剧膨胀。开采海砂会对海洋环境资源造成严重影响,但由于填海造地和建筑工程的巨大海砂需求,盗采海砂屡禁不止。盗挖海砂不仅将使得浅海砂资源愈来愈少,在入海陆源物质贫乏、没有充足沙源补充的情况下,也将首先会使挖沙坑附近海底地形地貌发生明显的侵蚀作用。

3.4 海底地形变化研究与分析

作者分别于2012年和2013年两年对该研究区进行测量,通过比对典型剖面两年的水深数据来研究两年来研究区海底地形的变化情况(图7)。剖面位置与图3中的一致。通过对比可以发现,研究区地形整体上变化不大,海底冲刷不明显,其中部分疏浚

区发生轻微淤积。

图7a剖面南北斜跨全区,比对结果显示该剖面海底地形南部几乎没有变化,在西北部浅滩区有比较明显的地形改变,西北部的浅滩水深增加超过1m,研究区的自然动力无法造成如此大的地形改变,可能为人为的抽砂活动造成的。b剖面横跨调查区北部的浅滩发育区,地形起伏明显,剖面对比显示海底地形有较大的变化,特别是剖面东部浅滩位置,海底沉积物大量缺失,同时在浅滩西侧的水道里有大量沉积物增加现象,可能为港口清淤活动将浅滩上的大量沉积物堆积在潮道中所致。c剖面处于潮汐水道中央深槽区,比对结果显示海底地形未见明显变化,说明该区没有人为活动干扰,自然动力并未造

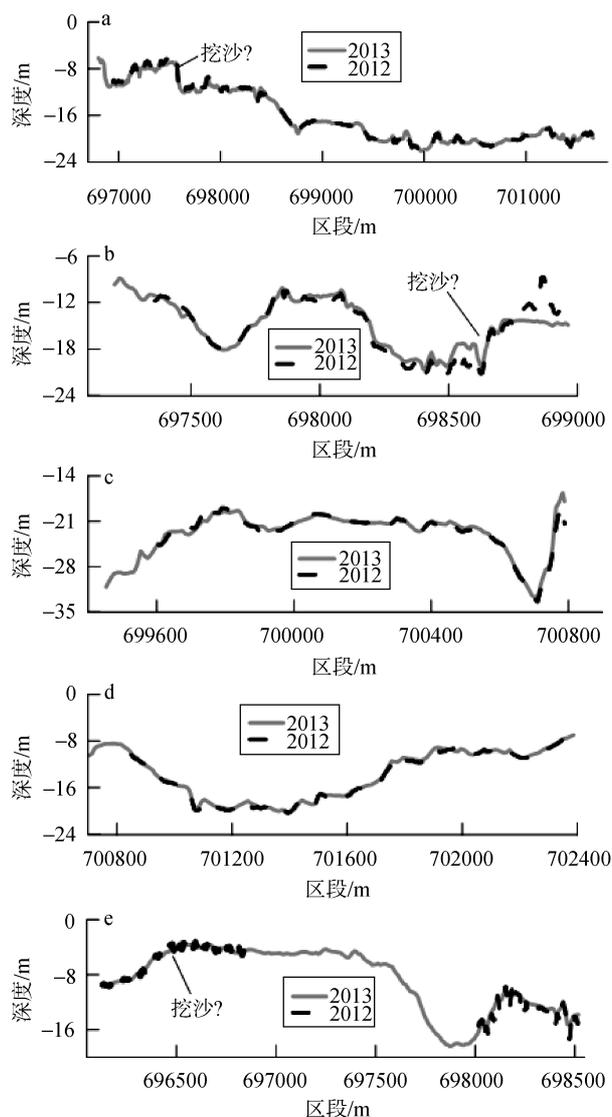


图7 2012~2013年研究区海底地形剖面图

Fig. 7 Topographic profiles of study area between 2012~2013

成海底明显冲刷或堆积。d剖面斜跨研究区南部浅滩,剖面对比结果表明,该剖面东部浅滩及水道中有部分区域水深增加,表明海底的沉积物已被搬运,两年海底高差约为1 m,可能为人为疏浚造成的。由于受渔网和养殖箱的影响,2012年未能在剖面e中部进行调查。通过对已有数据的对比,发现调查范围的东、西两侧海底均有不同程度的变化。剖面西侧的部分区段海底高程下降,2013年水深比2012年水深增加约1 m,此区段对应该区西侧的抽砂区,同时2012年剖面东侧的起伏地形中的沟槽位置在2013年已经有所恢复,说明周边沉积物补充至沟槽内,这可能是台风导致的快速沉积物冲蚀和堆积引起的,也可能是人为活动造成的海底部分滑塌所致。

4 结论

(1) 由于研究区海域沿岸凸出的半岛、岬角及海中岛屿的控制,湾内水流的动力轴线受到限制,水流被限制在半岛、岬角及岛屿端点连线之间,致使水流相对集中,涨落潮流流速较大,冲刷动力较强。受潮流的水动力作用影响,调查区海底总体上呈现中部低、南北高的地形格局,其中中部深水区又为近岸深、中间浅的特征,中轴为潮汐水道,水道两侧发育浅滩。

(2) 研究区主要沉积物类型可分为砂、粉砂质砂、黏土质粉砂、砂质粉砂、黏土砂质粉砂5种,组分以砂和粉砂为主。应用窦国仁的泥沙起动流速公式对研究区表层沉积物的起动流速进行计算,计算结果显示,由于研究区大部分表层沉积物中细粒沉积物占主要组分,沉积物具有较强的黏性,因此起动流速都很大,部分甚至超过2 m/s,但调查资料表明研究区大潮潮流流速最大仅约为0.96 m/s。这表明研究区在常态水动力条件下,海底沉积物很难被冲刷,短期内海底地形基本不会受潮流影响。

(3) 研究区在2012年~2013年海底地形整体变化不大,海底冲刷不明显,部分疏浚区发生轻微淤积,说明短期内潮流、地质构造活动等自然因素对研究区地形的影响十分有限。一些个别区域的地形起伏变化较大,据推测可能是由于人为的挖沙、港口疏浚等因素造成的,因此,人为因素是短期内造成该区域地形变化的主要诱因。

致谢: 感谢宋永东、刘贤三、郑翔等在外业调查及后期资料处理过程中给予的大力支持和帮助。

参考文献:

[1] 黄哲强. 湄洲湾海域水质氮-磷及石油类分布特点[J].

福建环境, 2001, 18(6): 20-21.

Huang Zheqiang. The distributed characteristics of Nitrogen, Phosphorus and Petroleum in sea area of Meizhou Bay[J]. Fujian Environment, 2001, 18(6): 20-21.

[2] 高东旭, 刘允召. 福建湄洲湾港口建设[J]. 水运工程, 1996, 20(10): 59-63.

Gao Dongxu, Liu Yunzhao. Meizhou Bay port construction in Fujian[J]. Port and Waterway Engineering, 1996, 20(10): 59-63.

[3] 吴剑新. 湄洲湾港的发展现状及分析[J]. 物流科技, 2013, 37(12): 124-126.

Wu Jianxin. The development and analysis of Meizhou Bay Port[J]. Logistics Sci-Tech, 2013, 37(12): 124-126.

[4] 吴承强. 福建近岸海域海底地貌研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.

Wu Chengqiang. Study on submarine morphology of Fujian offshore[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.

[5] 陈凯. 湄洲湾海域表层沉积物石油类分布特征[J]. 福建水产, 2009, 26(3): 27-29.

Chen Kai. Study on the distributed characteristics of petroleum hydrocarbon in surface sediment in Meizhou Bay[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2009, 26(3): 27-29.

[6] 王宪, 田春雨, 郑盛华. 湄洲湾表层海水石油烃的分布特征分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 241-244.

Wang Xian, Tian Chunyu, Zheng Shenghua. Research on the distributed characteristics of petroleum hydrocarbon in surface seawater of Meizhou Bay[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2008, 29(2): 241-244.

[7] 郭焯民, 李新福. 近岸滩涂石油设施溢油风险控制[J]. 科技创新导报, 2008, 5(35): 51-52.

Guo Zhuomin, Li Xinfu. The risk control of oil facilities spill in costal tidal flats[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, 5(35): 51-52.

[8] 汤军健, 温生辉, 陈彬. 事故性溢油对湄洲湾环境影响的预测[J]. 台湾海峡, 2002, 21(3): 332-339.

Tang Junjian, Wen Shenghui, Chen Bin. Environmental effect of accident oil spill in Meizhou Bay[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2002, 21(3): 332-339.

[9] Muhlbauer W. Kent pipeline risk management manual(first edition)[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1992.

[10] 朱倩. 海底管线系统的风险评估技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

Zhu Qian. A study on risk assessment techniques of the submarine pipeline system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[11] 王晶, 李志军, Goncharov V K, 等. 渤海海底管线溢

- 油污预测模型[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 10-13.
- Wang Jing, Li Zhijun, Goncharov V K, et al. A forecast model on oil pollution of leaks from seabed pipe line in the Bohai Sea[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(1): 10-13.
- [12] 柏利果. 杭州湾海底管线泄漏防控的对策探讨[J]. 安全、健康和环境, 2015, 15(1): 10-12, 26.
- Bai Ligu. Counter measure discussions in leakage prevention and control of submerged pipeline of Hangzhou Bay[J]. Safety, Healthy and Environment, 2015, 15(1): 10-12, 26.
- [13] 朱秀星. 地质灾害环境下埋地油气管线安全性研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
- Zhu Xiuxing. The safety of buried oil-gas pipeline under geological disaster[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [14] 周川, 范奉鑫, 栾振东, 等. 南海北部陆架主要地貌特征及灾害地质因素[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(1): 51-60.
- Zhou Chuan, Fan Fengxin, Luan Zhendong, et al. Geomorphology and hazardous geological factors on the continental shelf of the northern south China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(1): 51-60.
- [15] 骆智斌, 潘伟然, 张国荣. 湄洲湾秀屿港进港航道悬沙分布特征和运移趋势[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(3): 382-385.
- Luo Zhibin, Pan Weiran, Zhang Guorong. The sediment properties and transportation rules of the Xiuyu sea-route in Meizhou Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2007, 46(3): 382-385.
- [16] 潘定安, 汪思明, 沈焕庭. 湄洲湾中央深槽及白牛浅滩的成因探讨[J]. 地理学报, 1994, 49(1): 55-63.
- Pan Dingan, Wang Siming, Shen Huanting. Approach of the formation cause of the central deep channel and the Bainiu sands in Meizhou Bay[J]. Acta Geographical Sinica, 1994, 49(1): 55-63.
- [17] 刘浩, 潘伟然, 骆智斌. 湄洲湾潮流特性的数值研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28(1): 118-122.
- Liu Hao, Pan Weiran, Luo Zhibin. Numerical study on the tidal regime in Meizhou Bay[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2009, 28(1): 118-122.
- [18] 陈晓彬. 湄洲湾港定位及发展对策[J]. 水道管理, 2012, 34(12): 23-25.
- Chen Xiaobin. The positioning and development countermeasures of the Meizhou Bay port[J]. Channel Management, 2012, 34(12): 23-25.
- [19] 王维聪, 尹金永. 湄洲湾航道三期工程 30 万吨级主航道林齿礁炸清礁回填工程施工[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(2): 225-227.
- Wang Weicong, Yin Jinyong. Backfill engineering construction of 30 ton main channel teeth reef fried of the three phase of Meizhou Bay waterway engineering[J]. China Water Transport, 2014, 14(2): 225-227.
- [20] 郭晓峰, 王翠, 陈楚汉, 等. 湄洲湾峰尾围垦工程施工期间海水悬浮泥沙输移扩散的数值模拟[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(1): 125-132.
- Guo Xiaofeng, Wang Cui, Chen Chuhan, et al. Numerical simulation of the transport diffusion of suspended matter during the construction of Fengwei reclamation project at Meizhou Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(1): 125-132.
- [21] 赵宗泽, 刘荣杰, 马毅, 等. 近 30 年来湄洲湾海岸线变迁遥感监测与分析[J]. 海岸工程, 2013, 32(1): 19-27.
- Zhao Zongze, Liu Rongjie, Ma Yi, et al. Remote sensing monitoring and analysis of coastline changes in the Meizhou Bay since the last 30 years[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(1): 19-27.
- [22] 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 coastal waters of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- [23] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999, 43(6): 1-9.
- Dou Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999, 43(6): 1-9.
- [24] Leo C van Rijn. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas[M]. Amsterdam: Aqua Publication, 1993.
- [25] 董志华, 曹立华, 薛荣俊. 台风对北部湾南部海底地形地貌及海底管线的影响[J]. 海洋技术, 2004, 23(2): 24-28.
- Dong Zhihua, Cao Lihua, Xue Rongjun. The influence on topography and relief in South Gulf Beibu Bay and suspending of pipe caused by typhoon[J]. Ocean Technology, 2004, 23(2): 24-28.
- [26] 常瑞芳, 崔青, 欧素英. 黄河口水下三角洲海底冲蚀沟发育的动力机制探讨[J]. 海洋学报, 1999, 21(3): 90-97.
- Chang Ruifang, Cui Qing, O Suying. Study of dynamic mechanism for the formation and growth of gully landform on the subaqueous delta near old Huanghe River mouth [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 21(3): 90-97.

Topographical and geomorphological features of seafloor in northern Meizhou Gulf

GONG Shi-qi^{1, 2}, YAN Jun¹, MA Xiao-chuan¹, LUAN Zhen-dong¹, CHEN Chang-an¹

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jan. 9, 2015

Key words: Meizhou Gulf; seafloor topography; topographic change; influence factors

Abstract: In this study, we primarily study the features and influencing factors of the seafloor geomorphology in the northern Meizhou Bay using a multibeam system and the characteristics of the sediments and tidal currents. The relief in the middle of the study area is low and high in the northern and southern sections, respectively. The deep area in the middle of the study area features a deep nearshore zone and shallow center, and there is a tidal channel, where shallows occur on both sides of the axis. The sediments mainly comprise sand and silt. The surface sediments are viscous because they are mainly fine-grained and the tidal current velocity is slow. Therefore, the seafloor sediments are barely eroded under normal hydrodynamic conditions, and the topography of seabed is nearly never influenced by tidal currents. Comparing the 2012 and 2013 survey results, it was discovered that the seafloor topography did not totally change; however, some individual areas experienced obvious changes. This infers that the changes in relief were due to offshore dredging and port dredging. Therefore, the key factor influencing the seafloor geomorphology in short term is human activity.

(本文编辑: 谭雪静)