

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.01.008

北部湾东南海域海底沙波发育分布特征及控制因素

郭立^{1,2}, 马小川¹, 阎军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, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:北部湾东南海域海底发育大量沙波, 利用最新获得的多波束测深、沉积物和水动力数据对沙波形态和分布特征进行综合分析, 探讨沉积物特征、水动力条件、海平面变化等不同控制因素对海底沙波发育及分布的影响。结果表明研究区沙波广泛分布于沙脊顶部、沙脊槽中线附近及沙脊槽北端, 沙波呈现远岸区尺度较小、对称性较好, 近岸区尺度较大、多不对称的分布特征。海底沙波的发育和分布受现代潮流作用和沉积物特征的共同控制。潮流通道及流速的分布情况与沙波形态、规模的差异性分布一致。表层沉积物具有“远岸细、近岸粗”的特点, 与沙波远岸尺度小、近岸尺度大的分布规律有较好的对应关系。此外, 研究区出现有近对称形态的沙波, 可能为海平面变化期间多期潮流共同作用形成的残余沙波。

关键词:海底沙波; 分布特征; 控制因素; 北部湾

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)01-0067-10

海底沙波是波脊走向与余流方向近乎垂直的一种海底地貌形态, 是对可供沉积物和水动力相互作用的响应^[1], 普遍存在于潮控陆架海洋环境中。由于海底沙波不是静止不动的, 其垂向生长或横向迁移将对海底工程设施、海岸环境、航道安全等造成潜在威胁。虽然沙波的形态受控于水动力条件和沉积物粒度的组成, 但其本身的形态又对沙波的活动与否、迁移方向和迁移速度快慢具有指示意义^[2]。因此, 对海底沙波的形态特征及活动性的研究一直受到各国研究者的重视。

Allen 通过对法国岸外沙波形态的统计, 总结了沙波波高、波长和水深之间的相互关系^[3]。Flemming 通过对全球不同区域的大量沙波(1 491 个)进行统计, 发现波高与波长存在幂函数关系, 即 $y = 0.0677x^{0.8098}$ ^[4], 被认为是沙波参数关系的全球平均趋势, 并得到广泛认可。Van Landeghem 统计并分析了爱尔兰海海底的 1 064 个沙波, 并将不同环境中的沙波进行对比, 发现波高与波长的关系与 Flemming 得出的全球平均趋势极为吻合^[1]。近几十年来, 许多学者利用理论模型和数值计算模拟的方法来预测沙波活动性, 取得了较大进展。但由于海底影响因素较复杂, 线性稳定分析^[5,6]、弱非线性分析^[7]以及相对简化的模型^[8]均具有局限性。21 世纪初, 空间互相关技术的应用^[9,10]成功重现了海

底沙波二维迁移向量, 较为全面和可靠, 能更好地了解海底沙波的迁移规律。

在现今水动力条件下, 水流方向的稳定性和供沙量的多少控制了形成沙波的类型^[11]。而海底沙波的形态特征受到沉积物供给、原有地貌和水动力条件的共同控制^[12]。虽然海底沙波形态具有重现性, 但现代潮流流场和海底沉积物分布的非均匀性也导致其在形态和空间分布上具有区域差异性^[13]。另外, 海平面的变化会对沉积物输运产生严重的影响, 因为水深及潮流系统发生变化将使海底部产生复杂特征^[14]。

近年来, 随着电子科学、声学 and 定位技术的进步, 多波束测深、旁扫声纳和浅地层剖面等手段对海底沙波的研究十分普遍^[15]。许多研究者基于实测数据已对我国不同海域的海底沙波进行了研究, 取得了一定进展。但我国对海底沙波的研究相对国外起步较晚, 对海底沙波的研究仍十分有限, 目前的研究多集中在对沙波成因、特征及现今稳定性的讨论上^[2]。已有数据表明, 北部湾东南海域分布大量不同形态特征沙波^[16]。但由于野外观测成本较大, 目前获得的数据尚不全面, 对该区海底沙波分布特征及演化规律认识有限, 对不同控制因素的具体作用认识也较模糊。另外, 对海平面变迁过程中残余沙波的演化规律目前研究较少。本研究基于 20 km×20 km 最新全覆盖多波束测深、水动力条件及沉积物参数等实测数据对北部湾东南海域海底沙波形态和分布特征进行综合分析, 探讨沉积物特征、水动力条件、海平面变化等不同控制因素对海底沙波

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41406061)

作者简介:郭立(1990—), 女, 硕士生, 从事海洋沉积动力学研究, E-mail: guoli1990@163.com

收稿日期: 2016-03-22; **改回日期:** 2016-07-15. 蔡秋蓉编辑

发育及分布的影响,并揭示该区末次盛冰期以来海进过程带来的海平面变化对海底沙波多样性的影响。

1 研究区概况

研究区位于北部湾东南部(图 1)。北部湾是一个在末次盛冰期之后形成的半封闭年轻海湾,三面受陆地包围,大部分水深为 20~60 m,最大水深可达 100 m^[17]。末次盛冰期相对海平面在现今海平面之下 100 m 以上。当时,北部湾大部分暴露海平面之上遭受侵蚀并接受陆源沉积^[18]。之后,海平面上升,约在 11.5 kaBP 时形成了接近现代环境的狭长半封闭海湾。末次盛冰期以来北部湾最老的海洋沉积物是在 12~11.5 kaBP 形成的,这与已有钻孔数据符合^[19]。水文资料调查结果显示,北部湾主要分潮为全日潮性质。受热带季风控制,每年 10 月到次年 3 月盛行 NE 向风,5 月到 8 月盛行 S—SSW 向风,4 月和 9 月转换风向。夏季常受台风影响,而冬季则常有寒潮影响。潮流主要为往复流,流向与东方附近岸线基本平行,内陆架浅水区大潮潮流流速可达近 1 m/s,涨潮流偏北向,落潮流偏南向,近岸落潮流常大于涨潮流。研究区表层沉积物主要来自河流输入、海流运输和近岸侵蚀^[20],物源充裕,主要为细粒沉积和分选较好的砂质沉积物构成,这些沉积物在水动力作用下形成了不同形态的海底地貌。

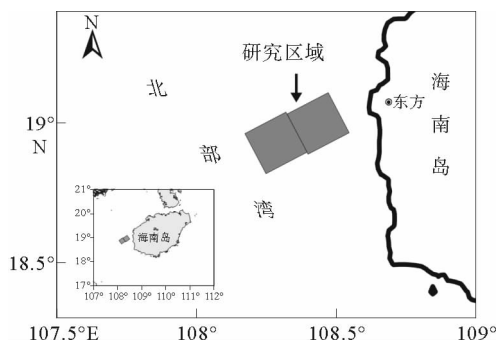


图 1 研究区位置图(北部湾东南海域海南岛东方岸外)

Fig. 1 Location of the study area

(in the southeast of Beibu Gulf near Dongfang city)

2 数据采集与处理

通过 SeaBat8101 多波束水深测量系统获得了研究区全覆盖高精度水深数据。SeaBat8101 多波

束水深测量系统,工作频率 240 kHz,波束角 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$,同时发射 101 个波束,最大测量深度达 300 m,测量精度为 5 cm。定位利用 GBX2PRO 信标和 DGPS 导航测量系统,差分定位精度小于 ± 1 m,输出频率为 5 Hz。潮位校正使用国家海洋局东方海洋站的水位观测数据和东方 1-1 平台水位实测水深数据,且全部校正到榆林基准面。多波束原始数据利用 CARIS HIPS 软件处理,数据由 Surfer 软件成图,数字化后测量新月形沙丘的几何参数。

沉积物采用蚌式取样器获得,对获得的沉积物进行粒度分析。小于 $710 \mu\text{m}$ 的部分用激光粒度仪测量。取适量样品首先进行预处理。先后加入过量的 30% 的 H_2O_2 和 0.25 mol/L 的 HCl 溶液去除有机质和碳酸盐(至不起气泡为止),然后将样品进行反复离心、洗盐至溶液呈中性为止。处理好的样品经超声波充分分散后用法国产 Cilas940L 激光粒度仪(测量范围 $0.3 \sim 2000 \mu\text{m}$,重复测量相对误差小于 2%)测量。大于 $710 \mu\text{m}$ 的部分用传统筛析法。然后将两部分合并得到完整的粒度分布,并用矩法计算平均粒径、分选系数、偏态等粒度参数。

为了对整个海区海流作了解,在 2009、2010 年度航次调查期间利用船载 ADCP 进行了连续走航式海流剖面测量。经室内初步处理,消除船速等干扰,获得了调查期间流场分布数据。并分别对底层(离海底 1.2 m 范围内)、近底层(离海底 8 m 范围内)和中层(离海底约 12~20 m)水体进行了流速和流向统计,以便于了解不同深度处的流速、流向分布情况。

3 结果与讨论

3.1 沙波分布特征

实测数据表明,研究区沙波广泛分布于沙脊顶部、沙脊槽中线附近及沙脊槽北端,形态和规模具有空间差异性。通过全覆盖高精度多波束水深测量,获得了研究区的海底底形信息,并用 Surfer 软件成图(图 2)。从图 2 可以看出,研究区的沙波存在一定规律:沙脊顶部一般发育规模较大的沙波,翼部沙波规模大小不等,根部则发育倾向相反的新月形沙丘;沙脊槽发育的沙波,从南向北依次为向北倾斜的新月形沙丘、对称的直线型沙波、向南倾斜的三维沙波。

沙脊 II、IV 顶部北端发育大量大型沙波,这些沙波均具有“槽缓脊尖”的特点,在潮流的作用下,其沙

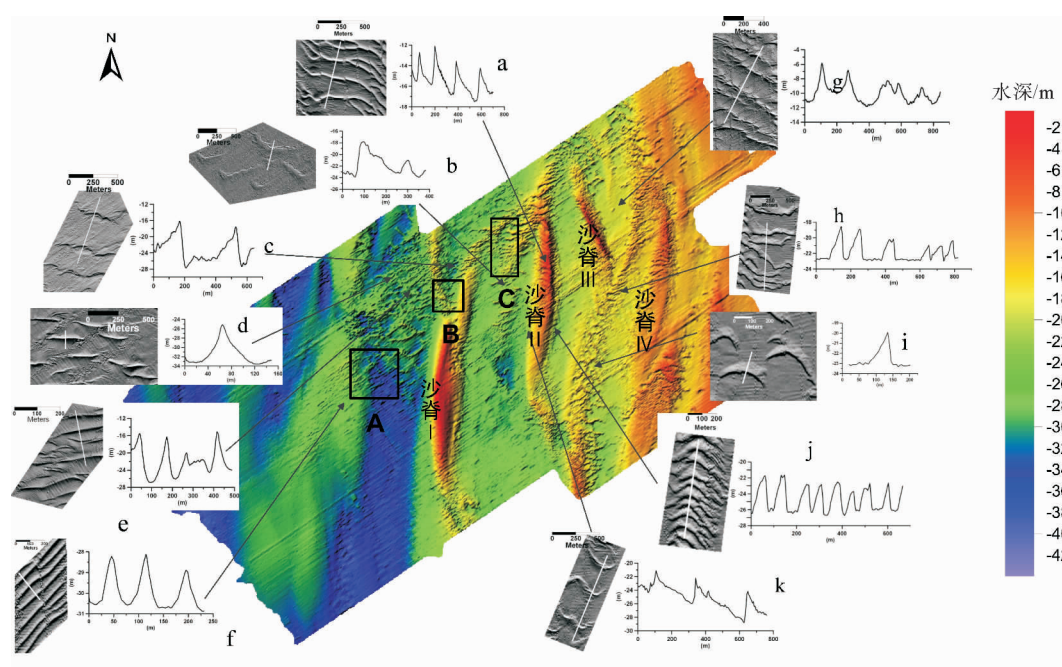


图 2 北部湾东南部东方岸外海底底形及典型沙波形态

Fig. 2 Submarine bedforms and morphology of typical sediment waves in the southeast of Beibu Gulf near Dongfang City

波对称性稍有差异。沙脊 II 顶部发育略向北倾的沙波,沙脊 IV 顶部发育稍向南或东南倾的沙波,其间的开阔区域则发育向南倾的新月形沙丘。

从上图可以明显看出沙脊 I、II 之间的槽内南部较平坦,几乎没有较大的沙波,中部发育过渡性的直线形沙波,到北部则发育大量规模较大的新月型沙丘。沙波的形态受水动力条件的强烈影响也有所差异,沙脊西侧槽的北端,沙脊的限制作用削弱了北向涨潮流,松散的砂质沉积物被搬运至此,聚集形成砂体。而南向落潮流则相对变强,沙波改变了倾斜方向,由北倾变为南倾,两侧有限的砂质沉积限制了线形沙波的发育,从而形成了新月形沙丘。

在沙脊 III 和 IV 之间的沙脊槽内也发现了类似特征的砂体,它的东西两侧发育了倾向相反的沙波,在砂体的东侧向 NNE 方向倾斜,而由于沙脊 III 的阻挡,在砂体的西侧发育 SSE 倾向的沙波。这很可能是受沙脊两端和沙脊主体的限制及科氏力的影响,涨潮流在沙脊槽内偏向东,落潮流则偏向西,这种动力过程造就了沙脊两侧倾向相反的沙波,同时在槽内也会形成了倾向相反的沙波。

3.2 现代水动力条件

全新世以来,潮流成为改造陆架沉积物和地貌的主要营力^[21]。沙波是定向往复流作用下的产物,

是潮流动力对海底沙砾物质作用的结果^[22]。沙波的形成需要一定的流速。流速过大,侵蚀作用显著,沉积物难以沉积;流速过小,搬运力不足,只能形成较小的沙纹。研究表明,沙波的流速要求一般为 40~100 cm/s,在此范围内,较高的流速条件下常发育新月形沙波,反之则发育形态规则的直线型沙波^[2,23]。因此,我们利用研究区的实测海流对沙波分布的位置和形态进行了分析。

图 3 为水体底层、近底层和中层的流速、流向统计图。从统计图上可见,各层流场存在差异,底层、近底层的流向多为北偏东方向和南偏西方向,流速多分布在 10~60 cm/s 之间,而中层流向则多为 E 和 W 方向,流速多在 20~80 cm/s 之间,大于底层流速。

另外,对 ADCP 获得的不同时期的流速剖面进行了分析,发现涨潮和落潮期在研究区有不同的流速分布和不同的潮流通带。这个区别是造成研究区地貌差异的主要因素。同时,地形的差异对流速分布具有显著影响。以沙脊 I 和沙脊 II 为例,在两侧沙脊的限制作用下,在研究区沙脊 I 和沙脊 II 西侧槽中存在涨潮优势流,而在靠近沙脊 II 东部的槽中为落潮优势流。特别是规模较大的沙脊 I,其东西两侧水深发生了巨大变化,水动力条件有明显差异。潮流通道及流速的分布情况与沙波形态、规模的差异性分布一致。

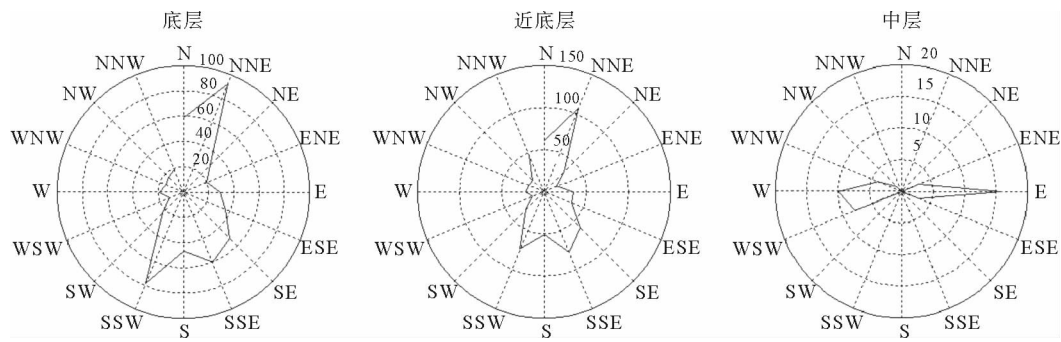


图3 底层、近底层、中层流速流向频率统计图

Fig. 3 Direction frequencies of bottom, subbottom and middle flows

结果表明,落潮阶段,潮流通带主要分布在离岸较远的深水区以及沙脊Ⅱ、Ⅳ之间的开阔区域(如图4所示)。高流速值主要出现在沙脊槽内,顶部一般流速相对较小,且在沙脊槽内西侧流速大于东侧,表明潮流能量在两个沙脊之间向西偏移。涨潮时,潮流通带则以离岸较远的深水区 and 沙脊Ⅰ、Ⅱ之间的沙脊槽为主(图5)。流速分别由沙脊槽两侧的翼部

向外辐散,逐渐增大,在沙脊Ⅰ的北端和沙脊Ⅱ的中部的脊顶出现高值。而在沙脊Ⅱ的东侧槽内的流速则较小。所以此时沙脊顶部流速高于槽内流速,沙脊槽内流速的分布为中间流速小,两侧流速较大。沙脊Ⅰ、Ⅱ之间的沙脊槽中西侧槽内出现低流速区域,均小于两侧的流速,可能是沙脊Ⅰ的阻挡使得流速突然下降。

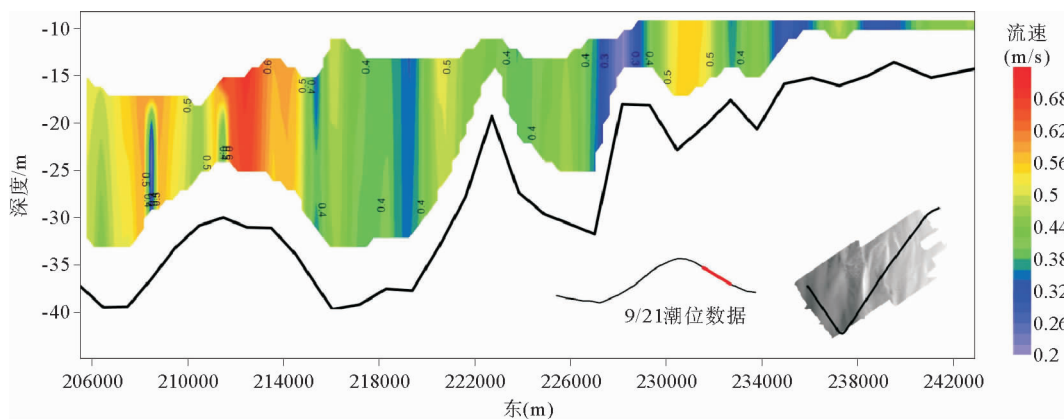
图4 落潮中期流速剖面^[24]

Fig. 4 Velocity profile of ebb tide

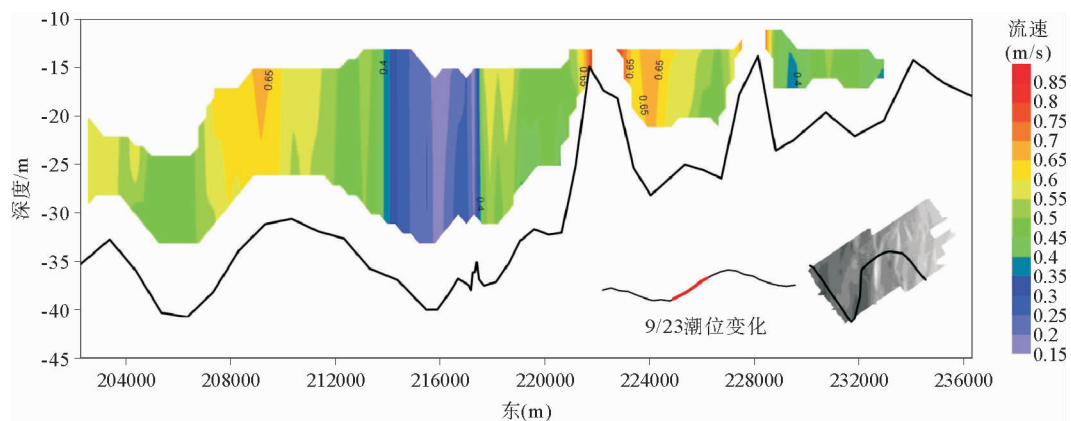
图5 涨潮初期和中期流速剖面^[24]

Fig. 5 Velocity profile of high tide

3.3 沉积物特征及其与沙波分布的关系

沙波形成和发育的物质基础来源于陆架沉积物,包括沉积物供给量多少和沉积物粒度两个参数。输沙率丰富的海区是沙波形成的基础^[25,26]。输沙量丰富的陆架区,沙波的高度和规模大,且易形成不对称沙丘^[3],而当沉积物供应有限时,极易形成新月形沙丘。沉积物粒度对沙波形成也有显著影响,粗颗粒的沉积物通常形成较大规模的沙波^[1]。这两个结论在研究区都得到了验证。

通过 2009、2010 年两个调查航次,共取得 32 个站位的 29 个表层沉积物样品,进行室内处理和分析。结果表明,研究区大部分沉积物为砂质的粗颗粒沉积物(砂质沉积物),且粒度分异明显,主要分布在沙波或沙脊之上。部分沉积物为粉砂质或黏土质的细粒沉积物,如 A1+、A1、A3、B1、B+ 站位(图 6 中所示),分选性较差,多分布在沙脊槽内或远岸区。例外的是,沙脊 I 基部南端 A4 站位的沉积物平均粒径较大(1.635 mm),大于周围沉积物的粒度,接近于近岸区站位 B4(1.563 mm)、B5(1.963 mm)、B++(2.104 mm)样品沉积物的粒度。虽然其样品组分有细微差别,考虑到水深和水动力的差异,这种差异是可以理解的。而 A4 站位与周围沉积物相差悬殊的粗粒沉积物特征,反映了残留沉积物的特

性,也表明沙脊 I 可能是残余地貌改造形成的。

沉积物的粒径与水动力成正相关,粗颗粒的沉积物起动速率较大,因而容易沉积下来。相对于粗粒沉积物,细粒沉积物更容易被搬运到离岸较远的区域。A2、12、B4 3 个站位均位于沙脊槽的北端沙波发育区,且其周围动力条件相似,因此选择 A2-12-B4 剖面探讨向岸方向沉积物粒径变化规律。从图 7 中可以看出,由站位 A2 到 B4,离岸越来越近,沉积物颗粒的平均粒径呈增大趋势,粗颗粒组分含量逐渐增多,细颗粒组分逐渐减少,由于 3 个站位受近南北向的盛行水动力作用,3 个站位显著的粒度特征表明了其物源的差异,也能反映离岸由远及近,沉积物粒度由细变粗的特征,而这一特征与东西向水动力作用关系不大。

多波束资料显示,研究区近岸和远岸沙波具有明显的空间差异性。如图 4 所示,在研究区按离岸距离由远及近选取 D、E、F 3 个沙波发育区,分析沙波的形态特征。从图 2、4 可以看出,水深较深处发育的沙波大多对称性较好,而近岸处沙波多呈现不对称性。与由 D 到 F 沉积物量由少到多的分布规律一致。取 D、E、F 3 区的沙波剖面分析,提取波高、波长、深度、沉积物粒度等参数(表 1),描述沙波形态特征。

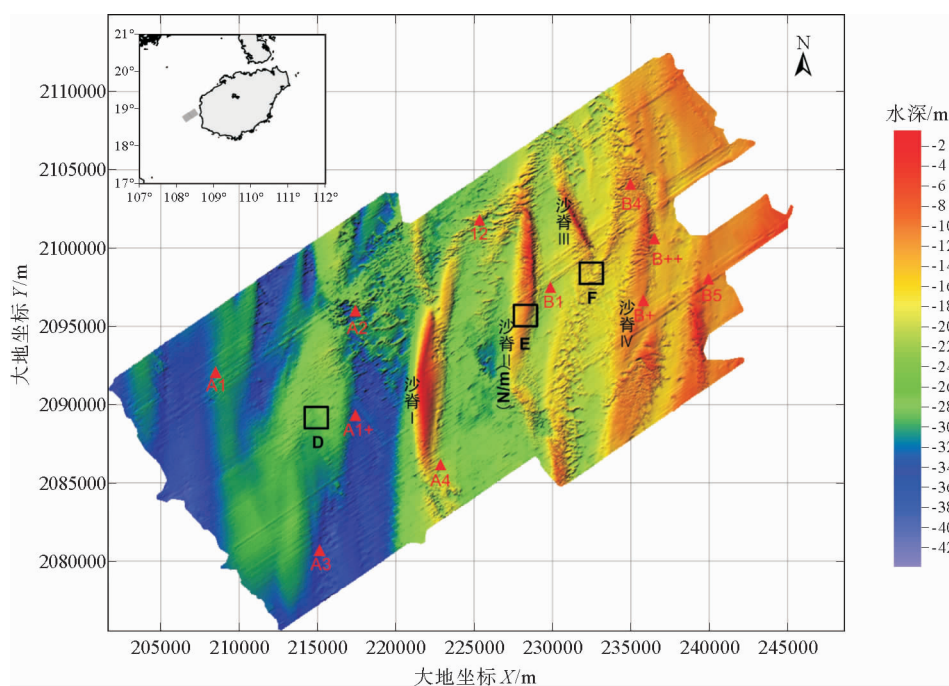


图 6 沉积物取样站位分布图

Fig. 6 Sampling locations map

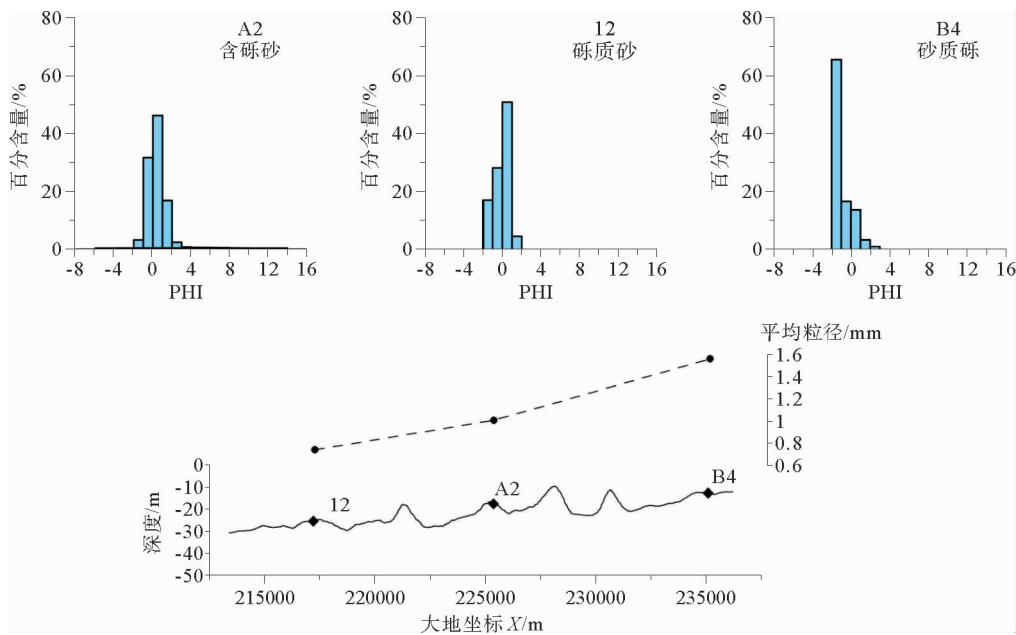


图 7 A2、12、B4 3 个站位表层沉积物由海向岸粒度特征
Fig. 7 Shoreward grain size distribution of the surface sediment at site A2、12、B4

表 1 D、E、F 区沙波和沉积物基本参数
Table 1 The basic parameters of sand waves and sediments in district D、E、F

区域	D	E	F
平均波高/m	1.8	2.63	3.79
平均波长/m	54	80.27	112.9
平均水深/m	31	19	17
平均粒径/mm	0.2	0.511	0.693

由表 1 可以看出,离岸越近,表层沉积物粒度越大,且沙波的规模也较大。离岸较近的沙波波高和波长都较大,平均波高 3.6 m,平均波长 100 m,多呈现三维形态。而离岸较远的沙波规模小于近岸区,前者的波高和波长约是后者的 1/2,远岸区沙波平均波高为 1.4 m,波长为 55.6 m,多呈二维形态。这种差异与不同的水深、水动力条件以及沉积物特征有关。远岸区受波浪的影响较小,潮流占主导作用,细粒沉积物更易发育对称性二维沙波。而近岸区则发育大型不对称性三维沙波,与近岸浪流联合的水动力条件和粗颗粒的沉积物特征相适应。同时,从基于对数尺度做出的图(图 8)可以看出,D、E、F 3 个区域的沙波波高和波长的关系,符合 Flemming 提出的幂函数关系,但波高值略偏大,表明这 3 个区域的沙波可能是在现代环境条件下形成的活动沙波^[27]。

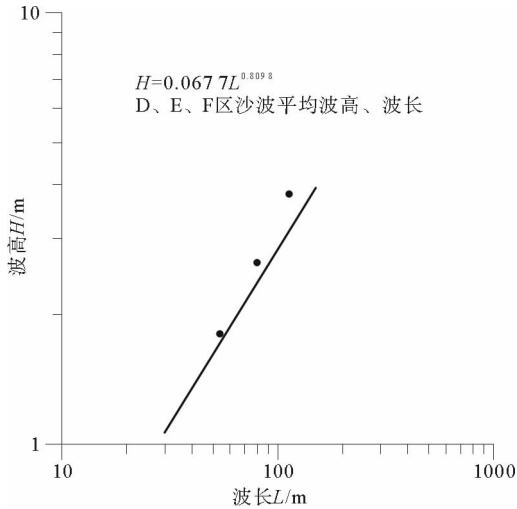


图 8 D、E、F 区域沙波波高与波长关系
Fig. 8 Relation between wave height and length in district D、E、F

3.4 极端天气对海底沙波形态和分布特征的影响

海洋环境变幻莫测,台风等极端天气对海底地形塑造起着十分关键的作用。很多学者强调了极端天气对沉积物运输和沙波迁移的重要性^[13,28]。马小川通过对台风“康森”和“凯萨娜”过境的水动力、多波束及沉积物等数据的分析,认为台风虽然能够导致短期高强度沉积物运输,甚至改变沙波的形态,但其难以在长时间尺度改变沙波的发育规律,起主要作用的仍为正常状态下的潮流条件^[24]。董志华则通过对 2003 年该区 5 次台风过境的声纳和多波

束数据进行理论计算和现实资料对比,认为海南东方岸外沙波沙脊发育区是在台风引起的强底流和潮流作用下共同形成的。台风引起的强底流作用能造成沙波的迅速迁移,而潮流则主要起修复台风造成的沙波形态的改变及维持沙波的形态的作用^[29]。台风引起的强水动力条件的改变,可以在短时间内造成海底底形的巨大改变,这在实测资料上可以得到验证。台风等极端天气引起的强对流过程在短时间内能改变海底沙波的形态,但是无法改变海底沙波在研究区的分布规律,常态下海底沙波的发育和演变仍主要受潮流作用的控制。研究区的潮流作用将修复台风等导致的沙波形态特征的瞬间变化。

3.5 海平面变化对海底沙波多样性的贡献

研究区除了常见的剖面不对称的沙波,还发现有近对称形态的沙波,主要分布在沙脊以西、沙脊北部以及沙脊之间的区域,如图 2 中 A、B、C 区域。这些沙波大多具有脊尖槽缓的特征,从形态上难以分辨迎流面和背流面(如图 2 的 d, e, g)。浅地层剖面显示,该类沙波内部结构存在反转。如图 9 为 C 区沙波的内部结构,红色和蓝色斜线分别代表倾向相反的层理,从图中可以看出,向南东方向倾斜的层理覆盖于北西向倾斜的层理之上,表明该区域的

沉积物运输方向发生了改变。研究发现,该区域近对称形态的沙波波高与波长的关系明显偏离这一规律^[28]。同时,现代沙波波高最大可达 0.25 倍水深^[1],这些区域波高波长的关系仍大于这一极限值,与现代成因的沙波波高特征不一致^[28],表明该区域的沙波可能为残余沙波。

末次盛冰期后,海平面快速上升,使得北部湾海域相对高度从-100 多米变化到现今的高度^[30],海岸线发生了巨大的变迁。海平面上升过程中有若干次停顿,留下几条古岸线遗迹。根据前人重建的海岸线迁移数据,作出不同时期的古海岸线图,如图 10 所示。全新世海侵时期,海平面快速上升,岸线后退,使得北部湾大部分区域被淹没,约在 11.5 kaBP 时形成了接近现代环境的狭长半封闭海湾^[19]。全新世后期,海平面继续上升,通过前人的沉积物、海洋水文以及古生物地理资料等推算,至约 8.5 kaBP 时,琼州海峡完全打开,现今的海陆格局基本形成^[31]。之后经过几次上升和回落,达到现在的海平面高度^[32]。海平面的变化带来动力环境和沉积物运输条件的改变,原有的底形相应发生变化^[33]。潮流和潮汐活动受海平面的波动而发生变化。尤其是琼州海峡的贯通,改变了原来相对平衡的海洋动力环境,余流方向发生反转,引起沙波内部结构的改变。同时,模拟研究表明,海底地形及岸线

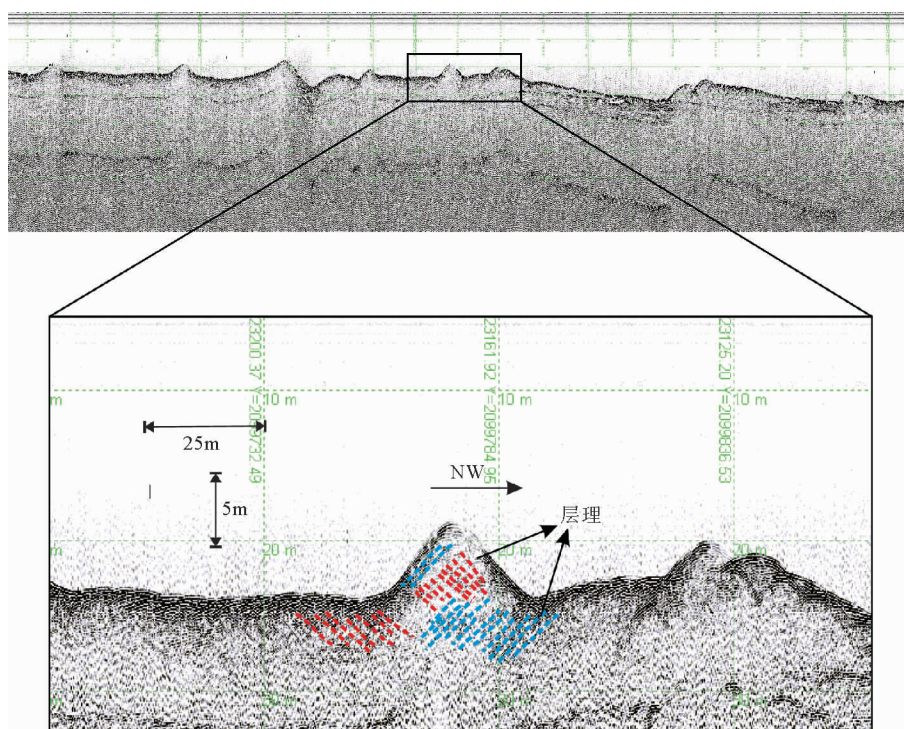


图 9 C 区近对称沙波内部结构的浅地层剖面图

Fig. 9 The shallow seismic profile for internal structure of symmetrical sand waves near district C

轮廓在沙脊形成过程中起到重要的约束作用,海平面上升会导致岸线边界及水深发生变化,导致潮波系统改变^[34],从而也会造成沙波结构的改变。

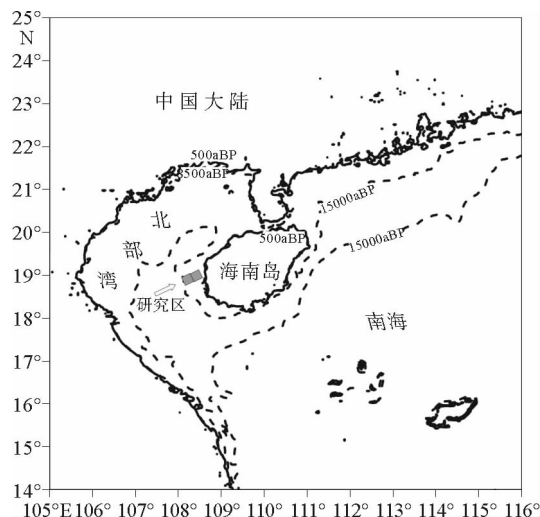


图 10 北部湾古海岸线变迁图(改编自文献[27])

Fig. 10 The paleocoastline map of Beibu Gulf
(adapted from [27])

4 结论

(1)北部湾东南海域海底发育大量沙波,主要发育于沙脊上、沙脊槽内以及沙脊两侧。沙波的规模和形态具有显著空间差异,是水动力条件、沉积物类型、沉积物供应多寡、海平面变化等多种因素共同作用下的结果。

(2)研究区近底层的流向多为北偏东或南偏西方向,流速多分布在 10~60 cm/s。研究区流速受沙脊影响较大,沙脊的阻挡限制了流速,流速又反过来影响了沙脊的演化。潮流通道的分布情况与沙波形态、规模的差异性分布一致。

(3)研究区沉积物特征与海底地貌分布具有一致性,存在“远岸细近岸粗”的特点。同时沉积物的供应差异也导致波形分布存在差异性,即远岸尺度小、沙波对称性好,近岸尺度大、多呈现不对称性的分布特征。

(4)研究区部分区域出现有近对称形态的沙波,浅地层剖面显示该类沙波内部结构存在反转,且其几何参数特征有别于现代成因的沙波,认为该类沙波可能为受海平面上升期间多期潮流共同作用的结果。

参考文献 (References)

- [1] Landeghem K J J V, Wheeler A J, Mitchell N C, et al. Variations in sediment wave dimensions across the tidally dominated Irish sea, NW Europe [J]. *Marine Geology*, 2009, 263(1-4): 108-119.
- [2] 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 Sangyun, LIU Zhenxia, et al. Research on the activity of submarine sand waves off Dongfang, Hainan Island[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 2001, 19(1): 17-24.]
- [3] Allen J R L. Simple models for the shape and symmetry of tidal sand waves: (2) Dynamically stable symmetrical equilibrium forms[J]. *Marine Geology*, 1982, 48(82): 51-73.
- [4] Flemming B. Zur klassifikation subaquatischer, strömungs- transversaler Transportkörper[J]. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 1988, 29(93-97): 44-47.
- [5] Huthnance J M. On one mechanism forming linear sand banks [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1982, 14(1): 79-99.
- [6] Hulscher S J, de Swart H E, de Vriend H J. The generation of offshore tidal sand banks and sand waves [J]. *Continental Shelf Research*, 1993, 13(11): 1183-1204.
- [7] Komarova N L, Newell A C. Nonlinear dynamics of sand banks and sand waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 415(5): 285-321.
- [8] Németh A A, Hulscher S J, de Vriend H J. Modelling sand wave migration in shallow shelf seas [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(18): 2795-2806.
- [9] Duffy G P, Hughes-Clarke J E. Application of spatial cross correlation to detection of migration of submarine sand dunes [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003-2012), 2005, 110(F4): 1-11.
- [10] Buijsman M C, Ridderinkhof H. Long-term evolution of sandwaves in the Marsdiep inlet. I: High-resolution observations [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(9): 1190-1201.
- [11] Jim B, Ray K. An experimental study of turbulent flow over a low-angle dune [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2002, 107(C9): 18-1-18-19.
- [12] Whitmeyer S J, Fitzgerald D M. Episodic dynamics of a sand wave field [J]. *Marine Geology*, 2008, 252(1): 24-37.
- [13] 高抒, 方国洪, 于克俊, 等. 沉积物输运对砂质海底稳定性影响的评估方法及应用实例[J]. *海洋科学集刊*, 2001(43): 25-37. [GAO Shu, FANG Guohong, YU Kejun, et al. Methodology for evaluating the stability of sandy seabed controlled by sediment movement, with an example of application[J]. *Studia Marina Sinica*, 2001(43): 25-37.]
- [14] Berné S, Vagner P, Guichard F, et al. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2002, 188(2): 293-315.

- [15] 罗深荣. 侧扫声纳和多波束测深系统在海洋调查中的综合应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 22-24. [LUO Shenrong. Comprehensive utilization of side scan sonar and multi-beam sounding system in oceanographic research[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(1): 22-24.]
- [16] 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.]
- [17] 奉仰崇. 面对北部湾的思考——关于环北部湾海岸的开发与保护[J]. 海洋开发与管理, 1999(2): 14-17. [FENG Yangchong. In the face of the Gulf of Tonkin thinking: Central Gulf of Tonkin on the development and protection[J]. Ocean Development and Management, 1999(2): 14-17.]
- [18] Li Z, Zhang Y, Li Y, et al. Palynological records of Holocene monsoon change from the Gulf of Tonkin (Beibuwan), northwestern South China Sea [J]. Quaternary Research, 2010, 74(1): 8-14.
- [19] Yao Y T, Harff J, Meyer M, et al. Reconstruction of paleo-coastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum [J]. Science in China, 2009, 52(8): 1127-1136.
- [20] 徐方建, 陈世悦, 操应长, 等. 近 4400 年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义 [J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1198-1205. [XU Fangjian, CHEN Shiyue, CAO Yingchang. Geochemical records and geological significance of the continental shelf sediments in the northern South China Sea since 4400a[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1198-1205.]
- [21] 刘振夏, 夏东兴, 王揆洋. 中国陆架潮流沉积体系和模式[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 141-147. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing, WANG Kuiyang. Tidal depositional systems and patterns of China's continental shelf[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 29(2): 141-147.]
- [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] 夏东兴, 刘振夏. 潮流脊的形成机制和发育条件[J]. 海洋学报, 1984, 6(3): 361-367. [XIA Dongxing, LIU Zhenxia. The formation mechanism and development conditions of tidal ridges[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984, 6(3): 361-367.]
- [24] 马小川. 海南岛西南海域海底沙波沙脊形成演化及其工程意义[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013. [MA Xiaochuan. Formation, evolution and engineering significance of submarine sand waves and sand ridges, southeast of Hainan Island[D]. Institute of Oceanology, Qingdao: Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [25] 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.]
- [26] 吴自银, 金翔龙, 李家彪, 等. 东海外陆架线状沙脊群[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 93-103. [WU Ziyin, JIN Xianglong, LI Jiabiao, et al. The linear sand ridges on continental shelf of East China Sea[J]. Chinese Sci Bull, 2006, 1(1): 93-103.]
- [27] Kubo Y S, Soh W, Machiyama H, et al. Bedforms produced by the Kuroshio Current passing over the northern Izu Ridge [J]. Geo-Marine Letters, 2004, 24(1): 1-7.
- [28] 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 and Quaternary Geology, 2007, 27(4): 23-28.]
- [29] 董志华. 台风对东方岸外沙波沙脊和海底地貌的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. [DONG Zhihua. The influence on current ridge, sand wave and topography of Dongfang off shore by typhoon[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.]
- [30] 姚衍桃, Harff J, Meyer M, 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(6): 753-762. [YAO Yantao, Harff J, Meyer M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 39(6): 753-762.]
- [31] 赵焕庭, 王丽荣, 袁家义. 琼州海峡成因与时代 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 33-40. [ZHAO Huanting, WANG Lirong, YUAN Jiayi. Origin and time of Qiongzhou Strait[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(2): 33-40.]
- [32] 时小军, 余克服, 陈特固. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 121-132. [SHI Xiaojun, YU Kefu, CHEN Teguo. Progress in researches on sea-level changes in south china sea since mid-holocene [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(5): 121-132.]
- [33] 吴自银, 金翔龙, 曹振铁, 等. 东海陆架沙脊分布及其形成演化 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 188-198. [WU Ziyin, JIN Xianglong, CAO Zhenyi, et al. Distribution, formation and evolution of sand ridges on the East China Sea shelf[J]. Sci China Earth Sci, 2010, 40(2): 188-198.]
- [34] 贾建军, 闫国年, 宋志尧, 等. 中国东部边缘海潮波系统形成机制的模拟研究 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(2): 159-167. [JIA Jianjun, LV Guonian, SONG Zhiyao, et al. Simulation of mechanisms for the tidal wave system in marginal seas, eastern China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(2): 159-167.]

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

GUO Li^{1,2}, MA Xiaochuan¹, YAN Jun¹

(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)

Abstract: To access the main factors influencing development and distribution of sand waves, analyses have been undertaken on the characteristics of sediment, hydrodynamics and sea level changes using the latest high-resolution multibeam, surface sediment and hydrodynamic data collected in the southeast of Beibu Gulf, where sand waves are abundantly developed. Results suggest that sand waves in this area are widespread, mostly developed on the sand ridges and in the troughs between sand ridges. Sand waves are smaller in scale in the offshore area but larger in the area nearshore. The development and distribution features of sand waves depend upon modern hydrodynamics and sediment supply. Geometric features and dimension of sand waves depend upon tidal inlet and flow velocity. Surface sediments are usually “finer offshore and coarser nearshore”, corresponding to the distribution of sand waves referred above. Besides, some of the symmetrical sand waves are found in certain areas with residual properties, perhaps as the result of different hydrodynamics while sea level changes in different periods.

Key words: sand waves; distribution characteristics; control factors; Beibu Gulf