

南海北部东沙群岛西部海域的海底沙波与内波的研究进展

张洪运^{1,3}, 庄丽华^{1,2}, 阎军^{1,2}, 马小川^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 南海北部外陆架和上陆坡分布着大量的各种类型的深水沙波, 经过统计, 这些沙波的活动性十分迥异, 有着不同于浅水沙波的运移机制。基于国内外对该地区沙波研究成果的总结, 指出天文潮、风暴潮等因素均不可能造成海底沙波的持续运动。南海北部同时是世界上内波活动最频繁的区域, 与沙波活动区存在空间一致性。经过本文的综述分析, 南海北部频发的内波可以造成海底的强流, 是造成该海域海底沙波活动的主要原因, 未来应在此框架理论下, 进行相关证实研究。

关键词: 南海北部; 东沙群岛西部海域; 海底沙波; 内波

中图分类号: P737.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)10-0149-09

DOI: 10.11759/hyxx20170109002

沙波或水下沙丘是一种常见的脊线方向和流体方向垂直的水下微地貌形态, 多见于潮流环境下^[1]。根据沙波出现的位置可以将沙波分为河道沙波、河口沙波、海滩沙波、海底沙波等。海底沙波根据出现位置的水深, 可以分为浅水沙波(<50 m)、中水沙波(50~100 m)和深水沙波(水深>100 m)。中浅水海底沙波广泛分布于全球不同海域, 如白令海^[2]、北海^[3-5]、西北大西洋^[6-7]、地中海沿岸^[8-9]、旧金山湾湾口^[10]、Monterey 水下峡谷^[11]、法国布雷斯特西南的台伯河口^[12]等。我国渤海^[13]、黄东海外陆架^[14]、台湾海峡^[15-16]、南海北部^[17-22]、北部湾^[23-25]也均有大量沙波分布。

有关浅水沙波的形成过程和机制已研究得非常广泛和细致, 形成了较为成熟的技术方法和理论基础, 现有研究讨论了这些沙波的分布规律、形态特征和发育条件, 并对海底沙波的形态和迁移特征进行了对比分析。海底沙波能够在 20~100 cm/s 的流速下发育并发生移动, 特别是在风暴潮等作用下会产生快速迁移^[26-28]。南海北部东沙群岛西部海域水深 200 m 左右的深水沙波处于现代非常规水动力环境条件下。海底沙波的迁移可导致海底地形地貌快速演化, 引起海底设施冲刷, 从而影响海底设施的稳定性及安全^[10, 27], 其形成机制具有特殊的动力过程, 探究其成因和活动规律, 对于了解南海北部陆架现代沉积过程、地貌演变和物质输运模式具有重要意义, 并对海底工程设施的安全运行和维护具有重要的指导意义, 也可以为该海域的油气安全生产提供重要科学支持。

1 南海北部的沙波

1.1 沙波特征简介

南海北部东沙群岛西部海域, 水深 100~250 m 左右的陆架坡折和上陆坡地带, 广泛分布有浅灰色和灰黄色以细砂和中砂为主的砂质沉积物, 普遍发育有各种类型的沙波、沙垄和沙丘等沙体地貌^[17, 20, 22]。海底沙波总体上沿大陆架和大陆坡转折线呈 NE 或 NEE 向条带状延伸^[17, 22], 并且沙波多为非对称型的直线型沙波^[17, 20, 22]。沙波区沙波波高从 0.3 到 5.6 m 不等, 波长从 5~140 m 不等, 基本涵盖了从小型、中型、大型到巨型的沙波, 并且沙波的规模随着水深的增大而增大, 并且不同水深处沙波的活动性差异较大^[17]。这些大量的能够迁移的海底沙波导致番禺 30-1 气田海底管道频繁发生悬跨, 且具有悬跨区段多、跨度大、变化快的特点(内部资料, 图 1)。沙波主要分布于水深约 100~210 m 的上陆坡, 整体上看, 沙波发育具有空间差异性, 从北向南随着水深的增大, 沙波波高增高, 波长增长, 陡坡和缓坡倾角增大, 沙波对称性变差。空间上沙波的活动性情况也有所不同, 北

收稿日期: 2017-01-09; 修回日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41576056)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41576056]

作者简介: 张洪运(1991-), 男, 山东临沂人, 在读博士, 主要从事海底地形地貌方面的研究工作, E-mail: hongyun_zhang@qq.com; 庄丽华(1974-), 通信作者, 女, 山东招远人, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋沉积、海洋工程地质与灾害地质工作, 电话: 0532-82898669, E-mail: lhzhuang@qdio.ac.cn

部浅水区活动性较小,中部大型沙波区活动最明显,而西南部复杂地形区陆坡的坡折线附近沙波活动性很强,能够发生移动,小范围内,背景基本一致的沙波迁移方向相差很大、甚至方向相反,主要表现为向

陆和向海的两个方向,沙波的分布具有明显的空间差异性。这种现象与 Reeder 2011 年在南海东沙岛东北海域(图 1)的观测结果相似,用传统的天文潮和风暴潮理论解释是行不通的^[29]。

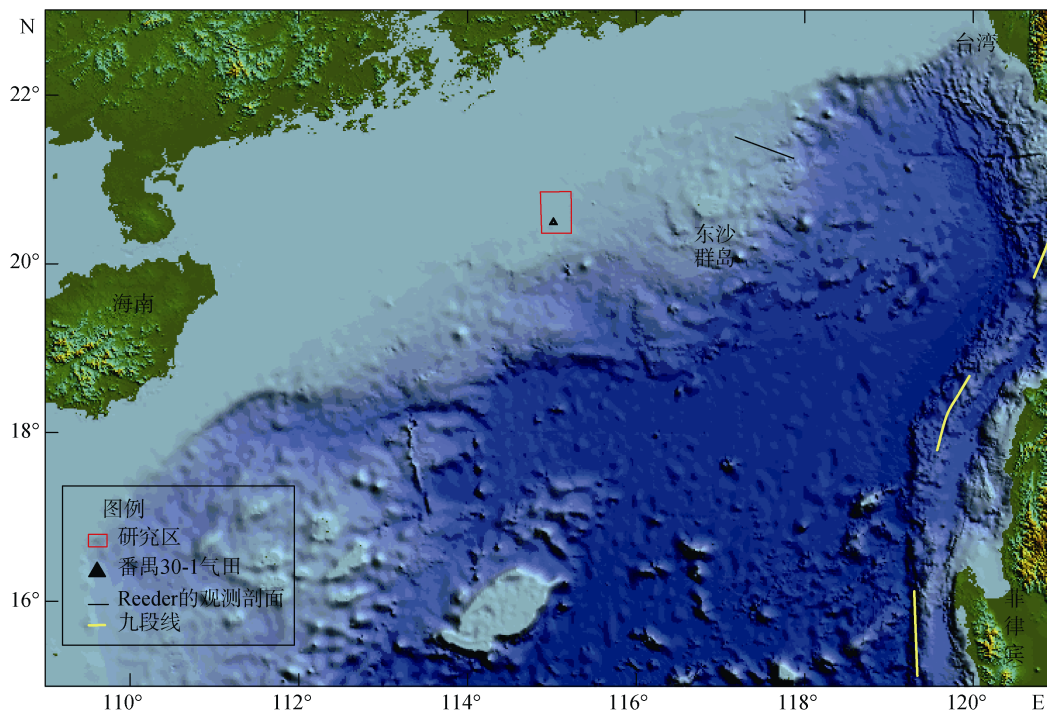


图 1 研究区域位置示意图

Fig. 1 Location of study area

1.2 沙波的迁移及其研究方法

海底沙波的迁移与其波高、波长等形态参数有关^[30-31],沙波最初被定义为对称和不对称的,沙波向陡坡方向运移,其迁移方向与最强潮流方向一致^[5, 32],陡坡越陡,迁移速度越大^[23]。目前常用侧扫声呐和精密水深剖面测量的方法定性或半定量研究沙波的几何特征^[4-5, 7],也有研究者利用水动力和已有沙波迁移公式对沙波迁移速率进行定量估算和分析^[22],模拟显示南海北部海底沙波每年以 0.155~0.534 m 的距离向海(SE)移动,速度非常缓慢,受海底地形及其他因素的复杂影响,数值模拟的方法具有局限性,仍需要通过实测数据证实。更为直接和可靠的方法是在较高定位精度的基础上,通过重复水深测量,通过剖面对比和平面对比直观识别海底沙波活动性和演化特征^[3, 6, 24, 33],或利用空间互相关分析技术重现海底沙波的二维迁移向量^[34-35]。由于大量实测数据提供了可靠依据而使结果更加可信,进而使现场观测及数据对比成为研究海底沙波现代活动性、形态

演化和迁移规律的有效手段。Duffy and Hughes-Clarkes^[35] 2005 年首次利用空间互相关技术通过计算不同时刻沙波坡度图像(对升沉和潮汐误差不敏感)的互相关性,利用质心来计算沙波的迁移向量。而 Buijsman and Ridderinkhof^[34]则在荷兰 Marsdiep 湾利用 ADCP 数据获得底形 DTM,然后利用空间互相关技术,根据不同时刻波高(底床高差减平均底床高程)图像的互相关最大值成功计算了沙波水平迁移向量和迁移速度。相比沙波特定位置的剖面和平面对比,这种新的技术依据实测数据,获得的迁移向量分布更可靠和全面。因此进一步结合平面剖面对比方法将能更好地了解海底沙波的活动规律。

1.3 研究现状

许多研究者对该地区的沙波进行了大量的研究工作,总结如下(表 1),从形态结构、迁移规律、形成和演化等方面,也发表了许多高质量论文,但其中存在很多不足,主要体现在沙波的成因,以及迁移演化方面,尤其在沙波运移的水动力机制方面争论较多。有研究者^[18-19, 36-37]

认为海底的沙波是今生的,海底表层沉积物为晚更新世地层受到冲刷改造的再沉积,在现今的潮流控制下,向SE和NW两个方向移动。也有研究者认为^[38]该处沙波是残留的沙波,在冰后期由于气候变暖,海平面迅速上升,使该区海底沙波地貌未经大的改造而保留下来,

并且在现在的潮流环境下是稳定的,不发生迁移。也有观点认为^[22],虽然研究区的沙波是残留沙波,但是在潮流作用下,向深海发生迁移。对沙波的迁移动力来源,主要有以下几种认识,潮流,风暴潮,风暴潮和潮流的耦合,该区域频发的海洋内波等^[17-18, 22, 37, 39-40]。

表1 南海北部海底沙波研究概况表

Tab. 1 Existing research on sand waves of northern South China Sea

| 水深(m) | 波高(m) | 波长(m) | 成因 | 迁移速率 | 迁移方向 |
|-------------|-----------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 129.9~132.7 | <0.4 | 8~12 | 今生 ^[37] 。 | | SE向NW移动。 |
| 132.7~140.1 | 0.5~1.5 | 70~80 | | | |
| 140.1~145.1 | 1~3 | 80~120 | | | |
| 114~116 | 0.15~1.22 | 21.5~70.2 | 可能与内波密切 | 大型沙波分布区,数十厘米到米级;交 | 向SE移动 ^[18, 40] 。 |
| 116~129 | 0.3~1.5 | 24.3~77.8 | 相关 ^[17, 39] 。 | 错沙波区表现出不同移动方向;浅水区 | |
| 133~176 | 1.1~5.67 | 23.0~135.7 | | 运移反而不明显(实际观测获得)。 | |
| 176~210 | 0.13~0.57 | 20.7~58.2 | | | |
| 143~148 | 1~3.5 | 100~120 | 残留 ^[38] 。 | 不迁移 | |
| 80~250 | | | 内波 ^[40] 。 | <1.6 m/a(采用观测流速据公式估算)。 | NW向SE移动。 |
| 129.9~132.7 | <0.4 | 8~12 | 现代形成 ^[36] 。 | | |
| 132.7~140.1 | 0.5~1.5 | 70~80 | | | |
| 140.1~145.1 | 1~3 | 80~120 | | | |
| 100~250 | | | 现代形成 ^[19] 。 | | |
| 80~250 | <1 1~2 >2 | | 残留 ^[22] 。 | 0.166~0.534 m/a(根据流速,用模型估算) | 向深海方向。 |
| 130~250 | 1~2 2 2~3 | 5~10 20~30 40~50 | 今生 ^[18] | 0.106~0.176 m/a(细砂区,根据流速用模型估算) | |

2 南海北部陆架陆坡区的内波

内波是海洋中稳定的层化海水中产生的一种内部波动,是海洋中普遍存在的一种现象^[41]。依照海洋内波的生成机制、内波频率或波长等的不同,内波可划分为小尺度高频随机内波、中/小尺度内孤立波、内潮波、近惯性内波等^[42]。而内潮波在传播过程中发生裂变等则会产生内孤立波^[41]。内波的生成源既可以位于海洋的上、下边界也可以位于海洋内部^[41],如:近海大陆架、大陆坡、海脊等海区^[43-44],其特征宽度从几百米至几百公里不等,周期则为10~30 min,而孤立内波能够产生强烈的海流脉动,产生异常的突发性强流,并在其传播过程中导致局地海面海水强烈辐聚^[45],对悬浮颗粒和沉积物跨大陆架的交换与输送有较大作用^[46]

南海北部普遍存在内波现象,是世界上公认的内波频发区^[47],尤其在春夏季节和季风方向转换,海水更容易层化,更易发生内波现象^[48],因而夏季

内波比冬季更为发育^[49]。南海北部具有显著的海水垂直层化季节变化及剧烈变化的海底地形特征,是孤立内波活动的多发区^[50],许多学者^[51-53]通过利用多源卫星遥感图像(如ERS-1/2、ENVISAT、SPOT和NOAA AVHRR)对南海北部海洋内波的空间分布特征进行了统计,结果表明孤立内波主要分布在吕宋海峡、东沙群岛和海南岛以东,其中东沙群岛附近孤立内波活动最为频繁。另外,南海北部陆架陆坡海域的非随机内波不仅存在孤立波的形式,还存在内潮波的形式,但是目前还不能用遥感手段直接对内潮波进行观测来证实存在^[47]。

对于南海北部陆架陆坡区内波的来源,目前有两种认识,第一种观点认为其来源于吕宋海峡,由于吕宋海峡处地形变化比较剧烈,当来自太平洋的潮波或海流穿过海峡进入南海时,潮流或海流受海峡内外的地形剧烈变化的影响会在原本层化的海水中激发出内潮波或内孤立波。内潮波或内孤立波向西北传播,穿过南海海盆,到达陆架陆坡的海底,对

海底沙波造成影响。另一种观点认为南海北部陆架陆坡区地形变化剧烈,并且该海域海水常年存在海水的分层现象,根据内波的形成机制,海底地形的剧烈变化会对层化的海水产生压迫,并造成扰动,进而产生内波^[47]。

3 海底沙波和内波的关系探讨

海底沙波的迁移演化与水动力直接相关,中浅水沙波的形成一般归因于潮流^[16]、河流^[12, 54]、波浪^[55]、中尺度流^[8]、风驱海流^[16, 56]、流经陡变陆架坡折的潮汐背风波^[57]、内波^[56, 58]以及陆架坡折处经过地形放大的内波致高速海流^[59],浪、流的耦合效应会加速沙波的形成和移动^[33, 60-61]。

正常海况条件下南海北部 80 m 以深海底的流速一般不超过 20 cm/s,不足以起动底质砂体,更不会形成沙波^[39]。数值模拟显示,极端天气情况下,强台风过境时,底流最大流速达到了 20 cm/s,可以引起海底泥沙的扰动,然而台风是移动的,并且每次强台风的移动路径不相同,在海底造成的强流时间相对不会持续很久,因此也不足以导致该海域沙波的定向持续性移动^[39]。风暴潮形成的风海流与潮流叠加形成的海流最大底流流速可超过 30 cm/s,但这种流速仍不足以导致沙波的形成和大规模移动^[19],台风与潮流耦合作用下也难以起动海底泥沙^[38]。因此台风不能作为南海北部 100~200 m 水深海域海底沙波的大规模定向移动的主要动力来源。东沙群岛西部海域番禺气田附近 100~200 m 水深的海域的海底沙波似乎应该是相对稳定的,但是近几年调查数据表明情况并非如此^[17-18, 36, 39],沙波具有活动性,能够发生迁移运动。最新调查^[17, 39]显示,在大型沙波区内,有向东南运移的趋势,幅度为数十厘米到米级;在交错沙波区,西北浅水段沙波向近岸运动,东南深水段沙波向深水方向移动;也有浅水区的沙波在调查期间运移趋势不明显。

实地观测发现东沙群岛西南番禺气田附近海域底流流速大,底层最大水平海流可达到 1.16 m/s,最大剪切流近 2 m/s,跃层附近最大流速甚至出现高达 5.8 m/s 的极值^[39],远超正常潮流流速量级。底层强流有独特时空分布特征,总体上来说研究范围内水深越大,底流越强,这与传统认识有很大差异。近几年研究发现该海域出现的突发强流与南海北部内波活动有关^[40, 48, 62]。南海北部的孤立内波大部分可能是形成于吕宋海峡具有陡峭海槛底地形的海底山脊

或峡道中^[45, 50],由于海底地形的突变,内波传播方向在东沙群岛附近变为西向及西北向,在从深海向陆架传播时与南海北部陆缘变浅的海底地形发生相互作用,能量发生耗散^[49, 63]甚至反射,而剩余能量将继续向陆架传播。在南海北部东沙群岛附近,做基于 X 波段雷达的内波观测,曾经观察到一次内孤立波的传播速度为 3.04 m/s,传播方向约为 297°,振幅大于 100 m^[64]。

番禺气田海域海底沙波发育区与内波活动区二者有很强的一致性,说明它们之间极可能存在内在联系,在该海域发现的严重的海底冲刷和沙波底型迁移除了受到台风和热带风暴的影响外,内波致强流极有可能是导致南海北部陆架坡折区和上陆坡底层流速骤增的主要原因,沙波空间分布和活动性差异也可能与穿过研究海域的大振幅孤立内波作用密切相关。最新研究表明^[65],从遥感卫星图像上可观测到内孤立波的传播过程,由于东沙群岛的阻隔作用,内孤立波发生绕射,一部分与等深线呈一定角度向西北方向的陆架传播,传播路径上的锚系浮标系统和近底流速计的记录中提取到的信息显示,内孤立波在近海底引起超过 80 cm/s 的强流。分布在 130~150 m 水深范围内、以粗砂为主的海底沙波,有相对平行的脊线,垂直于内孤立波的传播路径,可能受内孤立波控制,导致向上陆坡方向迁移;而分布在相对陡的海底,沙波脊线平行于等深线的海底沙波,可能受到内潮控制而向深水方向运移。

同样,在东沙群岛东北部海域调查中^[29]也观测到大振幅孤立内波对海底沙波的冲刷效应,内波可以造成海底泥沙的扰动和海底的冲刷,Reeder 利用回声测深仪首次记录到了内波导致海底沙波区泥沙起动的过程,其影响深度超过 600 m 水深,图 2 显示的是利用回声测深记录到的内波导致该海域海底沙波区泥沙起动和再悬浮的过程。

事实上,在过去数十年中,内波活动已经被证实能够在沉积物再悬浮输运及海底地貌的形成演化中扮演重要角色,特别是在上陆坡和外陆架边缘区域。内波能够与陆架或陆坡海底碰撞并在等温层与底床交界处产生垂直于陆架的底流^[66],有时,一些很大振幅的内波将产生周期性的强底流并使底床沉积物发生运动^[67-71]。在较大的尺度上,内波甚至可能冲刷陆坡和陆架外缘并决定其坡度^[69, 72-73]。而在较小的尺度上,内波产生的底流也可能使海底沉积物形成波形地貌并形成不同的沉积构造。一些发育在

陆坡或陆架边缘的沙波被认为与内波有关^[29, 56, 59], 而且研究者尝试通过露头识别出可能存在的内波沉积^[74-76], 但由于缺少地层剖面及钻孔数据, 仍

没有现今直接证据能够予以证实^[77], 而对内波引起的沉积动力过程, 目前的研究很少且亟需进一步深入探讨。

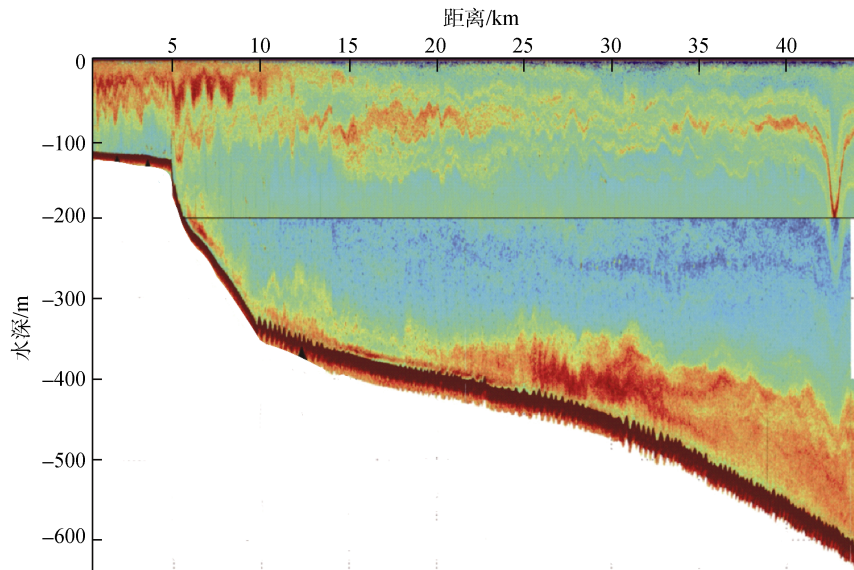


图 2 内孤立波的水体结构(改编自文献[29])

Fig. 2 Water column structure of the ISW (modified from references [29])

4 讨论与展望

南海北部东沙群岛西部番禺气田海域的沙波有区别于其他任何地方的特殊的水动力学机制。对于海底沙波的迁移速度地研究, 需要有高分辨率的海底地形地貌数据, 并且需要长期重复进行测量, 同时也应该改进研究方法, 比如: 采用空间互相关技术等来定量的研究海底沙波的运移方向和距离。

正常情况下南海北部沙波区的底流速度并不足以造成沙波的运动, 但是实测的大量调查发现, 南海北部的沙波具有活动性, 并且活动性迥异, 有向陆和向海两个方向。传统的天文潮、风暴潮理论并不能解释这种现象。另外, 南海北部是一个内波高发区。我们发现, 海底沙波的活动区恰好处于内波的活动区, 二者之间必然存在某些内在联系。通过各种观测手段确实观测到内波引发的强流, 并且这种强流也足以造成沙波的移动, 但是内波活动具体怎样造成沙波差异化分布和运动的机制仍有待于研究。

参考文献:

[1] 栾振东, 范奉鑫, 李成钢, 等. 地貌形态对海底管线稳定性影响的研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(12): 53-58.
Luan Zhendong, Fan Fengxin, Li Chenggang, et al. The

effect of seabed features on the stability of offshore pipeline[J]. Marine Sciences, 2007, 31(12): 53-58.

- [2] Field M E, Nelson C H, Cacchione D A, et al. Sand waves on an epicontinental shelf: Northern Bering Sea[J]. Marine Geology, 1981, 42(1): 233-258.
- [3] Dijk T, Kleinhans M G. Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(F4): 97-116.
- [4] Anthony D, Leth J. Large-scale bed forms, sediment distribution and sand mobility in the eastern north sea off the Danish west coast[J]. Marine Geology, 2002, 182(3): 247-263.
- [5] Mccave I N. Sand waves in the North Sea off the coast of holland[J]. Marine Geology, 1971, 10(3): 199-225.
- [6] Whitmeyer S J, Fitzgerald D M. Episodic dynamics of a sand wave field[J]. Marine Geology, 2008, 252(1): 24-37.
- [7] Li M Z, Amos C L. Field observations of bedforms and sediment transport thresholds of fine sand under combined waves and currents[J]. Marine Geology, 1999, 158(1): 147-160.
- [8] Ediger V, Velegrakis A F, Evans G. Upper slope sediment waves in the Cilician Basin, Northeastern Mediterranean[J]. Marine Geology, 2002, 192(1): 321-333.
- [9] Santoro V C, Amore E, Cavallaro L, et al. Sand waves in the Messina Strait, Italy[J]. Ocean Dynamics, 2002,

- 54(3): 392-398.
- [10] Barnard P L, Hanes D M, Rubin D M, et al. Giant sand waves at the mouth of San Francisco Bay[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2006, 87(29): 285-289.
- [11] Xu J P, Wong F L, Kvitek R, et al. Sand wave migration in Monterey submarine canyon, central California[J]. *Marine Geology*, 2008, 248(3): 193-212.
- [12] Trincardi F, Normark W R. Sediment waves on the tiber prodelta slope: interaction of deltaic sedimentation and currents along the shelf [J]. *Geo-marine Letters*, 1988, 8(3): 149-157.
- [13] 刘振夏, 夏东兴, 汤毓祥, 等. 渤海东部全新世潮流沉积体系[J]. *中国科学(B 辑)*, 1994, 24(12): 1331-1338.
Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Tang Yuxiang, et al. The Holocene sedimentary body's series in the east of the Bohai Sea [J]. *Science in China (series B)*, 1994, 24(12): 1331-1338.
- [14] 叶银灿, 庄振业, 来向华, 等. 东海扬子浅滩砂质底形研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(6): 1057-1062.
Ye Yincan, Zhuang Zhenye, Lai Xianghua, et al. A study of sandy bed forms on the Yangtze shoal in the East China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(6): 1057-1062.
- [15] 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.
- [16] Cai A, Zhu X, Li Y, et al. Sedimentary environment in the Taiwan shoal[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2003, 21(3): 201-211.
- [17] 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. Geomorphology and hazardous geological factors on the continental shelf of the northern south china sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(1): 51-60.
- [18] 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. The sand wave dynamic analysis of seafloor on the pearl river mouth basin of the south China Sea shelf slope and continental slope[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(6): 122-132.
- [19] 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(自然科学版)*, 2006, 36(6): 1019-1023.
Wu Jianzheng, Hu Rijun, Zhu Longhai, et al. Study on the seafloor sand waves in the Northern South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(6): 1019-1023.
- [20] 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 Wenjia. 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.
- [21] 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 Geological Sinica*, 2010, 84(2): 233-245.
- [22] 冯文科, 黎维峰. 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. The research of dynamic of seafloor sandwaves in the Northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(6): 92-99.
- [23] 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]. *海洋科学进展*, 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]. *Advance in Marine Science*, 2001, 19(1): 17-24.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Németh A A, Hulscher S J M H, Vriend H J D. Modelling sand wave migration in shallow shelf seas[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(s 18-19): 2795.
- [27] Morelissen R, Hulscher S J M H, Knaapen M A F, et al. Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines[J]. *Coastal Engineering*, 2003, 48(3): 197-209.

- [28] 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[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(43). 北京: 科学出版社, 2001: 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[C]//Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences. *Studia Marina Sinica*(43). Beijing: Science Press, 2011: 25-37.
- [29] Reeder D B, Ma B B, Yang Y J. Very Large subaqueous sand dunes on the upper continental slope in the South China Sea generated by episodic, shoaling deep-water internal solitary waves[J]. *Marine Geology*, 2011, 279(1): 12-18.
- [30] Lobo F J, Hernández-molina F J, Somoza L, et al. Patterns of bottom current flow deduced from dune asymmetries over the gulf of cadiz shelf (southwest Spain)[J]. *Marine Geology*, 2000, 164(s 3-4): 91-117.
- [31] 高抒. 大型海底、海岸和沙漠沙丘的形态和迁移特征[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 13-22.
Gao Shu. Morphological and migration characteristics of large-scaled submarine, coastal and desert sand dunes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 13-22.
- [32] Bartholdy J, Bartholomae A, Flemming B W. Grain-size control of large compound flow-transverse bedforms in a tidal inlet of the Danish Wadden Sea[J]. *Marine Geology*, 2002, 188(3): 391-413.
- [33] Li M Z, King E L. Multibeam bathymetric investigations of the morphology of sand ridges and associated bedforms and their relation to storm processes, Sable Island Bank, Scotian Shelf[J]. *Marine Geology*, 2007, 243(1): 200-228.
- [34] Buijsman M C, Ridderinkhof H. Long-term evolution of sand waves in the Marsdiep Inlet. I: High-resolution observations [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(9): 1190-1201.
- [35] 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 Atmospheres*, 2005, 110(F04S12): 1-11.
- [36] Luan X W, Peng X C, Wang Y M, et al. Activity and formation of sand waves on Northern South China Sea shelf[J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21(1): 55-70.
- [37] 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.
- [38] 陈鸣, 陆丰 13-1 平台场地海底稳定性分析与评价[J]. *热带海洋学报*, 1995, 14(2): 40-46.
Chen Ming. An evaluation on seafloor stability for platform site lufeng 13-1[J]. *Journal of Tropical oceanography*, 1995, 14(2): 40-46.
- [39] 范奉鑫, 尹宝树, 徐振华, 等. PY30-1 海管冲刷机理及悬跨治理研究[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011.
Fang Fengxin, Yin baoshu, Xu Zhenhua, et al. PY30-1 the scour mechanism of subsea pipeline and the management and research of suspended span[R]. Qingdao: Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [40] 夏华永, 刘愉强, 杨阳. 南海北部沙波区海底强流的内波特征及其对沙波运动的影响[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(6): 15-22.
Xia Huayong, Liu Yuqiang, Yang Yang. Internal-wave characteristics of strong bottom currents at the sand-wave zone of the northern South China Sea and its role in sand-wave motion[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(6): 15-22.
- [41] 杜涛, 吴巍, 方欣华. 海洋内波的产生与分布[J]. *海洋科学*, 2001, 25(4): 25-28.
Du Tao, Wu Wei, Fang Xinhua. The generation and distribution of ocean internal waves[J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(4): 25-28.
- [42] 李丙瑞. 海洋中的内波及其演变、破碎和所致混合[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
Li Bingrui. The evolution, broken and mix of the internal waves[D]. Ocean University of China, 2006.
- [43] Pingree R D, Mardell G T. Solitary internal waves in the Celtic Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 1985, 14(1): 431-441.
- [44] Huthnance J M. Circulation, Exchange and water masses at the ocean margin: the role of physical processes at the shelf edge[J]. *Progress in Oceanography*, 1995, 35(4): 353-431.
- [45] 蔡树群, 何建玲, 谢皆烁. 近 10 年来南海孤立内波的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 703-710.
Cai Shuqun, He Jianling, Xie jieshuo. Recent decadal progress of the study on internal solitons in the South China Sea[J]. *Advance in Earth Science*, 2011, 26(7): 703-710.
- [46] Chen CY, Hsu JRC. Interaction between internal waves and a permeable seabed[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(5): 587-621.
- [47] 杜涛. 南海北部的内波[J]. *地学前缘*, 2000, s2: 188.
Du Tao. The internal waves in northern south china sea[J]. *Geoscience Frontiers*, 2000, s2: 188.
- [48] 方文东, 施平, 龙小敏, 等. 南海北部孤立内波의现场观测[J]. *科学通报*, 2005, 50(13): 1400-1404.

- Fang Wendong, Shi Ping, Long Xiaomin, et al. In-situ observation of the internal Isolation waves of northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(13): 1400-1404.
- [49] Guo C, Chen X. A review of internal solitary wave dynamics in the Northern South China Sea[J]. Progress in Oceanography, 2013, 121(2): 7-23.
- [50] 徐振华. 南海西北部陆架海域内孤立波特征及机理研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋环境与波动重点实验室, 2009.
- Xu Zhenhua. The research on characteristic and mechanism of the internal solitary wave on the continental shelf of the northwestern of the south China sea[D]. Qingdao: Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, the Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [51] Hsu M K, Liu A K, Liu C. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4): 389-410.
- [52] Zhao Z, Alford M H. Source and propagation of internal solitary waves in the Northeastern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(C11): 63-79.
- [53] Gan X L, Huang W G, Yang J S, et al. The study of spatial and temporal distribution characteristics of internal waves in the South China Sea from multi-satellite data [J]. Remote Sensing Technology & Application, 2007, 22(2): 242-245.
- [54] Jordan G F. Large submarine sand waves[J]. Science, 1962, 136(3519): 48-839.
- [55] Yalin M S. Mechanics of Sediment Transport[M]. Oxford, Pergamon Press, 1972.
- [56] Bradford B, Marlene N, Folger D W. Long-term observations of bottom current and bottom sediment movement on the mid-Atlantic continental shelf[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1979, 84(NC3): 1187-1205.
- [57] Cartwright D, Stride A H. Large sand waves near the edge of the continental shelf[J]. Nature, 1958, 181(4601): 41.
- [58] Stride A H, Tucker M J. Internal waves and waves of sand[J]. Nature, 1960, 188(188): 933-933.
- [59] Shepard F P, Marshall N F, Mcloughlin P A. "Internal waves" advancing along submarine canyons[J]. Science, 1974, 183(4121): 8-195.
- [60] Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1979, 84(C4): 1797-1808.
- [61] Grant W D, Madsen O S. The continental-shelf bottom boundary layer[J]. Fluid Mechanics, 1986, 18(18): 265-305.
- [62] 方文东, 陈荣裕. 南海北部大陆坡区的突发性强流[J]. 热带海洋学报, 2000, 19(1): 70-75.
- Fang Wendong, Chen Rongyu. Abrupt strong currents over continental slope of northern South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(1): 70-75.
- [63] Duda T F, Lynch J F, Irish J D, et al. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 29(4): 1105-1130.
- [64] 吕海滨, 何宜军, 申辉. 基于 X 波段雷达获取东沙群岛附近内波的传播速度[Z]. 海洋科学, 2012, 36(11): 98-102.
- Lü Haibin, He Yijun, Shen Hui. Velocity of the internal waves around the Dongsha Islands calculated based on X-band radar[J]. Marine Sciences, 2012, 36(11): 98-102.
- [65] Ma X, Yan J, Hou Y, et al. Footprints of obliquely incident internal solitary waves and internal tides near the shelf break in the Northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2016, 121(12).
- [66] Pomar L, Morsilli M, Hallock P, et al. Internal waves, an under-explored source of turbulence events in the sedimentary record[J]. Earth-science Reviews, 2011, 111(1): 56-81.
- [67] Noble M A, Xu J P. Observations of large-amplitude cross-shore internal bores near the shelf break, Santa Monica Bay, Ca[J]. Marine Environmental Research, 2003, 56(1): 49-127.
- [68] Quaresma L S, Vitorino J, Oliveira A, et al. Evidence of sediment resuspension by nonlinear internal waves on the western Portuguese mid-shelf[J]. Marine Geology, 2007, 246(2): 123-143.
- [69] Puig P, Palanques A, Guillén J, et al. Role of internal waves in the generation of nepheloid layers on the northwestern Alboran slope: implications for continental margin shaping[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(2): 0-176.
- [70] Brogström B, Hildebrand H. Large internal waves in Massachusetts Bay transport sediments offshore [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(s 17-18): 2029-2049.
- [71] Stastna M, Lamb K G. Sediment resuspension mechanisms associated with internal waves in coastal waters[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(113): 193-199.
- [72] Cacchione D A, Pratson L F, Ogston A S. The shaping of continental slopes by internal tides.[J]. Science, 2002, 296(5568): 7-724.
- [73] Klymak J M, Alford M H, Pinkel R, et al. The breaking and scattering of the internal tide on a continental slope[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(5): 926-945.
- [74] Morsilli M, Pomar L. Internal waves VS surface storm

- waves: a review on the origin of hummocky cross-stratification[J]. *Terra Nova*, 2012, 24(4): 273-282.
- [75] He Y B, Luo J X, Li X D, et al. Evidence of internal-wave and internal-tide deposits in the Middle Ordovician Xujiajuan Formation of the Xiangshan Group, Ningxia, China[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(5-6): 509-523.
- [76] Youbin H E, Gao Z. The characteristics and recognition of internal-tide and internal-wave deposits[J]. *Science Bulletin*, 1999, 44(7): 582-589.
- [77] Shanmugam G. Modern internal waves and internal tides along oceanic pycnoclines: challenges and implications for ancient deep-marine baroclinic sands[J]. *Aapg Bulletin*, 2013, 97(5): 858-879.

Progress of sand waves and internal waves research in sea area west of the Dongsha Islands in the northern South China Sea

ZHANG Hong-yun^{1, 3}, ZHUANG Li-hua^{1, 2}, YAN Jun^{1, 2}, MA Xiao-chuan^{1, 2}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jan. 9, 2017

Key words: the northern South China Sea; western sea of the Dongsha Islands; sand waves; internal waves

Abstract: There are many types of deepwater sand waves on the continental shelf and upper slope of the northern South China Sea. Statistical analyses indicate that these sand waves have a different migration mechanism than shallow-water sand waves. Based on a summary of domestic and international research on sand waves in this region, we found that factors such as the astronomical tide and storm surge cannot cause the sustained movement of sand waves. The northern South China Sea is also the world's most frequent internal-wave activity area, and there is spatial consistency in the sand-wave activity areas. The frequently occurring internal wave in the northern South China Sea can cause strong flow in the seabed, which is the main reason for the seabed sand-wave activity. In the future, relevant research should be performed to verify this theory.

(本文编辑: 刘珊珊)