

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019123001

南海北部陵水陆坡重力流沉积调查与分析

冯湘子, 朱友生

中海油田服务股份有限公司物探事业部, 天津 300451

摘要:深水沉积环境复杂、浅层沉积物土质差异明显、重力流沉积多样,对深水海洋工程水下设施的设计、施工和运营安全提出了新的挑战。通过二维/三维数字地震等方式能够识别出数百米的滑坡体,但是对于海洋工程上所关注的浅层海底的重力流沉积体系,其分析能力有限。以南海北部陵水区块为例,通过船载多波束的后向散射成果、自主水下航行器(AUV)搭载的浅地层剖面资料,结合重力活塞取样器(JPC)取样和碳 14 测年(AMS^{14}C)等资料综合分析,对深水海底浅层重力流沉积的形成和分布模式进行探讨。研究表明,船载多波束后向散射图能够较为准确地识别区域性重力流沉积区域,以及表层沉积物的变化,AUV 搭载的浅地层剖面能够精确地识别地层的纵向差异,JPC 取样能够获取重力流沉积样品及其物理力学参数,以上资料的综合分析,是准确识别、研究和认识现代重力流沉积体系的重要方法。研究区内最近的 2 期重力流沉积分别发生于 5.5 kaBP 左右和 45 kaBP 前,重力流的发生一般都是由上陆坡区海底峡谷的活动引起的。最近的一期重力流事件中,先后发生了浊流沉积和块状搬运体(MTDs)沉积,MTDs 沉积过程中会对下伏地层产生明显的冲蚀现象。在重力流沉积区进行水下结构物设计和施工时,应特别关注重力流沉积引起地形坡度变化,以及地层中土质成分的差异,可能对水下结构物的安装和维护产生的影响。

关键词:后向散射;重力流;浊流;深水沉积模式

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Investigation of gravity flow deposits on the Lingshui slope of the northern South China Sea

FENG Xiangzi, ZHU Yousheng

Geophysical Department, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China

Abstract: Deep-water environment is rather complex. Within the shallow part of the environment, there occur various gravity flow deposits, that become new challenges to the design, construction and operation of underwater facilities. The landslides on scale of hundreds of meters can be identified by 2D/3D digital seismic survey, but the recognition of gravity flow depositional system on the shallow seabed, which is concerned by marine engineers, is limited. Taking the Lingshui block in the north of the South China Sea as an example, this paper discussed the formation and distribution models of shallow gravity flow deposits in the deep sea bottom with the results of MBES backscattering on board, the sub-bottom profile data carried by the Autonomous Underwater Vehicle (AUV), combined with the data of Jumbo Piston Corer (JPC) sampling and AMS^{14}C dating. The results show that the MBES backscatter result can accurately identify the region of gravity flow deposition and the changes of surface sediments, the Sub-bottom profiler carried by AUV can accurately identify the vertical differences of strata, and JPC sampling can obtain the gravity flow deposits as well as their physical and mechanical parameters. The comprehensive analysis of the above data founded the basis to accurately identify, study and recognize the present situation of the gravity flow depositional system. The latest two periods of gravity flow deposition in the study area occurred about 5.5 ka and 45 ka ago, respectively. Generally, the gravity flow is caused by the activity of submarine canyon on the upper slope. In the latest gravity flow event, turbidity current deposition and MTDS deposition took place successively, and the MTDS deposition produced obvious erosion to the underlying strata. In the design and construction of underwater structures in the gravity flow active area, special attention should be paid to the change of terrain slope caused by gravity flow deposition and the difference of soil composition in the stratum, which may affect the installation and maintenance of underwater facilities.

Key words: backscatter; gravity flow deposition; turbidity; deep-water sedimentary model

资助项目:陵水 17-2 气田群开发工程场地详细勘察

作者简介:冯湘子(1986—),男,硕士,主要从事海洋工程勘察, E-mail: fengxz@cosl.com.cn

收稿日期:2019-12-30; 改回日期:2020-06-27. 文凤英编辑

1 重力流沉积体系研究进展

1929年在北大西洋 Grand Banks 陆坡上由地震造成的大型浊流的发现^[1],揭开了重力流沉积体系研究的序幕。深水沉积环境复杂、浅层沉积物土质差异明显,对深水海洋工程设施的设计、施工和运营安全提出了新的挑战。但由于观测技术的限制,重力流的不可预测性和破坏性以及实地观测的困难,使沉积学家和海洋学家多年来对重力流的研究一直局限于实验室、数值模拟和浊积岩露头^[2-6]等工作。

近几十年来,国内外诸多学者对中国南海北部陆坡区的重力流沉积体系进行了研究,主要研究手段包括三维地震、岩芯和测井数据等,通过地质-地球物理-地球化学综合分析,运用层序地层学、地震沉积学和深水沉积动力学等理论方法,揭示了海底峡谷的侵蚀-充填过程、深水海底扇和MTDs(Mass Transport Depositions, 块体搬运体系)发育特征等^[7-11]。

三维地震调查作为宏观的方法,研究区域较广,一般以盆地为单位,横跨数百千米;研究年代跨度大,所关注的地质结构和特征厚度在数十米至数千千米。而对于岩芯和测井数据的研究属于较为微观的范畴,通过粒度、薄片等研究方法,可以对研究对象进行微观的分类^[12-17]。沉积学家已经投入了大量精力对深海沉积进行研究,但无论是钻探还是物探都存在各自的局限,不能充分反映单层厚度只有几厘米到几十厘米的深海重力流沉积物^[18-23]。

从海洋工程专业角度来看,主要关注海底地形和浅层地质特征,包括海底至海底以下30 m左右地质构造和沉积差异,特别是当前的这一时刻海底的状态和浅部地层的特征。对于南海陆坡的重力流沉积,部分研究单位也曾采用船载的浅地层剖面仪进行调查,并取得了较好的资料和成果。相对于船载的浅地层剖面仪,AUV(Autonomous Underwater Vehicle, 自主式水下航行器)所能搭载的浅地层剖面震源能级较小,但得益于距离所需观测的地层较小,因此能够取得分辨率较高的地层剖面资料。

本文的研究主要基于近年来进行的南海北部陵水区块的工程勘察工作,根据AUV采集的高精度地球物理资料,对南海北部深水区的重力流沉积体系特征进行了研究,并对沉积模式进行了分析。

2 研究方法

本文选取南海北部陵水区块作为研究区域,研

究区域内水深约200~1600 m。研究方法主要为地球物理调查和工程地质调查,海上采集主要完成于2017年,主要包括:

(1) AUV 搭载的 Kongsberg EM2040 采集多波束水深

AUV采用的是COSL Explorer,最大作业能力为海面以下3000 m,调查时定高在海底以上40 m航行,航速为3节,通过Kongsberg EM2040多波束测深系统,工作频率为200 kHz,可获取分辨率1 m×1 m的水深成果。

(2) AUV 搭载的 EdgeTech 2200 浅地层剖面资料

EdgeTech 2200为侧扫声纳和浅地层剖面一体化的采集设备,纵向上的分辨率可达0.1 m,在调查区域内深水区的探测深度约为30 m;在水深超千米的海域,船载浅剖资料效果并不理想,而采用AUV搭载的浅地层剖面仪,处理后的浅剖资料的分辨率优于0.1 m,能够精确地识别区分浊流沉积、MTDs沉积和正常沉积地层。

(3) 船载 EM302 深水多波束水深

EM302为一套经典的深水多波束测深系统,作业时勘察船的航速在4.5节左右,工作频率为30 kHz,可获取分辨率为20 m×20 m的水深成果。

根据船载多波束大范围调查成果,调查区域内水深由西北向东南渐深,以800 m水深为界,以浅为陆坡,包括1处缓坡和3处海底峡谷(由西向东依次命名为峡谷1、峡谷2和峡谷3);以深为下陆坡,整体水深变化较为平缓(图1)。

(4) 船载 EM302 后向散射强度资料

后向散射强度(Backscatter Strength)资料,或称为背散射强度,是在多波束测深系统记录水深时,同时记录的海底声学后向散射强度,可用于利用声强信息正演海底地质学特征,能够反映海底底质的变化。在本研究中,为了获取一定穿透深度,主要采用了较低频率的船载多波束后向散射强度;通过对研究区域的船载多波束(型号Kongsberg EM302,作业频率30 kHz)后向散射资料进行处理,可获取全区的后向散射强度分布特征,清晰显示了重力流事件中沉积物的运移路径。

(5) JPC 取样资料

JPC(Jumbo Piston Corer, 重力活塞取样器)是深水区域获取表层样品的常用设备,本区域内进行取样时,采用6 m长度的取样管,获取的样品长度一般超过5 m。

(6) AMS¹⁴C 测年资料

研究区域内布设有一处80 m深的钻孔取样作

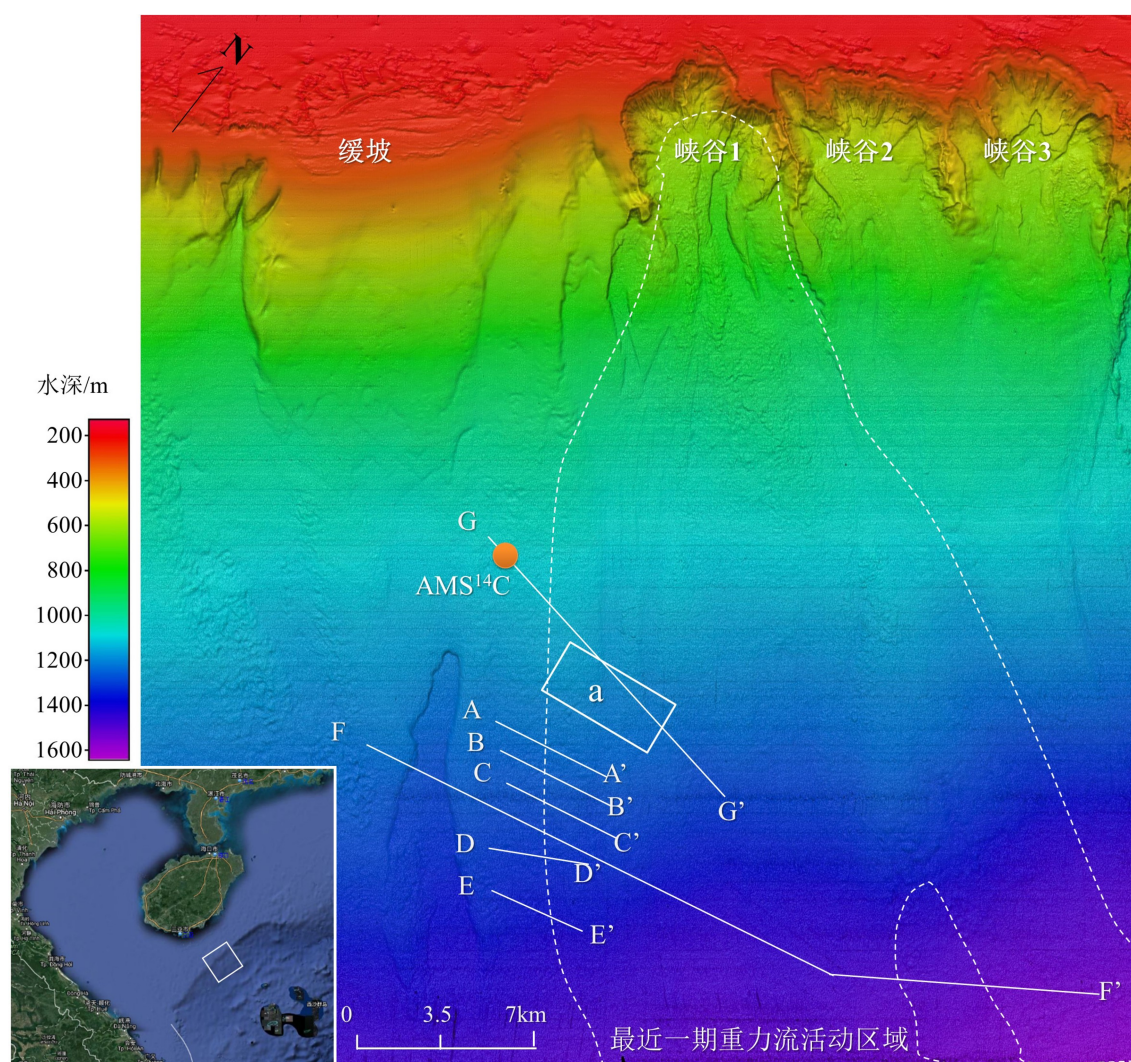


图 1 研究区域及水深地形图

Fig.1 Bathymetric map showing the survey area

业(图 1 中的 AMS¹⁴C), 水深约 1100 m, 每隔一定的深度选取适量样品, 加入水、30% 的 H₂O₂ 进行浸泡, 充分分散, 过 0.063 mm 筛进行冲洗, 烘干后, 挑选 0.025~0.035 mm 之间合适的浮游有孔虫混合种, 如果没有足够的有孔虫, 就挑选贝壳, 或者植根进行 AMS¹⁴C 测年。AMS¹⁴C 测年在美国迈阿密的 Beta 测年实验室完成。

为确定近期的重力流事件发生的时间, 采用 AMS¹⁴C 测年方法对深水钻孔获取的样品进行分析, 并通过浅地层剖面连接取样位置与重力流沉积区域, 将剖面按照海底拉平后, 可以认为海底(图 2 红色线)与 R1(图 2 蓝色线)之间的地层是在相同的时间年代中完成的沉积, 根据 AMS¹⁴C 测年成果, 对应的时间年代约为 5.5 kaBP, 因此, 可以推断最近一期的重力流事件发生于约 5.5 kaBP。

通过以上资料的综合分析, 能够更加细致地识别深水重力流沉积特征, 特别是其海底地形地貌形

态和浅层沉积特征及其所发生的年代。

3 重力流沉积体系的识别特征

根据研究, 调查区域内浅部地层(海底以下 0~30 m)存在 3 类沉积特征: 正常沉积、浊流沉积和 MTDs 沉积, 这些沉积特征在水深地形、后向散射、浅地层剖面及 JPC 取样中, 均存在较为显著的差异。

3.1 水深与地形

根据 AUV 水深地形资料的分析, 能够比较清晰地观测到正常沉积与近期 MTDs 沉积地形特征的差异, 这种差异在坡度图中则更为显著(图 3), 可将海底表层沉积划分为 3 类: 近期 MTDs 沉积、正常沉积和浊流沉积。

3.1.1 近期 MTDs 沉积

近期 MTDs 沉积主要特征为崎岖海底和滑动构

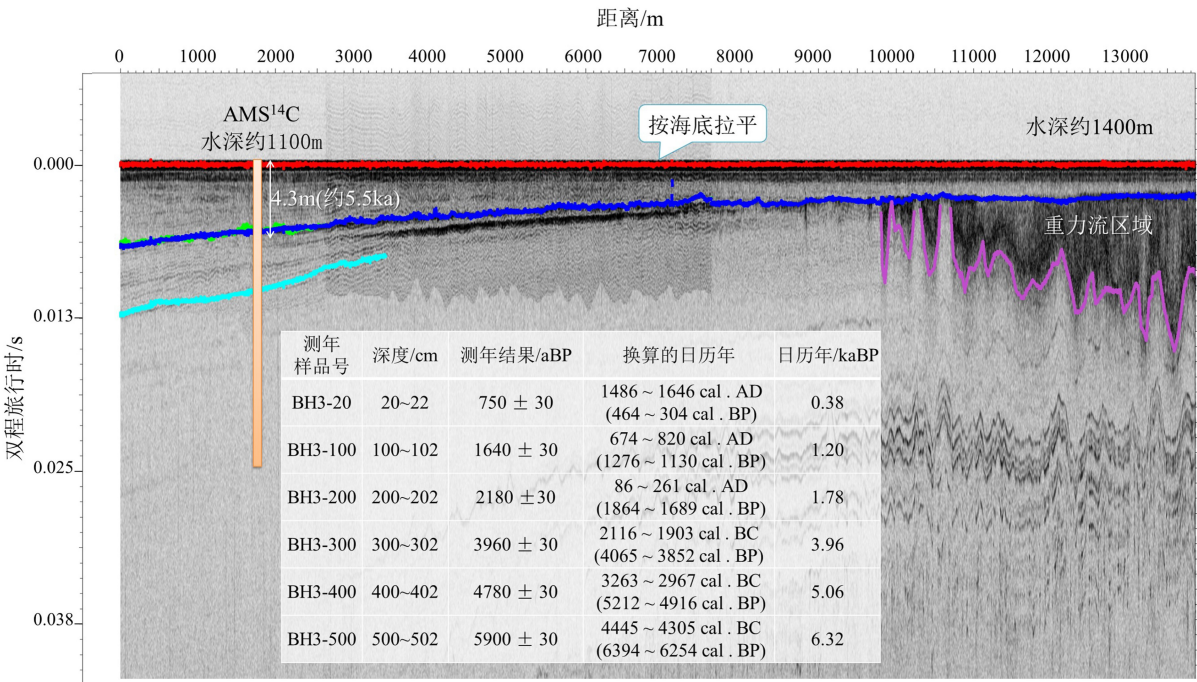


图 2 通过碳¹⁴C 测年推算重力流发生年代 (图 1 中的 G-G')
Fig.2 Estimating the age of gravity flow by AMS ¹⁴C dating (At G-G' of Fig.2)

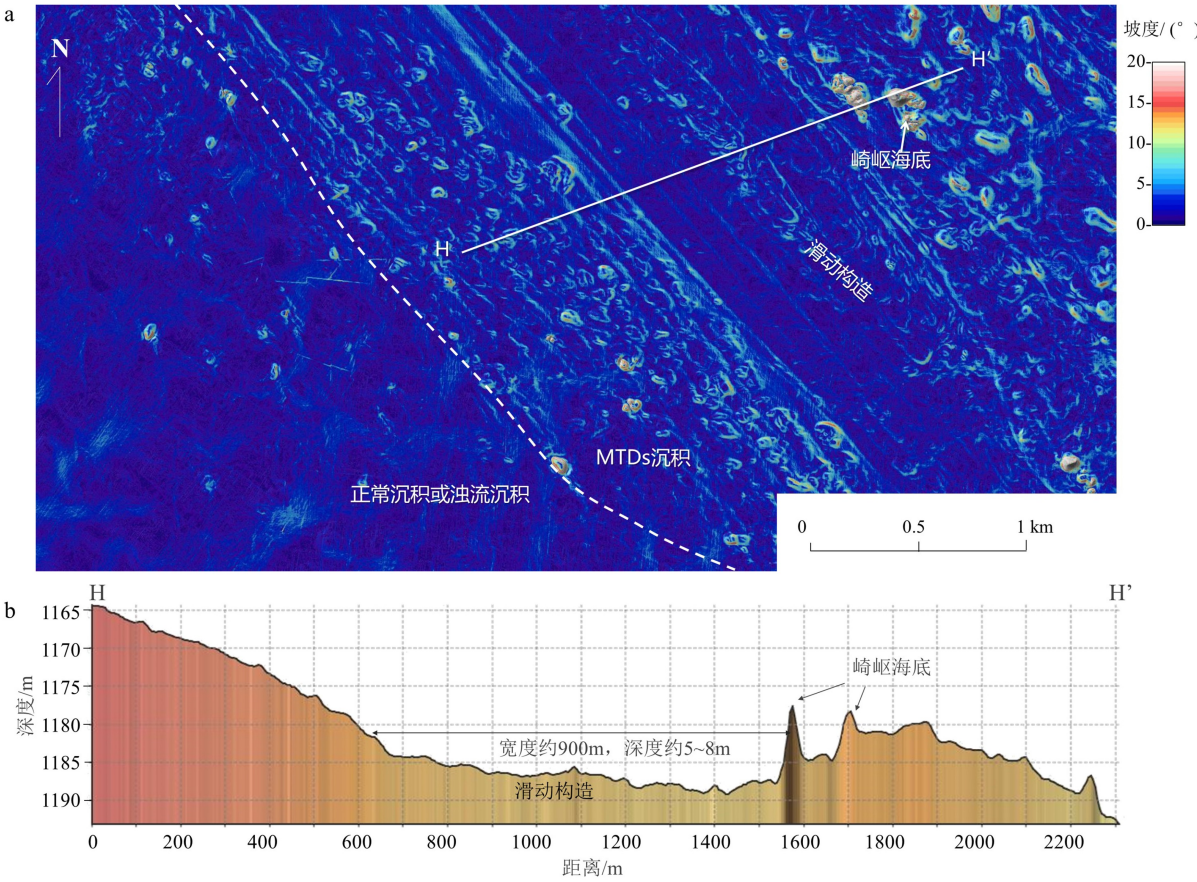


图 3 通过地形识别最近一期 MTDs 沉积 (位于图 1 中的 a 区域)
a. MTDs 沉积坡度图, b. MTDs 沉积水深剖面图。
Fig.3 The last MTDs sediment according to terrain recognition (at area a of Fig.1)
a. MTDs sedimentary slope map, b. MTDs sediment depth profile.

造, 由于深水沉积速率较低(约 $10\sim 20\text{ cm/ka}$), 其原始形态特征保存较为完整。

在 MTDs 沉积过程中, 随着运动能量的减弱, 碎屑块体逐步在海底沉积下来, 形成地形崎岖的海底。调查区域内发现有不同尺寸的块体, 其海底以上部分的直径由十几米到上百米不等, 高出海底一般只有几米, 边缘坡度可达 $8^\circ\sim 10^\circ$, 部分块体甚至可达 16 m , 边缘坡度超过 20° (图 3)。

滑动构造主要发现在 MTDs 主运移通道上, 一般较周围海底深, 形态上类似于陆地上的河道; 滑动构造长度可达数十千米, 宽度从几百米至上千米。滑动构造内部未见有碎屑块体沉积, 可以认为是重力流沉积中的高能部分(图 3)。

3.1.2 正常沉积

正常沉积区在至少数万年未经重力流活动影响, 其主要的地形特征为相对平缓的海底(图 3)。通过地形特征还可以识别早期的 MTDs 沉积, 发生于距今数万年前, 至今沉积了约 20 m 厚的正常沉积地层, 对于规模较大的构造依然能够保留部分原有的特征, 其边缘坡度可达 $5^\circ\sim 7^\circ$, 但对于较小的碎屑块体在当前的海底地形资料中无法分辨其特征。

3.1.3 浊流沉积

在海底地形并不平坦的区域, 浊流沉积主要体现为填充负向地形的特性, 使海底地形趋于平缓, 其沉积区域在水深地形上并没有明显的识别特征; 但当浊流沉积发生在较为平坦的海底, 则会形成较

为清晰的边界, 主要依据为 AUV 多波束调查成果及浅地层剖面。得益于在较为稳定的沉积环境, 调查区域内近期的沉积物厚度基本没有变化, 并没有改变原有的地形特征, 因此, 保留了海底以下约 0.8 m 的浊流沉积的明显边缘, 相对于周围的海底高出 $0.1\sim 0.2\text{ m}$ (图 4)。

3.2 后向散射强度

根据后向散射强度成果, 可以较为直观地识别出正常沉积、浊流沉积和 MTDs 沉积。

正常沉积的地层, 由于沉积物的堆积是长时间连续和稳定的, 因此在后向散射成果中表现为较为稳定和连续的反射强度。

浊流沉积呈现较强的后向散射强度, 在后向散射图中较容易识别。

MTDs 沉积的后向散射强度要低于浊流沉积, 与正常沉积的后向散射强度接近, 但在重力流形成过程中, MTDs 会对正常沉积的地层进行切割、侵蚀和覆盖, 因此在 MTDs 沉积区域, 在后向散射图中产生带状交替出现的强弱反射, 表现为由于内部形变引起的后向散射强度变化。

根据后向散射图, 研究区域下陆坡的西部位于缓坡的下游, 其后向散射强度较为均一, 表明近期没有重力流活动; 东部区域位于 3 处海底峡谷的下游, 其后向散射强度呈河流状分布, 表明海底峡谷在近期存在浊流、MTDs 等重力流活动, 而且其来源均为峡谷 1(图 5)。

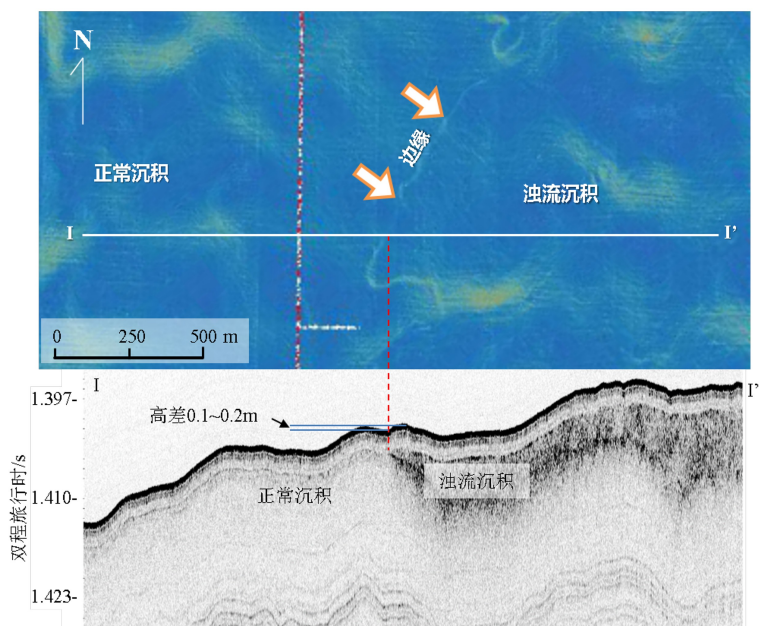


图 4 坡度图/浅地层剖面图——浊流沉积与正常沉积之间形成的边缘

Fig.4 Slope map/SBP profile— boundary between turbidite deposits and normal deposits

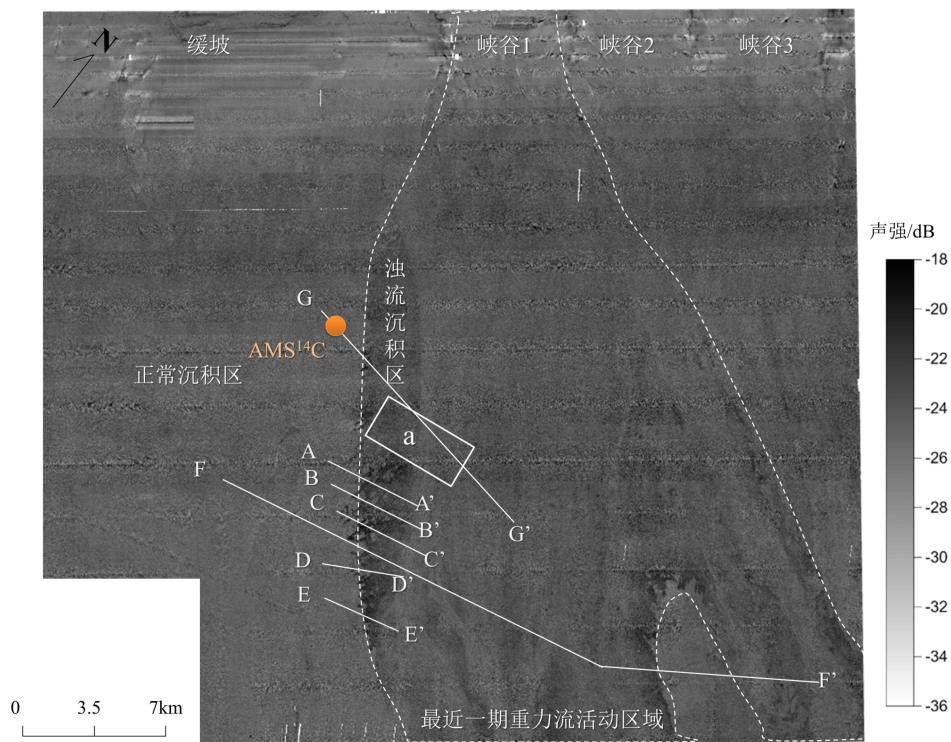


图 5 陆坡区后向散射强度平面图

Fig.5 The Backscatter intensity in the lower slope area

在区域性深水沉积模式研究中,通过踏勘多波束采集到的后向散射资料和 AUV 采集的浅地层剖面资料,不仅能够确定近期重力流的运移方式,而且能够确定其中浊流沉积和 MTDs 沉积的先后关系。

3.3 浅地层剖面

通过对比发现,后向散射强度与浅地层剖面资料之间具备较好的对应关系,浊流沉积在浅地层剖面图中表现为强振幅,而在后散射强度图中也表现为较强的反射强度,二者在平面位置上也非常一致(图 6)。

3.3.1 正常沉积

正常沉积在浅地层剖面上表现为平行反射层理,多数体现为弱反射,受地质事件影响,会产生平行于海底的强反射沉积层,通过强反射层可以对全区的层序进行划分。

3.3.2 浊流沉积

浊流沉积在浅地层剖面上表现为强反射。反射强度差异产生的原因主要是颗粒大小在沉积过程中的差异造成的。颗粒较大的块体流在沉积时均一性较差,无法形成较为统一的反射;而浊流沉积物颗粒较为均一,所形成的沉积物具备更强的反

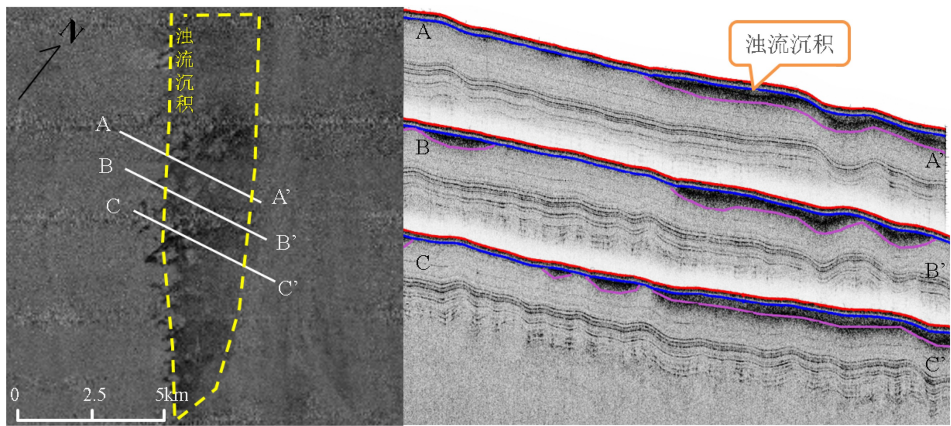


图 6 后向散射图(左)与浅地层剖面(右)对比

Fig.6 Contrast of backscatter map (left) and sub-bottom profile (right)

射能力,因而体现为强反射。

在浊流沉积区的边缘,呈现为较为明显的边界(图 7),这是由于浊流在运移过程中,流体内部和流体表面的悬浮物差异造成的,当浊流停止运动后这种差异就体现出来,在浊流边界形成强反射,而在其内部主要为弥散状反射特征。

3.3.3 MTDs 与浊流混合沉积

在发生重力流事件时,MTDs 沉积与浊流沉积并不是独立事件,因此在实际的沉积地层中,存在 MTDs 与浊流混合沉积地层。在浅地层剖面上,这种混合地层也体现为中等强度的反射特征,介于 MTDs 沉积与浊流沉积之间(图 7)。

3.3.4 MTDs 沉积

MTDs 沉积在浅地层剖面上表现为空白反射或弱反射,由于其内部的碎屑块体之间存在形变和旋转,并且在一期 MTDs 中可能会存在次级 MTDs,因此 MTDs 沉积内部可见不规则的界面。此外,

MTDs 沉积具有较强的侵蚀特性,在具备较强的动能时会将下伏的沉积地层冲蚀掉数米,甚至十几米,因此在 MTDs 主运移通道上多能见到侵蚀界面(图 7)。

3.4 JPC 取样

调查区域内布设了百余个 JPC(Jumbo Piston Corer, 大型活塞式重力取样器)取样,取样长度 4.5~5.0 m,调查区域内大部分的浊流沉积均被 MTDs 沉积所冲蚀或覆盖,因此所获取的样品主要为正常沉积和 MTDs 沉积物,少数 JPC 取样获取到了浊流沉积物。

根据 JPC 取样资料和浅地层剖面资料,浊流沉积物主要成分为非常软的黏土,部分含粉砂,在水深 1 000~1 500 m 沉积厚度一般为 20~80 cm。相对其上下的正常地层而言,浊流沉积物体现为较低的含水(38%~87%),较高的容重(15~18 kN/m³),较低的液限、塑限和塑性指数(表 1,其中 1.3 m 处试验

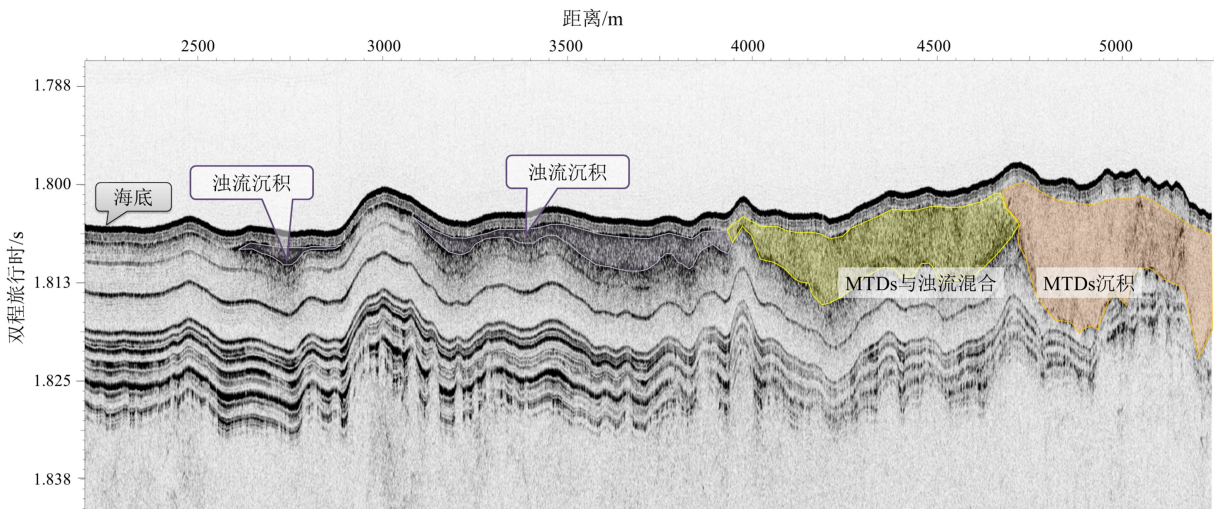


图 7 浅地层剖面——近期浊流与 MTDs 沉积 (图 1 中的 E-E’)
Fig.7 Sub-bottom profile – recent turbidity and MTDs deposits(At E-E’ of Fig.1)

表 1 浊流沉积 JPC 取样土质参数
Table 1 Soil parameters for JPC Sampling in turbidity area

样品深度/ m	含水/ %	容重/ (kN/m ³)	界限含水量/%			200#/ %	颗粒密度
			液限	塑限	塑性指数		
0.5	113	13.8	89.2	39.4	49.8	94	2.7
1.3	80	15.2	71.1	31.6	39.5	96	2.71
2	117	13.7	81	40.7	40.3	93	2.69
2.7	130	13.4	101.7	45.1	56.6	95	2.7
3.5	133	13.1	105.1	45.5	59.6	93	2.7
4.2	112	13.6	104	44.6	59.4	96	2.7
4.9	119	13.5	94.3	40.4	53.9	97	2.7

样品为浊流沉积物)。

MTDs 沉积物一般表现为较低的含水率和较高的容重,并且 MTDs 沉积物由于碎屑块体之间的形变和旋转,其土质特性在横向和纵向上均表现为较明显的差异,而正常沉积区域的土质特性则较为稳定。此外,在所获取的 MTDs 沉积物取样中,发现存在较多的泥碎屑和 MTDs 底部侵蚀面等特征(图 8),直接揭示了沉积环境的变化。



图 8 JPC 取样所获取的 MTDs 样品

Fig.8 MTDs sediment sample by JPC sampling

4 重力流沉积模式与分布

4.1 重力流沉积模式

Bouma 基于野外观察,总结了浊流沉积的沉积构造组合特征,并建立了浊积岩的特定层序鲍玛序列(Ta-e)^[7],是浊流沉积相中应用较为广泛的一类模式。鲍玛序列将浊积岩层序划分为:①A 段—粒序递变段;②B 段—下部平行纹层段;③C 段—波痕纹层段或称变形纹层段;④D 段—上部平行纹层段;⑤E 段—泥质段。但实际情况下,大多浊积岩序列都是不完整的,根据调查区域内的 JPC 取样,主要成分为非常软的黏土,部分含粉砂,对应鲍玛序列的 Td-e 段。

结合 JPC 取样、AMS¹⁴C 测年以及地球物理调查成果,调查区域内最近一次重力流地质事件发生于距今 5.5 ka 左右,短时间内连续发生了一系列的重力流沉积事件,按照发生的先后顺序,在本文中将为 4 个时期来描述:5.5 ka 前、浊流沉积、MTDs 沉积和近 5.5 ka 的沉积^[8-11]。

(1) 5.5 kaBP 前

根据调查区域西部的浅地层剖面,更早一期的重力流事件埋藏深度在海底以下约 20 m,结合测年分析为约 45 kaBP,而在此深度至近期的重力流事件之间,地层都是连续分布的。因此,45~5.5 kaBP 之间调查区域内为一段数万年的稳定深水沉积时期,期间未发生过可见的重力流事件,调查区域内这一时间段的沉积层厚度约为 8~12 m。

(2) 5.5 ka 浊流沉积

根据浊流沉积上覆的沉积物的 AMS¹⁴C 测年结果,浊流沉积发生于 5.5 kaBP 左右。

浊流沉积分布非常广,在调查区域内覆盖了超过 1000 km² 的区域,其平面分布呈扇状,流经之处并未发生明显的侵蚀痕迹,主要物源为峡谷 1。浊流沉积的分布受地形影响,优先堆积于海底凹陷处,而在海底凸起处沉积层厚度较薄或者无沉积(图 9)。

(3) 5.5 ka MTDs 沉积

紧跟着浊流沉积之后发生,主要来源为峡谷 1,其分布与浊流沉积类似,并且几乎将之前的浊流沉积全部覆盖或部分冲蚀,形成新的、更为崎岖的海底。MTDs 事件中根据 MTDs 的规模和能量,对下伏的浊流沉积地层有着不同的影响:较弱的 MTDs 会直接堆积在浊流沉积之上;稍强的 MTDs 会与浊流混合,或者冲蚀掉一部分浊流沉积(图 7、图 10③);较强的 MTDs 会将浊流沉积完全冲蚀掉,甚至将浊流下伏的正常沉积地层也一并冲蚀掉(图 7、图 10④)。

(4) 5.5 ka 至今

为一段较为稳定的自然沉积时期,在此期间形成了最表层海底沉积物(图 10⑤),沉积物厚度表现为水越浅沉积物越厚。调查区域内完成了超过 4000 km 的 AUV 调查,根据浅地层剖面上 4 万余个点位的资料,统计了调查区域内近 5.5 ka 以来的沉积速率,从水深约 200 m 的陆架边缘,到 1600 m 深的陆坡底部,沉积速率由 100 cm/ka 快速增至 400 cm/ka,而后逐步降低到约 25 cm/ka。此外,在 MTDs 沉积之后所形成的崎岖海底区,坡度较大(一般超过 6°)的区域未见明显的近期沉积。

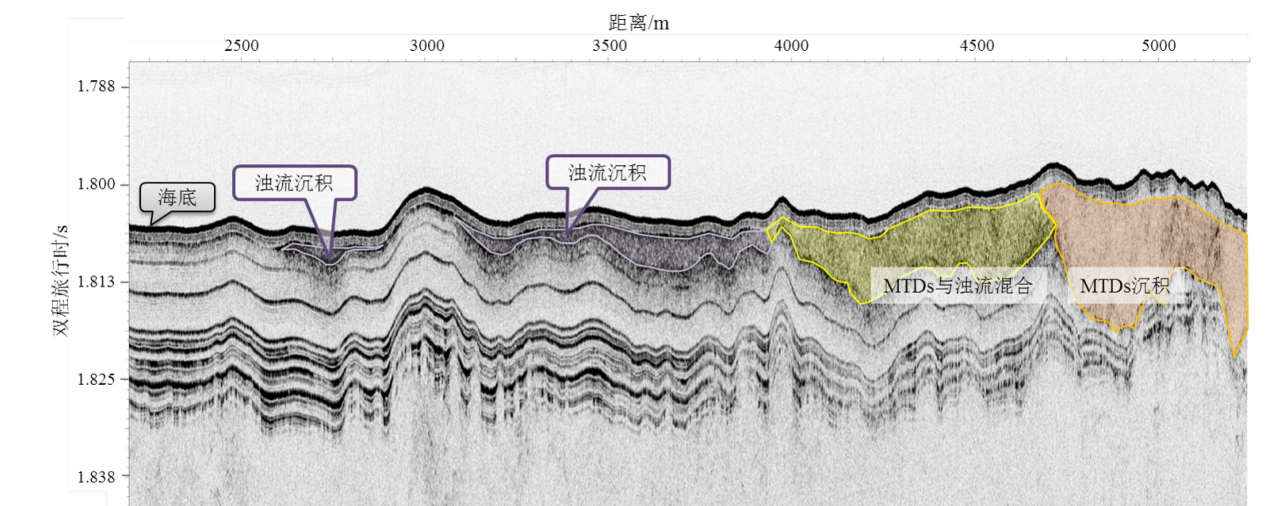


图 9 浅地层剖面——浊流堆积在海底凹陷处 (图 1 中的 D-D')

Fig.9 Sub-bottom profile— Turbidities in the seabed depressions(At D-D' of Fig.1)

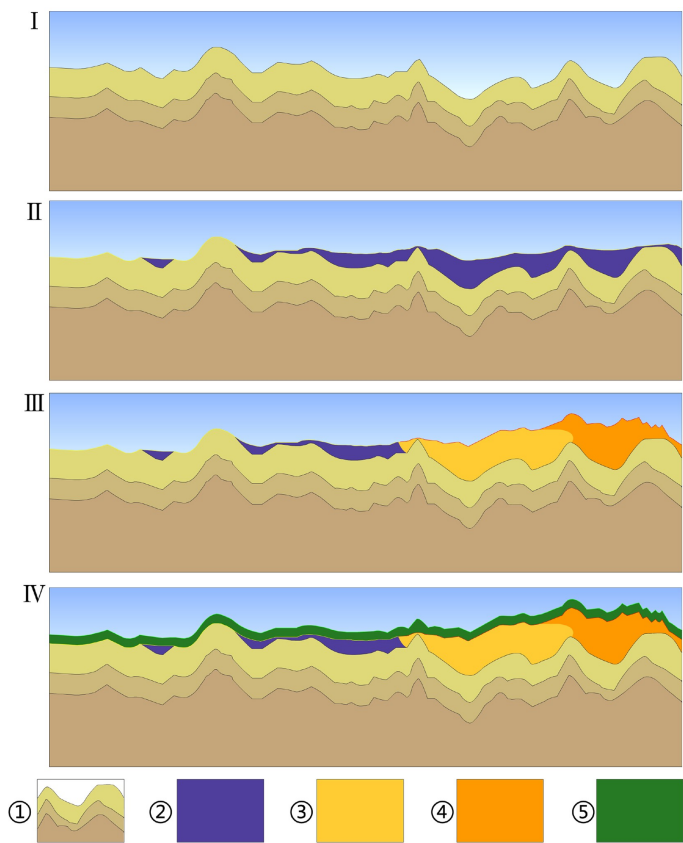


图 10 浊流与 MTDs 沉积模式

I 5.5 ka 前, II 5.5 ka, III 5.5 ka, IV 当今; ①正常沉积, ②浊流沉积, ③MTDs 与浊流混合, ④MTDs 将浊流完全冲蚀, ⑤近 5.5 ka 沉积。

Fig.10 Turbidity and MTDs sedimentary models

I Before 5.5 ka, II 5.5 ka, III 5.5 ka, IV Now; ①Normal deposition, ②Turbidity deposition, ③Mix of MTDs and Turbidity, ④Turbidity is depleted by MTDs completely, ⑤Deposition in 5.5 ka.

4.2 重力流分布特性

研究区域内的 3 处峡谷在历史上均产生了多次重力流事件, 而 5.5 ka 发生的这次重力流事件, 主要

由峡谷 1 滑塌引起, 由浅至深影响了大部分的调查区域。在水深约 1400~1600 m 的海底, 重力流沉积分布广泛, 东西向横跨约 30 km(图 11)。

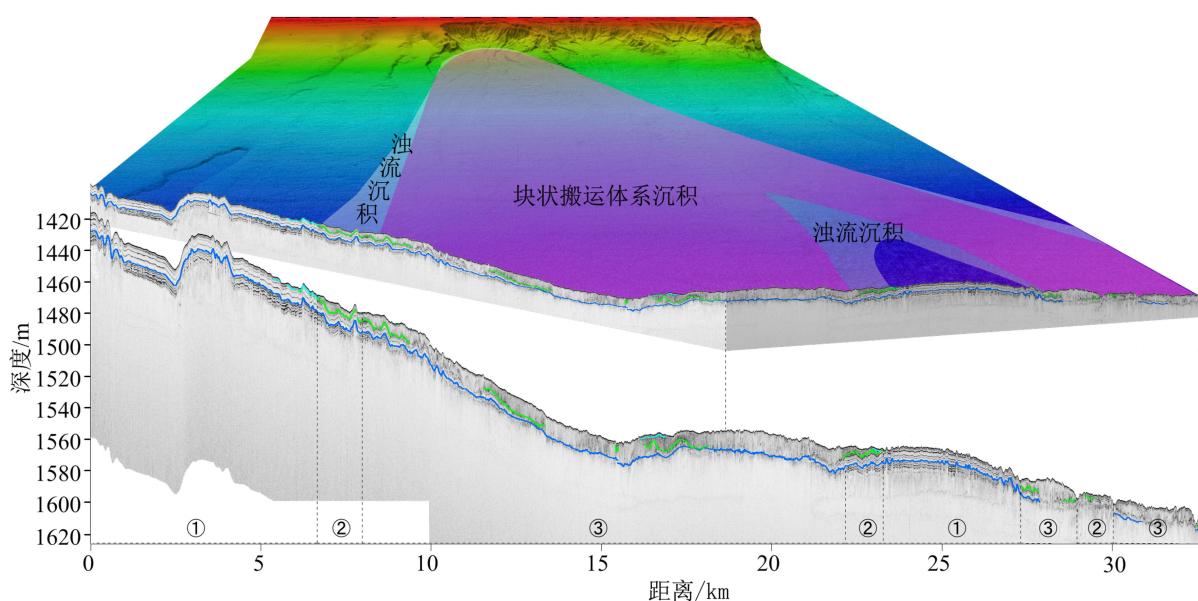


图 11 调查区域水深光照图及东-西向浅地层剖面 (图 1 中的 F-F')

①正常沉积, ②浊流沉积, ③MTDs 沉积。

Fig.11 3D Illumination map and W-E sub-bottom profile in survey area (at F-F' of Fig.1)

①Normal deposition, ②Turbidity deposition, ③MTDs deposition.

5 结论

(1) 船载多波束后向散射图能够较为准确地识别区域性重力流沉积区域以及表层沉积物的变化; AUV 搭载的浅地层剖面能够精确地识别地层的纵向差异; JPC 取样能够获取重力流沉积样品及其物理力学参数; 以上资料的综合分析, 是准确识别、研究和认识现代重力流沉积体系的重要方法。

(2) 研究区内最近的 2 期重力流沉积分别发生于距今 5.5 ka 左右和 45 ka 前, 重力流的发生一般都是由上陆坡区海底峡谷的活动引起的。

(3) 最近的一期重力流事件中, 先后发生了浊流沉积和 MTDs 沉积, MTDs 沉积过程中会对下伏地层产生明显的冲蚀现象。

(4) 在重力流沉积区进行水下结构物设计和施工时, 应特别关注重力流沉积引起的地形坡度变化, 以及地层中土质成分的差异, 可能对水下结构物的安装和维护产生的影响。

参考文献 (References)

- [1] Heezen B C, Ewing W M. Turbidity currents and submarine slumps and the 1929 Grand Banks (Newfoundland) earthquake [J]. *American Journal Science Series*, 1952, 250: 849-873.
- [2] Parker G, Garcia M, Fukushima Y, et al. Experiments on turbidity currents over an erodible bed [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1987, 25: 123-147.
- [3] Garcia M. Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, 120: 1 240-1 263.
- [4] Huang H, Imran J, Pirmez C. Numerical modeling of poorly sorted depositional turbidity currents [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: 1-15.
- [5] Bouma A H, Normark W R, Barnes N E. Submarine Fans and Related Turbidite Systems [M]. New York: Springer Verlag, 1985: 351.
- [6] Talling P J, Masson D G, Sumner E J, et al. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. *Sedimentology*, 2012, 59 (7): 1 937-2 003.
- [7] Bouma A H. Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 168.
- [8] 秦志亮. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的沉积过程、分布及成因研究 [D]. 中国科学院研究生院. 2012. [QIN Zhiliang. Study on the sedimentary process, distribution and genesis of the transport sedimentary system on the northern continental slope of the South China Sea [D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences. 2012.]
- [9] 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用 [J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007 (6): 771-777. [SHAO Lei, LI Xuejie, GENG Jianhua, et al. Deepwater undercurrent sedimentation in the northern South China Sea [J]. *Chinese Science: part D: Geoscience*, 2007 (6): 771-777.]
- [10] 王大伟, 吴时国, 董冬冬, 等. 琼东南盆地第四纪块体搬运体系的地

- 震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009(3): 69-74. [WANG Dawei, WU Shiguo, DONG Dongdong, et al. Seismic characteristics of Quaternary block transport system in Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009(3): 69-74.]
- [11] 王俊勤, 张广旭, 陈端新, 等. 琼东南盆地陵水研究区海底地质灾害类型、分布和成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019(4): 87-95. [WANG Junqin, Zhang GUANGXU, CHEN Duanxin, et al. Types, distribution and genetic mechanism of submarine geological disasters in Lingshui study area of Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2019(4): 87-95.]
- [12] 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009(5): 65-72. [WANG Dawei, WU Shiguo, QIN Zhiliang, et al. Structure and identification characteristics of large block transport system on the continental slope of the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009(5): 65-72.]
- [13] 袁圣强, 吴时国, 赵宗举, 等. 南海北部陆坡深水区沉积物输送模式探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010(4): 39-48. [YUAN Shengqiang, WU Shiguo, ZHAO Zongju, et al. Discussion on sediment transport model in deep water area of northern continental slope of South China Sea [J]. Marine geology and Quaternary geology, 2010(4): 39-48.]
- [14] 张娜, 姜涛, 张道军. 琼东南盆地海底地形地貌特征及其对深水沉积的控制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012(5): 27-33. [ZHANG Na, JIANG Tao, ZHANG Daojun. Seafloor topography and geomorphology in Qiongdongnan Basin and its control on deep-water sedimentation [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012(5): 27-33.]
- [15] 庞雄, 陈长民, 朱明. 深水沉积研究前缘问题[J]. 地质论评, 2007(1): 36-42. [PANG Xiong, CHEN Changmin, ZHU Ming. Frontier problems in the study of deep-water sedimentation [J]. [A review of geology](#), 2007(1): 36-42.]
- [16] 徐景平. 海底浊流研究百年回顾[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2014(10): 98-105. [XU Jingping. A hundred-year review of the study of submarine turbidity current [J]. Journal of Ocean University of China: natural Science Edition, 2014(10): 98-105.]
- [17] 姜辉. 浊流沉积的动力学机制与响应[J]. 石油与天然气地质, 2010, 8(8): 428-435. [JIANG Hui. Dynamic mechanism and response of turbidity current deposition [J]. Petroleum and natural gas geology, 2010, 8(8): 428-435.]
- [18] 李利阳. 浊流沉积研究的新进展: 鲍马序列、海底扇的重新审视[J]. 沉积与特提斯地质, 2015(4): 106-112. [LI Liyang. New progress in the study of turbidite deposits: re-examination of Baoma sequence and subsea fan [J]. [Sedimentation and Tethys geology](#), 2015(4): 106-112.]
- [19] 孙国桐. 深水重力流沉积研究进展[J]. 地质科技情报, 2015(3): 30-36. [SUN Guotong. Research progress of gravity flow deposition in deep water [J]. Geological science and technology information, 2015(3): 30-36.]
- [20] 梁建设, 田兵, 王琪, 等. 深水沉积理论研究现状、存在问题及发展趋势[J]. 天然气地球科学, 2017(10): 1488-1496. [LIANG Jian, TIAN Bing, WANG Qi, et al. Research status, existing problems and development trend of deepwater sedimentation theory [J]. Natural Gas Geoscience, 2017(10): 1488-1496.]
- [21] Laval A, Cremer M, Beghin P, et al. Density surges: Two-dimensional experiments [J]. Sedimentology, 2010, 35(1): 73-84.
- [22] Marr J G, Harff P A, Shanmugam G, et al. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures [J]. [Geo-logical Society of America Bulletin](#), 2001, 113(11): 1377-1386.
- [23] Yin M, Rui Y. Laboratory study on submarine debris flow [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(8): 950-958.