

文章编号:1673-5005(2011)05-0014-06

南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义

王大伟^{1,2}, 吴时国^{1,2}, 吕福亮³, 王彬³

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院海洋研究所 海洋油气研究中心, 山东 青岛 266071; 3. 中石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310013)

摘要:依据块体搬运沉积体系的地球物理识别特征,利用最新采集的二维和三维高分辨率地震资料,在南海深水区域的琼东南盆地、白云凹陷和文莱深水地层中发现了块体搬运沉积体系(MTDs);建立典型MTDs的沉积模式,探讨MTDs的深水油气勘探意义。结果表明:MTDs表现为弱振幅和反射杂乱的特点,发育正断层、逆冲断层、挤压脊和褶皱等沉积构造;典型的MTDs可以划分为头部拉张区域、体部滑移-挤压区域和趾部挤压区域3个结构单元;MTDs主要是富泥沉积物,在深水油气勘探中往往充当良好盖层,容易与浊流沉积体系一起形成深水地层圈闭,也有部分MTDs是富砂沉积物,可以成为潜在油气储层。

关键词:南海;深水;块体搬运沉积体系;沉积模式;地震识别特征

中图分类号:TE 121.3 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.003

Mass transport deposits and its significance for oil & gas exploration in deep-water regions of South China Sea

WANG Da-wei^{1,2}, WU Shi-guo^{1,2}, LÜ Fu-liang³, WANG Bin³

(1. *Key Laboratory of Marine Geology & Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*

2. *Marine Oil & Gas Research Center, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*

3. *Hangzhou Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou 310013, China)*

Abstract: Based on the geophysical identification characteristics, by the high resolution deep water 2D and 3D seismic data, the mass transport deposits (MTDs) were found in the deep-water formations of the South China Sea, which includes Qiongdongnan Basin, Baiyun Sag and Brunei. The sediment model of MTDs was built, and its significance for deep-water oil and gas exploration was discussed. The results show that MTDs are characterized by low amplitude, chaotic and translucent seismic reflection. And they are easy to form many sedimentary structures such as normal fault, thrust fault, pressure ridge and fold. The typical MTDs can be divided into three sections such as tensional head, compressive body and toe. MTDs are mainly mud-rich sediments and can usually be as excellent cover, and form deep-water trap cooperation with turbidity system. A little fraction of sand-prone MTDs can be a potential reservoir.

Key words: South China Sea; deep water; mass transport deposits system; sediment model; seismic identification characteristics

块体搬运沉积体系(mass transport deposits, 简称MTDs)是陆源碎屑向深海大洋输送的主要方式之一,无论是在被动大陆边缘还是主动大陆边缘都

经常发生^[1]。MTDs是广泛发生在外陆架-上陆坡、峡谷、隆起(火山、底辟和盐丘等)翼部、水道侧壁的一种沉积物搬运机制,包括滑动、滑塌和碎屑流等重

收稿日期:2011-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40906028);中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-229);中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放课题(MGE2010KG07)

作者简介:王大伟(1976-),男(汉族),黑龙江绥化人,助理研究员,博士,主要从事深水地质及油气研究。

力流作用过程及其沉积物^[2-3]。在全球“从源到汇”研究计划中,MTDs作为大陆边缘沉积物质扩散系统的物质搬运方式之一,是深水沉积体系的重要研究内容^[4],已成为国际深水研究的热点。笔者采用MTDs这一概念,并通过研究区内的地震资料分析该深水沉积作用,探讨其油气勘探意义。

1 南海 MTDs 分布特征

南海发育有大量 MTDs,利用最新的高分辨率二维和三维地震资料,分别在琼东南盆地和白云凹陷的第四纪及文莱的现今海底中发现了 MTDs(图 1)。

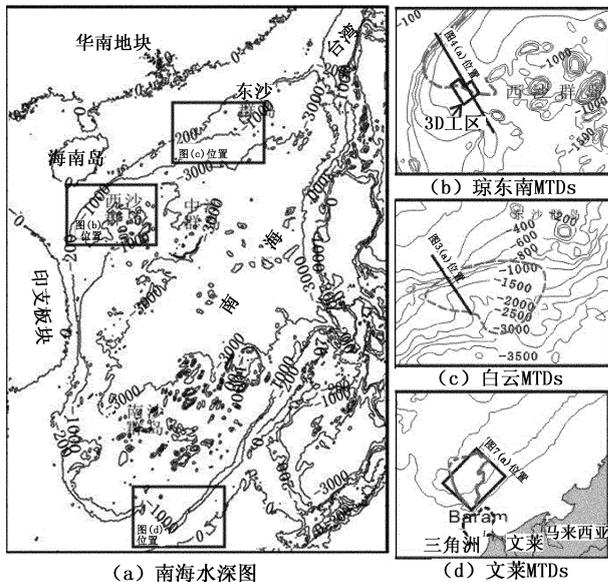


图 1 南海 MTDs 分布

Fig. 1 MTDs distribution in the South China Sea

1.1 琼东南 MTDs

琼东南盆地位于海南岛与西沙群岛之间的海域,海水由北西向南东变深,从 90~200 m 迅速加深至约 2 km。自中新世末(10.5 Ma)以来,盆地虽处于裂后期,但与典型的被动模式不同,裂后阶段南海北部仍有较强烈的构造活动,并有一系列构造热事件发生,主要表现为构造沉降加速、幔源岩浆活动、新断裂体系形成及大规模盆地热流体活动^[5]。至今有些构造活动仍在发育,这些都为 MTDs 的形成提供了触发机制。MTDs 主要分布在海南隆起-莺歌海盆地-西沙隆起之间的盆地内部(图 1(b))。

1.2 白云 MTDs

白云凹陷处于南海北部陆架到陆坡区,呈近东西走向,水深多为 0.5~1.5 km,为南海北部最大的一个深水凹陷。古珠江强大的物源输送能力给白云凹陷提供了充沛的物源,在裂陷期和热沉降期白云主洼快

速沉降,形成了巨厚沉积;从晚中新世到第四纪为白云凹陷新构造期,受菲律宾板块新构造期 NWW 向俯冲影响,凹陷内发育大量的晚期断层^[6];前人研究发现白云凹陷在晚期很可能经历过超压释放作用^[7],凹陷内有广泛的底辟构造。从海底地形地貌、沉积物源、构造活动及压力条件看,白云凹陷具备发育 MTDs 的诸多条件。调查研究发现,白云凹陷第四系 MTDs 沉积分布可达 13 000 km²^[8](图 1(c))。

1.3 文莱 MTDs

南沙海槽盆地是南海南部主动大陆边缘的一个前陆盆地,呈 NE-SW 向的 U 形海槽,南坡较陡,水深大于 2.8 km,容易发育 MTDs。新近纪由于澳大利亚板块向北运动与欧亚板块南端的岛弧碰撞挤入,在陆上形成了高耸的基纳巴卢山脉,在海上由于逆冲体的荷载而形成了南沙海槽前陆盆地。巴兰河从基纳巴卢山脉带走大量物源物质,发育了巴兰三角洲。调查发现,地层中有巨型坍塌、滑塌和碎屑流沉积物质^[9]。在文莱深水区中发现海底表层存在 MTDs(图 1(d)),并且构成了 50% 的沉积层序^[10]。

2 MTDs 沉积模式及地震识别特征

在地震识别尺度内,代表 MTDs 的地震反射同相轴从轻微变形到严重变形、连续性从好到差,振幅变化也比较明显。MTDs 内部地层的变形情况主要取决于变形部位的应力条件和重力流类型,根据地震反射特征可以判断沉积时的重力流过程(表 1)。

表 1 块体搬运沉积体系的重力流过程

Table 1 Gravity flow process of MTDs

重力流过程	地震识别特征
滑动	无明显变形的连续性块体,强振幅、高连续性
滑塌	挤压脊,叠瓦状滑动,不规则的上覆地层接触,双重构造,强烈变形
碎屑流	巨大的漂块和分离块体,不规则上覆地层接触,侧向尖灭,定向挤压脊和侵蚀沟(谷),弱振幅的杂乱反射

二维地震剖面中主要利用同相轴的反射特征识别 MTDs,三维地震资料中主要利用地震属性分析 MTDs 沉积构造的平面特征。本文中主要采用相干体技术分析 MTDs 的沉积特征,可以识别同沉积逆冲断层、侵蚀沟槽和侧向挤压脊等沉积构造。

2.1 典型 MTDs 沉积模式

根据南海 MTDs 的地震剖面,分析 MTDs 的搬运过程和受力特征,建立 MTDs 的沉积模式(图 2),将一个典型的 MTDs 划分为 3 个结构单元:

(1) 头部拉张区域。岩体受拉张作用而发生崩

塌,一般发育上倾陡崖或犁式正断层,并且断面终止于底部的滑移面,失稳物质在重力作用下沿陆坡向下搬运,并发育侧面陡壁,坡度一般为 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。

(2) 体部滑移-挤压区域。随着地形的逐渐平缓,动能逐渐减小,碎屑逐渐发生沉积。MTDs有一定侵蚀能力,对底部地层产生侵蚀,容易形成侵蚀沟槽,并在有些区域形成坡坪;同时,携带块体中的大型块体也可能沉积下来,形成漂块。

(3) 趾部挤压区域。MTDs逐渐失去动能,边流动边沉积,具有塑性流体特征。挤压作用是MTDs趾部的主要受力特征,因此会发育许多由挤压而形成的长条形塑性沉积体(挤压脊或逆冲断层构造),呈平行或亚平行分布,并与流动方向垂直。

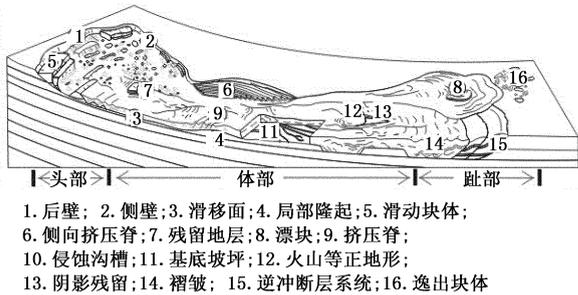


图2 块体搬运沉积体系的沉积模式

Fig.2 Sediment model of MTDs

不同结构单元发育不同的重力流过程,并且彼此之间存在重力流演化,例如白云 MTDs(图3),从头部到趾部依次发育滑动、滑塌和碎屑流等重力流过程,并且在沉积过程中或沉积之后受到等深流或

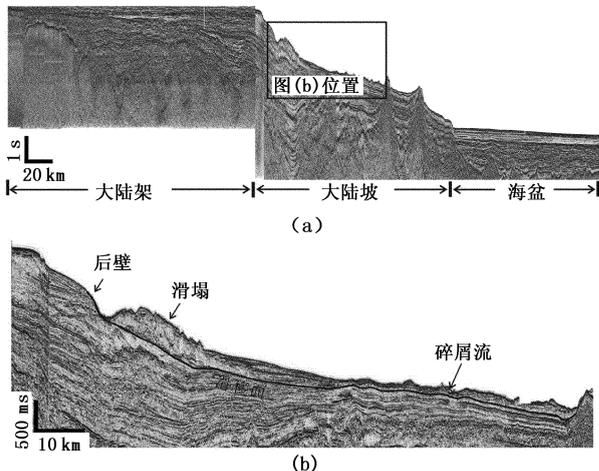


图3 典型 MTDs(白云 MTDs)

Fig.3 Typical MTDs(Baiyun MTDs)

水道的改造,使后壁也不易识别。但是,并不是所有 MTDs 都具有典型 MTDs 的沉积特征,发育完整的重力流演化过程,例如琼东南盆地 MTDs(图4),坡折

带发育滑动和滑塌,坡脚发育滑塌,在盆地内部发育碎屑流。

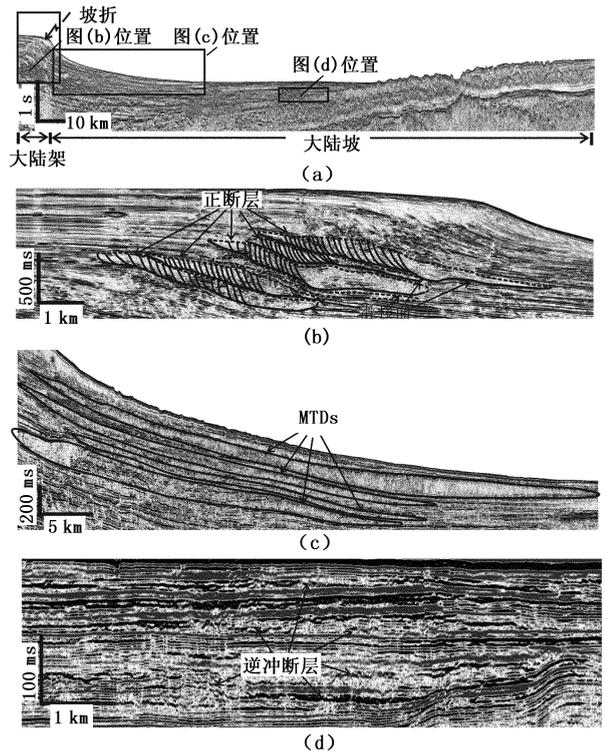


图4 重力流类型不完整的 MTDs(琼东南 MTDs)

Fig.4 Non-typical MTDs(Qiongdongnan MTDs)

2.2 沉积构造的地震识别特征

MTDs 的不同结构单元处于不同的应力场环境中,发育不同的沉积构造,具有不同的地震识别特征。头部主要受到拉张应力作用,发育正断层,容易形成滑动块体;受到应力条件和坡度变化的影响,滑动将演化成滑塌;由于周围地层的不断捕获,加之不断的搅拌,继而形成具有塑性流体特征的碎屑流;最终塑性流体在开阔区域散开或受到阻挡,失去动能逐渐沉积下来。

2.2.1 滑动块体、滑塌体

MTDs 的头部范围以一个或多个陡倾斜面为标志,在斜坡顶部形成陡崖,倾斜角度为 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$,称之为后壁(图3)。这些断面向深部逐渐变缓,并成为 MTDs 的滑移面。在每套滑塌体中可以揭示出滑移面,位于滑塌地层的底部。在滑移面的上倾方向发育犁式正断层,并且呈阶梯状逐渐交于底部的滑移面(图4(b))。在滑移面的下倾方向,发育杂乱地震反射相,具有很差的连续性和弱振幅。这说明陆架坡折带的沉积地层主要受到沿陆坡向下的拉张应力作用,容易形成具有明显阶梯状的犁式断层,并在犁式断层的下倾方向逐渐堆积,形成上部滑动、下

部滑塌的重力流沉积。

2.2.2 弱振幅透镜体或丘状体

如果滑动或滑塌型重力流获得足够的能量,就会沿着坡折带下的斜坡继续向前流动,在坡度较小的区域失去动能,或继续向前流动,遇到正地形的阻挡而停留下来。这种重力滑塌成因的沉积物,可以沉积在斜坡上,也可以沉积在盆地中,并且具有明显的地震剖面特征。

在琼东南盆地中,可以清晰地识别出弱振幅杂乱反射地震相(图 4(c)),与其他地层之间呈现逐渐尖灭的渐变接触关系,或者是近乎垂直的突变接触关系。外形上具有中间厚、两翼薄、逐渐尖灭的丘形特征,无法分辨内部的沉积地层。

2.2.3 同沉积逆冲断层

在隆起前的缓坡地带,通过二维地震剖面(图 4(d))可以清晰识别出剖面由同沉积逆冲断层构成的双重构造。为了展现同沉积逆冲断层在平面上及剖面上的更多细节,利用位于同一区域的三维地震数据(图 1(b)),通过对某期 MTDs 的底界面进行解释,并将该界面进行层位拉平处理,提取了 MTDs 内部的相干体切片(图 5)。相干时间切片显示 MTDs 的内部整体比较杂乱,反映了 MTDs 内部物质分选差、杂乱无章的构成;局部发育褶皱及逆冲断层构造,相似性差的白色条带呈现 NE 向分布。

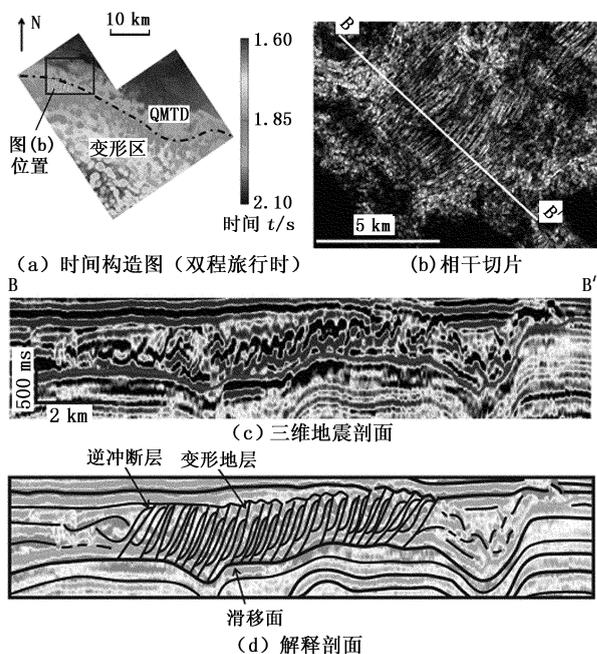


图 5 逆冲断层(琼东南 MTDs)

Fig. 5 Thrust fault(Qiongdongnan MTDs)

2.2.4 侵蚀沟槽

在三维地震资料中,可以观测到 MTDs 底界面

发育一定长度和宽度的侵蚀沟槽(图 6)。侵蚀沟槽出现在下伏地层中,形成的原因有两种:①高速流体对下伏地层的侵蚀;②高速流体携带的漂块发生跳跃前进,对底部地层产生冲蚀。琼东南 MTDs 在演化成高速流体之后对下伏地层产生侵蚀,形成 NW-SE 向的一系列侵蚀沟槽。在相干体时间切片上的侵蚀沟槽边界表现为连续性很差的白色条带,条带之间具有一定宽度,最宽处可以达到 1.5 km,可见高速流体对下伏地层的侵蚀很强。

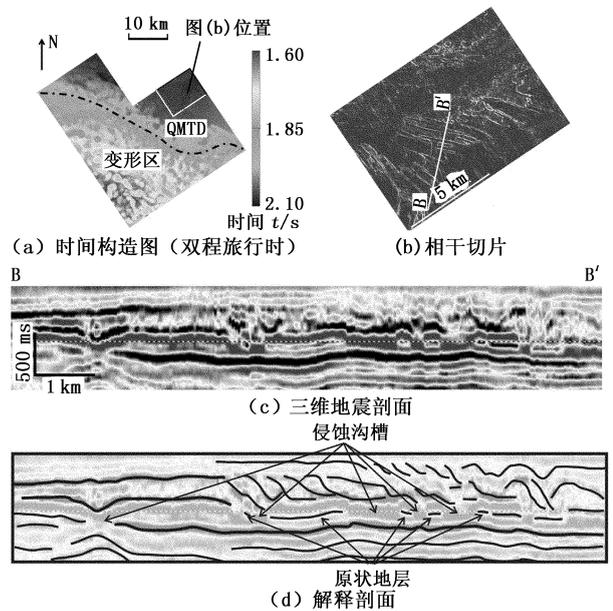


图 6 侵蚀沟槽(琼东南 MTDs)

Fig. 6 Erosion groove(Qiongdongnan MTDs)

2.2.5 侧向挤压脊

挤压构造在地震剖面中呈相互平行的连续反射,向陆一侧较陡,另一侧稍缓。主要分布 MTDs 的趾部或侧翼,呈现叠瓦状地震反射特征(图 5(c)、7(c))。但是,侧翼与趾部的挤压构造具有明显的成因上和规模上的差别。趾部逆冲结构主要是 MTDs 受到正地形的阻挡而逐渐沉积形成,一般厚度较大,有的达到数百米(如挪威大陆边缘的 MTDs)。与趾部的挤压构造不同,侧翼的挤压构造主要是由于 MTDs 带走了原地沉积物,使得侧翼挤压力变小而导致垮塌,称为补偿性的挤压构造,并且规模相对比较小。从物源区开始,文莱 MTDs 在重力作用下沿陆坡搬运,滑塌的同时部分搬运物质也不断沉积。研究区东部存在一个明显的陡壁,代表 MTDs 的侧面边界。陡壁西侧(或研究区中部)的平行亚平行旋转和逆冲断块形成挤压脊构造(图 7)。

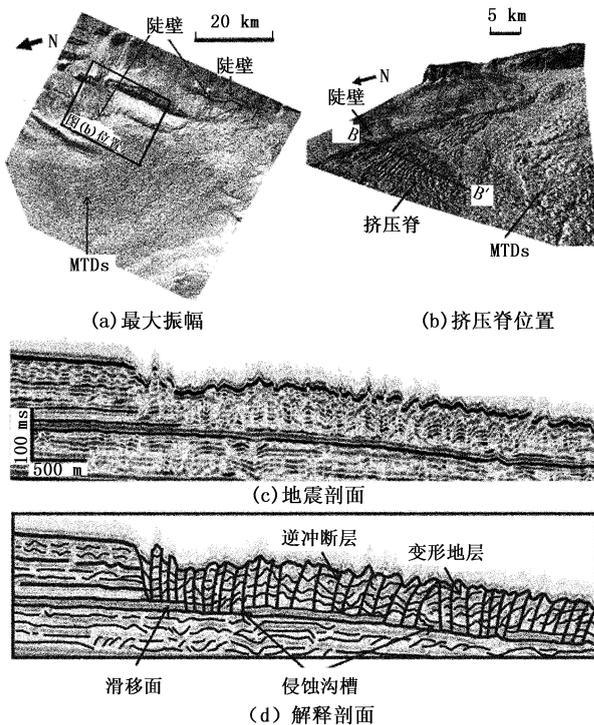


图7 侧向挤压脊(文莱 MTDs, 据 McGilvery, 2003)

Fig. 7 Lateral pressure ridge

(Brunei MTDs, after McGilvery, 2003)

3 MTDs 对深水油气勘探的研究意义

深水沉积环境中的 MTDs 是由陆架-陆坡区沉积物经过再次搬运沉积形成,对原生地层有极大的破坏力,并且多数沉积物富含泥质,通常不作为油气研究目标。最新的三维地震勘探表明,在世界许多大陆边缘深水盆地中的第四纪沉积物中发育大量 MTDs^[11-13]。在进行深水油气勘探的过程中,MTDs 作为陆架-陆坡区沉积物的重要组成部分是无法回避的研究内容。随着深水沉积环境逐渐深入,MTDs 的科学意义及其对深水油气勘探的研究意义越来越彰显出来。

3.1 与深水油气储层关系密切

由于 MTDs 是对原生沉积物的再次搬运,MTDs 的物性主要取决于物源。陆架-陆坡区域的沉积物多以泥质沉积物为主,MTDs 通常是富含泥质的沉积物,具有典型低孔、低渗特征,并且在深水环境中非常发育,可以作为一种良好的区域性顶部封闭和侧向封闭地层。例如,基卡(Kikeh)和古穆苏特(Gumusut)油田,MTDs 充当深切河道储层的侧向封闭^[2]。同时,陆架-陆坡区内富含砂质的三角洲或浊流水道沉积物,也可以成为 MTDs 的物源,形成具有良好物性的地层,如果有油气注入就可以成为具

有开发价值的油田。例如:Statfjord 油田的储层是河流砂岩形成的 MTDs^[14]; Hackberry 渐新世低位扇,储层由斜坡上下滑的 MTDs 和深海低洼区的河道充填沉积物构成^[15]; IODP308 航次 1320 钻孔的 MTC3 中发现厚度为 18 m 的连续砂岩^[16]。

3.2 有助于形成岩性圈闭

MTDs 是一种重力流体系,具有很强的侵蚀能力,可以改变下伏地层的产状、连通性,形成侵蚀沟槽和残留地层。具有良好封闭性的 MTDs,与孔渗性好的残留地层结合,容易形成地层岩性油气藏。Weimer 和 Slatt^[2]总结了 13 种浊积砂作为储层的深水圈闭样式,其中深水地层圈闭主要是砂体上倾尖灭和两种由水道下切作用所形成的地层圈闭。最新研究^[3]发现,MTDs 在前进过程中遇到隆起发生分流作用,隆起之后的原状地层能够保留下来,形成一个像彗星一样的“尾巴”(erosional shadow remnants, 简称 ESRs),称为阴影残留,如果阴影残留是砂质沉积物,容易形成良好的储层。尽管这种潜在的圈闭类型尚未被深水油气勘探实例所证实,但随着深水油气勘探程度的提高,这种地层圈闭有可能成为油气勘探目标。

3.3 地质灾害与深水工程研究意义

深水钻探、管线设计和定位中,海底稳定性是主要调查内容之一,忽略它会导致一些工程上的巨大损失^[17]。由于 MTDs 与其上覆和下伏深海沉积物具有不同级别的胶结度,并且块体搬运体系变形中的脱水作用导致块体沉积物含水率比上覆和下伏的沉积物低约 15%~20%^[18],造成海底的不稳定。此外,现今海底形成的 MTDs 是陆坡主要地质灾害类型之一,可能导致巨大破坏性的海啸,严重威胁着海洋工程安全,因此调查浅层 MTDs 的分布非常重要。

4 结论

(1) MTDs 具有明显的地震识别特征,表现为弱振幅和反射杂乱的特点,并发育正断层、逆冲断层、挤压脊和褶皱等沉积构造。

(2) 按照搬运过程和应力场环境,一个典型的 MTDs 可划分为 3 个结构单元:①头部拉张区域,发育阶梯状的犁式断层,形成滑动块体;②体部滑移-挤压区域,滑动将演化成滑塌,继而演化成碎屑流;③趾部挤压区域,发育同沉积逆冲断层。

(3) MTDs 研究有助于揭示陆架-陆坡体系中陆源碎屑物质向深水区域的输送机制,对深水储层预测、圈闭评价有重要的研究意义,同时对深水钻探工

程安全具有重要价值。

参考文献:

- [1] WU S, WONG H K, LÜDMANN T. Gravity driven sedimentation on the northwest continental slope of the south China Sea; results from high-resolution seismic data and piston cores [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1999,17(2):155-169.
- [2] WEIMER P, SLATT R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings[C]. *AAPG Studies in Geology* 57, SEPM Special Publication, 2007.
- [3] MOSCARDELLI L, WOOD L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad [J]. *Basin Research*, 2008,20:73-98.
- [4] 李铁刚,曹奇原,李安春,等.从源到汇:大陆边缘的沉积作用[J].*地球科学进展*, 2003,18(5):713-722.
LI Tie-gang, CAO Qi-yuan, LI An-chun, et al. Source to sink: sedimentation in the continental margins [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2003,18(5):713-722.
- [5] 李思田,林畅松,张启明,等.南海北部大陆边缘盆地模式裂隙的动力过程及10 Ma 以来的构造事件[J].*科学通报*, 1998,43(8):797-810.
LI Si-tian, LIN Chang-song, ZHANG Qi-ming, et al. Dynamic process of episodic rifting in continental marginal basin and tectonic events since 10Ma in South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998,43(8):797-810.
- [6] 朱伟林,张功成,杨少坤,等.南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [7] 石万忠,陈红汉,陈长民,等.珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟[J].*地球科学——中国地质大学学报*, 2006,31(2):229-236.
SHI Wan-zhong, CHEN Hong-han, CHEN Chang-min, et al. Modeling of pressure evolution and hydrocarbon migration in the Baiyun depression, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2006,31(2):229-236.
- [8] 孙运宝,吴时国,王志君,等.南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征[J].*海洋地质与第四纪地质*, 2008,28(6):69-77.
SUN Yun-bao, WU Shi-guo, WANG Zhi-jun, et al. The geometry and deformation characteristics of Baiyun submarine landslide [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008,28(6):69-77.
- [9] 吴世敏,周蒂,刘海龄.南沙地块构造格局及其演化特征[J].*大地构造与成矿学*, 2004,28(1):23-28.
WU Shi-min, ZHOU Di, LIU Hai-ling. Tectonic framework and evolutionary characteristics of Nansha Block, South China Sea [J]. *Geotectonica et Metallogeni*, 2004,28(1):23-28.
- [10] MCGILVERY T, COOK D. The influence of local gradients on accommodation space and linked depositional elements across a stepped slope profile, offshore Brunei [C]//ROBERTS H, ROSEN N, FILLON R, et al. Gulf Coast Section-SEPM Foundation 23rd Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2003:23-55.
- [11] BEAUBOUEF R, ABREU V, WAGONER J. Basin 4 of the Brazos-Trinity slope system, western Gulf of Mexico: The terminal portion of a late Pleistocene lowstand systems tract [C]//ROBERTS H, ROSEN N, FILLON R, et al. Gulf Coast Section-SEPM Foundation 23rd Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2003:182-203.
- [12] NEWTON S, MOSHER D, SHIPP C, et al. Importance of mass transport complexes in the Quaternary development of the Nile Fan, Egypt [C]. Houston: OTC, 2004:OTC16742.
- [13] 刘保华,李西双,赵月霞,等.冲绳海槽西部陆坡碎屑沉积物的搬运方式:滑塌和重力流[J].*海洋与湖沼*, 2005,36(1):1-9.
LIU Bao-hua, LI Xi-shuang, ZHAO Yue-xia, et al. Debris transport on the western continental slope of the okinawa trough: slumping and gravity flowing [J]. *Oceanologia & Limnologia Sinica*, 2005,36(1):1-9.
- [14] HESTHAMMER J, FOSSEN H. Evolution of geometries of gravitational collapse structures with examples from Statfjord field, northern North Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999,16:259-281.
- [15] COSSEY S, JACOBS R. Oligocene Hackberry formation of southwest Louisiana: sequence stratigraphy, sedimentology, and hydrocarbon potential [J]. *AAPG Bull*, 1992,76:589-606.
- [16] BEAUBOUEF R, ABREU V. MTCs of the Brazos-Trinity slope system thoughts on the sequence stratigraphy of MTCs and their possible roles in shaping hydrocarbon traps [M]. New York: The springer-Verlag Press, 2010:475-490.
- [17] HOFFMAN J, KALUZA M, GRIFFITHS R, et al. Addressing the challenges in the placement of seafloor infrastructure on the East Breaks Slide [C]. Houston: OTC, 2004:OTC16748.
- [18] PIPER D, PIRMEZ C, MANLEY P, et al. Mass-transport deposits of the Amazon fan [C]//FLOOD R, PIPER D, KLAUS A, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results, 1997:109-146.