

doi:10.3799/dqkx.2011.095

琼东南盆地深水块体流构成及其沉积特征

何云龙^{1,2}, 解习农¹, 陆永潮¹, 李俊良³, 张成¹, 姜涛¹, 苏明¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510640

3. 中国海洋石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 为了深化对琼东南盆地深水区沉积体系的认识, 基于琼东南盆地深水区 2D 和 3D 地震资料, 发现琼东南盆地深水区发育大量的块体流沉积。通过对块体流沉积进行精细刻画, 识别出一些典型的块体流沉积特征: 滑移体、陆坡陡崖、搬运块体、残余块体、挤压脊、逆冲断层以及块体流顶部的滞留沉积等。陡倾陆坡上块体流以杂乱反射为特征, 地层变形剧烈, 而宽缓陆坡上块体流以发育地层变形微弱的滑移体为特征, 反映出陆坡角度对于块体流发育及其内部结构特征有明显的控制作用。大规模块体流沉积作为深海沉积的重要组成部分, 对于深海沉积物的空间展布具有重要的控制作用: 一方面, 通过不规则顶部影响随后沉积物的输送通道和沉积体的内部结构; 另一方面, 对已沉积的地层产生直接的侵蚀作用, 破坏原始沉积地层的内部结构, 造成潜在储层中地质流体的逸散。因此, 鉴于块体流对深水沉积体系重要的影响, 有必要加强对块体流沉积的精细研究, 以更好地指导深水油气勘探。

关键词: 南海北部; 琼东南盆地; 块体流; 沉积; 海洋地质。

中图分类号: P736.1

文章编号: 1000-2383(2011)05-0905-09

收稿日期: 2011-05-24

Architecture and Characteristics of Mass Transport Deposits (MTDs) in Qiongdongnan Basin in Northern South China Sea

HE Yun-long^{1,2}, XIE Xi-nong¹, LU Yong-chao¹, LI Jun-liang³, Zhang Cheng¹, JIANG Tao¹, SU Ming¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou 510640, China

3. China National Offshore Oil Corporation Limited, Zhanjiang 524057, China

Abstract: In order to understand the deepwater depositional system in Qiongdongnan basin better, this study interprets the deepwater depositional architectures based on the regional 2D and 3D seismic data and it is found that large-scale MTDs are well developed in Qiongdongnan basin. According to the detailed study on MTDs, typical elements have been identified such as slide, escarpment, transported blocks, remnant blocks, compression ridge, thrust fault and ponded depositon on the irregular top surface. The MTDs on the slope with steep angles are characterized by chaotic seismic facies with tense deformation, while those on the gentle-angle slope are characterized by the slide with less deformation, which indicates that the angle of the slope has obvious control effect on the development and internal architecture features of MTDs. Being regarded as an important part of deepwater deposition, MTDs have an important effect on the spatial distribution of sediment in deepwater. On the one hand, the irregular top surface of MTDs affects the distribution and internal architecture of succedent sediments; on the other hand, MTDs erodes the former strata directly and wrecks the internal structure of former strata. And also, the erosion can give rise to effusion of the fluid in potential reservoir. Hence, according to its important role in deepwater deposition system, it is necessary to further the elaborate study on the MTDs to make the deepwater exploration more efficiently.

Key words: northern South China Sea; Qiongdongnan basin; mass-transport deposits (MTDs); sedimentation; marine geology.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 91028009); 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室开放基金资助项目(MSGL11-04); 国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2007CB411705-05); 国家自然科学基金青年基金项目(No. 41002031); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项基金(No. 2011029060).

作者简介: 何云龙(1983-), 男, 博士生, 主要从事海洋沉积学及其能源效应研究. E-mail: heyunlong06@163.com

深海块体流沉积(MTDs)是指在深海环境中由于重力失稳而导致大规模重力流的发生,由此产生大规模复合沉积体,包括滑移体(Slide)、滑塌体(Slumping)和碎屑流沉积(Debris flow)这3种重力流沉积类型.由于块体流在深海环境中普遍发育,近年来受到研究人员的广泛关注,成为了国际深水沉积研究的热点之一,2003年到2010年间举办了4次讨论大型海底块体流沉积的国际会议.作为大陆边缘深水沉积的重要组成部分,块体流沉积在世界上著名的油气勘探盆地都有发育(Casas *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2004; Owen *et al.*, 2007; Micallef *et al.*, 2009).大规模块体流沉积在大陆边缘发育,对陆坡体系沉积样式(Casas *et al.*, 2003; Pickering and Corregidor, 2005)和陆坡沉积演化具有重要的影响(Casas *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2004; Micallef *et al.*, 2009).同时,块体流的发育及其造成的超压会对海底的工程建设以及海底钻探带来巨大的风险(Binh *et al.*, 2009; Locat and Lee, 2009).

近年来,随着高精度的2D和3D地震资料增多,研究人员对中国东海和南海陆架边缘的块体流沉积都开展了研究,对于块体流内部的岩性特征(李前裕等, 2005)和地震反射结构特征取得了一些认识(刘保华等, 2005; 李成钢等, 2007).特别是3D地震资料的应用,使块体流沉积的内部结构特征和平面形态特征得到了更进一步的认识(王大伟等, 2009).尽管前人对块体流研究取得了一定的研究成果,但大多数是对块体流沉积内部结构的研究.本文利用高精度2D和3D地震资料,对琼东南盆地深水块体流沉积进行解释,并在此基础上对块体流沉积特征精细刻画,最后讨论块体流沉积与沉积储层的关系.

1 区域地质概况

中生代以来,欧亚、太平洋、印度洋3大板块之间的相互碰撞引发了复杂的构造活动,在三者的结合部位发育了中国最大的边缘海盆地——南海(姚伯初, 1996; 任建业和李思田, 2000; 孙珍等, 2009).由于具有与被动大陆边缘相似的构造和油气地质背景,南海北部一系列准被动大陆边缘盆地中蕴藏有丰富的油气资源潜力(何家雄等, 2010; 朱伟林等, 2010),琼东南盆地即为其中之一.

作为发育于前古近系基底之上的裂陷盆地,琼

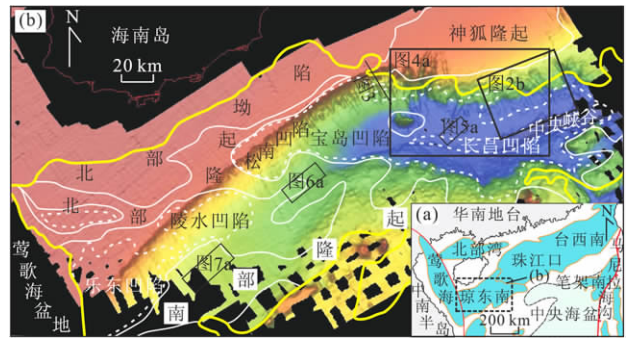


图1 琼东南盆地地质背景与构造单元划分

Fig.1 Regional geological background of the Qiongdongnan basin and its structural division

a. 琼东南盆地所处区域背景; b. 盆地构造单元划分,其背景为现今海底地貌

东南盆地位于海南岛东南部,西部为莺歌海盆地,东部为珠江口盆地(图1).琼东南盆地以S60断裂不整合面为界可分为下部裂陷幕和上部拗陷幕.然而,由于拗陷幕后期盆地加速沉降,因此又将裂陷幕分为早期沉降幕和晚期加速沉降幕(龚再升, 2004).根据前人研究结果,南海深水海盆在南海扩张初期就已经出现(汪品先等, 2003),但是南海北部陆坡深水体系在中新世以后才开始出现(Xie *et al.*, 2008; 邵磊等, 2009),并随之发育成具有不同特征的陆架陆坡体系(王海荣等, 2008; 何云龙等, 2010).本文研究的块体流发育于陆坡及深海平原环境.

2 块体流沉积特征

根据块体流沉积内部的应力状态, Lewis (1971)提出块体流沉积二分的经典模式:上陆坡的伸展端和下陆坡的挤压端.但是,随着深水高精度地质资料的应用,很多地区发育的块体流沉积并不符合这种典型的沉积模式(Strachan, 2002; Canals *et al.*, 2004; Frey-Martinez *et al.*, 2005).因此 Bull *et al.* (2009)在这个模型基础上进行修改,将块体流沉积分为头部陡壁带(headwall domain)、滑移部或者主体部(translation domain)和趾部(toe domain).

2.1 上陆坡块体流沉积特征

在琼东南盆地东部宽缓的陆坡中,如图2a所示,滑移块体的结构非常清晰,块体的内部连续性很好,只是由于某种触发重力流的机制使其位置向下陆坡滑动,伴随一系列滑移断层.这些滑移断层的断

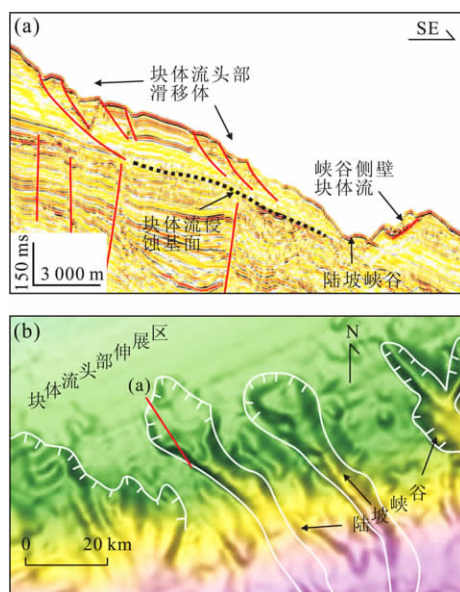


图 2 宽缓陆坡块体流沉积头部沉积特征

Fig. 2 Characteristics of MTDs in head domain in slope with gentle angle

a. 块体流沉积头部的剖面形态特征; b. 块体流沉积头部的平面形态特征

距一般很小,小于 10 m. 从侵蚀基面开始越往上滑移断层的断距越小,同时伴随着沉积厚度的变化. 这可能是沿着侵蚀基准面之上的沉积物被二次搬运而造成(Gee *et al.*, 2006). 在平面形态上,滑移块体产生的负地貌表现出向陆架方向下凹的形态. 在滑移体的向下陆坡一侧,如图 2b 所示,块体流表现为较强的冲蚀作用. 由于这种作用的存在,在下陆坡位置形成形态清晰的陆坡峡谷,将块体流头部的沉积物向深海输送.

与图 2 中宽缓陆坡上发育的块体流相对应,在陡倾陆坡环境下块体流发育特征表现出鲜明的不同. 发育高差明显的陡崖,其高度可以达到 210 m 以上(图 3). 整个陆坡内部连续的结构由于块体流的发育而改变,表现为杂乱的反射特征. 中陆坡位置偶尔出现的强连续反射为异地搬运块体. 所谓异地搬运块体是指块体流直接搬运来造成的上陆坡重力失稳的块体(Frey-Martinez *et al.*, 2005; Gee *et al.*, 2007)和块体流沉积边缘由于块体流的包卷而进入块体流沉积的块体(Gee *et al.*, 2005; Bull *et al.*, 2009),这种块体由于受到块体流搬运过程的影响,一般都伴随着不同程度的变形. 同时在块体流的凹凸表面还发育有规模不一的陆坡峡谷和水道. 图 3 中块体流的活动非常强烈,并将之前沉积于陆坡的斜坡扇冲蚀,表现出一套强反射与杂乱反射截然不

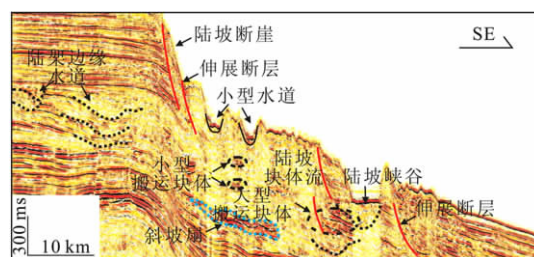


图 3 陡倾陆坡块体流沉积头部沉积特征

Fig. 3 Characteristics of MTDs in head domain in slope with abrupt angle

同的接触关系.

研究表明,上陆坡块体流头部沉积广泛发育有陆坡陡崖,这些陡崖的倾角一般在 10° 以上,最大可以达到 35° ,高差最大可以达到 1 600 m (Bryn *et al.*, 2005; Frey-Martinez *et al.*, 2005; Vanneste *et al.*, 2006). 在平面图上,陡崖表现出的单一或者多个向陆架方向下凹的弓形,使其能够跟构造成因的断层相区别(Frey-Martinez *et al.*, 2005). 特别是在小尺度的露头沉积研究中,这种与块体流沉积相关的断层性质的厘定就显得格外重要(Dykstra *et al.*, 2006).

2.2 下陆坡及深水盆地块体流沉积特征

根据经典的块体流沉积二分模式,在下陆坡和深水盆地块体流沉积内部表现为挤压应力(Lewis, 1971). 由于琼东南盆地南部发育古隆起,深水盆地被限制在北部陆坡和南部隆起之间的狭窄区域. 因此盆地块体流沉积受到地貌的影响,更容易表现出趾部挤压的特征,而块体流主体部的典型特征并不如趾部挤压特征突出.

块体为块体流沉积体部的一个重要特征,图 3 中展示了异地搬运块体特征. 另一种块体类型残余块体是指没有受到块体流侵蚀的地层,在地震剖面上表现为连续的地震反射,外表形态常呈现出明显的孤岛形态(Frey-Martinez *et al.*, 2005). 块体流沉积与周围正常深海细粒沉积之间界限明显,同时块体流内部发育 2 个强能量的不规则块体,对应图 4c 剖面中表现出的连续性很好的地震反射,将其解释此前沉积地层的残余块体.

琼东南盆地东部深水盆地由于受到物源供给和陆坡地貌限制,发育的块体流沉积规模都较小,其内部能量更小. 从图 5a 的块体流方差体沿层切片中可以看出,块体流与正常深海细粒沉积界限清晰,而且具有不规则的形态. 图 5b 中块体流与周围的正常深海泥质沉积之间表现出上超的地震反射结构,很难

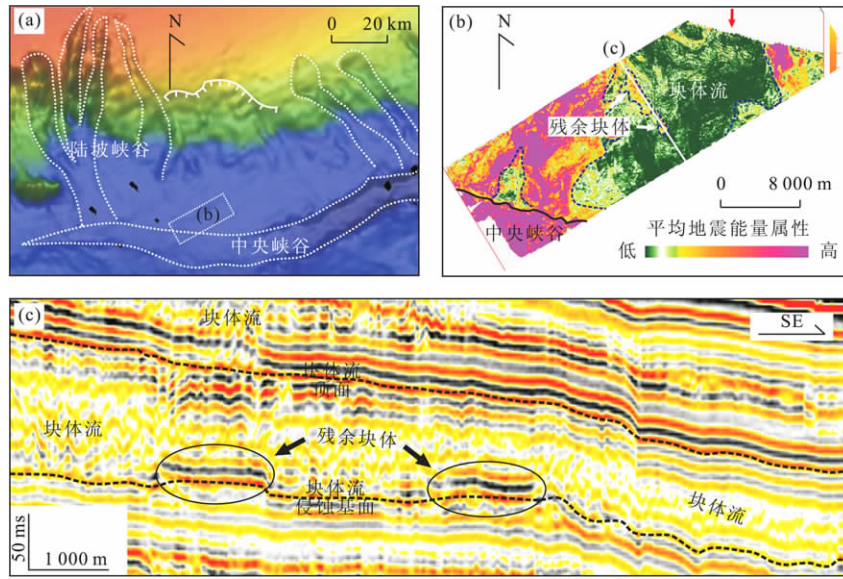


图 4 块体流沉积中转换部(体部)发育的残余块体特征

Fig. 4 The characteristics of remnant blocks in MTDs in translation domain

a. 三维地震工区的位置以及现今海底地貌图; b. 三维工区内上新世块体流沉积层间平均地震能量属性特征平面图; c. 残余块体的在剖面上的地震反射特征

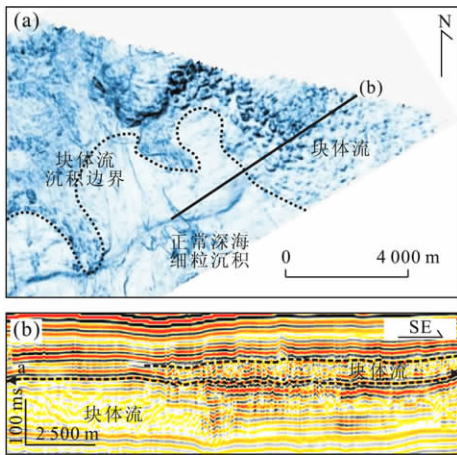


图 5 块体流沉积趾部发育的超覆结构

Fig. 5 The onlap structure of MTDs in toe domain

a. 块体流沉积方差体沿层切片图及其解释, 切片位置见图 5b; b. 块体流趾部的超覆结构

看出块体流沉积对周围地层产生的变形扰动和侵蚀作用. 图 5a 切片图中的小型斑点形态可能是块体流沉积转换部的另一重要特征——不规则表面形态反映.

块体流顶部的不规整形态是其体部的另一重要特征, 某些情况下在剖面上还可以表现出类似水道充填的形态(图 6b, 6c), 但是它在平面上表现的不规则团状可以将其与水道的线状分辨开(图 6a). 这些不规则形态之间下凹的地方成为捕获早期小规模

浊流沉积的理想场所, 因此在块体流顶部形成一系列平面形态不规则而且规模不一的浊积滞留沉积(图 6b, 6c).

结合块体流方差体切片上反映的形态特征和剖面特征, 可以将块体流进行更精细的平面结构精细划分(图 6a). 4 个朵体内部块体流的变形更剧烈, 厚度也更大. 块体流朵体之外的块体流变形特征不明显, 而且厚度较薄, 在平面上与周围深海泥质沉积的边界特征不显著, 需要结合剖面特征确定. 同时块体流沉积对底部盆底扇有一定的侵蚀作用(图 6d). 剖面上表现为盆底扇连续性好的强振幅反射被块体流表现出的杂乱反射所截断.

块体流趾部的逆冲断层是其趾部沉积的重要特征之一(Lewis, 1971; Huvenne *et al.*, 2002; Frey-Martinez *et al.*, 2006). 这种逆冲断层可以有 2 种类型: 地层严重变形的逆冲断层和变形微弱的逆冲断层. 图 6d 和图 6a 分别显示了变形强烈的逆冲断层的剖面形态和平面特征. 严重变形的逆冲断层由于地层的强烈变形在剖面上不太容易识别, 需要在平面切片上才能得到很好的显示, 其主要是受到块体流内部挤压作用而造成, 在平面上被称作挤压脊; 另一种变形微弱的逆冲断层在本研究区没有出现, 其在剖面上表现出平直的断面形态, 内部地层变形微弱或者没有变形(Bull *et al.*, 2009).

本次研究中出现了 2 种不同类型的挤压构造

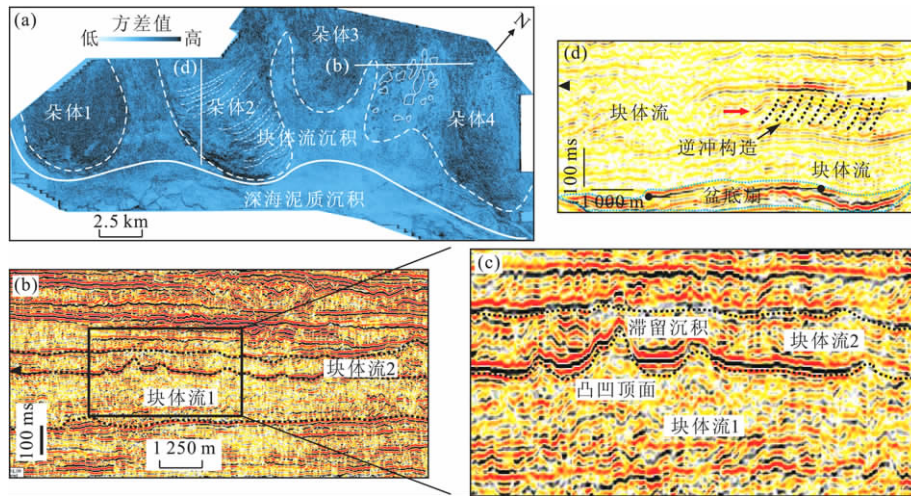


图 6 块体流转换部(体部)滞留沉积及趾部逆冲断层

Fig. 6 The ponded deposition on the top surface in translation domain and thrust in toe domain

a. 块体流转换部(转换部)方差体时间切片平面图,切片位置见图 6b、6d; b. 块体流沉积的不规则顶面及其顶部的滞留沉积; c. 图 6d 的局部放大图; d. 块体流沉积体部发育的逆冲构造的剖面特征

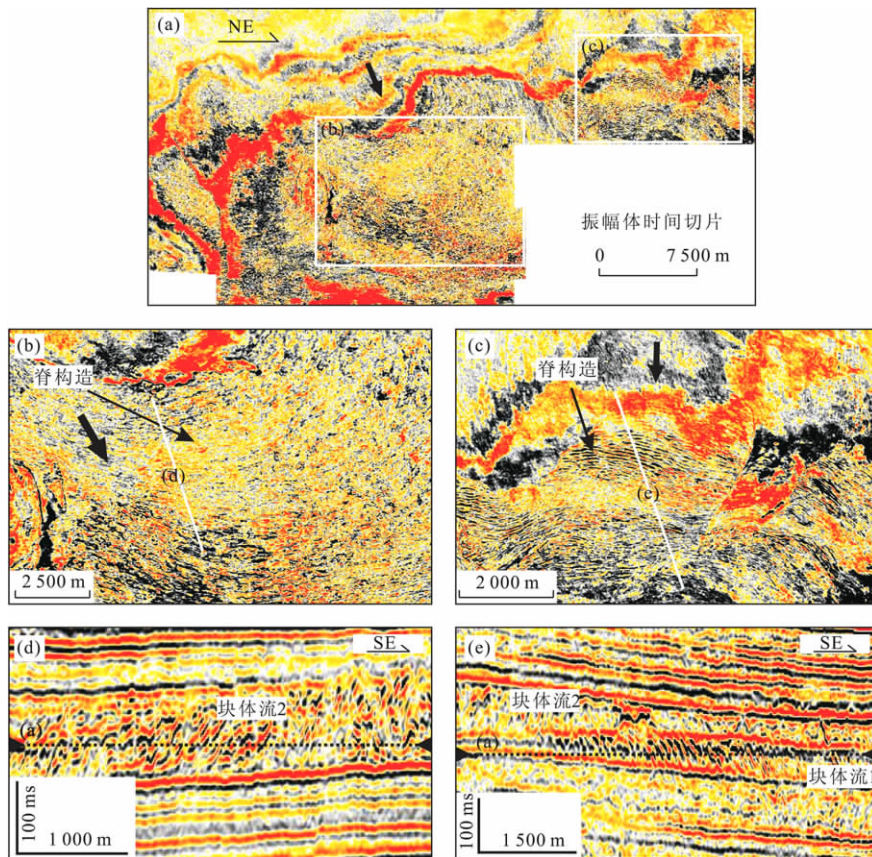


图 7 块体流沉积趾部两种不同脊构造

Fig. 7 Two kinds of ridges in the toe domain of MTDs

a. 块体流沉积趾部振幅时间切片,切片位置见图 7d、7e; b、c. 分别显示了 2 种指向不同的脊构造的平面特征; d、e. 分别显示了 2 种不同脊构造在剖面上的特征

(图 6d, 7b), 图 7d 中表现出的逆冲断层在平面产生的线状构造正反映了这样一种趋势. 在研究中还发

现了一种和块体流流向相反的线状构造(图 7c). 虽然图 7b 和 7c 振幅切片反映的不是同一期块体流沉

积,但是根据实际的地震资料,块体流的运动方向应该是由北至南,研究中尚没有证据说明图 7e 中的块体流是来源于盆地南部. 其他研究表明,在挤压应力作用下,块体流沉积在平面上表现出的线状构造,常常被当作是指示块体流沉积流动方向的一种指标 (Posamentier and Kolla, 2003; Frey-Martinez *et al.*, 2006),而在本次研究中就出现了与众不同的线状构造. 因此,在利用这种线状构造来判断块体流的古流向时应当谨慎分析,需要通过区域对比最终确定块体流的古流向.

3 讨论

通过与世界众多的被动大陆边缘含油气盆地的地质条件进行对比以及多年的油气勘探实践,已证实我国南海北部大陆边缘盆地具有丰富的油气资源 (何家雄等, 2010; 朱伟林等, 2010). 同时,近年世界深水油气勘探取得飞速进展,众多被动大陆边缘深水盆地的油气不断被发现. 因此,加强对深水沉积体系的研究,对于我国深水油气勘探具有十分重要的意义 (吴时国和秦蕴珊, 2009). 作为大陆边缘深海沉积中非常重要的组成部分,块体流沉积成为深水沉积储层的一个重要研究目标.

3.1 深水沉积环境

南海北部大陆边缘盆地的形成演化受到 3 大板块相互碰撞作用的控制,盆地沉积环境的演化与南海海盆的扩张关系密切. 总体上,南海北部大陆边缘盆地经历了河流湖泊沉积环境、浅海沉积环境和深海沉积环境 (黎明碧等, 2005). 对于深海沉积环境出现的时间,众多学者从不同的角度进行了研究. 汪品先等 (2003) 通过对 ODP148 航次岩心资料的精细分析,认为在南海形成初期就有深海环境出现,对 1148 站位的中新世早期的介形虫和底栖有孔虫化石群的分析,认为此时下陆坡的深度已经大于 1 500 m. Xie *et al.* (2008) 和邵磊等 (2009) 分别进行了地震剖面资料分析和沉积物元素地球化学分析,认为南海北部深水陆坡沉积环境在中新世开始出现. 对于深水陆坡环境出现的时间,南海东北部出现深水陆坡时间要早于西北部.

3.2 块体流与深水沉积

3.2.1 块体流对沉积的控制 块体流沉积的顶部形态非常复杂,其表面有一种重要的微观形态特征为小圆丘 (Sangree and Widmier, 1978),圆丘之间的微地貌是控制沉积物展布的重要因素和捕获随后

沉积物的理想场所 (图 6c). 在这种单个凹陷中沉积的砂体会影响储层的微观形态,使其丧失其侧向的连通性,不利于发育成规模的油气储层. 挪威大陆边缘盆地海底块体流沉积的剖面,非常直观地表现出这种不规则表面的特征 (Bull *et al.*, 2009) (图 8). 通过剖面可以发现这种小凹坑和小凸起 (圆丘) 之间的距离可以达到 600 m 左右,高差可以达到 60 m.

通过实验模拟研究表明,高密度流 (hyperpycnal flow) 作为将大部分河流悬浮沉积物向陆架或者陆架边缘搬运的重要方式,其对沉积物的搬运受到地貌的严格控制 (Stevenson and Peakall, 2010). 实验模拟研究还发现突然出现的局部地貌高地对沉积物能起到很好的分选作用,使高密度流中粗粒的沉积物在地貌上的相对低点沉积,而细粒沉积物被分选沉积到其他区域. 因此,由于这种不规则的表面形态,它对随后的沉积物,特别是后期小规模浊流沉积空间展布会产生重要的影响. 研究还表明块体流表面的不规则形态还会影响地震分辨率,使块体流表面的储层形态表现不清晰,影响我们对储层进行精细评价 (Armitage and Stright, 2010).

3.2.2 块体流的侵蚀作用 块体流除了对顶部的后生沉积物的展布有控制作用,还会对已形成的沉积地层产生一定的冲蚀作用 (图 3, 6d),或是将斜坡扇直接截断将原有斜坡扇沉积物向深海搬运,或是在深海盆地中直接向下侵蚀,破坏原有的沉积地层. 多期块体流的活动对上部一套盆底扇直接产生了侵蚀作用,在地震剖面上表现出连续的强反射同向轴突变为振幅很弱的杂乱反射 (图 9). 同时在图中还显示了块体流对底部一套盆地扇的侵蚀导致了盆底扇内部结构以及其上的沉积盖层被破坏,致使后期流体在盆底扇中不能形成良好的圈闭,而在侵蚀的位置发生逸散. 这种块体流侵蚀导致的流体逸散在地震剖面上得到了很好的显示.

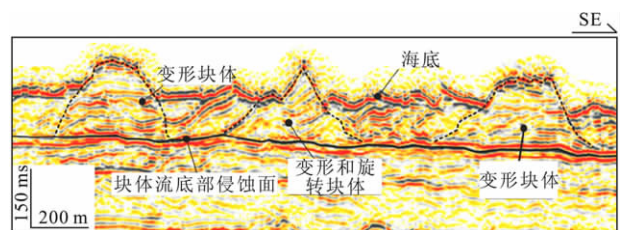


图 8 挪威大陆边缘盆地块体流沉积表面特征 (据 Bull *et al.*, 2009)

Fig. 8 The characteristics of top surface of MTDs in Norway passive margin

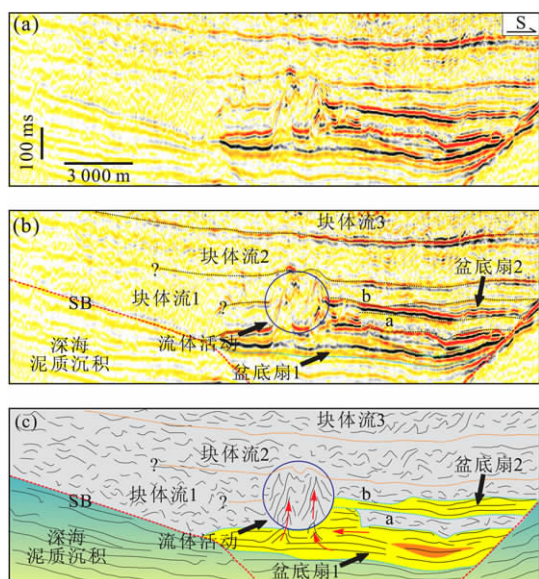


图9 块体流侵蚀储层导致流体逸散

Fig. 9 The fluid emission from reservoir generated by erosion of MTDs

a. 原始剖面; b. 解释剖面; c. 根据解释剖面得来的沉积相剖面图

块体流活动导致的底部沉积地层被侵蚀, 在世界其他深海盆地以及露头沉积研究中均有显示. 例如, 对南美洲特立尼达岛附近深海盆地块体流沉积的研究发现, 块体流对下覆的水道和天然堤系统产生了很强的侵蚀作用. 在低孔隙度和低渗透性块体流沉积的覆盖下, 下伏的浊积水道系统被认为是很好的地层圈闭系统(Moscardelli *et al.*, 2006). 另外, 对爱尔兰 Clare 县的海岸北部的露头研究发现, 块体流侵蚀以及相关的应力作用能使下部沉积的砂岩或是被卷入到块体流沉积中成为搬运块体, 或是在原地由于上覆块体流产生的应力致使砂岩的原始形态发生变化而形成砂岩丘、砂岩墙等(Strachan, 2002).

4 结论

(1) 南海北部琼东南盆地深水区发育有大量的块体流沉积, 其内部具有典型的块体流沉积特征, 包括上陆坡的滑移体、陆坡陡崖、搬运块体以及下陆坡和深水盆地的残余块体、挤压脊、逆冲断层、顶部滞留沉积等.

(2) 陆坡倾角对于块体流的发育有一定的控制作用: 陡倾陆坡和宽缓陆坡上块体流沉积表现出不同的特征. 在陡倾陆坡上块体流沉积大规模发育, 地层变形严重, 以杂乱的地震反射为特征; 而在宽缓的

陆坡上块体流的发育以地层变形程度较小的滑移体为特征.

(3) 块体流沉积顶部不规则形态对于随后的深水沉积的沉积物展布具有重要的控制作用. 此外, 块体流沉积还会直接对原有沉积地层进行侵蚀, 当潜在的油气储层遭受破坏后可能导致后期储层中充注的流体发生逸散. 因此, 在深水油气勘探中有必要对块体流沉积进行精细研究.

References

- Armitage, D. A., Stright, L., 2010. Modeling and interpreting the seismic-reflection expression of sandstone in an ancient mass-transport deposit dominated deep-water slope environment. *Marine and Petroleum Geology*, 27 (1): 1–12. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.08.013
- Binh, N. T. T., Tokunaga, T., Nakamura, T., et al., 2009. Physical properties of the shallow sediments in Late Pleistocene Formations, Ursa basin, gulf of Mexico, and their implications for generation and preservation of shallow overpressures. *Marine and Petroleum Geology*, 26(4): 474–486. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.01.018
- Bryn, P., Berg, K., Forsberg, C. F., et al., 2005. Explaining the Storegga slide. *Marine and Petroleum Geology*, 22 (1–2): 11–19. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.12.003
- Bull, S., Cartwright, J., Huuse, M., 2009. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 26 (7): 1132–1151. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.01.018
- Canals, M., Lastrasa, G., Urgeles, R., et al., 2004. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project. *Marine Geology*, 213(1–4): 9–72. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.10.001
- Casas, D., Ercilla, G., Baraza, J., et al., 2003. Recent mass-movement processes on the Ebro continental slope (NW Mediterranean). *Marine and Petroleum Geology*, 20(5): 445–457. doi:10.1016/S0264–8172(03)00078–3
- Dykstra, M., Kneller, B., Milana, J. P., 2006. Deglacial and postglacial sedimentary architecture in a deeply incised paleovalley: paleofjord—the Pennsylvanian (Late Carboniferous) Jejenes Formation, San Juan, Argentina. *Geological Society of America Bulletin*, 118(7–8): 913–937. doi:10.1130/B25810.1
- Frey-Martinez, J., Cartwright, J., Hall, B., 2005. 3D seismic interpretation of slump complexes: examples from the

- continental margin of Israel. *Basin Research*, 17(1): 83–108. doi: 10.1111/j.1365-2117.2005.00255.x
- Frey-Martinez, J., Cartwright, J., James, D., 2006. Frontally confined versus frontally emergent submarine landslides: a 3D seismic characterisation. *Marine and Petroleum Geology*, 23(5): 585–604. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2006.04.002
- Gee, M. J. R., Gawthorpe, R. L., Friedmann, J. S., 2005. Giant striations at the base of a submarine landslide. *Marine Geology*, 214(1–3): 287–294. doi: 10.1016/j.margeo.2004.09.003
- Gee, M. J. R., Gawthorpe, R. L., Friedmann, S. J., 2006. Triggering and evolution of a giant submarine landslide, offshore Angola, revealed by 3D seismic stratigraphy and geomorphology. *Journal of Sedimentary Research*, 76(1): 9–19. doi: 10.2110/jsr.2006.02
- Gee, M. J. R., Uy, H. S., Warren, J., et al., 2007. The Brunel slide: a giant submarine landslide on the North West Borneo margin revealed by 3D seismic data. *Marine Geology*, 246(1): 9–23. doi: 10.1016/j.margeo.2007.07.009
- Gong, Z. S., 2004. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 513–517 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Yan, W., Ma, W. H., et al., 2010. Analogy of oil and gas geology between quasi-passive margin of northern South China Sea and global oil and gas enriched areas in deep water. *Natural Gas Geoscience*, 21(6): 897–908, 995 (in Chinese with English abstract).
- He, Y. L., Xie, X. N., Li, J. L., et al., 2010. Depositional characteristics and controlling factors of continental slope system in the Qiongdongnan basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(2): 118–122 (in Chinese with English abstract).
- Huvenne, V. A. I., Croker, P. F., Henriot, J. P., 2002. A refreshing 3D view of an ancient sediment collapse and slope failure. *Terra Nova*, 14(1): 33–40. doi: 10.1046/j.1365-3121.2002.00386.x
- Lewis, K. B., 1971. Slumping on a continental slope inclined at 1°–4°. *Sedimentology*, 16(1–2): 97–110. doi: 10.1111/j.1365-3091.1971.tb00221.x
- Li, C. G., Fan, F. X., Yan, J., 2007. The slipping zone in the north of the shelf break in the East China Sea. *Marine Sciences*, 31(5): 90–92 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. B., Jin, X. L., Li, J. B., et al., 2005. Miocene deposition and Palaeo-slope evolution of the middle part of northern continental slope in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(3): 73–79 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Y., Zheng, H. B., Zhong, G. F., et al., 2005. Tectonic events indicated by Late Oligocene slumped deposits from the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 19–24 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. H., Li, X. S., Zhao, Y. X., et al., 2005. Debris transport on the western continental slope of the Okinawa trough: slumping and gravity flowing. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 36(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Locat, J., Lee, H., 2009. Submarine mass movements and their consequences: an overview. In: Sassa, K., Canuti, P., eds., *Landslides-disaster risk reduction*. Springer-Verlag, Berlin, 115–142.
- Micallef, A., Masson, D. G., Berndt, C., et al., 2009. Development and mass movement processes of the north-eastern Storegga slide. *Quaternary Science Reviews*, 28(5–6): 433–448. doi: 10.1016/j.quascirev.2008.09.026
- Moscardelli, L., Wood, L., Mann, P., 2006. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela. *AAPG Bulletin*, 90: 1059–1088. doi: 10.1306/02210605052
- Owen, M., Day, S., Maslin, M., 2007. Late Pleistocene submarine mass movements: occurrence and causes. *Quaternary Science Reviews*, 26(7–8): 958–978. doi: 10.1016/j.quascirev.2006.12.011
- Pickering, K. T., Corregidor, J., 2005. Mass-transport complexes (MTCs) and tectonic control on basin-floor submarine fans, Middle Eocene, South Spanish Pyrenees. *Journal of Sedimentary Research*, 75(5): 761–783. doi: 10.2110/jsr.2005.062
- Posamentier, H. W., Kolla, V., 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3): 367–388. doi: 10.1306/111302730367
- Ren, J. Y., Li, S. T., 2000. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 203–213 (in Chinese with English abstract).
- Sangree, J. B., Widmier, J. M., 1978. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part 9: seismic interpretation of clastic depositional facies. *American Association of Petroleum Geologists*, 62(5): 752–771.
- Shao, L., Pang, X., Zhang, G. C., et al., 2009. Late Oligocene tectonic event in the northern South China Sea and

- its implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(5): 717–724 (in Chinese with English abstract).
- Silva, A. J., Baxter, C. D. P., LaRosa, P. T., et al., 2004. Investigation of mass wasting on the continental slope and rise. *Marine Geology*, 203(3–4): 355–366. doi: 10.1016/S0025–3227(03)00315–3
- Strachan, L. J., 2002. Slump-initiated and controlled syndepositional sandstone remobilization: an example from the Namurian of County Clare, Ireland. *Sedimentology*, 49(1): 25–41. doi: 10.1046/j.1365–3091.2002.00430.x
- Stevenson, C. J., Peakall, J., 2010. Effects of topography on lofting gravity flows: implications for the deposition of deep-water massive sands. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 1366–1378.
- Sun, Z., Sun, L. T., Zhou, D., et al., 2009. Discussion on the South China Sea evolution and lithospheric breakup through 3D analogue modeling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 435–447 (in Chinese with English abstract).
- Vanneste, M., Mienert, J., Bunz, S., 2006. The Hinlopen slide: a giant, submarine slope failure on the northern Svalbard margin, Arctic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1–2): 373–388. doi: 10.1016/j.epsl.2006.02.045
- Wang, D. W., Wu, S. G., Qing, Z. L., et al., 2009. Architecture and identification of large Quaternary mass transport depositions in the slope of South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 29(5): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. R., Wang, Y. M., Qiu, Y., et al., 2008. Geomorphology and its control of deep-water slope of the margin of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(2): 70–79 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Jian, Z. M., Zhao, Q. H., et al., 2003. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep sea records. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2549–2561. doi: 10.1360/03wd0156
- Wu, S. G., Qin, Y. S., 2009. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 922–930 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Müller, R. D., Ren, J. Y., et al., 2008. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea. *Marine Geology*, 247(3–4): 129–144. doi: 10.1016/j.margeo.2007.08.005
- Yao, B. C., 1996. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 16(2): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Zhong, K., et al., 2010. South China Sea: oil and gas outlook. *Engineering Sciences*, 12(5): 46–50 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 龚再升, 2004. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(5): 513–517.
- 何家雄, 颜文, 马文宏, 等, 2010. 南海北部准被动陆缘深水油气地质及与世界深水油气富集区类比. *天然气地球科学*, 21(6): 897–908, 995.
- 何云龙, 解习农, 李俊良, 等, 2010. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素. *地质科技情报*, 29(2): 118–122.
- 李成钢, 范奉鑫, 阎军, 2007. 东海陆架前缘斜坡北部的滑塌带. *海洋科学*, 31(5): 90–92.
- 黎明碧, 金翔龙, 李家彪, 等, 2005. 南海中北部中新世陆坡凹陷沉积充填与古陆坡形态演变. *海洋学报(中文版)*, 27(3): 73–79.
- 李前裕, 郑洪波, 钟广法, 等, 2005. 南海晚渐新世滑塌沉积指示的地质构造事件. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 19–24.
- 刘保华, 李西双, 赵月霞, 等, 2005. 冲绳海槽西部陆坡碎屑沉积物的搬运方式: 滑塌和重力流. *海洋与湖沼*, 36(1): 1–9.
- 任建业, 李思田, 2000. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景. *地学前缘*, 7(3): 203–213.
- 邵磊, 庞雄, 张功成, 等, 2009. 南海北部渐新世末的构造事件. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(5): 717–724.
- 孙珍, 孙龙涛, 周蒂, 等, 2009. 南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 435–447.
- 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等, 2009. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征. *海洋地质与第四纪地质*, 29(5): 65–72.
- 王海荣, 王英民, 邱燕, 等, 2008. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素. *海洋学报(中文版)*, 30(2): 70–79.
- 汪品先, 翦知湣, 赵泉鸿, 等, 2003. 南海演变与季风历史的深海证据. *科学通报*, 48(21): 2228–2239.
- 吴时国, 秦蕴珊, 2009. 南海北部陆坡深水沉积体系研究. *沉积学报*, 27(5): 922–930.
- 姚伯初, 1996. 南海海盆新生代的构造演化史. *海洋地质与第四纪地质*, 16(2): 1–13.
- 朱伟林, 张功成, 钟锺, 等, 2010. 中国南海油气资源前景. *中国工程科学*, (5): 46–50, 46–50.