



块体搬运沉积构型及其对后期浊流沉积的影响——以琼东南盆地陵水凹陷L区为例

高毅凡, 李 磊, 程琳燕, 龚广传, 张 威, 杨志鹏, 王 潘, 杨 蕾

Sedimentary architecture of mass transport deposits and its influence on later turbidity deposition—An example from the L area of Lingshui Sag in Qiongdongnan Basin

GAO Yifan, LI Lei, CHENG Linyan, GONG Guangchuan, ZHANG Wei, YANG Zhipeng, WANG Pan, and YANG Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021061501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

高毅凡, 李磊, 程琳燕, 等. 块体搬运沉积构型及其对后期浊流沉积的影响——以琼东南盆地陵水凹陷 L 区为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 101-109.

GAO Yifan, LI Lei, CHENG Linyan, et al. Sedimentary architecture of mass transport deposits and its influence on later turbidity deposition—An example from the L area of Lingshui Sag in Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 101-109.

块体搬运沉积构型及其对后期浊流沉积的影响 ——以琼东南盆地陵水凹陷 L 区为例

高毅凡^{1,2}, 李磊^{1,2}, 程琳燕^{1,2}, 龚广传^{1,2}, 张威^{1,2}, 杨志鹏^{1,2}, 王潘^{1,2}, 杨蕾³

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065

3. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院, 任丘 062550

摘要:通过对琼东南盆地陵水凹陷陆坡区高分辨率三维地震资料的精细解释,在研究区发现广泛发育的块体搬运沉积体系 (MTDs), 表现为: ① 弱振幅、低连续、杂乱或空白的地震反射特征且具有明显的侵蚀作用; ② 在研究区体部和趾部区域发现大量侵蚀擦痕、逆冲推覆构造和挤压脊等内部结构; ③ 块体搬运沉积由于内部结构变形发育为逆冲推覆构造等, 其表面形态往往呈连续的凸起与凹陷。研究区识别出两期 MTDs (MTDs1 和 MTDs2) 和一套浊流沉积, MTDs1 所形成的长 10~15 km、宽 2~3 km 的脊, 改变了海底形态, 阻碍了后期浊流沉积的流向, 并影响了浊流沉积的位置。

关键词:侵蚀擦痕; 逆冲推覆构造; 顶界面起伏不平; 后期浊流沉积; 琼东南盆地

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021061501

Sedimentary architecture of mass transport deposits and its influence on later turbidity deposition—An example from the L area of Lingshui Sag in Qiongdongnan Basin

GAO Yifan^{1,2}, LI Lei^{1,2}, CHENG Linyan^{1,2}, GONG Guangchuan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, YANG Zhipeng^{1,2}, WANG Pan^{1,2}, YANG Lei³

1. School of Earth Sciences and Engineering Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

3. Exploration and Development Research Institute of Huawei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062550, China

Abstract: Through the fine interpretation of high-resolution 3D seismic data collected from the slope area of the Lingshui Sag in the Qiongdongnan Basin, extensively developed mass transport deposits (MTDs) have been discovered with the characteristics as follows: (1) The mass transport deposits usually show weak amplitude, low continuity, chaotic or blank seismic reflection with obvious erosion; (2) A large number of internal structures such as erosional scratches, thrust nappe structures, and squeezed ridges are observed in the body and toe parts of the deposits; (3) Mass transport induced thrust nappe structures caused by internal structural deformation are common and the surface morphology of the deformation is always characterized by continuous protrusions and depressions. Two stages of MTDs, i.e. MTDs1 and MTDs2, are found in the study area together with associated turbidites. The ridges 10~15 km long and 2~3 km wide formed by the MTDs1 may change the morphology of seafloor, block the way of later turbidity currents and change the location of turbidites.

Key words: erosional scratches; thrust nappe structure; undulating top surface; later turbidity deposits; Qiongdongnan Basin

近年来,随着对深海环境的进一步勘探,在深水盆地边缘发现了许多重力流沉积的产物。人们通过对陆架、陆坡和盆地底部的高分辨率地震资料的分析将这些复杂的重力流沉积特征进行了详细研究^[1]。其中块体搬运沉积 (MTDs) 是深水重力流

沉积中的重要组成单元。MTDs 是指由于滑动、滑塌、碎屑流等重力流沉积因素,顺着陆坡从高地移动到坡度较低地区的过程中所形成的沉积体^[2-3]。前人的研究中,MTDs 存在于许多深水盆地边缘地层中,甚至达到陆坡边缘盆地面积的 50%,它还是

资助项目:国家自然科学基金项目“深水重力流流态转化研究”(41302147)

作者简介:高毅凡(1998—),男,硕士,主要从事地震解释及深水沉积研究, E-mail: 1035337789@qq.com

通讯作者:李磊(1979—),男,博士,教授,硕导,主要从事地震地质综合解释及海洋沉积研究, E-mail: lilei@xsyu.edu.cn

收稿日期:2021-06-15; 改回日期:2021-09-19。 周立君编辑

深海沉积物输运的重要来源之一^[4-5]。2016 年对意大利 Maiolica 白垩纪碳酸盐岩的研究表明,该盆地地层中 MTDs 约占 50%~60%^[6]。由于块体搬运沉积广泛发育于浅海—深海中的陆架边缘盆地中,因此,对其深入研究有助于认识海底地形和构造活动,为深水领域油气资源勘探与预防海底地质灾害提供有利依据。

但是由于 MTDs 多发育于深海沉积环境中,我们无法直观地通过观察其外部特征与内部结构来识别,因此需要借助高分辨率的地震资料、回声探测、多波束测深系统等对其进行表征与识别^[7-8]。本文基于琼东南盆地陵水凹陷高分辨率三维地震资料,发现在陵水凹陷陆坡处发育有大量重力流沉积的产物,其中块体搬运沉积占有较大比例。由于海底陆坡和盆地底部的沉积体系是以重力流沉积为主,因此 MTDs 的广泛发育会影响海底形态和 MTDs 之后地层的沉积与构造变形,还会影响水道的发育位置^[3,9]。但现在的研究依然没有足够的证据表明 MTDs 内部构造的发育对上覆地层沉积的影响,以及它是如何影响和控制后期地层沉积的。本文基于以上问题,研究国内外最新成果,对本地区 MTDs 进行刻画和分析,重点研究 MTDs 内部构造特征和它对后续地层沉积的影响。

1 地质概况

琼东南盆地位于中国海南岛南部,整个盆地面积约为 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,整个盆地呈 NE 方向展布^[10]。陵水凹陷位于琼东南盆地深水区,西部与乐东凹陷

相连位于琼东南盆地中央坳陷带,南部为陵南低凸起,北部与陵水-松南低凸起连接,东部为松南低凸起。研究区位于陵水凹陷陆坡区,是连接浅海陆架与深海平原的过渡区(图 1)。陵水凹陷主要沉积的新生代地层包括始新统、渐新统崖城组和陵水组,中新统三亚组、眉山组和黄流组,上新统莺歌海组及第四系,新生代整体沉积的地层厚度约 10 km^[10-11]。陵水凹陷新生代地层主要经历了古近纪的裂陷期、新近纪和第四纪的裂后期,裂后期沉积又根据沉降速率划分为热沉降期和加速沉降期,共 3 大构造演化阶段。在加速沉降阶段的后期,整个琼东南盆地构造活动逐渐稳定,北部海南岛为盆地提供了充足的物源^[10]。研究区内目的层段主要发育于第四纪,第四纪的沉积模式主要为陆架陆坡海相沉积,由于陆架边缘的物源供给充足,这些沉积物受重力流沉积作用,在沿陆坡向下不断推进沉积的过程中会发育块体搬运沉积体、水道和峡谷等^[12-14]。

2 MTDs 在地震资料上的识别

由于深水地区资料有限,目前深水 MTDs 的识别方法仍以地震资料为主,用有限的常规测井资料、岩心等数据辅助解释^[15]。地震资料是目前识别深水 MTDs 最常见、最主要的方法。它主要是根据地震波对 MTDs 边界及内部运动的响应特征来判断 MTDs 的形态与搬运过程^[8,15]。在地震上常见的陡崖、擦痕、杂乱反射、趾部的逆冲构造等识别标志可以判断 MTDs 的规模、搬运方向等(图 2)^[15]。利用地震属性资料,如均方根、瞬时频率、相干体、

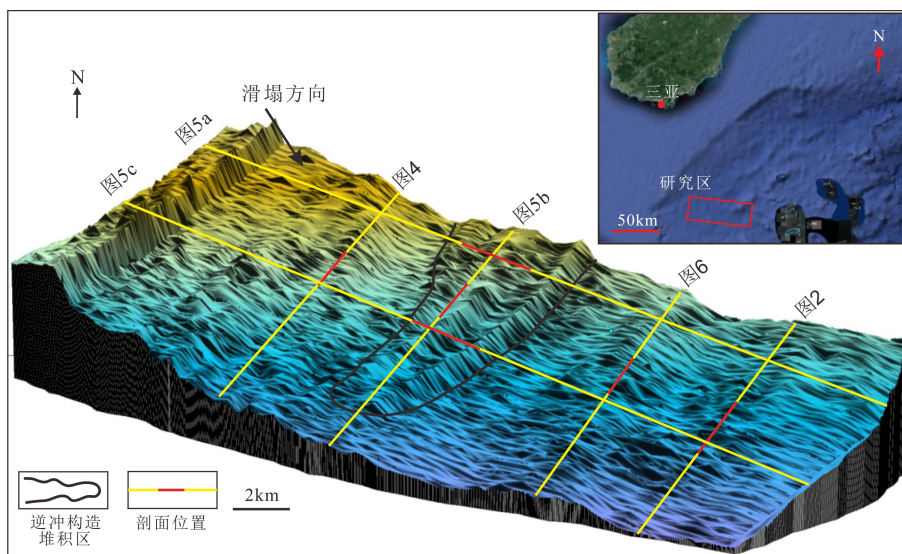


图 1 琼东南盆地陵水凹陷位置与研究区 MTDs1 现今地貌图

Fig.1 Location of Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin and the MTDs1 current

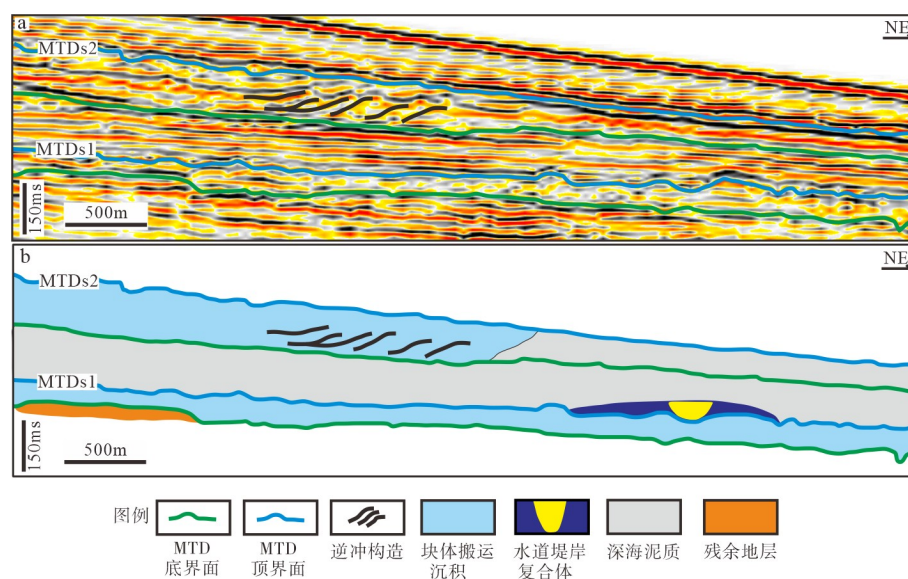


图 2 琼东南盆地陵水凹陷陆坡典型剖面

Fig.2 Type sections through the slope of Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin

时间切片等,可以进一步识别 MTDs 的平面展布、内部特征等^[2,15]。在常规的测井曲线上 MTDs 的特征通常为漏斗形和箱形的组合,顶界面为突变或渐变的接触关系,曲线主要为弱齿状或齿状^[8,15-16]。在测井资料识别中,以地震资料解释为前提,用井-震结合的方法,对 MTDs 的测井曲线识别,研究其边界和内部样式等^[16]。测井资料的局限性在于,它不能识别出 MTDs 的搬运方向及内部的具体形态,且深水钻井成本大,岩心资料少。因此本文主要利用高精度的三维地震资料,通过对 MTDs 的地震剖面、平面、三维模拟来具体识别其特征与展布。

根据北康盆地第四纪沉积地层,MTDs 在地震剖面上外部呈连续性差、弱振幅的丘状、波状反射特征,内部表现为杂乱、空白、弱-中-强振幅的反射特征;在尼日尔三角洲盆地和珠江口盆地的深水地层中可见 MTDs 呈半透明、低振幅、杂乱反射特征^[7,16]。本文通过研究陵水凹陷陆坡区高分辨率三维地震资料,识别出研究区 MTDs 有以下特征:① 在地震剖面上 MTDs 呈平行或亚平行状的弱振幅、杂乱、丘状反射特征;② 研究区处于块体搬运沉积体系体部-趾部区域,因此在研究区识别出逆冲推覆构造,在剖面上通常表现为多个叠瓦状的逆冲断层和一系列挤压脊(图 2);③ 在平面上呈长条形—似扇状几何特征(图 3),在构造图上可以看到凹陷的区域就是 MTDs 对基底的侵蚀作用区(图 1)。MTDs 的岩性主要和陆坡头部垮塌下来的物质有关,深海披覆泥占大多数,并且在 MTDs 趾部主要是碎屑流沉积,因此在剖面图上可以看到杂乱反射

主要为半透明反射特征。MTDs 在搬运的过程中本身对下伏地层会有侵蚀作用,因此下伏地层的地震反射会弱于顶界面地震反射^[14-15]。MTDs 会遭到海底地形的控制,还会受到水道和底流作用的改造,因此它的顶界面通常为不规则起伏形态(图 2a)^[3,13]。顶界面接着被后来的各种沉积物所填充^[17]。块体搬运沉积(MTDs1)对下伏地层的侵蚀作用会形成残余地层,MTDs 的侵蚀强度和下伏地层岩性决定了残余地层的规模和分布(图 2)。研究区主要是 MTDs 体部和趾部区域,在地震剖面上常见逆冲构造,逆冲构造以连续的弧形向下坡方向搬运(图 1,图 2)。

在深水重力沉积体系中,水道堤岸复合体也是重要组成部分,水道是沉积物向深海区搬运的主要通道和沉积填充区域^[18]。浊积水道主要在 MTDs 顶界面形成,它分为侵蚀期和填充期^[19]。侵蚀期的水道主要对 MTDs 顶界面进行侵蚀,一般很少发生沉积作用;填充期时,水动力条件减弱,在水道内部发生沉积,在水道外侧形成堤岸沉积(图 2)。因此在形成 MTDs 顶界面不规则起伏形态时,水道的侵蚀作用也是重要的因素。

2.1 侵蚀擦痕

侵蚀擦痕一般多发育于 MTDs 的体部和趾部,由头部所滑塌下来的块体在体部逐渐卸去重力,在体部其重力作用慢慢减弱,物源所携带的物质在此处逐渐沉积^[4,8]。沉积物从头部滑动,顺着陆坡向下搬运到体部时逐渐转化为碎屑流^[14]。这些碎屑流

沉积物由自身重力作用继续沿着基底剪切面向下搬运,会侵蚀水道壁和下伏地层。块体搬运过程中的动力强弱决定了侵蚀擦痕发育的数量和大小,动力越强,块体对下伏地层的侵蚀性越强,侵蚀擦痕越大。由于MTDs在体部的侵蚀作用较强,基底剪切面会受到侵蚀,形成比较常见的剪切槽。研究区发育的侵蚀擦痕显示,它下伏地层的同相轴被断开,侵蚀擦痕内部为杂乱或空白反射,呈波状弱连续地震相特征(图4)。在平面上,侵蚀擦痕表现为不规则的凹槽,图中凹凸不平的表面证实了块体在搬运过程中对下伏地层具有侵蚀性(图1)。侵蚀擦痕较为平直,其宽度大约为1~2 km,MTDs的强度和下伏地层的岩性决定了侵蚀擦痕的规模(图3)。

2.2 逆冲推覆构造

逆冲推覆构造与大型的逆冲断层不同,它是发育在块体搬运沉积的趾部,并且在挤压作用下形成的叠瓦状排列。块体在向下坡方向搬运的过程中由于地形的影响而受到限制,或后面的块体加速挤压前方块体使地层变形,这两种情况是形成逆冲推覆构造的主要动力因素[20]。逆冲推覆构造的规模取决于MTDs沉积体的大小和挤压动力强弱,沉积体的规模越大、挤压作用越强,其内部逆冲推覆构

造发育的规模也越大,MTDs趾部逆冲构造的厚度一般达到数十米,有的甚至几百米厚[7]。从研究区逆冲推覆构造典型剖面观察发现,MTDs内部逆冲推覆构造的同相轴表现为中—低振幅且连续的波状反射特征,它一般都是叠瓦状排列并且弯曲方向与块体搬运方向一致(图5)。在平面上,逆冲构造的特征为厚度较大的长条形脊,块体滑塌的方向垂直于逆冲脊(图1);均方根振幅图和瞬时频率图上显示,逆冲构造发育区为连续的条带状,并向块体搬运方向凸出(图3)。从图5可以看到,由于MTDs后期受到的挤压作用较强,因此MTDs顶界面的振幅一般要强于底界面。

2.3 挤压脊

挤压脊的发育位置比较广泛,在深水环境和陆地都有发育[7]。挤压脊的发育规模受到陆坡坡度和MTDs底部地形的控制,坡度较大或者地形隆起会使块体向前搬运时受阻,地层会受到更严重的挤压作用,容易形成规模较大的挤压脊。挤压脊一般都与逆冲推覆构造一起出现,挤压脊是由于MTDs受到挤压作用时,外部形态会变得起伏不平,后期地层继续发育时就会受到MTDs的影响。挤压脊多发育于挤压作用强烈的趾部区域。研究区的地

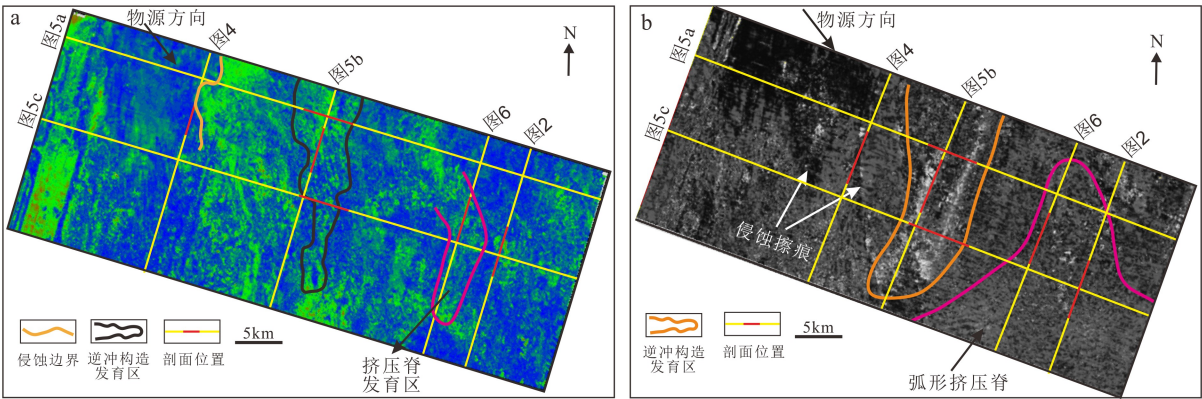


图3 MTDs1 均方根属性图 (a) 和瞬时频率图 (b)

Fig.3 RMS amplitude map of MTDs1(a), instantaneous frequency map of MTDs1(b)

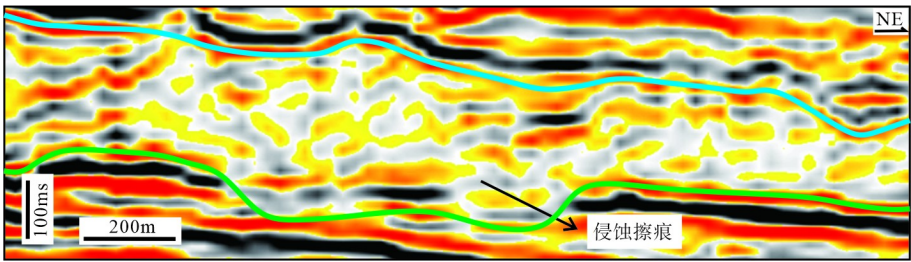


图4 MTDs 侵蚀擦痕典型剖面

Fig.4 Typical sections for MTDs erosion scratches

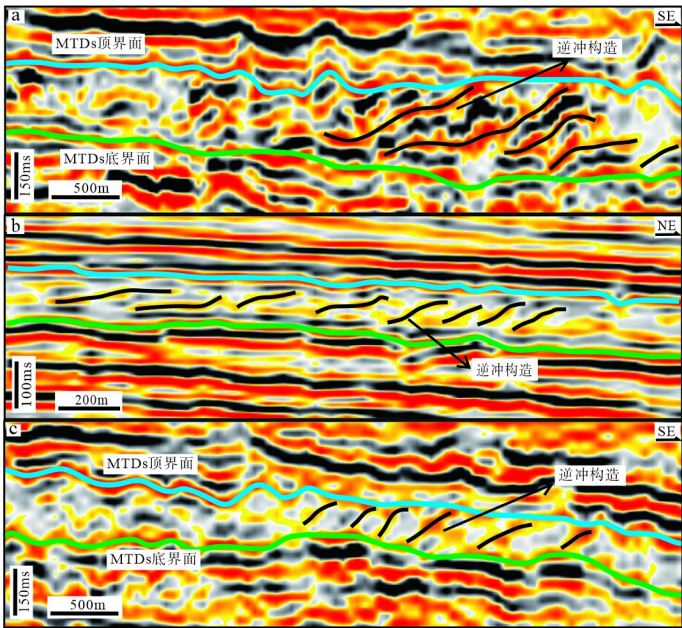


图 5 MTDs 逆冲构造典型剖面
Fig.5 Typical sections showing MTDs thrust nappe structure

震剖面显示, 挤压脊隆起的区域正是逆冲构造向上抬升的位置, 在 MTDs 的顶界面还可以看到脊和谷会交替出现, 谷的位置就是后期浊流最先填充的区域(图 6)。在平面上, 挤压脊的现象与逆冲推覆构造相似, 构造图中表现为地形局部隆起形成连续凹凸不平的表面(图 1); 瞬时频率图中显示为连续的弧形并且沿着块体搬运方向倾斜(图 3b)。

3 MTDs 与后沉积地层关系

陆坡由于失稳、垮塌等原因形成的 MTDs 在搬运过程中会侵蚀下伏地层并且边搬运边沉积, MTDs 沉积后所形成的海底地形, 还可以影响后期浊流的走向和浊流沉积的分布^[21]。这些直接或间接地影响了后期地层的发育和沉积物的流动方向。MTDs1 和 MTDs2 的地层直接接触, 即 MTDs1 的顶界面为 MTDs2 的底界面(图 7)。MTDs1 的地层沉积薄厚不一, 在下伏地层隆起的区域 MTDs1 的沉积少, 地

层相对较薄(图 7)。通过剖面可以看到, MTDs1 沉积厚度较薄的区域, 其上部的浊流沉积地层则相对较厚(图 8)。在层间也有部分区域发育连续性较好的地震反射, 这块连续性较好的地层有可能是浊流沉积的产物, 表明了块体搬运沉积在继续向坡下运动时会逐渐向浊流沉积转化, 重力流作用下的块体搬运沉积不是时刻发生, 在构造作用减弱的区域会发育较为连续的地层^[22]。MTDs1 的现今地貌图显示有许多凸起和凹陷的区域, 并且还有一些弓形的脊, 这些长约 10~15 km、宽约 2~3 km 的逆冲脊主要发育在逆冲构造形成的区域(图 9a)。MTDs1 主要通过起伏不平的顶界面对后期浊流沉积产生控制作用和影响, 这些凸起和凹陷会影响后期地层沉积的厚度和沉积物的流向, 这些脊也会阻碍和抑制后期沉积物的下坡运动。

MTDs1 之上是一期浊流沉积地层, 浊流沉积发育的地层相较于 MTDs 的地层连续性好, 呈中—强反射特征(图 7, 图 9d)。浊流沉积厚度图的西南低

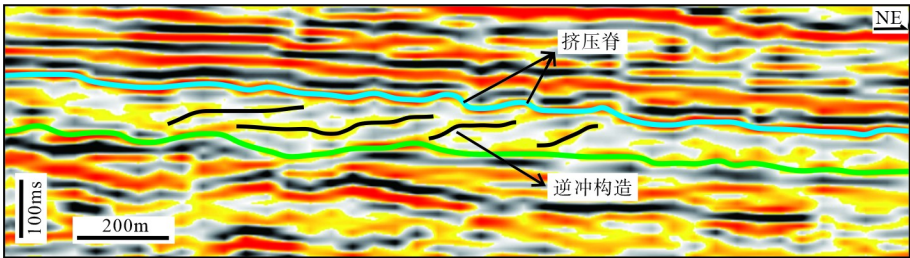


图 6 MTDs 挤压脊典型剖面
Fig.6 Typical sections showing MTDs squeeze ridge

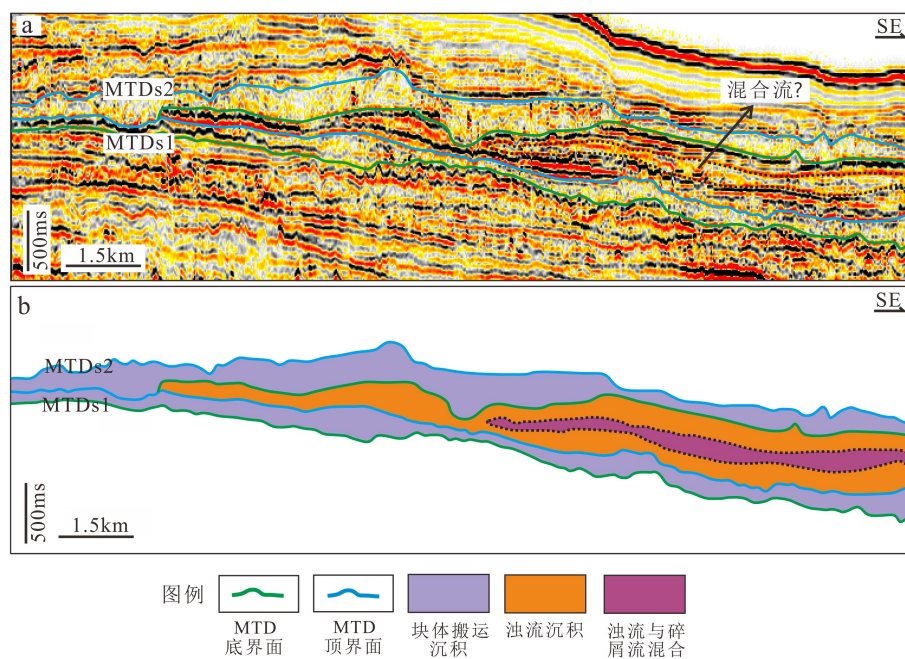


图 7 MTDs 与后期浊流沉积的典型剖面

Fig.7 Typical sections showing MTDs and late turbidity deposition

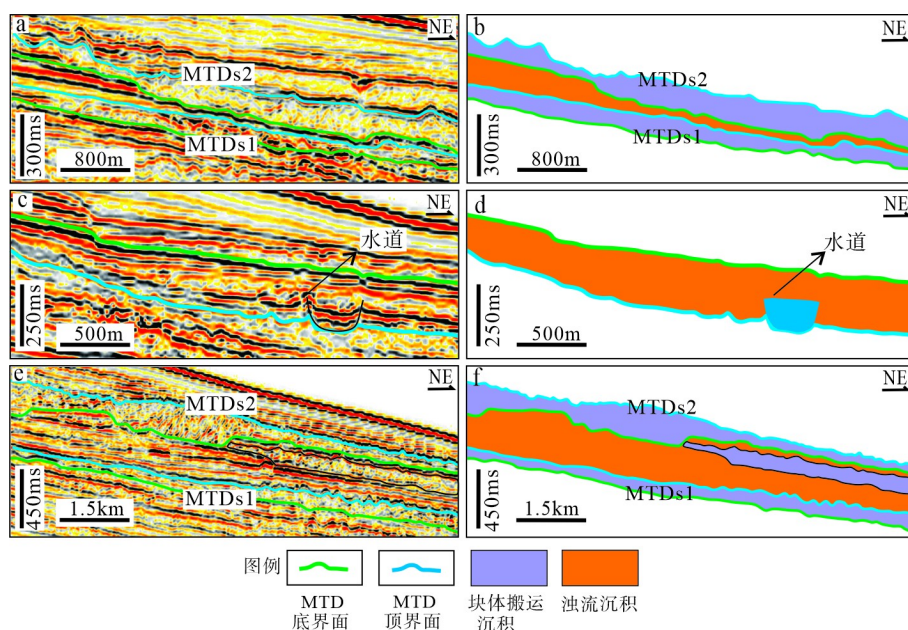


图 8 东北方向上后期浊流沉积的典型剖面

Fig.8 Typical sections showing late turbidity current deposition in the northeast

注区域显示, 浊流在此区域内沉积较少, 可能的原因是下伏 MTDs1 向上隆起或上覆 MTDs2 在搬运时侵蚀作用较大, 侵蚀了原本已经沉积的地层(图 7, 图 8a-b, 图 9b)。MTDs1 顶界面逆冲脊的区域内地形起伏较大, 脊与脊之间也可作为后期浊流的“通道”, 这些通道作为浊流沉积物搬运的载体又叫浊积水道, 浊积水道内部的振幅强于普通的浊流地层(图 7-9)。这些逆冲脊不仅可以作为浊流的通道,

而且也会抑制浊流的下坡运动, 改变浊流流向, 浊流顺着这些脊向地形低处继续运动沉积^[22]。在 MTDs1 东南角区域内, 其沉积较薄, 地层凹陷, 地形相较于前期较低, 因此后期的浊流在此处沉积的地层较厚, 其后的 MTDs2 却沉积较薄(图 8e-f, 图 9)。在此处浊流沉积的地层中还发现了混合流, 它是同一重力流事件中流体转化为多种不同性质流体的产物, 即碎屑流沉积与浊流沉积, 混合流的地层连续性比

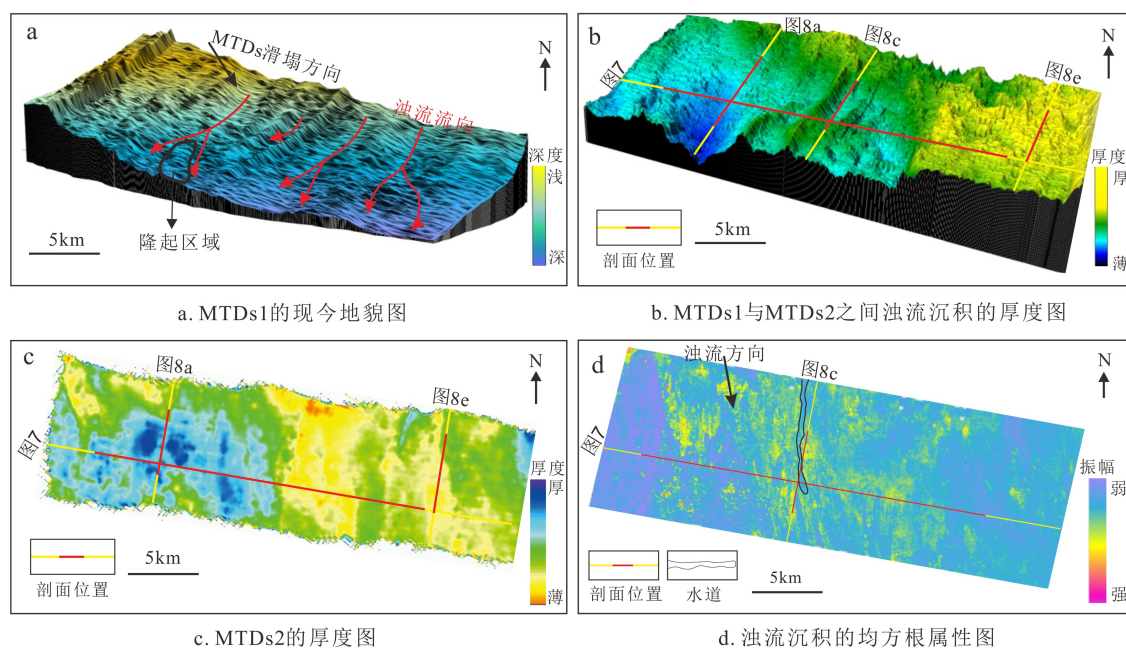


图 9 MTDs 与后期浊流沉积属性图

Fig.9 attribute map of MTDs and later turbidity current deposits

- a. Current geomorphology of MTDs1, b. thickness map of turbidity current deposits between MTDs1 and MTDs2, c. thickness map of MTDs2, d. the root mean square attribute map of turbidity current deposits.

块体搬运沉积好, 但比浊流沉积差(图 7)。浊流沉积的地层除了受到下伏 MTDs1 顶界面起伏地形的控制和影响, 还受到上覆 MTDs2 侵蚀作用的影响。当 MTDs2 的侵蚀作用变强, 会对已经沉积的浊流沉积造成侵蚀, 改变浊流沉积的地层厚度(图 8a-b、e-f)。当浊流沉积的地层厚度改变后又会反过来影响 MTDs2 的后续沉积, 因此这些控制作用都是相互影响的。

从整体来看, 因为 MTDs1 沉积的厚度分布不一, 就形成了起伏不平的顶界面, 海底凹凸不平的地形以及那些狭长的槽状地形会影响甚至改变后续浊流的走向及其沉积分布。MTDs1 的滑动方向与后期浊流的流向并不一致, MTDs1 的滑动方向是垂直于它所形成的逆冲脊, 而后期浊流的方向会随着地形不断改变(图 9a, 图 10a-b)。后期浊流沉积显示, 在 MTDs1 沉积厚、地形较高的区域浊流沉积较薄, 在 MTDs1 沉积较薄的区域浊流沉积的地层厚(图 9a-b, 图 10)。浊流沉积的地层起伏也会受到 MTDs1 的地形控制, 在浊流刚沉积时, 会首先填充 MTDs1 表面低洼区域, 之后填充沉积相对较平的地层。MTDs1 一些局部的突起太高, 后期的浊流沉积并不能完全覆盖这些隆起(图 7, 图 10c), 就会造成 MTDs1 直接与后期 MTDs2 接触并对其产生影响和控制作用(图 10b-c)。到 MTDs2 沉积时, 浊流沉积的地层对其起主要的控制作用, 它沿着浊流沉积的

表面逐渐沉积, 先是在低洼处大量沉积然后再向周围扩散沉积, 并且 MTDs 遇到下伏地层凸起处会受到地层影响而改变其自身形态。MTDs 的侵蚀能力会使 MTDs2 侵蚀下伏的浊积地层, 使下伏地层缺失并厚度减薄, 而自身的厚度增加。因此在浊流沉积较厚的区域, MTDs2 沉积较薄; 在浊流沉积较薄的区域, MTDs2 沉积较厚; MTDs2 的厚度会随着浊流沉积的起伏而分布不一(图 9b-c, 图 10)。

MTDs 顶面凸起的区域限制了浊流的继续流动, 改变浊流流向, 使其顺着凸起边缘向地势较低处继续搬运沉积。在其顶面低洼的区域, 如两脊之间的洼陷则充当了浊流的通道, 使浊流由通道向地形低处继续搬运沉积。浊流会不断因为 MTDs 地形的起伏而改变其流向, 地形高处抑制其搬运, 优先填充地形低处。当后期浊流沉积途径 MTDs 的起伏地形时, 会受到变形速率、泥沙供给、水流动力等的影响, 因此浊流的流向与其沉积分布会广泛受到 MTDs 起伏不平的地层控制。

4 结论

(1) 研究区所发育的深水重力流沉积单元包括块体搬运沉积体系、浊流沉积、水道堤岸复合体。

(2) 研究区 MTDs 总体表现为弱振幅、低连续、杂乱或空白的地震反射特征且具有明显的侵蚀作

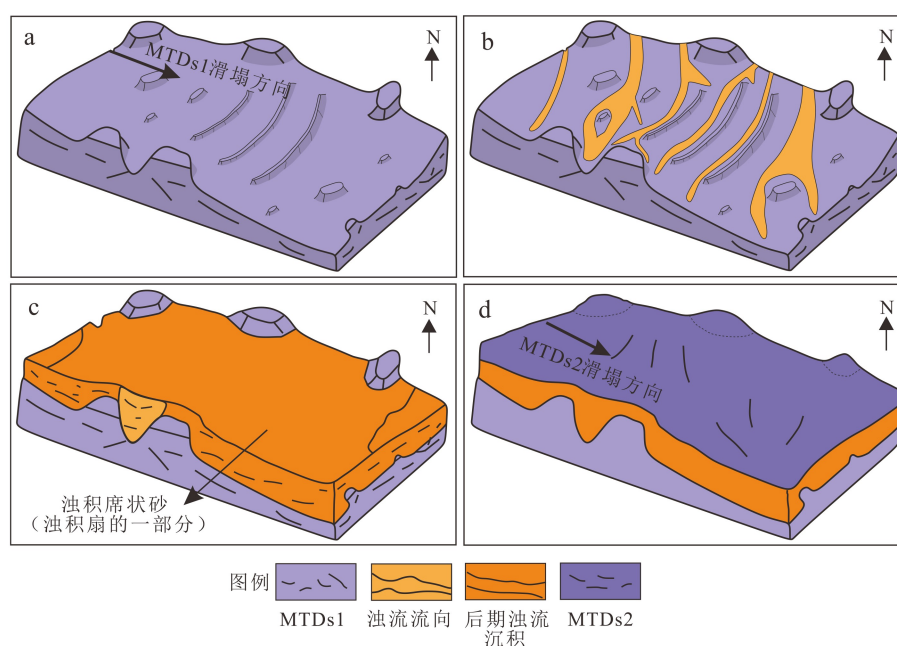


图 10 MTDs1 对后期浊流和 MTDs2 的控制作用

Fig.10 The control of MTDs1 on the late turbidity current and MTDs2

用。在研究区识别出 MTDs 体部区域发育大量侵蚀擦痕,其地震相特征为波状弱连续;以挤压作用为主的 MTDs 趾部区域多发育逆冲推覆构造和挤压脊,呈中—弱振幅、中—低连续的丘状地震反射特征。

(3) 研究区识别出两期 MTDs 分别为 MTDs1 和 MTDs2。MTDs1 在趾部挤压区域发育的逆冲脊长约 10~15 km、宽约 2~3 km,逆冲脊的发育改变了海底地形。通过对 MTDs 内部结构和 MTDs 起伏不平的顶界面的分析发现,MTDs 内部结构的变化造成其顶界面的凸起与凹陷,顶界面的起伏变化控制了后期浊流流向,且进一步影响了浊积岩的厚度和分布。

参考文献 (References)

- [1] Arthur M R, Gani M R. Submarine channel and lobe hidden inside mass-transport deposits in the northern Gulf of Mexico [J]. *Results in Geophysical Sciences*, 2021, 5: 100013.
- [2] 李磊, 王英民, 张莲美, 等. 块体搬运复合体的识别、演化及其油气勘探意义[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 76-82. [LI Lei, WANG Ying-min, ZHANG Lianmei, et al. Identification and evolution of mass transport complexes and its significance for oil and gas exploration [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 76-82.]
- [3] Nwoko J, Kane I, Huuse M. Mass transport deposit (MTD) relief as a control on post-MTD sedimentation: Insights from the Taranaki Basin, offshore New Zealand [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104489.
- [4] 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, 29(5): 65-72. [WANG Dawei, WU Shiguo, QIN Zhiliang, et al. Architecture and identification of large quaternary mass transport depositions in the slope of South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 65-72.]
- [5] Le Goff J, Sliotman A, Mulder T, et al. On the architecture of intraformational Mass-Transport Deposits: Insights from the carbonate slopes of Great Bahama Bank and the Apulian Carbonate Platform [J]. *Marine Geology*, 2020, 427: 106205.
- [6] Jablonská D, Di Celma C, Korneva I, et al. Mass-transport deposits within basinal carbonates from southern Italy [J]. *Italian Journal of Geosciences*, 2016, 135(1): 30-40.
- [7] 何玉林, 匡增桂, 徐梦婕. 北康盆地第四纪块体搬运沉积地震反射特征及成因机制[J]. 地质科技情报, 2018, 37(4): 258-268. [HE Yulin, KUANG Zenggui, XU Mengjie. Seismic reflection characteristics and triggering mechanism of mass transport deposits of Quaternary in Beikang Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2018, 37(4): 258-268.]
- [8] 秦磊, 毛金听, 倪凤玲, 等. 浅谈深水区块体搬运复合体的结构、成因分类以及识别方法[J]. 地球科学进展, 2020, 35(6): 632-642. [QIN Lei, MAO Jintin, NI Fengling, et al. A brief introduction to deep-water mass-transport complexes: structures, genetic classifications and identification methods [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(6): 632-642.]
- [9] Kneller B, Dykstra M, Fairweather L, et al. Mass-transport and slope accommodation: implications for turbidite sandstone reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(2): 213-235.
- [10] 苏明, 解习农, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 467-478. [SU Ming, XIE Xinong, WANG Zhenfeng, et al. Sedimentary evolution of the central canyon

- system in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34 (3): 467-478.]
- [11] 李安琪, 叶琦, 王真真, 等. 琼东南盆地陵水凹陷北部梅山组砂质碎屑流沉积特征及油气地质意义[J]. 地质科技通报, 2021, 40 (1): 110-118. [LI Anqi, YE Qi, WANG Zhenzhen, et al. Sedimentary characteristics and significance in hydrocarbon exploration of sandy debris flow in Meishan Formation of the northern Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40 (1): 110-118.]
- [12] 罗进华, 朱培民. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积体系超高精度解析[J]. 地质科技情报, 2019, 38 (6): 42-50. [LUO Jinhua, ZHU Peimin. Gravity induced deposits in the continental slope of Qiongdongnan Basin Based on ultrahigh resolution AUV data [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2019, 38 (6): 42-50.]
- [13] 李伟, 吴时国, 王秀娟, 等. 琼东南盆地中央峡谷上新统块体搬运沉积体系地震特征及其分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33 (2): 9-15. [LI Wei, WU Guoshi, WANG Xiujuan, et al. Seismic characteristics and distribution of pliocene mass transport deposits in central canyon of Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33 (2): 9-15.]
- [14] 杨田, 操应长, 田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报, 2021, 39 (1): 88-111. [YANG Tian, CAO Yingchang, TIAN Jingchun. Discussion on research of Deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39 (1): 88-111.]
- [15] 秦雁群, 万仑坤, 计智锋, 等. 深水块体搬运沉积体系研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39 (1): 140-152. [QIN Yanqun, WAN Lunkun, JI Zhifeng, et al. Progress of research on deep-water mass-transport deposits [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (1): 140-152.]
- [16] 李磊, 李彬, 王英民, 等. 块体搬运沉积体系地震地貌及沉积构型: 以珠江口盆地和尼日尔三角洲盆地为例[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44 (6): 2410-2416. [LI Lei, LI Bin, WANG Yingmin, et al. Seismic geomorphology and sedimentary architectures of mass transport deposits: Cases from Pearl River Mouth Basin and Niger Delta Basin [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44 (6): 2410-2416.]
- [17] 孙国桐. 深水重力流沉积研究进展[J]. 地质科技情报, 2015, 34 (3): 30-36. [SUN Guotong. A review of deep-water gravity-flow deposition research [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34 (3): 30-36.]
- [18] 冯湘子, 朱友生. 南海北部陵水陆坡重力流沉积调查与分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40 (5): 25-35. [FENG Xiangzi, ZHU Yousheng. Investigation of gravity flow deposits on the Lingshui slope of the northern South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40 (5): 25-35.]
- [19] 李磊, 王英民, 徐强, 等. 南海北部白云凹陷21Ma深水重力流沉积体系[J]. 石油学报, 2012, 33 (5): 798-806. [LI Lei, WANG Yingmin, XU Qiang, et al. 21Ma deepwater gravity flow depositional system in Baiyun sag, northern South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (5): 798-806.]
- [20] Bull S, Cartwright J, Huuse M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (7): 1132-1151.
- [21] Nwoko J, Kane I, Huuse M. Megaclasts within mass-transport deposits: their origin, characteristics and effect on substrates and succeeding flows [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2020, 500 (1): 515-530.
- [22] Bull S, Browne G H, Arnot M J, et al. Influence of Mass Transport Deposit (MTD) surface topography on deep-water deposition: an example from a predominantly fine-grained continental margin, New Zealand [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2020, 500 (1): 147-171.