

上新世早期块体搬运复合体运动标志识别与分析-以琼东南盆地东北陆坡为例*

琚泽龙^{1,2}, 詹文欢^{1,2*}, 郭建³, 吴晓川^{4,5}, 李健¹, 姚衍桃¹, 冯英辞¹, 孙杰¹, 王玘¹, 易虎^{1,2}, 黄嘉宪^{1,2}, 熊鑫⁶

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 511458
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队), 山东 济南 250014
4. 页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心, 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120
5. 自然资源部页岩气资源勘查重点实验室, 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120
6. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 江西 南昌 330013

摘要: 本研究通过对琼东南盆地深水高分辨率三维地震资料的精细解释, 在琼东南盆地东北部陆坡发现了 4 期块体搬运沉积复合体(mass transport complexes, MTCs): MTC1、MTC2、MTC3 和 MTC4。其中, MTC1、MTC2 和 MTC4 发育规模较小, 内部挤压程度低, 平均厚度 130~150m; MTC3 发育规模最大, 内部变形最为剧烈, 平均厚度 200m。通过识别和分析 MTC3 内部和外部的运动学标志, 确定了其向西南方向搬运, 并将其发育过程划分为初始边坡失稳阶段、滑移阶段和流体转换阶段。根据本次识别的 MTCs 形态及内部结构特征, 结合研究区的构造与气候演化背景, 认为该多期次 MTCs 的发育受地层坡度、海平面波动和高沉积速率的共同影响, 而红河断裂带持续走滑运动是其发育的主导控制因素。具体而言, 中新世晚期(10.5Ma)以后海平面的快速降低和上升, 改变沉积物强度和地层压力参数, 促进了 MTCs 的发育; 5.5Ma 以来琼东南盆地的快速沉降导致可容纳空间增大、物源进积以及坡度加大等, 为多期次 MTCs 的形成提供了条件; 红河断裂带持续走滑运动引发的断层活动则是触发该区域多期次 MTCs 的主要因素。本研究结果可增进对琼东南盆地东北部陆坡多期次 MTCs 的沉积特征及触发因素的认识, 也可探究南海地区 MTCs 的发育过程提供参考。

关键词: 琼东南盆地; 块体搬运复合体; 地震反射特征; 运动标志; 发育过程

Identification and Analysis of the kinematic Indicators of Early Pliocene Mass Transport Complexes: A Case Study of the Northeastern Continental Slope of the Qiongdongnan Basin

JU Zelong^{1,2}, ZHAN Wenhuan^{1,2*}, GUO Jian³, WU Xiaochuan^{4,5}, Li Jian¹, YAO Yantao¹, FENG Yingci¹, SUN Jie¹, WANG Pin¹, YI Hu^{1,2}, HUANG Jiaxian^{1,2}, XIONG Xin⁶

1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 511458, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources), Jinan 250014, China
4. National Joint Local Engineering Research Center for Shale Gas Exploration and Development, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China;
5. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China
6. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

Abstract: This study, through meticulous interpretation of high-resolution 3D seismic data from the deepwater area of the Qiongdongnan Basin, identified four stages of Mass Transport Complexes (MTCs) on the northeastern slope of the basin: MTC1, MTC2, MTC3, and MTC4. Among these, MTC1, MTC2, and MTC4 are relatively small in scale with low internal compression, averaging 130-150m in thickness; MTC3 is the largest in scale and exhibits the most intense internal deformation, with an average thickness of 200m. By identifying and analyzing the kinematic indicators within and outside MTC3, it was determined that it was transported towards the southwest, and its development process was divided into the initial slope instability stage, the sliding stage, and the fluid transformation stage. Based on the morphology and internal structural characteristics of the identified MTCs, combined with the tectonic and climatic evolution background of the study area, it is concluded that the development of these multi-stage MTCs is influenced by the combined effects of stratigraphic slope, sea level fluctuations, and high sedimentation rates, with the continuous strike-slip movement of the Red River Fault Zone being the dominant controlling factor. Specifically, the rapid fall and rise of sea levels after the late Miocene (10.5Ma)

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3103800, 2023YFC3008602), 国家自然科学基金项目(42206069, 42272098, 42306092), 广州市科技计划项目(2023A04J0191), 重庆市科研机构绩效激励引导项目(cstc2022jxj190001), 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1406)

作者简介: 琚泽龙(2000—), 男, 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 从事海洋地质灾害研究。email: zelong.ju.apply@outlook.com

通信作者: 詹文欢。email: whzhan@scsio.ac.cn

*感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改意见和建议

Foundation item: National key Research and Development Program of China (2022YFC3103800, 2023YFC3008602), National Natural Science Foundation of China(42206069, 42272098, 42306092), Science and Technology Projects of Guangzhou(2023A04J0191), Chongqing Municipal Scientific Research Institutions Performance Incentive and Guidance Project(cstc2022jxj190001), National Natural Science Foundation of ChongQing(CSTB2022NSCQ-MSX1406)

Corresponding author: ZHAN Wenhuan, email: whzhan@scsio.ac.cn

altered sediment strength and stratigraphic pressure parameters, promoting the development of MTCs; the rapid subsidence of the Qiongdongnan Basin since 5.5Ma has led to increased accommodation space, progradation of sediment sources, and increased slope, providing conditions for the formation of multi-stage MTCs; the fault activity triggered by the continuous strike-slip movement of the Red River Fault Zone is the main factor triggering the multi-stage MTCs in this region. The results of this study can improve the understanding of the depositional characteristics and triggering factors of multi-phase MTCs on the land slope in the northeastern Qiongdongdong Basin, and also provide a reference to explore the development of MTCs in the South China Sea.

Keywords: Qiongdongnan Basin; mass transport complexes; seismic reflecton characteristics; kinematic indicators; qevelopment process

引言

块体搬运沉积复合体(mass transport complexes, MTCs), 是大陆斜坡、峡谷、水道、或隆起构造翼部等区域, 由于重力作用导致不稳定的海底沉积物发生滑移和搬运而形成的沉积体(Weimer, 1990; Bryn et al, 2005; Scarselli, 2020; Cheng et al, 2021)。MTCs 在全球海域广泛分布, 是深水盆地地层记录的重要组成部分。MTCs 可以运输(Bernhardt, Schwanghart et al, 2017)大量的沉积物, 是大陆边缘沉积物转移到深海的重要途径(Hampton et al, 1996; Locat et al, 2002; Posamentier and Martinsen, 2011; Scarselli, 2020), 在全球“从源到汇”的研究中占有重要地位(李铁刚 等, 2003; Moscardelli, 2007; 马宏霞 等, 2011)。

MTCs 也是最主要的海底地质灾害之一, 其在海底的运动不但会破坏深海油气钻探、输油管道、海底电缆等海底工程设施; 同时它还可能在搬运过程中, 由于速度快、体积大而导致海底地形急剧升降, 进而引起水体扰动, 最终形成海啸, 对沿海人民的生命财产造成难以估量的损失(Piper et al, 2002; Bondevik et al, 2012; Harbitz et al, 2013; Schnyder et al, 2016)。

对于深海油气田勘探而言, 不同岩性的 MTCs 既可作为盖层, 也可作为储层。其中, 富泥质的 MTCs 不仅具有低孔、低渗特征, 并且底界面由于剪切作用而发生液化、脱水和超压作用(Wu et al, 2019a), 从而使其封闭性进一步增强, 因此可以作为一种良好的区域型顶部封闭和侧向封闭地层。而富砂质碎屑的 MTCs 则可成为潜在的油气储层(Mcgilvery et al, 2004; 王大伟 等, 2011; Wu et al, 2019a), 因为富含砂质的 MTCs 往往由于压实作用不足而导致孔隙度较高, 一旦有油气注入就可以成为有开发价值的油田。

琼东南盆地东北部陆坡区富含大量的油气资源, 并发育多期 MTCs(王大伟 等, 2009); Qin 等(2015)在琼东南盆地东北部陆坡识别出 3 个超大型第四纪 MTCs, 并且对其展布范围和厚度进行了统计; 王大伟 等(2009)和李伟 等(2013)在琼东南盆地中央峡谷区识别出了第四纪期间发育的 MTCs; 孟苗苗 等(2024)和杜浩 等(2021)探讨了琼东南盆地第四纪发育的 MTCs 对水合物成藏的潜在影响。已有研究主要集中在对琼东南盆地第四纪以来 MTCs 的识别与分析, 而对于更早时期发育的 MTCs 则鲜有报道。其原因主要是, 一方面受限于过去调查技

术和数据处理方法带来的分辨率不足而难以揭示更精细的深部地质信息; 另一方面以往该区域的相关研究多基于二维地震数据, 这在一定程度上限制了对更早期 MTCs 的深入认识。

近 20 年来, 随着三维地震勘探技术在 MTCs 运动标志研究领域的应用与发展, 极大地增进了人们对 MTCs 运动过程的认识(Posamentier and Kolla, 2003; Martinez et al, 2005; Gee et al, 2005; 2006; 2007; Moscardelli et al, 2006; Bull et al, 2009; Posamentier and Martinsen, 2011; Bernhardt et al, 2017)。三维地震数据的高分辨率使得我们能够对海底进行大规模的层位追踪, 从而精细重建海底地形地貌特征; 通过从地貌学的角度分析地震剖面、水平切片和属性图, 我们能够揭示各沉积单元的细节特征(Posamentier and Kolla, 2003; Gamboa and Alves, 2015)。这些技术的进步为我们深入理解海底地质结构和沉积过程提供了强有力的工具。

本研究利用三维地震数据在琼东南盆地东北部陆坡识别出中新世晚期-上新世发育的多期次 MTCs, 并利用三维地震数据的优势, 对多期次 MTCs 中规模最大、发育特征最为显著的 MTC3 进行了运动标志的精细刻画与分析, 旨在探讨 MTC3 的运动过程和发育阶段。同时, 本研究综合考虑了多期次 MTCs 的地震反射特征与区域地质构造背景, 探讨了它们的形成机制及主要控制因素。本研究不仅填补琼东南盆地东北陆坡区第四纪前 MTCs 精细研究的空白, 而且为该区域晚中新世以来的沉积物搬运、沉积过程及相关的古海洋学研究提供了宝贵的证据。

1 地质背景

琼东南盆地位于南海西北部, 面积约为 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。该盆地是西太平洋最大的被动大陆边缘盆地之一, 古近纪以来在南海大陆裂谷作用下, 由岩石圈伸展而逐渐形成(Hu et al, 2024)。琼东南盆地北接海南岛, 西接红河断裂带和莺歌海-宋洪盆地, 东接珠江口盆地, 南接广乐和永乐隆起(图 1a)。琼东南盆地新生代以来经历了复杂的构造活动, 从初始裂陷期发展到裂后沉降期, 整体上形成了“三拗两隆”的构造格局。琼东南盆地古近纪-新近纪地质演化可划分为裂谷期、裂陷期、热沉降期和加速热沉降期 4 个主要阶段(Zhao et al, 2016)。与这些构造演化相对应的是以古新世-渐新世为代表的非海相沉积和早中新世-中中新世为代表的近岸和浅海

沉积(Xie et al, 2006)。

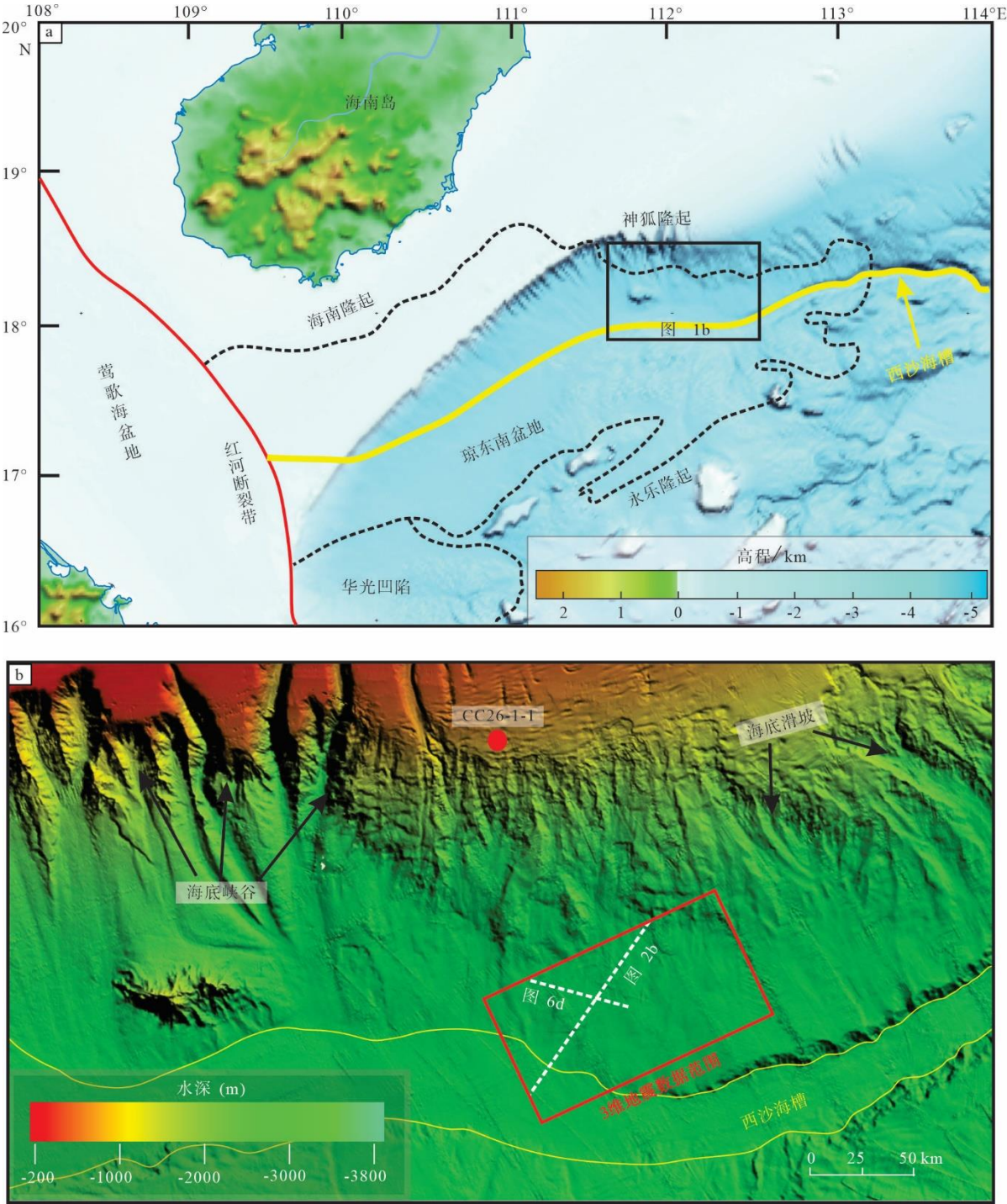


图 1 a 研究区示意图和 b 研究区地形地貌特征

图 a 基于南海地质地球物理图系(杨胜雄 等, 2015)的审图号为 JS(2015)02-107 的标准地图制作, 底图无修改。图 a 中黑色虚线代表琼东南盆地的分布范围[据 胡守祥(2021)修改], 红色直线代表红河断裂带, 黄色直线代表西沙海槽, 黑色方框表示研究区位置。图 b 中红色方框表示地震数据范围, 白色虚线表示图 6d 和 2b 地震剖面所在的位置, 红点代表 CC26-1-1 井所处位置。

Fig. 1 a Schematic map of the study area and b topographic and geomorphological features of the study area

琼东南盆地北部陆坡在晚中新世开始发育, 期间受到红河断裂带和太平洋 NW 向俯冲的影响, 盆地沉降幅度大, 陆架坡折形态逐渐形成, 而且坡度进一步变陡。琼东南盆地受红河和海南岛双物源供给的影响, 晚中新以后陆架边缘沉积物供给充足, 沉积物不断向陆架坡折推进, 形成了明显的陆架-陆坡体系(马云 等, 2012; 李艳 等, 2021; 马畅 等, 2022)。通过地震地层学和测井资料

分析, 可在研究区新生代地层中识别出 5 个地层界面(Xie et al, 2006; Wu et al, 2009;), 这些界面把地层分为三亚组、梅山组、黄流组和莺歌海组(T60~T20; 图 2a)。本研究的 MTCs 所涉及的地层包括晚中新世砂层黄流组和上新世以细粒沉积为主的莺歌海组(图 2a)。晚中新世以来, 琼东南盆地及海南岛地区断裂持续活动, 地震时有发生, 这些因素增加了沉积地层的不稳定性, 导致该地

程, 经历了多次大规模的海平面变化(谢金有 等, 2012; 李伟 等, 2013)。

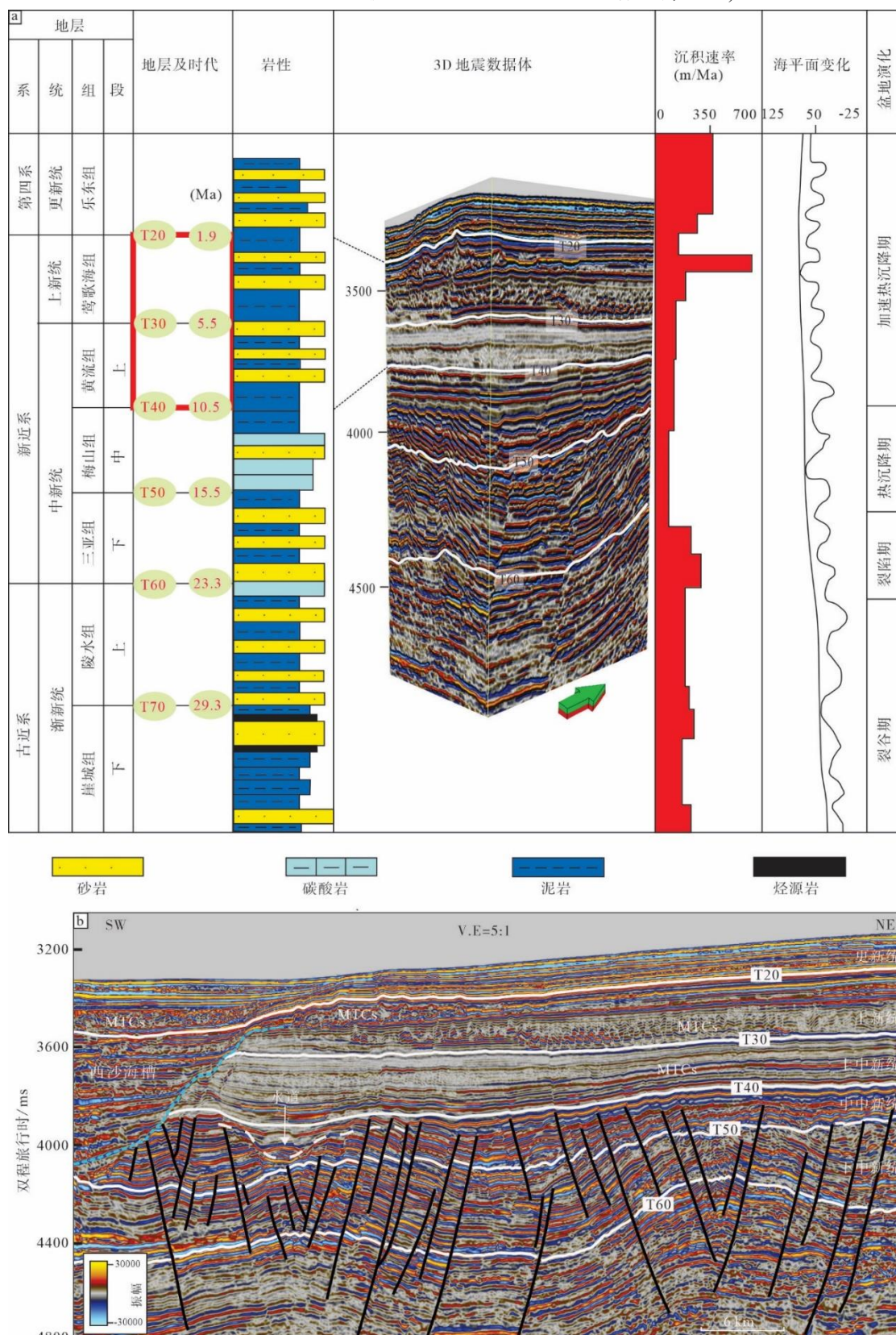


图 2 a 琼东南盆地地层柱状示意图和 b 地震层序界面

图a地层修改自Hu 等(2024), 岩性剖面来自蔡佳 等(2017), 沉积速率来源于Zhao 等(2016), 海平面变化曲线据李伟 等(2009)和Zhao 等(2016)。T20 (约 1.9Ma)是乐东组与莺歌海组的分界面; T30 (约 5.5Ma)是莺歌海组和黄流组的分界线; T40 (约 10.5Ma)是黄流组和梅山组的分界面; T50 (约 15.5Ma)是梅山组和三亚组的分界面; T60 (约 23.8Ma)是三亚组和陵水组的分界面。图 a 中红色实线框所对应的地层(晚中新世—上新世地层)为研究目标地层; 图 b 中白色实线(T20~T60)表示研究区区域地震反射界面, 黑色实线表示断层, 白色虚线表示水道的边界, 蓝色虚线表示西沙海槽的边界。

Fig. 2 a The integrated stratigraphic column of Qiongdongnan Basin and b seismic age horizon map

2 数据和方法

本研究所使用的三维(3D)地震数据体由中国海洋石油总公司提供,覆盖面积约为 334km²。该地震资料的基本参数为:总接收道数为 576 道,炮间距为 37.5m,共中心点间距为 12.5m;地震频率带宽约为 40~60Hz,主频约为 55Hz。基于 4ms 的垂直采样率和 25m 采样间隔,研究层段平均垂直分辨率为 5~10m。尽管本研究的 3D 数据体覆盖范围内缺乏钻井资料,但位于研究区以北的 CC26-1-1 井(钟佳 等, 2019; Li et al, 2021; Li et al, 2023)能够为本研究提供关键的地层对比信息。此外, Li 等(2021; 2023)对研究区的地震测线解释成果也可为本研究地震剖面解释中的层序界面追踪提供重要参考。

依据 Zhao 等(2016)通过地震剖面 and 钻井数据得到的地层时深转换公式,本研究以 2000m·s⁻¹ 的平均地层速度来计算运移块体规模和 MTCs 的厚度。根据钟佳 等(2019)对 CC26-1-1 的地层沉积特征和年代学研究结果,同时参考 Li 等(2021; 2023)对研究区所识别的地震层序界面,本研究建立了琼东南盆地东北部陆坡的地层年代格架(图 2b),并解释了 5 个关键的地震反射界面,其中在 T40 至 T20 界面内识别出多期次的 MTCs。此外,对高振幅的连续反射和中-弱振幅的杂乱反射的交界面进行追踪,以识别 MTCs 内部的沉积特征和层序结构。本研究基于研究区典型地震剖面的振幅强弱、连续性、频率高低和内部反射结构,并结合所创建的振幅时间切片和相干切片,对 MTCs 的地震相及其内部运动标志进行精细识别和解释。在此基础上,获得 MTCs 的运移方向和内部结构特征,最后结合区域地质背景,探讨 MTCs 的发育过程和主要控制因素。

3 解释结果

3.1 地层划分

地震剖面的地层单元解释结果显示,本研究的沉积地层共识别出 5 个地震反射界面(T60、T50、T40、T30 和 T20),并由此确定了 4 个地层组,从下至上依次为三亚

组、梅山组、黄流组和莺歌海组(图 2a)。其中,三亚组(T60~T50)的沉积时代大致为早中新世(23.3~15.5Ma),地震反射呈中强振幅中高频连续前积相;岩性上可能为灰白色、浅灰色粉细砂岩与深灰色泥岩的不等厚互层,指示浅滨海相-半深海相的环境(蔡佳 等, 2017)。梅山组(T50~T40)沉积于中中新世(15.5~10.5Ma),地震反射呈中强振幅中频连续席状地震相;岩性与三亚组相比无太大变化,但沉积物中多含灰质,以半深海相沉积体系为主(闫琢玉 等, 2023; 冯杨伟 等, 2016)。黄流组(T40~T30)沉积于上中新世(10.5~5.5Ma),地震反射呈弱振幅低频连续地震相;岩性可能呈浅灰色粉砂岩、泥质粉砂岩与深灰色泥岩的不等厚互层,以半深海相沉积体系为主(李杰 等, 1999; 罗泉源 等, 2023)。莺歌海组(T30~T20)沉积于上新世(5.5~1.9Ma),地震反射呈弱振幅低频杂乱地震相,并出现有丘状和楔状的反射结构。岩性上对应于 CC26-1-1 中的浅海-半深海相沉积(付超 等, 2017),以深灰色泥岩,间夹灰色砂岩和泥质砂岩为主。

本研究所识别出的 MTCs 主要发育于晚中新世黄流组砂层和上新世莺歌海组的细粒沉积层中。晚中新世黄流组的地震反射顶、底界面平行,内部反射杂乱,缺少有序排列的波阻抗界面,代表 MTCs 层状流态典型的地震响应特征(马宏霞 等, 2011)。上新世莺歌海组中还可以识别出 MTCs 内部块体的典型地震反射特征:中-强振幅,内部反射中度变形,连续性较好,与周围杂乱反射具有明显的边界(图 2)。

3.2 多期次 MTCs 发育特征

本研究利用高分辨率三维地震数据,对杂乱地震反射内的高振幅、高连续性反射界面进行追踪,共识别出 8 个连续界面(H1~H8)(图 3c),代表了 MTCs 的顶底界面所在位置。在这些界面所限定的地层中则发育有 4 期具有一定厚度的可明显识别的 MTCs,由下至上依次被标示为 MTC1、MTC2、MTC3、MTC4(图 3b)。各期 MTCs 在地震相特征、运动标志、平均厚度等方面都存在着差异(表 1),下文将展开详细的叙述。

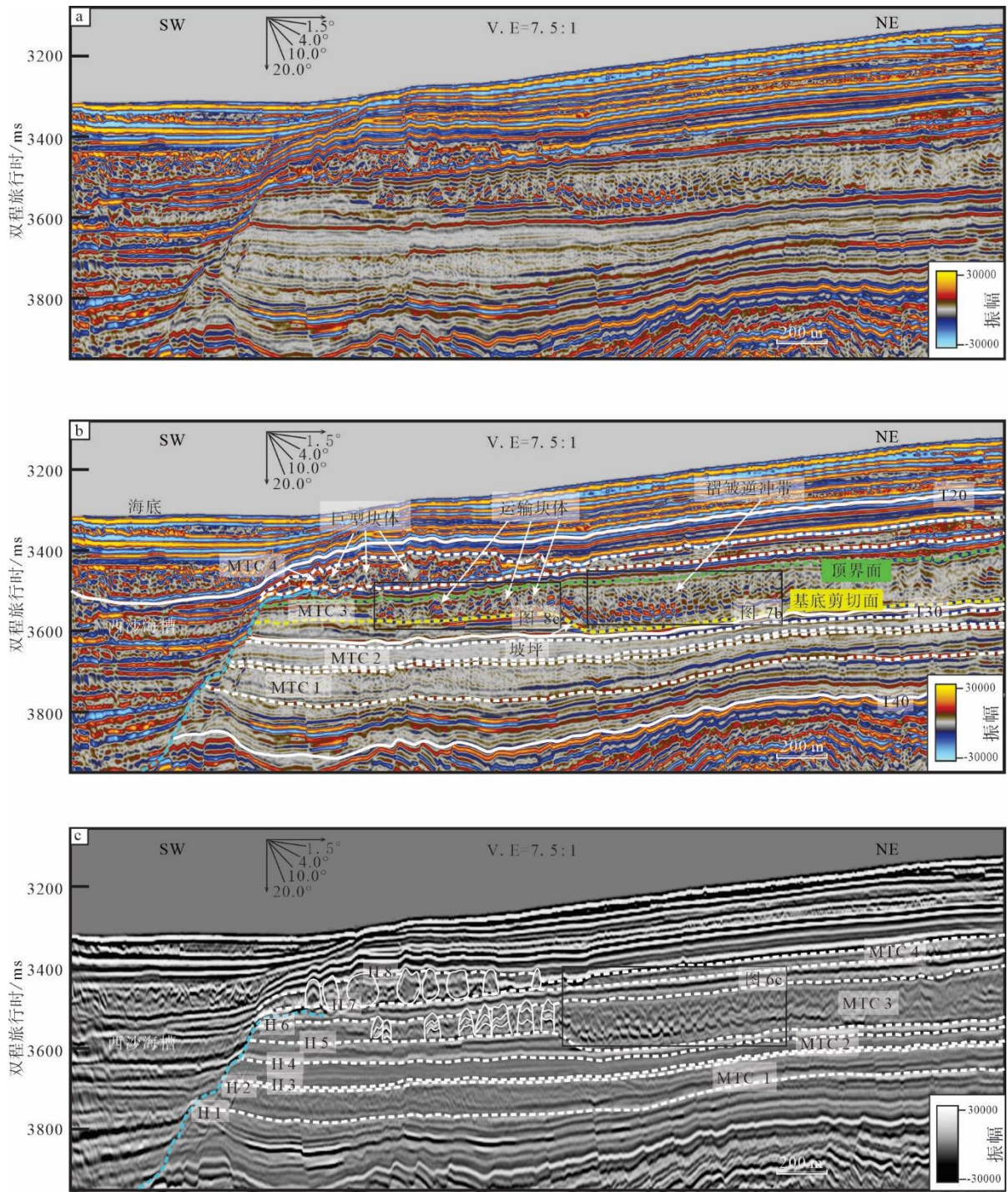


图 3 a NE—SW 未解释的地震剖面, b NE—SW 已解释的地震剖面, c MTC3 内发育的运动标志, c MTCs 的顶底界面和块体
 图 b 显示了研究区块体搬运沉积复合体(MTCs)的整体发育情况, 包含 4 个关键层位(T40、T30、T20 和海底)、MTCs 主要发育位置和 MTC3 内发育的运动标志。图中白色实线(T20—T40)代表研究区区域地层界面, 白色虚线代表 MTC1、MTC2、MTC4 的顶底界面, 绿色和黄色虚线分别代表 MTC3 的顶界面和基底剪切面, 蓝色虚线代表西沙海槽边界。图 c 展示了 MTC3 和 MTC4 中的块体。
 Fig. 3 a NE-SW uninterpreted seismic profiles, b NE-SW interpreted seismic profiles and kinematic indicators developed within MTC 3, c top-bottom interfaces and blocks of MTCs

表 1 各期 MTCs 发育的运动标志和地震相特征
 Tab. 1 The Kinematic Indicators and Seismic Facies Characteristics in MTCs' Development

MTCs	类型	时代	平均厚度/m	运动标志	地震相特征
MTC4	含块体	上新世	130	挤压脊、块体和滑动轨迹	中-强振幅, 杂乱反射, 块体内部表现为杂乱、透明反射特征
MTC3	含块体	上新世	200	挤压脊、沟槽、块体、滑动轨迹和逆冲褶皱带	中-强振幅, 杂乱反射, 块体内部表现为强振幅平行、倾斜堆叠反射特征.
MTC2	不含块体	早中新世	150	挤压脊	弱振幅, 高连续性, 水平状
MTC1	不含块体	早中新世	140	挤压脊	弱, 半透明, 杂乱反射

(1)MTC 1 位于多期次 MTCs 的底部,多边形断层的上部。其地震相特征为弱振幅、半透明、混乱叠置。受到 T40 界面形态的约束(图 3b), MTC1 在地震剖面上表现为西南侧较厚、东北侧较薄的特征,最大厚度为 150m,最小厚度约为 130m,平均厚度约为 140m。MTC1 不含块体,可识别的运动标志为挤压脊。

(2)MTC2 同 MTC1 相似,不含块体。MTC2 地震相特征为弱振幅、半透明。同样受到 T30 和 T40 界面的约束(图 3b),厚度整体表现为西南侧较厚东北侧较薄,平均厚度为 150m。

(3)MTC3 含运输块体,整体呈现中-强振幅、杂乱的地震反射特征。MTC3 从东北向西南方向厚度逐渐减小,平均厚度为 200m。其发育有 MTCs 较为完整的体-趾部结构,包括挤压脊、运输块体、逆冲褶皱带、滑动沟槽等。逆冲褶皱带表现为强振幅的倾斜堆叠反射,呈阶梯状排列(图 3b)。MTC3 的运输块体由强振幅的平行、倾斜堆叠反射组成,在地震剖面上呈向上凸起的丘状,其分布主要集中在 MTC3 的西南侧(图 3c)。

(4)MTC 4 位于多期次 MTCs 的顶部,整体表现为中-强振幅、杂乱的地震相。MTC4 含巨型块体,块体内部

呈现杂乱、透明的地震反射。MTC4 厚度变化较大,平均厚度为 130m,块体主要集中在西南侧(图 3c)。

上述各期 MTC 中, MTC3 规模最大,内部挤压结构也更为发育,其顶界面和基底剪切面反射清晰(图 3b)。此外,MTC3 的基底剪切面较为连续,且与下方未变形地层平行,在三维地震数据中可以对 MTC3 的基底剪切面进行大面积的追踪。因此,本研究将重点分析 MTC3 的外部侵蚀特征和内部变形结构,并由此来探讨研究区中 MTCs 的运动过程和控制因素。

3.3 MTC 3 运动标志

在振幅时间切片上可以清晰识别 MTC3 的陡坎,但其侧边边界相对模糊。然而,在地震剖面上,MTC3 的侧边边界则清晰可辨。通过将其在地震剖面上的位置与振幅时间切片相结合,可以精准地在时间切片上界定 MTC3 的侧边边界。本研究主要在振幅时间切片上对 MTC3 体-趾部发育的滑动沟槽、逆冲褶皱带、挤压脊、运输块体和滑动轨迹进行识别(图 4),并尽可能利用三维地震数据进行大面积追层重塑,然后在此基础上对这些运动标志展开详细描述。

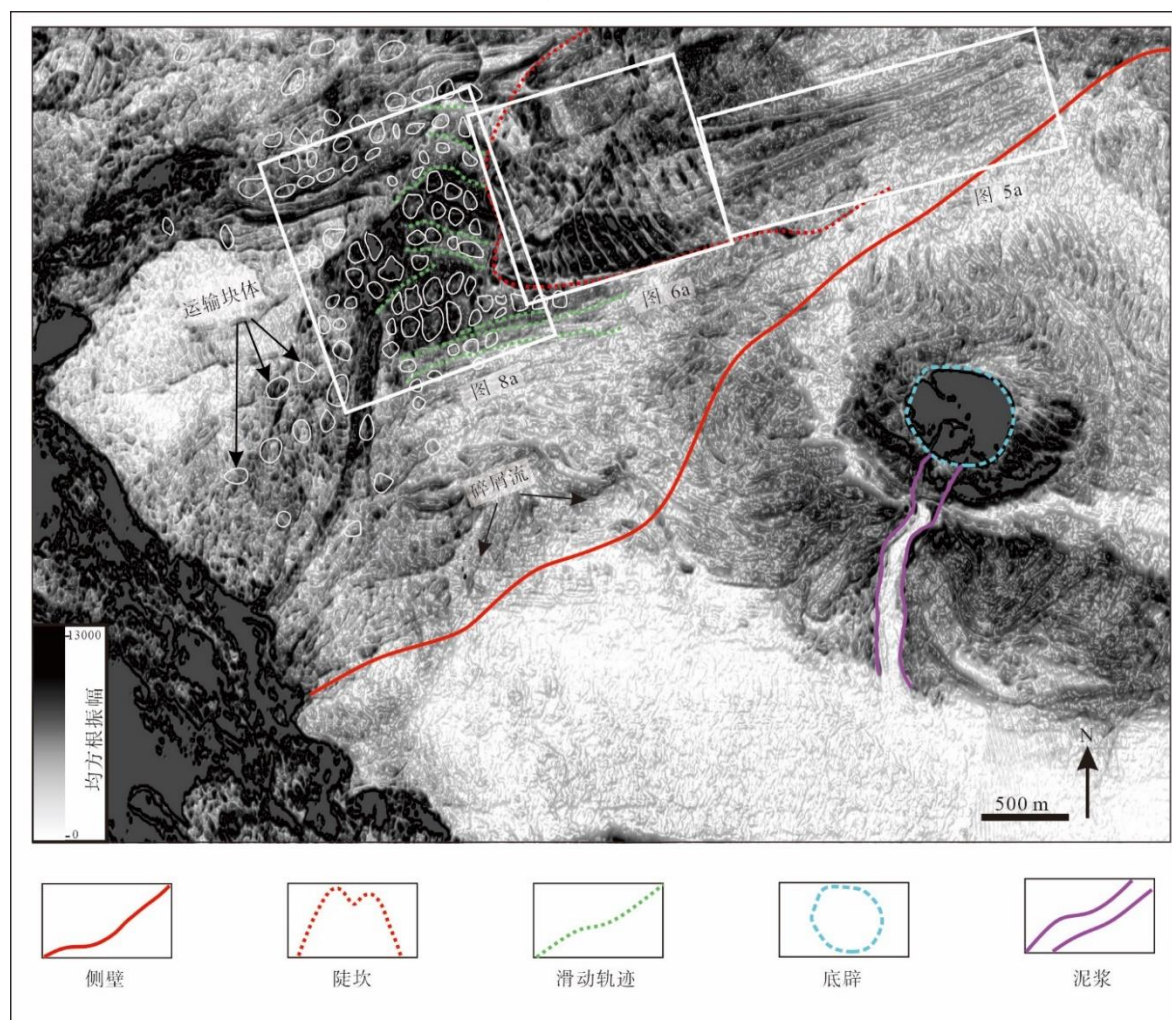


图 4 MTC3 内部提取的均方根振幅切片显示的运动标志

注意: 逆冲褶皱带及其外围的碎屑流特征共同构成了同沉积逆冲断层双重构造

Fig. 4 Kinematic indicators displayed in the root mean square amplitude slices extracted from within MTC3.

3.3.1 滑动沟槽

在 MTC3 振幅时间切片和地震剖面上, 均可识别出 6 条滑动沟槽(图 5)。这些滑动沟槽在走向上沿 NE-SW 展布, 且均发育在逆冲褶皱带的上坡方向(图 4)。滑动沟槽延伸长度 2696~3793m,宽度 37~121m; 沟槽间隔头部

较宽,大于 200m, 尾部小于 100m(图 5a)。地震剖面显示滑动沟槽呈 U 型或 V 型, 发育于 MTC 3 的基底剪切面上(图 5b)。滑动沟槽下伏地层(基底剪切面)同相轴被断开, 其内部为杂乱或者空白反射, 呈波状弱连续的地震相特征。

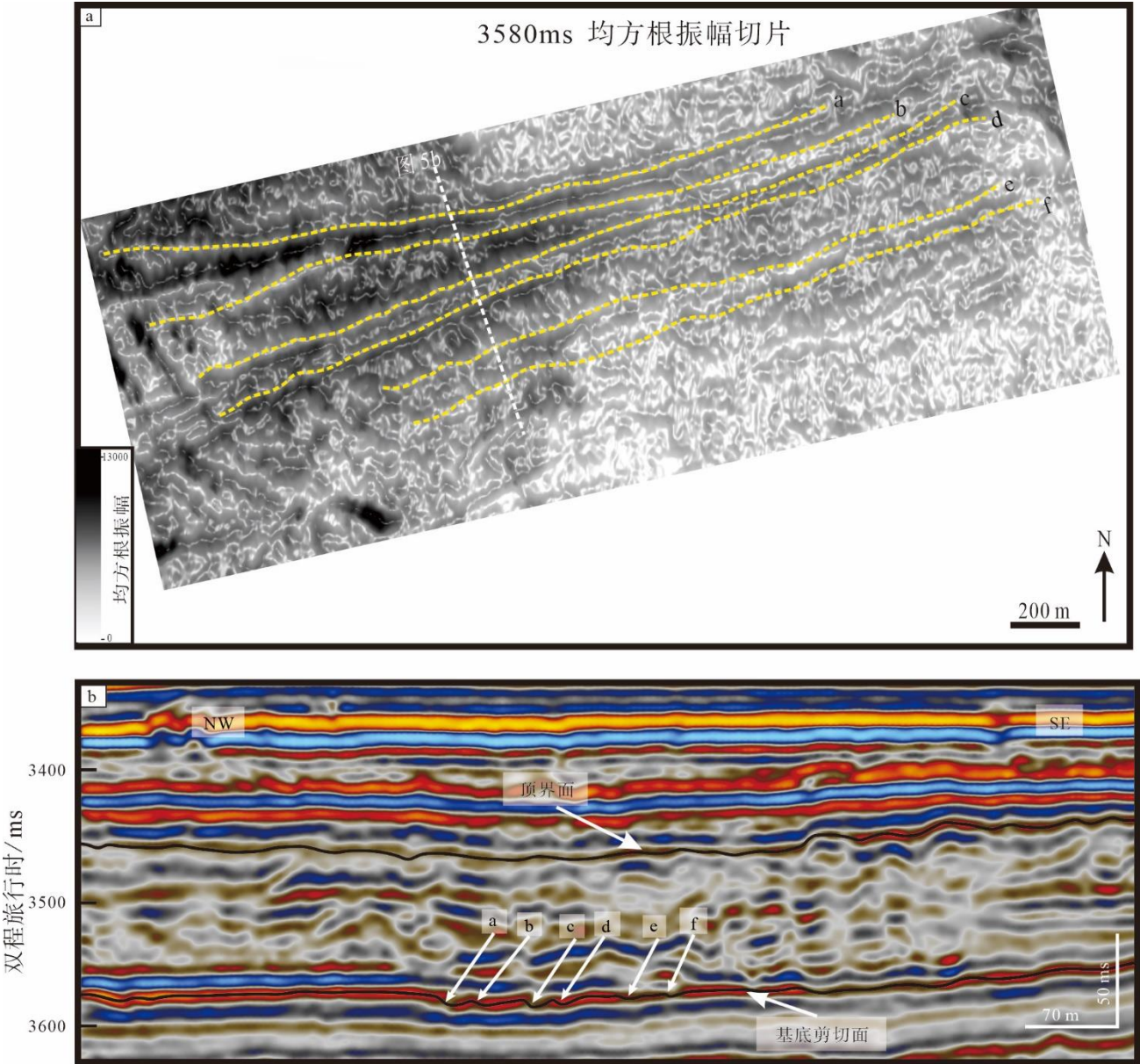


图 5 a 均方根振幅切片展示的滑动沟槽分布和 b 地震剖面展示的滑动沟槽
Fig. 5 a grooves on the root mean square amplitude slice and b grooves on the seismic profile

3.3.2 逆冲褶皱带

逆冲褶皱带在 MTCs 的趾部以连续的弧形沿陆坡下倾方向凸出(图 6a), MTCs 沉积层内表现为低振幅或局部中强振幅及连续性差的地震反射特征。沉积物呈叠瓦状排列在地震剖面上主要表现为丘状外形及波状反射, 总体呈弱振幅, 局部为中强振幅、弱连续性的地震反射特征(图 6c)。内部发育的叠瓦式逆冲断层厚度较大, 达数百米, 常出现在 MTCs 的末端, 基本都止于滑坡体内部, 其

上面充填基质与顶面相接(图 6c)。MTC3 趾部的逆冲断层覆盖面积为 6.7km², 约占趾部空间的 60%。在平面解释图上, 断层被不同的剪切边界所分割(图 6b)。研究区的逆冲断层几乎都向上坡方向倾斜, 并且在基底剪切面上分离。叠瓦状扇片只是一个板状体, 它是由一组紧密而规则地间隔开的、尺寸和最大位移大致相等的逆冲断层变形而来, 单个断层最大长度约为 250m。

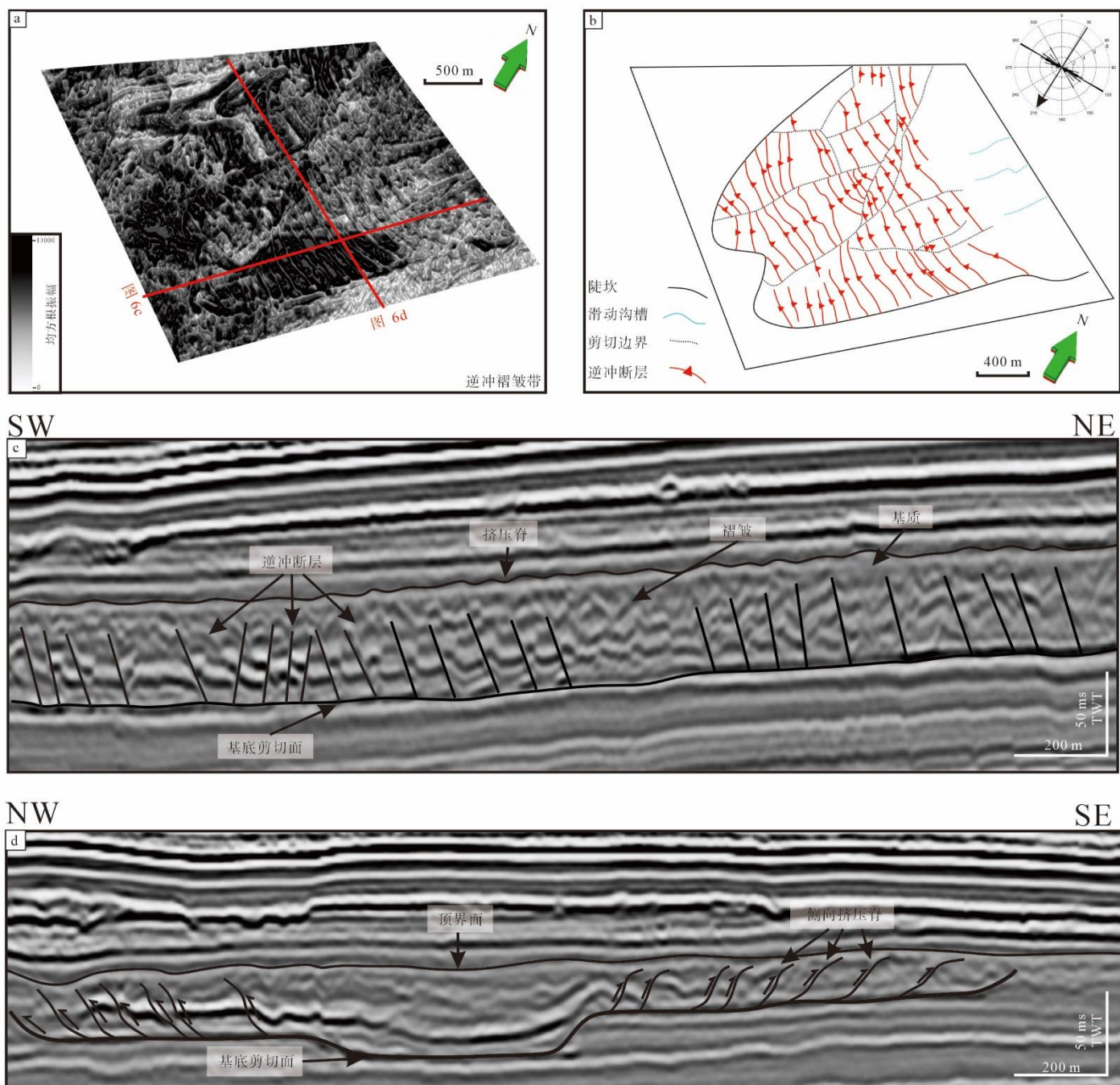


图 6 MTC3 内发育的逆冲褶皱带: a 振幅切片; b 振幅切片解释图, 玫瑰花图表示挤压断层的走向, 反映 MTC 3 的运动方向; c 逆冲褶皱带中的横向地震剖面; d 逆冲褶皱带中的纵向地震剖面

Fig. 6 Fold and thrust systems developed within MTC3: a Amplitude slice; b Interpretation of the amplitude slice; c Lateral seismic profile through the fold and thrust systems; d Longitudinal seismic profile through the fold and thrust systems

3.3.3 挤压脊

挤压脊是 MTCs 形成初期软质沉积物受挤压变形的结果, 通常发育于 MTCs 的趾部。由于它们的规模很小, 在地震剖面中通常难以分辨, 故利用 MTCs 振幅时间切片(3490ms)进行识别和分析。挤压脊与 MTCs 基质有关, 出现在 MTCs 的顶部, 表现为以一种无约束的方式向运输

方向自由扩展的叶状地貌(图 7a), 因此本研究将 MTC3 顶界面上呈现细长的彼此平行或亚平行的地形起伏约为 15ms(TWT)的结构判定为挤压脊(图 7b)。MTC3 的挤压脊在逆冲褶皱带区域更为明显, 相较于其他区域其起伏程度也更剧烈。

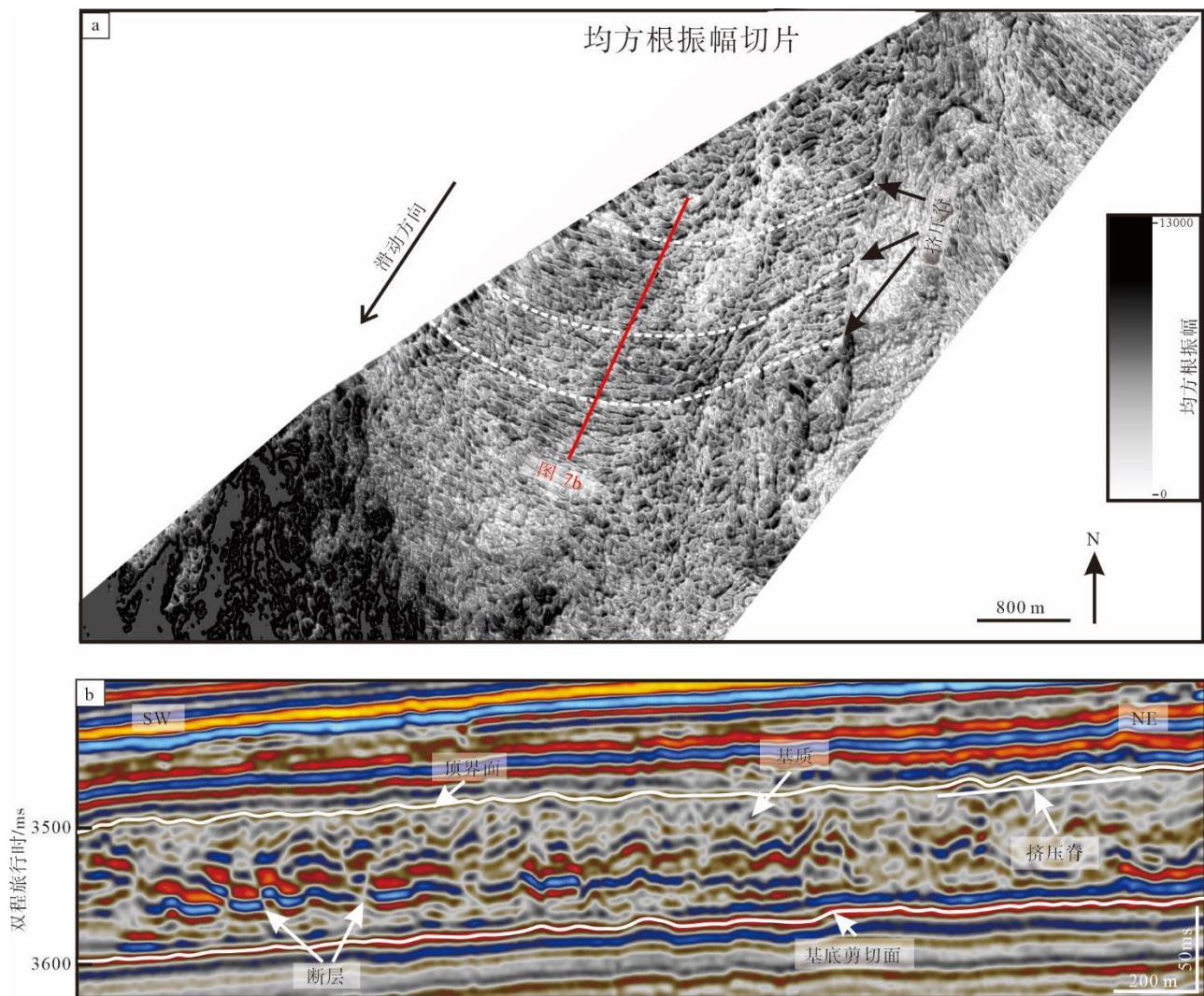


图 7 MTC3 内发育的挤压脊: a MTC 3 顶界面振幅切片; b 穿过挤压脊的地震剖面
Fig. 7 Pressure ridges developed within MTC3: a Amplitude slice at the top interface of MTC 3; b Seismic profile crossing the compressional ridge

3.3.4 运输块体和滑动轨迹

运输块体是在 MTCs 主体内部或向运输方向搬运的沉积物连贯体。相较于 MTCs 主体的杂乱反射特征, 块体内部反射强(图 8)。但由于运输作用, 块体内部结构会随着搬运或滑动距离的增加而表现为平行、倾斜、弯曲和反射轻微中断的地震反射特征(图 8c)。块体呈现向上渐缩的横截面, 并且顶部向上凸起造成顶界面凹凸不平。

块体主要分布在 MTC3 逆冲褶皱带的西侧(图 8a 和图 8b), 呈现带状排列, 块体间距较小。运输块体在移动过程中会切割 MTCs 两侧基底面或者下伏沉积物, 并留下条纹状的线形特征—滑动轨迹(图 8d)。这些线形特征可用于重建运输块体的运动路径, 同时对判断 MTCs 的整体运输方向有一定作用。滑动轨迹主要发育在逆冲褶皱带前端, 少部分发育在逆冲褶皱带外围。

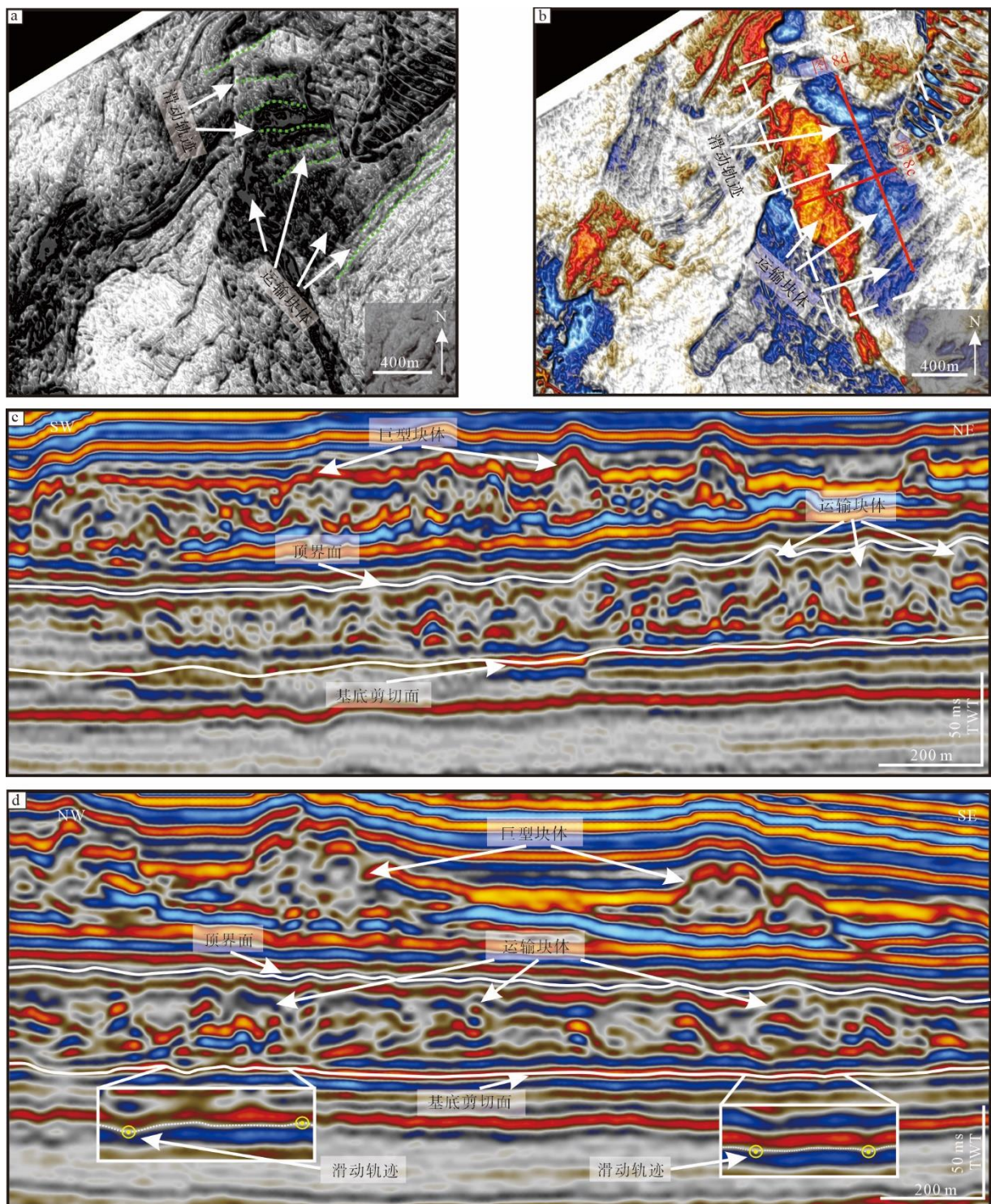


图 8 MTC3 内的运输块体和滑动轨迹: a 振幅切片; b 相干切片; c 穿过运输块体的横向地震剖面; d 穿过运输块体的纵向地震剖面

注: 地震剖面上显示的滑动轨迹为基底剪切面上留下的凹陷; 黄色圆圈代表块体的运动方向由屏幕向外

Fig. 8 Translated blocks and glide track within MTC3: a Amplitude slice; b Coherence slice; c Lateral seismic profile through the translated block; d Longitudinal seismic profile through the translated block

4 讨论

4.1 MTC 3 的发育过程

Bull(2009)将 MTCs 划分头部-拉张区、体部-滑移区和趾部-挤压区 3 个区域(图 9), 并基于高分辨率的三维地震数据在 MTCs 内部识别出大量运动标志, 这些运动标志记录了 MTCs 的运动学信息。Gee 等(2005)、Moscardelli 等(2007)和 Bull 等(2009)认为 MTCs 的头

部是斜坡地质体失稳形成的伸展构造和断块体, 块体沿断裂面或基底剪切面向下滑移, 常表现为陡崖或断层崖、铲式正断层和断块等海底结构或地貌单元。MTCs 在滑动过程中受到强烈的摩擦力作用, 形成了 MTCs 体部明显可见的变形构造, 如滑动沟槽、挤压脊等。该部分块体搬运沉积体的运动以滑塌和滑移为主, 内部呈现弱变形或中等程度变形(Shanmugam G, 2012)。MTCs 趾部是块

体搬运沉积体最主要的沉积物堆积区。沉积物叠置推挤,受阻于前方和侧方地层,形成了挤压褶皱到叠瓦状逆冲

褶皱带的构造格局,前缘还可见到运输块体和滑动轨迹(Bull et al, 2009; Shanmugam, 2012)。

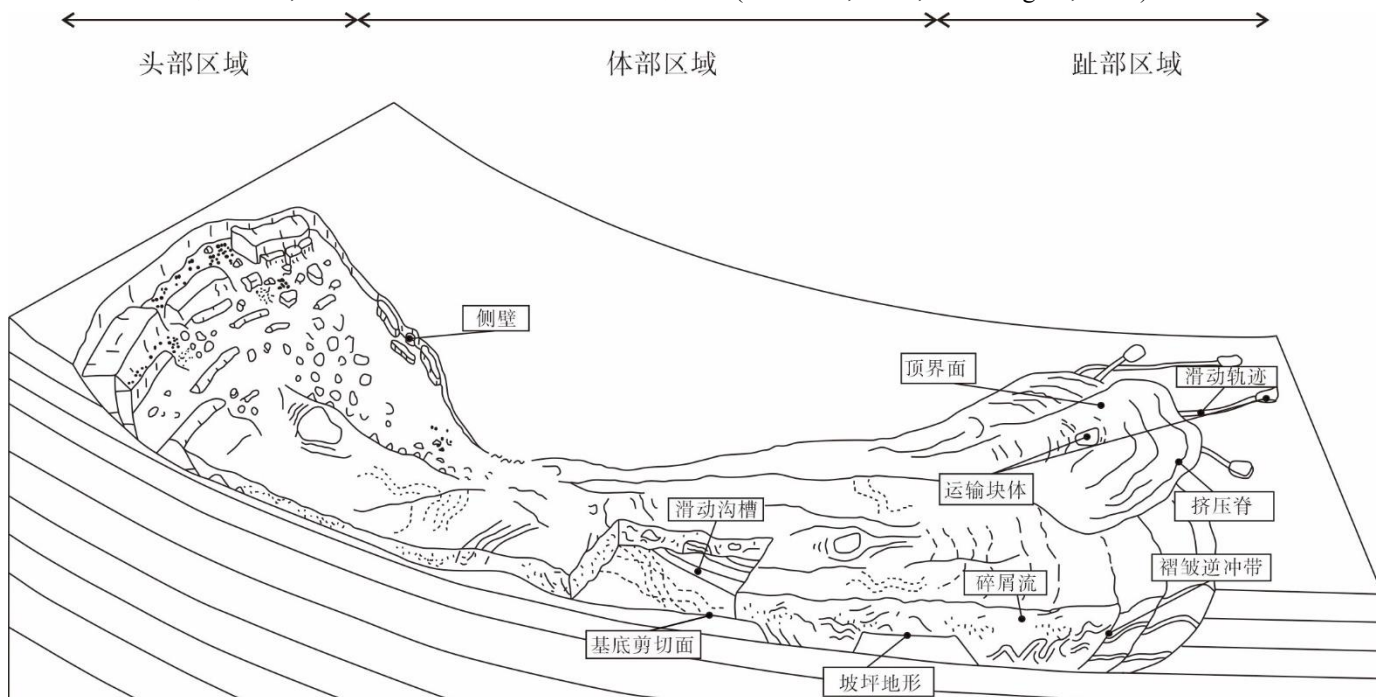


图 9 MTCs 的结构示意图(据 Bull 等,2009 修改)。

Fig. 9 Schematic diagram of MTCs structure (modified after Bull et al, 2009).

目前关于 MTCs 的发育过程仍然存在一些争论,没有形成一个统一的认识。其中,Dott (1963)将 MTCs 的发育过程分为崩塌、滑塌、碎屑流、浊流 4 个阶段;大多数学者则认为 MTCs 的发育过程不包括浊流,浊流仍是沉积物密度较低的碎屑流((Hampton, 1972; Parsons et al, 1998),因而普遍将其运动过程划分为滑动、滑塌、碎屑流(Nisbet and Piper, 1998; Moscardelli and Wood, 2008)。国内对 MTCs 的发育过程研究较少,主要归因于针对深水地质过程的探测手段相对有限。三维地震数据为获取精细的地质结构提供了一种有效手段(Cartwright and Huuse, 2005),从而有助于我们对 MTCs 运动过程开展深入的研究。

在本研究中,我们利用三维地震数据对研究区上新世发育的 MTC3 体部和趾部区域的运动标志进行了精细识别,获得了一些关于 MTC3 形成过程的认识。首先,根据滑动沟槽 N-E 的展布方向(图 5a)、逆冲褶皱带 NW-SE 的走向(图 6b)和连续挤压脊 N-E 的平移方向(图 7b),确定了 MTC3 的运动方向为 NE-SW。此外,根据研究区 MTC3 体-趾部区域的运动标志与 Gee 等(2006)和 Qin 等(2015)对 MTCs 发育过程研究结果的对比分析,本研究认为 MTC3 的发育过程分为如下 3 个阶段:

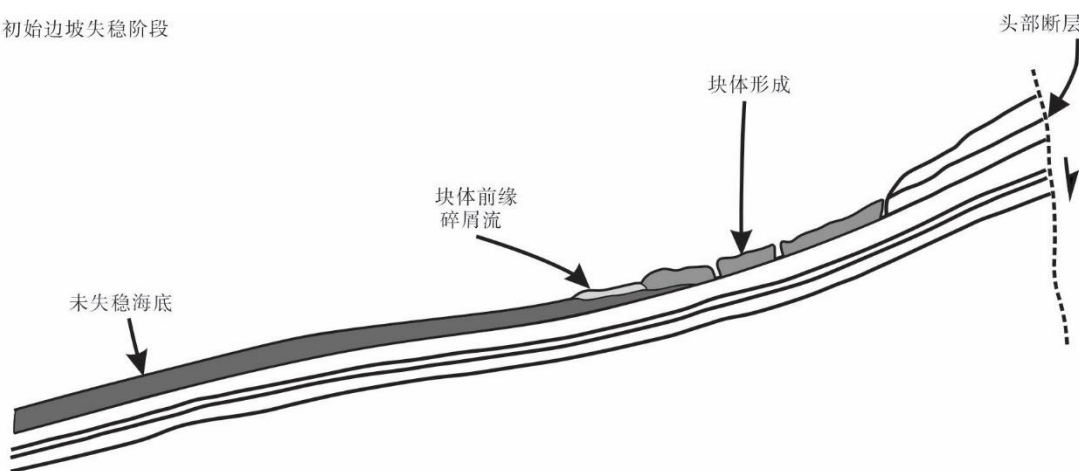
(1)初始边坡失稳阶段

当重力超过地层有效应力的临界值时,上坡地层崩塌形成巨型块体(图 10a)。这些块体在向下滑动时,在拉张力的影响下会破裂形成更小的块体。在此阶段,侵蚀性碎屑流在块体前方产生并伴随其流动。

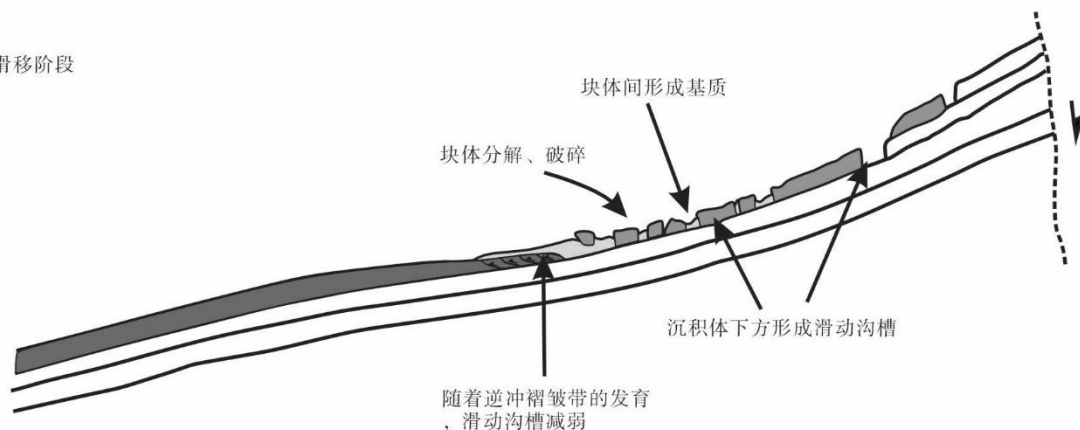
(2)滑移阶段

在此阶段,一些滑塌体和滑动块体会破碎,并在块体间形成基质(图 10b),而另一些滑塌体和滑动块体则维持有限变形,形成巨型块体或运输块体。随着块体搬运沉积体(由连续的滑动块体和基质组成)继续向下坡运动,它对底部剪切面会造成较为强烈的侵蚀,形成一系列 NE-SW 向的滑动沟槽(图 5)。这些滑动沟槽与 Mcgilvery 等(2004)在文莱近海所观察到的细长状沟槽在形态上具有相似性,Posamentier and Kolla (2003)认为这类型的侵蚀特征是基底剪切面独有的属性。块体搬运沉积体到达趾部挤压区后会形成强烈变形的逆冲褶皱带(图 6),这与该处的地形限制有着密切的联系(Moscardelli et al, 2006)。在本研究中,逆冲褶皱系统的前缘受到早期变形地层(陡坎)的制约(图 6b),而其侧向挤压则是受到邻近地层的限制(图 6d),MTC3 内的逆冲断层并未穿透其顶界面。

a. 初始边坡失稳阶段



b. 滑移阶段



c. 流体转换阶段

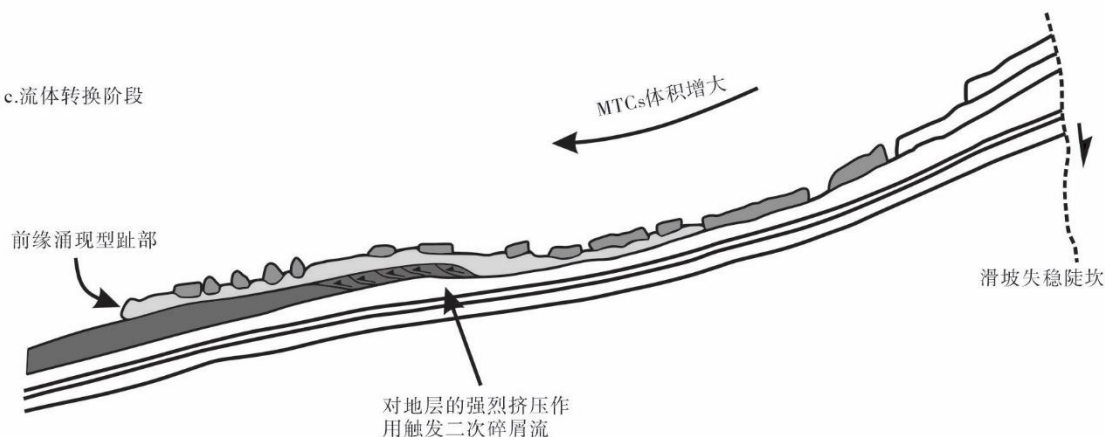


图 10 MTC3 随时间演化过程模型(据 Gee 等,2006 修改)

Fig. 10 Evolutionary process model of MTC3 over time (modified after Gee et al, 2006).

(3)流体转换阶段

随着块体搬运沉积体继续向前移动,强烈的挤压作用使得逆冲褶皱带不断发展,底部剪切面厚度变大,导致滑动沟槽停止发育。在这种强烈的挤压作用下可能会触发二次碎屑流(Gee et al, 2005),碎屑流将大量的沉积物继续向下坡方向运输(图 10),运输的沉积物包括 MTCs 内部的块体,以及侵蚀基底剪切面和侧向边界上的块体。这些块体可能在很大程度上分解并融入二次碎屑流。振幅切片上的同沉积逆冲断层构成的双重构造(图 4)也说明该区域的块体搬运类型已经演化为二次碎屑流(王大伟 等, 2009)。

4.2 多期次 MTCs 成因分析

MTCs 的控制因素可分为内部因素和外部因素(Masson et al, 2006)。内部因素包括力学性质、海底地形地貌、软弱层等,外部因素有地震、火山、海啸、流体逸散、异常高沉积速率、断层活动、超孔隙压力和天然气水合物分解等(Locat et al, 2002; Owen et al, 2007; Scarselli et al, 2020)。MTCs 的发育通常受多种因素共同控制,但由于不同地区地质背景的差异性,各因素对 MTCs 发育的影响程度存在显著差异。前人研究表明,研究区及相邻工区的 MTCs 受相同因素和不同因素控制(白博 等, 2016; 雷亚妮 等, 2018)。相同因素是导致 MTCs 产生的必要条件,而不同因素则因地质背景的差异,使得研究区 MTCs 表现出独特的发育特征。

4.2.1 共性控制因素分析

4.2.1.1 必要因素

造成 MTCs 的成因较多,但总体来看,其发生的必要条件如下:1) 陆坡坡度。前人研究研究表明 (Qin et al, 2015; Guan et al, 2016),只要地层坡度大于 1° 便有可能触发 MTCs。本文基于地震剖面解释结果,测得不同期次 MTCs 底界面的坡度分别为: MTC 1 为 $1.5^{\circ}\sim 4^{\circ}$, MTC 2 为 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$, MTC 3 为 $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$, MTC 4 为 $2.5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ (图 3c)。又因为研究区位于琼东南盆地东北陆坡的缓坡区,多期次 MTCs 的头部位于三维地震测线未覆盖的陡坡区域,因此我们推测多期次 MTCs 头部区域的地形坡度普遍大于 4° 。在这种情况下,研究区滑塌沉积物的重力下滑分量易大于沉积物的抗剪强度,斜坡滑坡相对易发(白博等, 2016)。2) 丰富的沉积物来源。丰富的物质来源是形成 MTCs 的基础(李艳等, 2021)。3) 必要的触发因素。MTCs 的形成需要一定外部因素的触发,常见的外部因素有地震活动、高沉积速率、火山活动、构造活动等因素 (Owen et al, 2007; Scarselli et al, 2020)。

4.2.1.2 触发因素

1) 高沉积速率。一定时期内大量沉积物的堆积会使得地层压力增大甚至超压,而超压地层中孔隙流体的运移可导致斜坡区域沉积层失稳和坍塌,从而形成 MTCs(Locat and Lee, 2002; Dugan and Sheahan, 2012; Yamamoto et al, 2019)。根据 CC26-1-1 井位揭示的沉积速率,在上述 T30~T20 期间的海平面快速下降-上升旋回中,海平面快速下降的同时还伴随着沉积速率突然陡增,这也许是促使 MTC3 成为该多期次 MTCs 中发育规模最大的原因之一。因此,高沉积速率也是造成琼东南盆地陆坡区 MTCs 发育的一个主要因素。

2) 海平面的波动。海平面的波动对陆坡沉积物的稳定性也有着重要的影响。海平面波动能够改变沉积物的水动力条件、沉积速率以及剪切强度,进而可能导致沉积物失稳(Smith et al, 2013; Urbah et al, 2013; He et al, 2013b)。在南海北部, Sun et al, (2017)、Wang et al, (2018) 和 Li et al. (2019) 认为海平面变化是琼东南盆地 MTCs 的触发机制之一。通过对琼东南盆地的海平面变化曲线(Li 等, 2009)和多期次 MTCs 发育时期的对比分析,我们发现琼东南盆地在 MTCs 形成期间经历了多次较频繁的海平面升降,特别是在 T30 至 T20 期间存在一次斜率较大的海平面快速下降和快速上升旋回,而这一旋回的时间正好对应了 MTC 3 的上部沉积(图 2)。因此,本研究认为海平面的快速波动是研究区多期次 MTCs 的重要触发因素。

4.2.2 特殊控制因素分析

红河断裂带起源于世界屋脊之称的青藏高原东南部,

向南海海域延伸,进入莺歌海盆地,总长超过 1000km (图 1a)。红河断裂带在海域的延伸被认为是琼东南盆地的西界(孙珍等, 2003),琼东南盆地的演化历史与红河断裂带的构造演化有着紧密的联系(袁玉松等, 2008)。琼东南盆地从 T40 界面沉积至今属于加速热沉降期,在这一时期盆地逐渐变为被动大陆边缘型沉积,地层快速沉降,物源供应很快,沉积物厚度增大,地层以轻微角度向南部倾斜。此时琼东南盆地控盆构造活动较弱,但红河断裂带持续进行左旋运动,运动时间持续到 10~5.5Ma (雷超等, 2022)。自 5.5Ma 以来,红河断裂带从左旋运动转变为右旋运动,且断层活动性进一步加大(胡守祥等, 2021)。地理位置上,研究区 MTCs 位于琼东南盆地北部陆坡区域,该区域受到红河断裂带活动影响(图 1; Cheng et al, 2021); 时间上,研究区发育 4 期 MTCs 形成于晚中新世-上新世(10.5~1.9Ma),与红河断裂带的活动时间高度一致。地震剖面上,可以观察到多期次 MTCs 下部与大量多边形断层紧密相连(图 2b),其中一些断层甚至延伸至 MTC1 的底界面(图 3c)。红河断裂带的持续运动会导致多边形断层重新活动(Xie et al, 2006; Ren et al, 2014)。这些断层形成于早中新世晚期(Hu et al, 2024),并在晚中新世期间活动性显著增强。在晚中新世末期(5.5Ma),受红河断裂带影响,研究区断层从左旋走滑转变为右旋走滑,并且活动性在第四纪进一步增强。由此可以推断,红河断裂带的持续运动会导致多边形断层活动,对西沙海槽北部陆坡沉积物的稳定性存在显著影响,进而成为触发该区域多期次 MTCs 的主要因素。

5 结论

(1) 琼东南盆地东北部陆坡发育了多期次 MTCs 沉积,构成了该区域新近纪以来地层中的重要沉积单元。研究区 MTCs 的地震反射总体特征为弱振幅、半透明及杂乱反射。

(2) MTC3 在该多期次 MTCs 中规模最大,且内部变形程度最为强烈。研究区主要包括 MTC3 体-趾部,体部滑移区以波状弱连续地震相为主要特征;趾部以挤压作用为主,以强振幅的叠瓦式逆冲褶皱带为主要特征。在 MTC3 的内部和顶底界面总共识别了 4 组运动标志:滑动沟槽、逆冲褶皱系统、挤压脊、运输块体和滑动轨迹。通过对运动标志的分析确定了 MTC3 的迁移方向为西南方向,并将 MTC 3 的运动过程划分为初始边坡失稳阶段、滑移阶段和流体转换阶段。

(3) 琼东南盆地东北部陆坡多期次 MTCs 的发育受到地层坡度、海平面波动和高沉积速率等因素的共同影响,其中红河断裂带持续走滑运动是研究区发育多期次 MTCs 的主导因素。

- 白博, 秦志亮, 杨鲲, 等, 2016. 珠江口盆地白云深水区海底重力滑脱构造地震地质综合识别[J]. 物探化探计算技术, 38(2): 219–224. BAI BO, QIN ZHILIANG, YANG KUN, et al, 2016. Seismic and geologic comprehensive identification of sea floor gravity decollement structure in Baiyun deep-water zone, Pearl River Mouth Basin[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 38(2): 219–224 (in Chinese with English abstract).
- 蔡佳, 2017. 琼东南盆地长昌凹陷新近系三亚组沉积相[J]. 岩性油气藏, 29(5): 46–54. CAI JIA, 2017. Sedimentary facies of Neogene Sanya Formation in Changchang Sag, Qiongdongnan Basin[J]. LITHOLOGIC RESERVOIRS, 29(5): 46–54(in Chinese with English abstract).
- 杜浩, 石万忠, 梁金强, 等, 2021. 琼东南盆地块体搬运沉积体系成因及其对水合物成藏的影响[J]. 石油地球物理勘探, 56(4): 869–881. DU HAO, SHI WANGZHONG, LIANG JINQIANG, et al, 2021. Genesis of mass transport deposits and their effect on gas hydrate accumulation in the Qiongdongnan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 56(4): 869–881(in Chinese with English abstract).
- 付超, 于兴河, 金丽娜, 等, 2017. 琼东南盆地莺歌海组重力流沉积演化过程[J]. 沉积学报, 35(3): 552–560. FU CHAO, YU XINGHE, JIN LINA, et al, 2017. Sedimentary Evolution of Gravity Flow Disposition of Yinggehai Formation in Qiongdongnan Basin[J]. ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA, 35(3): 552–560(in Chinese with English abstract).
- 冯杨伟, 屈红军, 张功成, 等, 2016. 南海北部琼东南盆地深水区梅山组一段地震相分析[J]. 矿物岩石, 36(1): 82–95. FENG YANGWEI, QU HONGJUN, ZHANG GONGCHENG, et al, 2016. The seismic facies analyzing of deep water area of Miocene Meishan formation in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. Mineral Petrol, 36(1): 82–95(in Chinese with English abstract).
- 胡守祥, 姚衍桃, 李健, 等, 2021. 琼东南盆地陆架区晚中新世以来断层活动性研究热带海洋学报[J], 40(02): 90–102. HU SHOUXIANG, YAO YANTAO, LI JIAN, et al, 2021. Study on fault activities since the Late Miocene in the continental shelf of Qiongdongnan Basin[J]. JOURNAL OF TROPICAL OCEANOGRAPHY, 40(02): 90–102(in Chinese with English abstract).
- 李铁刚, 曹奇原, 李安春, 等, 2003. 从源到汇: 大陆边缘的沉积作用[J]. 地球科学进展, (5): 713–721. LI TIEGANG, CAO QIYUAN, LI ANCHUN, et al, 2003. Source to sink: sedimentation in the continental margins[J]. ADVANCE IN EARTH SCIENCES, (5): 713–721(in Chinese with English abstract).
- 雷超, 任建业, 裴健翔, 等, 2022. 莺歌海-琼东南盆地结合部记录的红河断裂带向海延伸及其演化过程[J]. 中国科学: 地球科学, 64(11): 1893–1908. LEI CHAO, REN JIANYE, PEI JIANXIANG, et al, 2022. Tectonics of the offshore Red River Fault recorded in the junction of the Yinggehai and Qiongdongnan Basins. Science China Earth Sciences, 64(11): 1893–1908.
- 雷亚妮, 王广建, 吴时国, 2018. 白云凹陷深水油气开发区海底滑坡的特征、分布以及成因初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(2): 106–114. LEI YANI, WANG GUANGJIAN, WU SHIGUO, 2018. Preliminary research on characteristics, distribution patterns and origins of submarine slides in deepwater oil and gas exploration area of Baiyun Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 38(2): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- 李艳, 吴南, 胡守祥, 等, 2021. 南海白云凹陷东南部两种不同类型块体搬运沉积体系的地震响应及成因分析[J]. 热带海洋学报, 40(5): 85–100. LI YAN, WU NAN, HU SHOUXIANG, ZHAO FANG, ZHAN WENHUA, et al, 2021. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of two types of mass-transport complexes in the southeast of Baiyun Sag, South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 40(5): 85–100(in Chinese with English abstract).
- 李艳, 2022. 大陆边缘块体搬运沉积体系的地震响应及运动学过程分析[D]. 中国科学院南海海洋研究所. LI YAN, 2022. Seismic characteristics and kinematic process analysis of Mass transport complexes on continental margins[D]. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- 李伟, 吴时国, 王秀娟, 等, 2013. 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, 33(2): 9–15. LI WEI, WU SHIGUO, WANG XIUJUAN, et al, 2013. Seismic characteristics and distribution of Pliocene mass transport deposits in central canyon of Qiongdongnan Basin[J]. MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY, 33(2): 9–15(in Chinese with English abstract).
- 李杰, 林畅松, 陈平富, 1999. 琼东南盆地莺歌海组—黄流组海平面变化与层序年代地层[J]. 地质论评, 45(5): 514–520. LI JIE, LIN CHANGSONG, CHEN PINGFU, 1999. Sea Level Change and Sequence Chronostratigraphy of the Yinggehai-Huangliu Formation in the Qiongdongnan Basin[J]. GEOLOGICAL REVIEW, 45(5): 514–520(in Chinese with English abstract).
- 罗泉源, 焦祥燕, 何小胡, 等, 2023. 琼东南盆地西区黄流组重力流水道沉积特征及其控制因素[J]. 海洋地质前沿, 39(7): 25–33. LUO QUANYUAN, JIAO XIANGYAN, HE XIAOHU, et al, 2023. Sedimentation and controlling factor of gravity flow channels in the Huangliu Formation in the western of the Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(7): 25–33(in Chinese with English abstract).
- 马宏霞, 吕福亮, 范国章, 等, 2011. 缅甸若开海域块体搬运沉积地震响应及典型地质特征[J]. 石油与天然气地质, 32(5): 751–759. MA HONGXIA, LÜ FULIANG, FAN GUOZHANG, et al, 2011. Seismic responses and geological characteristics of mass-transport deposits in the Rakhine Basin, Offshore Myanmar[J]. Oil & Gas Geology, 32(5): 751–759 (in Chinese with English abstract).
- 马云, 李三忠, 梁金强, 等, 2012. 南海北部琼东南盆地海底滑坡特征及其成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(S3): 196–205. MA YUN, LI SANZHONG, LIANG JINQIANG, et al, 2012. Characteristics and Mechanism of Submarine Landslides in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(S3): 196–205(in Chinese with English abstract).
- 马畅, 葛家旺, 赵晓明, 等, 2022. 南海北部琼东南盆地第四系陆架边缘轨迹迁移及深水沉积模式[J]. 地学前缘, 29(4): 55–72. MA CHANG, GE JIAWANG, ZHAO XIAOMING, et al, 2022. Quaternary Qiongdongnan Basin in South China Sea: Shelf-edge trajectory migration and deep-water depositional models. Earth Science Frontiers, 2022, 29(4): 55–72(in Chinese with English abstract).
- 孟苗苗, 阎少妮, 梁金强, 等, 2024. 琼东南盆地块体搬运体系沉积特征及其对下伏水合物藏的影响[J]. 地质学报, 98(09): 2592–2606. MENG MIAOMIAO, YAN SHAONI, LIANG JINQIANG, et al, 2024. Sedimentary characteristics of mass transport deposits and their influence on underlying gas hydrate reservoirs in the Qiongdongnan basin[J]. ACTA GEOLOGICA SINICA, 98(09): 2592–2606(in Chinese with English abstract).
- 秦志亮, 2012. 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(海洋研究所). QIN ZHILIANG, 2012. Sedimentary Process, Distribution and Mechanism of Mass Transport Deposits, the Slope Area of Northern South China Sea[D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等, 2003. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J]. 热带海洋学报, 22(2): 1–9. SUN ZHEN, ZHONG ZHIHONG, ZHOU DI, et al, 2003. Deformation mechanism of red river fault zone during cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin formation[J]. Journal of Tropical Oceanography, 22(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- 王大伟, 吴时国, 董冬冬, 等, 2009. 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, 29(3): 69–74. WANG DAWEI, WU SHIGUO, DONG DONGDONG, 2009. Seismic characteristics of quaternary mass transport deposits in

- Qiongdongnan Basin[J]. MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY, 29(3): 69-74(in Chinese with English abstract).
- 王大伟, 吴时国, 吕福亮, 等, 2011. 南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 35(5):14-19.
- WANG DAWEI, WU SHIGUO, LÜ FULIANG, et al, 2011. Mass transport deposits and its significance for oil & gas exploration in deep-water regions of South China Sea[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(5):14-19(in Chinese with English abstract).
- 谢金有, 祝幼华, 李绪深, 等, 2012. 南海北部大陆架莺琼盆地新生代海平面变化[J]. 海相油气地质, 17(1):49-58. XIE JINYOU, ZHU YOUHUA, LI XUSHEN, et al, 2012. The Cenozoic Sea-Level Changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 17(1):49-58(in Chinese with English abstract).
- 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎, 2015. 南海地质地球物理图系[M]. 中国航海图书出版社. YANG SHENGXIONG, QIU YAN, ZHU BENDUO, 2015. Atlas of geology and geophysics of the South China Sea[M]. China Navigation Publications Press.
- 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 等, 2008. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. 地球物理学报, 51(2): 376-383. YUAN YUSONG, YANG SHUCHUN, HU SHENGBIAO, et al, 2008. Tectonic subsidence of Qiongdongnan Basin and its main control factors[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(2): 376-383 (in Chinese with English abstract).
- 闫琢玉, 李建平, 龚胜利, 等, 2023. 琼东南盆地北部梅山组浊积扇砂组构造特征与物源体系差异[J]. 天然气地球科学, 34(12): 2087-2100. YAN ZHUOYU, LI JIANPING, GONG SHENGLI, et al, 2023. Sand fabric characteristics and provenance system differences of turbidite fan from the Meishan Formation in the northern Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(12): 2087-2100(in Chinese with English abstract).
- 钟佳, 杨希冰, 朱沛苑, 等, 2019. 琼东南盆地宝岛-文昌凹陷陵水组储层差异演化特征[J]. 地球科学, 44(8): 2665-2676. ZHONG JIA, YANG XIBING, ZHU PEIYUAN, et al, 2019. Porosity Evolution Differences of the Lingshui Formation Reservoir between Baodao and Changchang Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 44(8): 2665-2676(in Chinese with English abstract).
- BERNHARDT A, SCHWANGHART W, HEBBLEN D, et al, 2017. Immediate propagation of deglacial environmental change to deep-marine turbidite systems along the Chile convergent margin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 473: 190-204.
- BONDEVIK S, STORMO S K, SKJERDAL G, 2012. Green mosses date the Storegga tsunami to the chilliest decades of the 8.2 ka cold event[J]. Quaternary Science Reviews, 45: 1-6.
- BULL S, CARTWRIGHT J, HUUSE M, 2009. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data[J]. Marine and Petroleum Geology, 26(7): 1132-1151.
- CARTWRIGHT J, HUUSE M, 2005. 3D seismic technology: the geological 'Hubble' [J]. Basin Research, 17(1): 1-20.
- CHENG C, JIANG T, KUANG Z, et al, 2021. Seismic characteristics and distributions of Quaternary mass transport deposits in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 129: 104348.
- DOTT R H, 1963. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. AAPG Bulletin, 47: 104-128.
- DUGAN B, SHEAHAN T C, 2012. Offshore sediment overpressures of passive margins: Mechanisms, measurement, and models[J]. Reviews of Geophysics, 50(3).
- FREY MARTINEZ J, CARTWRIGHT J, HALL B, 2005. 3D seismic interpretation of slump complexes: examples from the continental margin of Israel[J]. Basin Research, 17(1): 83-108.
- GAMBOA D, ALVES T M, 2015. Spatial and dimensional relationships of submarine slope architectural elements: A seismic-scale analysis from the Espírito Santo Basin (SE Brazil)[J]. Marine and Petroleum Geology, 64: 43-57.
- GEE M, GAWTORPE R, FRIEDMANN J, 2005. Giant striations at the base of a submarine landslide[J]. Marine Geology, 214: 287-294.
- GEE M, GAWTORPE RL, FRIEDMANN SJ, 2006. Triggering and Evolution of a Giant Submarine Landslide, Offshore Angola, Revealed by 3D Seismic Stratigraphy and Geomorphology[J]. Journal of Sedimentary Research, 76: 9-19.
- GEE M, UY HS, WARREN J, et al, 2007. The Brunei slide: A giant submarine landslide on the North West Borneo Margin revealed by 3D seismic data[J]. Marine Geology, 246: 9-23.
- HAMPTON M A, 1972. The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents[J]. Journal of Sedimentary Research, 42: 775-793.
- HARBITZ C B, LØVHOLT F, BUNGUM H, 2013. Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely?[J]. Natural Hazards, 72(3): 1341-1374.
- HE Y, XIE X, LI J, et al, 2013b. Differences of MTDs characteristics between eastern and western part of Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 43: 49-56.
- HU S, ROTEVATN A, JACKSON C, et al, 2024. Geometry and evolution of polygonal fault systems under a regionally anisotropic stress field: Insights from 3D seismic analysis of the Qiongdongnan Basin, NW South China Sea[J]. Basin Research, 36(1): 118-134.
- LI C, LYU C, CHEN G, et al, 2019. Zircon U-Pb ages and REE composition constraints on the provenance of the continental slope-parallel submarine fan, western Qiongdongnan Basin, northern margin of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 102: 350-362.
- LI P, JIN Y, GAO W, et al, 2023. Spatial differentiation and dynamic mechanism of micro-geomorphology based on acoustic spectrum data of the Huanghe (Yellow) River Delta[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 41(6): 2077-2089.
- LI Y, PU R, ZHANG G, et al, 2021. Determining 3D seismic characteristics of the conduit system of the Changchang sag, Qiongdongnan Basin[J]. Interpretation, 9(2): T283-T297.
- LOCAT J, LEE H J, 2002. Submarine landslides: advances and challenges[J]. Canadian Geotechnical Journal, 39(1): 193-212.
- MASSON D.G, HARBITZ C.B, WYNN R.B, et al, 2006. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction. Royal Society[J], 364: 2009-2039
- MAC MCGILVER T A, HADDAD G, COOK D L, 2004. Seafloor and shallow subsurface examples of mass transport complexes, offshore Brunei[C]. Offshore Technology Conference. Houston.
- MOSCARDELLI L, WOOD L, 2007. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. Basin Research, 20(1): 73-98.
- MOSCARDELLI L, WOOD L, MANN P, 2006. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela[J]. AAPG Bulletin, 90(7): 1059-1088.
- NISBET E, PIPER D W, 1998. Giant submarine slides[J]. Nature, 392: 329-330.
- OWEN M, DAY S, MASLIN M, 2007. Late Pleistocene submarine mass movements: occurrence and causes[J]. Quaternary Science Reviews, 26: 958-978.
- PARSONS J D, GARCÍA M H, 1998. Similarity of gravity current fronts[J]. Physics of Fluids, 10(12): 3209-3213.
- PIPER D J W, COCHONAT P, MORRISON M L, 2002. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar[J]. Sedimentology, 46(1): 79-97.
- POSAMENTIER H W, KOLLA V, 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings[J]. Sedimentary Research, 73: 367-388.
- POSAMENTIER H W, MARTINSEN O J, 2011. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: Insights from outcrop and 3D seismic data[J]. SEPM Society for Sediment, 28: 25-43.
- QIN Z, WU S, WANG D, et al, 2015. Mass transport deposits and processes in the north slope of the Xisha Trough, northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(1): 117-125.
- REN J, ZHANG D, TONG D, et al, 2014. Characterising the nature, evolution and origin of detachment fault in central depression belt, Qiongdongnan Basin of South China Sea: evidence from seismic reflection data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 33(12): 118-126.
- SUN Q, XIE X, PIPER D, et al, 2017. Three dimensional seismic anatomy of multi-stage mass transport deposits in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: Their ages and kinematics[J]. Marine Geology, 393: 93-108.
- SHANMUGAM G, 2012. Process-sedimentological challenges in distinguishing paleo-tsunami deposits[J]. Nat Hazards, 63:5-30.
- SCARSELLI N, 2020. Submarine landslides architecture, controlling

- factors and environments. A summary[J]. *Regional Geology and Tectonics: Principles of Geologic Analysis*: 417-439.
- SCHNYDER J S D, EBERLI G P, KIRBY J T, et al, 2016. Tsunamis caused by submarine slope failures along western Great Bahama Bank[J]. *Scientific Reports*, 6: 35925.
- SMITH D E, HARRISON S, JORDAN J T, 2013. Sea level rise and submarine mass failures on open continental margins[J]. *Quaternary Science Reviews*, 82: 93-103.
- URBAH M, TALLING P J, MASSON D G, 2013. Timing and frequency of large submarine landslides: implications for understanding triggers and future geohazard[J]. *Quaternary Science Reviews*, 72: 63-82.
- WEIMER P, 1990. Sequence Stratigraphy, Facies Geometries, and Depositional History of the Mississippi Fan, Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 74(4): 425-453.
- WANG W, WANG D, WU S, et al, 2018. Submarine landslides on the north continental slope of the South China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 17(1): 83-100.
- WU N, JACKSON C A L, JOHNSON H, et al, 2019a. Lithological, petrophysical and seal properties of mass-transport complexes (MTCs), northern Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 103(4): 705-735.
- XIE X, MÜLLER R D, LI S, et al, 2006. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745-765.
- YAMAMOTO Y, CHIYONOBU S, KANAMATSU T, et al, 2019. Repeated large-scale mass-transport deposits and consequent rapid sedimentation in the western part of the Bay of Bengal, India[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 477(1): 183-193.
- YUAN S, LÜ F, WU S, et al, 2009. Seismic stratigraphy of the Qiongdongnan deep sea channel system, northwest South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(2): 250-259.
- ZHAO Z, SUN Z, SUN L, et al, 2016. Cenozoic tectonic subsidence in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Basin Research*, 30(S1): 269-288.