

重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化 ——以大西洋赤道段菩提瓜尔盆地为例

田纳新¹, 龚承林², 吴高奎¹, 齐 昆², 朱一杰², 刘静静¹

[1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249]

摘要:海底地貌对重力流沉积具有重要控制作用并同时受到重力流沉积过程影响。针对重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化研究不足的问题,以大西洋赤道段菩提瓜尔盆地的局部沉积记录为解剖对象,基于三维地震资料,采用RGB三色融合技术,阐明了深水沉积体系发育演化特征,揭示了重力流与海底地貌的动态相互作用。研究区初始地貌中的主要地貌低点和次要地貌低点控制了早期深水水道和朵叶体的发育:①随着主要地貌低点斜坡坡度向远物源一端明显变缓,重力流的速度和能量逐渐减小,向下侵蚀能力变弱、侧向拓宽能力增强,水道剖面形态沿流向依次呈现V型、深U型及碟型;②因为水道限制性逐渐减弱,末端非限制性区域发育朵叶体沉积,朵页体上覆于水道充填沉积且向近物源一端生长,最终溢出到研究区西北角的次要地貌低点。水道和朵叶体沉积致使主要地貌低点远物源一端的斜坡坡度进一步变缓,后期块体流被捕获时,其沿流向携带沉积物的能力更容易降低,导致块体搬运沉积复合体(MTCs)在主要地貌低点远物源一端广泛堆积。

关键词:地貌低点;动态相互作用;海底地貌;重力流;深水沉积;菩提瓜尔盆地;大西洋赤道段

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Development of submarine depositional systems under dynamic interplays between sediment gravity flows and seafloor topography: A case study of the Potiguar Basin on the equatorial Atlantic Ocean

TIAN Naxin¹, GONG Chenglin², WU Gaokui¹, QI Kun², ZHU Yijie², LIU Jingjing¹

[1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China*; 2. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*]

Abstract: Seafloor topography plays a significant role in the modulation of gravity flow deposition and in the meantime, the associated depositional processes can modify the pre-existing topography. Given a lack of studies on the development of the submarine depositional systems as a consequence of the dynamic interplays between sediment gravity flows and seafloor topography, we analyze the local depositional records of the Potiguar Basin on the equatorial Atlantic Ocean. Using 3D seismic data along with spectral decomposition and spectral decomposition with red, green and blue (RGB) color blending techniques, we investigate the development of a submarine depositional system and then reveal the dynamic interactions between sediment gravity flows and seafloor topography. The results indicate that the main topographic low and the minor topographic low within initial topography of the study area played a major role in the deposition of early submarine channels and lobes. With the gentling of the slope along the main topographic low toward the distal provenance end, the velocities and competences of sediment gravity flows gradually decreased; correspondingly, their tendencies of vertically downcutting and laterally broadening respectively weakened and strengthened, resulting in the cross-sectional geometries of submarine channels varying from V-shaped through deep U-shaped to dish-shaped downstream. Because submarine-channel confinement gradually decreased downstream, lobes occur at the unconfined terminal area, which grew headward, overlay on the early channel fills, and finally spilled out

收稿日期:2023-10-05;修回日期:2023-11-14。

第一作者简介:田纳新(1968—),男,博士、高级工程师,石油地质学。E-mail:tiannx.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05033);中石化集团科研项目(P21043-3)。

into the minor topographic low at the northwestern corner of the study area. The deposition of submarine channels and lobes significantly reduced the slope gradients in distal parts of the main topographic low. When subsequent mass flows were captured by the main topographic low, the capacity of mass flows to carry sediments was prone to get even weaker, thus resulting in more extensive accumulation of mass-transport complexes (MTCs) in distal parts of the main topographic low.

Key words: topographic low, dynamic interaction, seafloor topography, sediment gravity flow, submarine depositional system, Potiguar Basin, equatorial Atlantic Ocean

引用格式:田纳新,龚承林,吴高奎,等.重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化——以大西洋赤道段菩提瓜尔盆地为例[J].石油与天然气地质,2024,45(1):15–30. DOI:10.11743/ogg20240102.

TIAN Naxin, GONG Chenglin, WU Gaokui, et al. Development of submarine depositional systems under dynamic interplays between sediment gravity flows and seafloor topography: A case study of the Potiguar Basin on the equatorial Atlantic Ocean[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 15–30. DOI: 10.11743/ogg20240102.

重力流沉积形成的深水沉积体系包括深水水道、朵叶体和块体搬运沉积等多种沉积单元,其发育在大陆边缘源-汇系统末端,具有重要的油气勘探潜力^[1-4]。研究深水沉积体系发育演化过程及其控制因素对于深水油气勘探具有重要的理论指导意义^[5-7]。深水沉积体系发育演化受多因素影响,如气候波动、海平面变化及构造活动等,这些因素多作用于陆表和浅水区,被称为盆外控制因素^[8-10]。深水沉积体系在小尺度下的发育演化则主要受海底地貌^[10-12]等盆内控制因素影响。

目前,前人在“复杂海底地貌背景下的海底扇发育演化”领域开展了诸多研究,具体涉及斜坡坡度^[13-15]、地形障碍^[16-18]以及微盆地^[19-21]对重力流的控制。另一方面,重力流沉积也可以改造海底地貌,如块体搬运过程及块体搬运沉积复合体(MTCs)常形成侵蚀性冲沟和残留突出块体,其分别表现为负地貌和正地貌,从而形成不规则海底地貌^[22-24]。此外,重力流倾向于寻找局部可容空间(负地貌)进行沉积充填,从而使海底地貌填平补齐^[25-27]。“海底地貌控制深水沉积”“深水沉积改造海底地貌”目前均已成为学科研究的热点,但重力流与海底地貌动态相互作用下的深水沉积体系发育演化研究仍较薄弱,亟需进一步探索。

菩提瓜尔盆地与圭亚那盆地同属于大西洋赤道段,是当今世界油气勘探的热点区域。本研究以菩提瓜尔盆地的局部沉积记录为解剖对象,借助三维地震资料,厘定了深水沉积体系的发育演化过程,揭示了重力流与海底地貌的动态相互作用,具体包括:①恢复研究区初始地貌,重构其时空演化;②定量表征深水沉积单元,揭示沉积过程;③阐明重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化。研究有助于进一步认识大西洋赤道段菩提瓜尔盆地深水沉积过程并为深水油气勘探提供借鉴。

1 地质背景

菩提瓜尔盆地起源于早白垩世冈瓦纳大陆裂解及后续的大西洋扩张^[28-31],其整体位于巴西赤道陆缘的东部边缘,总面积约 $4.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。菩提瓜尔盆地的陆地和海域面积分别约为 $2.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$,本文的研究区则位于其深水部分,由 660 km^2 三维地震测网所限定(图1)。

菩提瓜尔盆地经历了裂谷期(晚贝里阿斯期—早阿普特期)、过渡期(晚阿普特期—早阿尔布期)及漂移期(早阿尔布期—全新世)3个构造演化阶段,相应发育有裂谷层系、拗陷层系以及陆缘层系^[32-34](图2)。其中,陆缘层系沉降机制主要是重力均衡,沉降速率较低,总体发育一个大规模的海侵—海退旋回^[35](图2)。研究目的层为上升半旋回底部的三级层序SQ6,其底部和顶部边界分别为SB6和SB7(图2)。沿沉积物搬运方向,该套海侵序列依次为近物源的河流—海湾沉积(Açu组,缩写为ACU)、陆架边缘碳酸盐岩沉积(Ponta do Mel组,缩写为PML)以及远物源的深水沉积(Qubbradas组,缩写为QBR)(图2)。

2 资料与方法

2.1 三维地震资料解释

本次研究的主要资料为 660 km^2 的三维地震数据体,地震数据采样间隔为 5 ms ,处理面元为 $18.75 \text{ m} \times 12.50 \text{ m}$,目的层主频为 30 Hz ,对应垂向分辨率约为 20 m 。另外,地震数据被处理为零相位,以SEG负极性显示(在地震剖面上,正反射系数对应波阻抗增加)。

基于地震资料,对深水沉积体系开展详细的三维

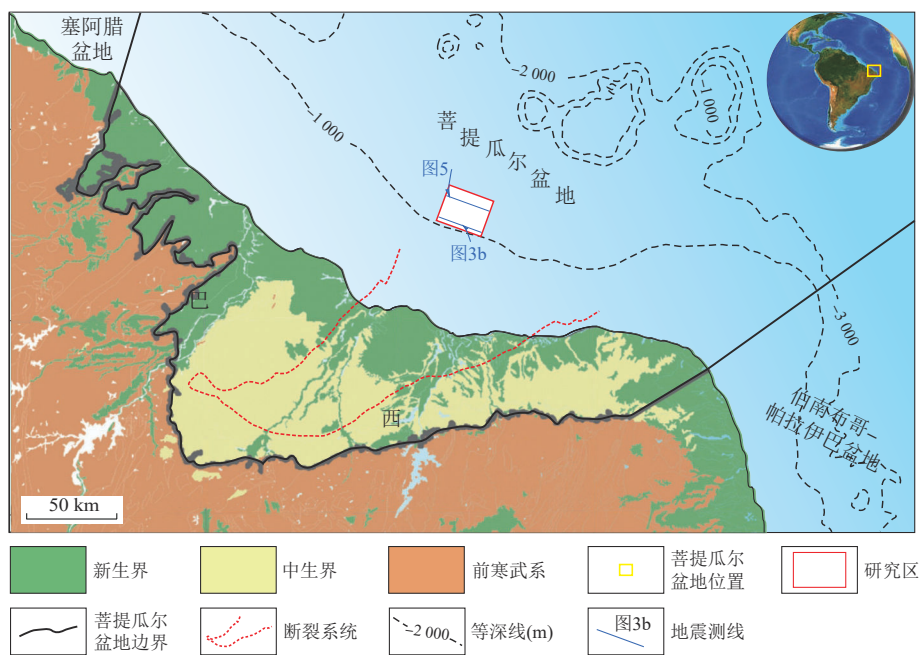


图1 菩提瓜尔盆地及研究区分布位置(修改自 Fonseca 等, 2020^[36])

Fig. 1 Geological map showing the geographical context of the Potiguar Basin and the specific location of the study area (modified from Fonseca et al., 2020^[36])

地震表征。首先,针对目的层SQ6层序,利用PaleoScan软件创建包含系列界面的切片堆(horizon stack),并从中挑选3个代表性界面(H1—H3)。对各代表性界面,采用分频RGB三色(红-绿-蓝)融合技术来解释深水沉积体系地震地貌特征。RGB三色融合属性图可有效提高沉积单元平面分布特征的可视化程度,为揭示相关沉积过程提供了极大便利。根据地震数据体频谱分析结果,SQ6层序主频约为30 Hz,因此,对于提取的切片,分别使用5,20和35 Hz的频率来代表红、绿和蓝三色。另外,除以上三维地震地貌表征,本研究还基于地震反射的振幅、连续性、反射结构和外部形态,对深水沉积体系开展详细的二维地震相分析。

2.2 古地貌坡度定量表征

为了研究海底地貌对重力流的控制,首先需要恢复研究区的初始海底地貌。本研究对目的层底界面(SB6)进行详细追踪,在对顶界面(SB7)进行层拉平的情况下生成SB6构造图,从而反映研究区深水沉积体系发育前的初始地貌。如图3所示,泥火山分别在研究区东、西部发育,而且在其发育位置,目的层SQ6厚度显著减薄,因此认为在SQ6沉积之前,泥火山已经进行了充分活动。在这种早期泥火山活动的影响下,研究区在SQ6沉积时期存在一个北东-南西走向的主要地貌低点,其延伸方向与沉积倾向一致(图3a)。虽然

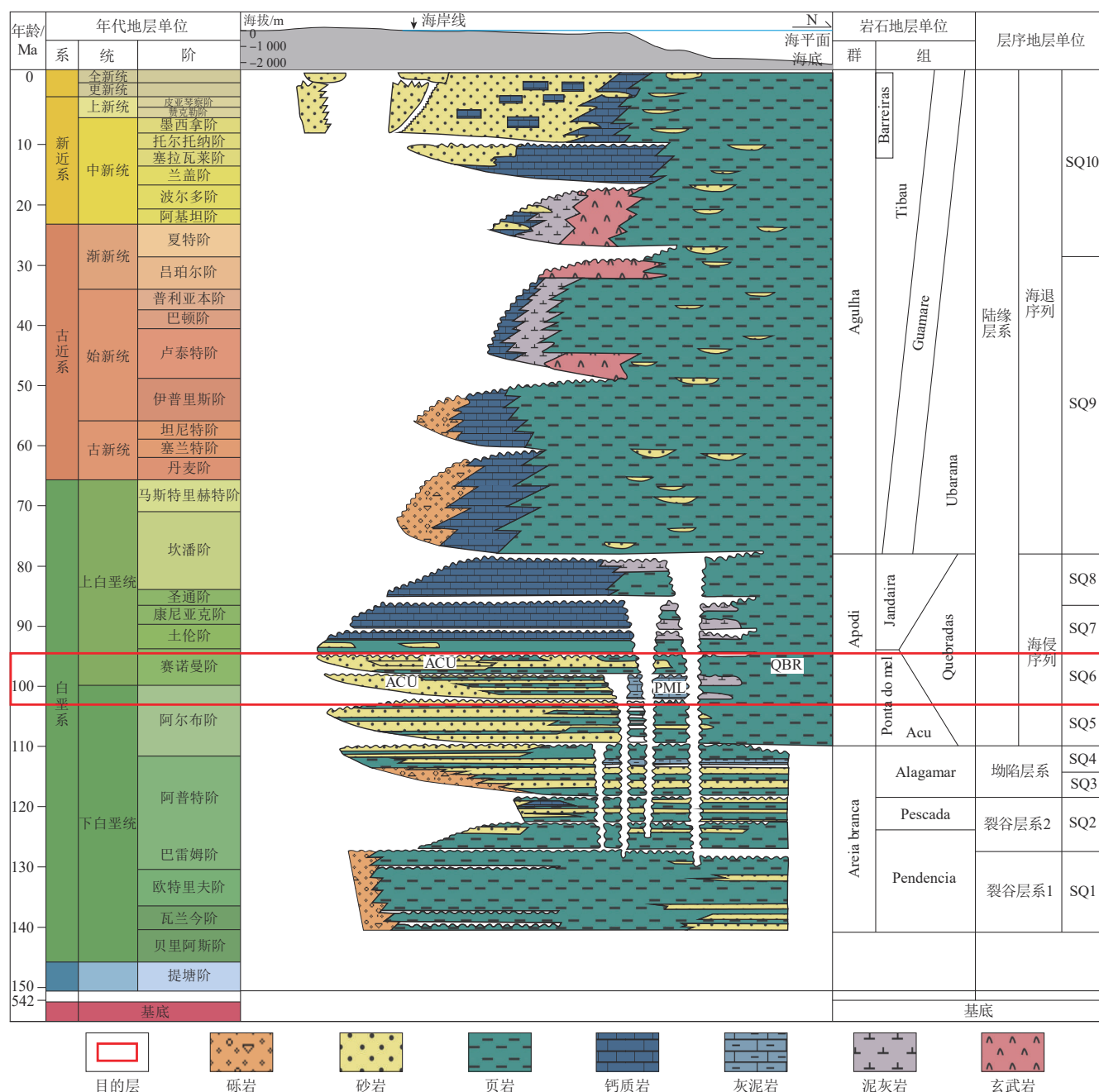
该主要地貌低点在一定程度上受到了后期重力流侵蚀的影响,其主要成因还是两侧泥火山的强烈活动,因此认为SB6界面可有效反映初始海底地貌。

鉴于深水沉积体系沿主要地貌低点展布,可提取主要地貌低点轴向最深谷底线(底界面最深部分)剖面。沿主要地貌低点走向以500 m间隔垂直走向拉取地震剖面,在剖面上测量最深谷底线深度以定量表征沿沉积倾向的初始斜坡坡度(图4)。在两个间隔为500 m的连续剖面之间,测量两个最深谷底线位置之间的垂向距离,利用反正切函数计算古地形坡度大小。需要说明的是,随时间推移,初始地貌中的主要地貌低点受到了后期深水沉积充填。为展示后期地貌中主要地貌低点斜坡坡度变化,本研究对深水沉积体系发育过程中某一时刻(深水水道和朵叶体发育后)最深谷底线的深度和坡度均进行了测量。

3 主要认识

3.1 初始海底地貌

如前所述,利用目的层底界面SB6构造图来反映研究区深水沉积体系发育前的初始地貌特征。如图3所示,泥火山分别在研究区的西部和东部发育,形成了明显的地貌高点;在泥火山坡脚处,地势较低,再加上

图2 菩提瓜尔盆地地层综合柱状图(修改自Silva等,2021^[34])Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Potiguar Basin (modified after Silva et al., 2021^[34])

侧向限制性,该处非常容易捕获后期重力流。因此,它们构成了深水沉积主要“地形容器”,被命名为研究区“主要地貌低点”(图3)。这个主要地貌低点呈拉长形态,沿北东-南西向延伸,总体限制高度在195~405 m,宽度在4.36~9.93 km,长度约13.74 km。另外,研究区西北角发育有一个小型地貌低点,被命名为“次要地貌低点”,其呈不规则形态,限制高度约210 m,宽度在0.97~3.75 km,长度在2.11~6.38 km(图3)。

由于主要地貌低点沿着沉积倾向延伸,故使用轴

向最深谷底线剖面来表征沿沉积倾向的初始斜坡坡度。如图4a所示,主要地貌低点最深谷底线延伸总长度约25.2 km,对应深度在3 494~4 517 m。根据斜坡坡度变化统计结果,可将整个主要地貌低点划分为A段和B段(图4a),其中A段延伸约17.00 km,以近物源一端边界为起始点,对应0~17 km最深谷底线,相应深度为3 494~4 333 m。A段斜坡总体较陡,坡度为0.30°~7.00°,平均为2.83°(图4a)。主要地貌低点下游B段延伸约8.16 km,对应17~25 km最深谷底线,深度为

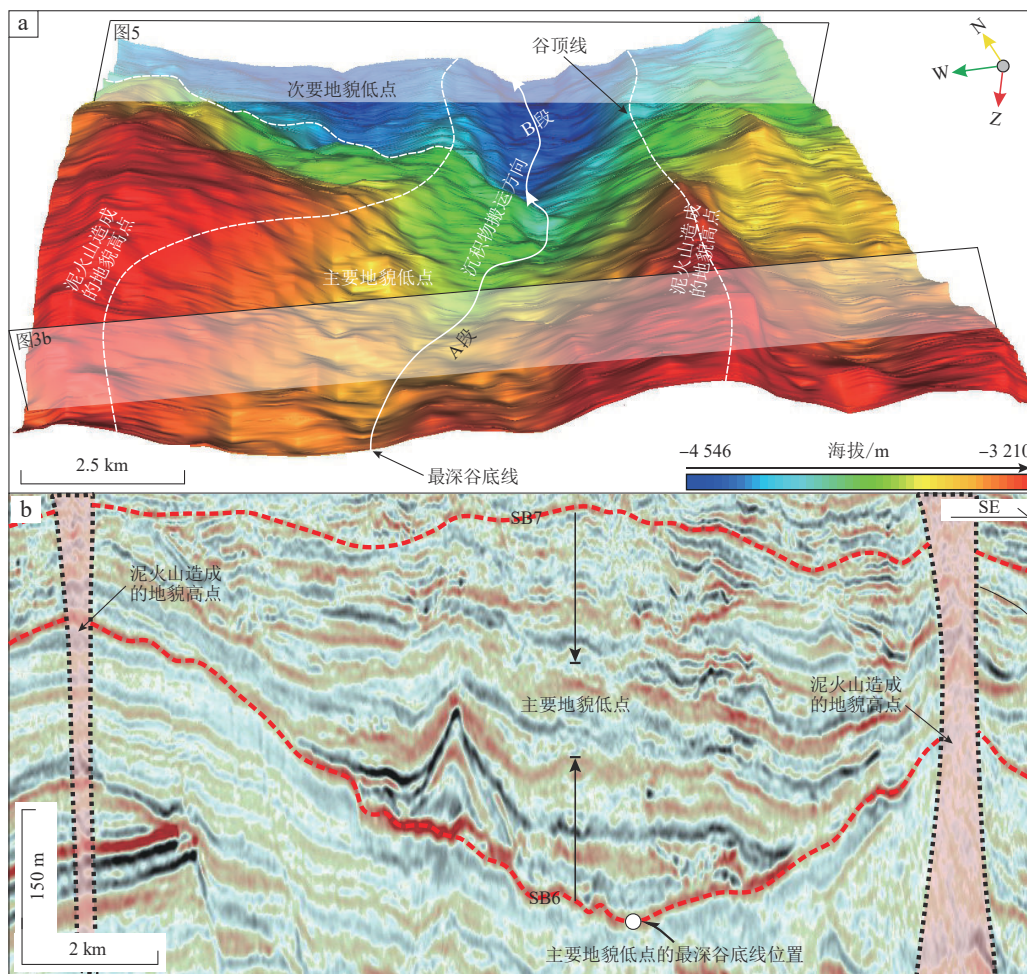


图3 研究区初始地貌及区域地震剖面

Fig. 3 The original topographic map and the regional seismic profile of the study area

a. 目的层底界面SB6的三维构造图;b. 研究区近物源一端沿沉积倾向的地震剖面(剖面位置见图1和图3a)

4 333 ~ 4 517 m。B段斜坡总体较缓,坡度为 0.23° ~ 3.40° ,平均 1.32° (图4a)。另外,对A段和B段斜坡坡度的分布频率也进行了统计(图4b,c),同样表明主要地貌低点A段明显更陡。

3.2 地震相识别及沉积解释

限于测井资料缺乏,主要开展地震相研究并依据前人地震相解释模板以识别目的层SQ6内部的深水沉积单元。

3.2.1 地震相描述

在目的层SQ6内,结合二维地震相以及平面地震属性分析,共识别出4种地震相(表1):地震相1在剖面上表现为振幅变化不定、连续性较差的反射结构,底部见U型或V型侵蚀面(图5;表1),在平面上多呈条带状(图6a;表1);地震相2发育在地震相1的末端,在地震剖面上表现为强振幅、连续性较好的平行反射结

构(图5;表1),在平面上多呈扇形或舌状堆积(图6b;表1);地震相3在剖面上表现为振幅变化不定的杂乱反射,具有侵蚀型底界面和不规则顶界面(图5,图6;表1);地震相4分布最为广泛,在剖面上表现为低振幅、连续性较好的平行反射结构,在平面上则呈现为明显的席状(图5,图6;表1)。

3.2.2 地震相解释

在赋予地震相以沉积学意义时,考虑到研究区缺少钻井资料,主要借鉴前人公开发表的深水沉积地震相解释模板(表1)。具有明显U型或V型侵蚀面的地震相1被普遍解释为深水水道^[37-38]。堆积在深水水道出口的地震相2则被解释为末端朵叶体,其由水道出口的非限制性流体沉积形成,在侧向上与水道充填沉积相连通^[1,39]。具有杂乱反射特征的地震相3被解释为块体搬运沉积复合体(MTCs),由海底滑坡所致^[22-23]。地震相4属于深水环境背景沉积,将其解释

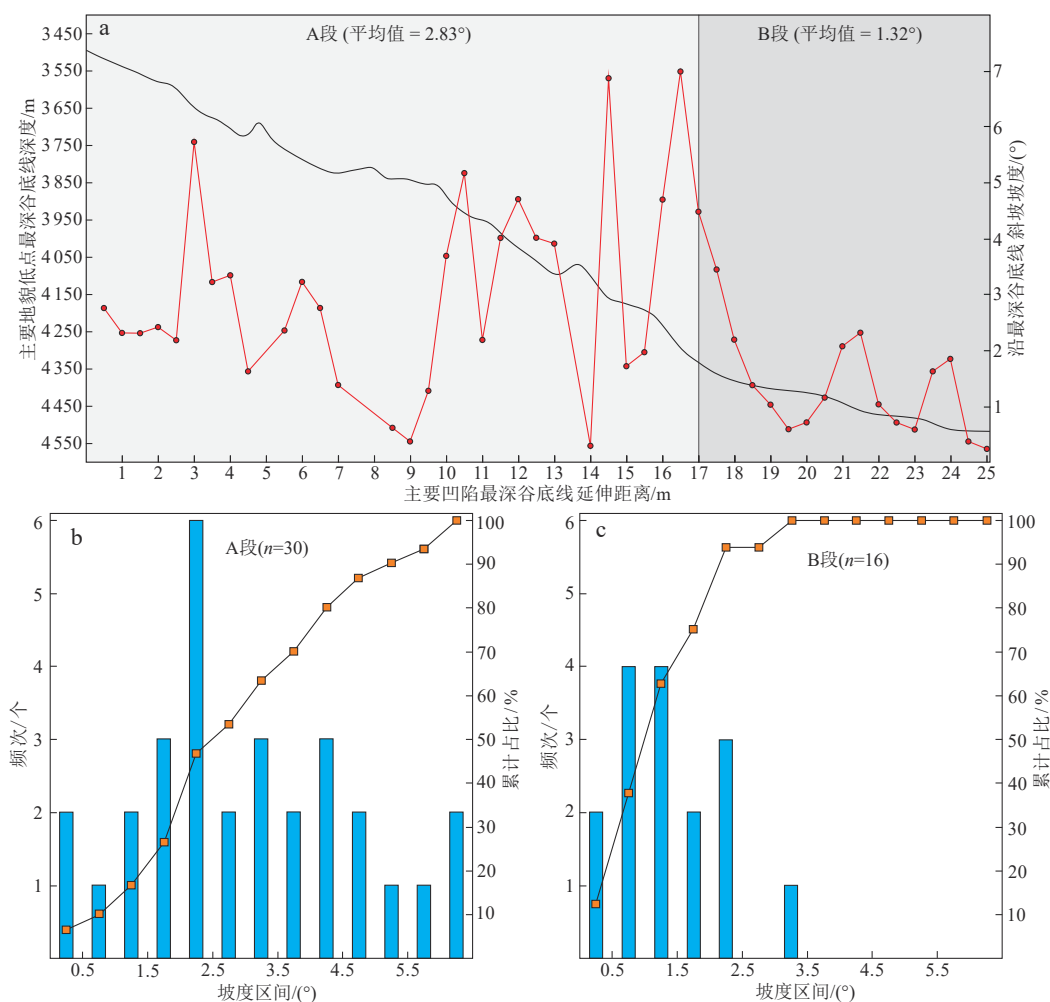


图4 研究区主要地貌低点斜坡坡度统计

Fig. 4 Statistical results about the slope gradients of the main topographic low in the study area

a. 主要地貌低点最深谷底线深度以及对应的斜坡坡度计算结果; b. 主要地貌低点A段斜坡坡度分布频率; c. 主要地貌低点B段斜坡坡度分布频率

为深海披覆沉积,其多由来自于低密度浊流、悬浮沉积物的细粒沉积物构成^[4,40]。

3.3 深水沉积体系表征

根据地震相识别结果,除了披覆沉积,深水沉积体系主要由深水水道、朵叶体以及MTCs组成,这3种沉积单元在研究区内按照时间顺序依次发育。

3.3.1 深水水道

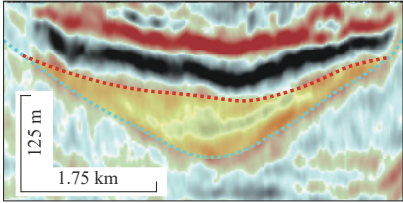
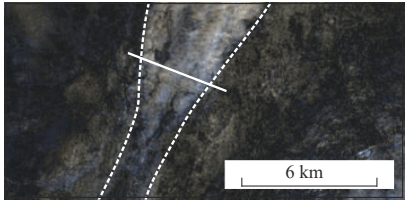
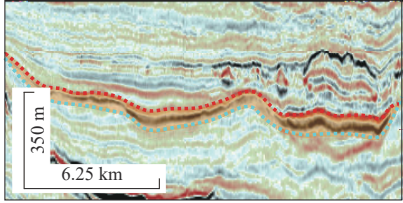
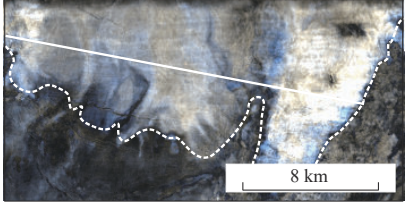
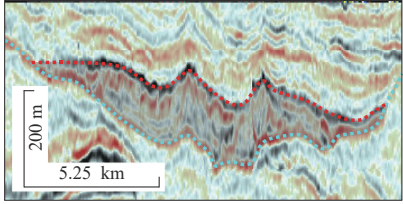
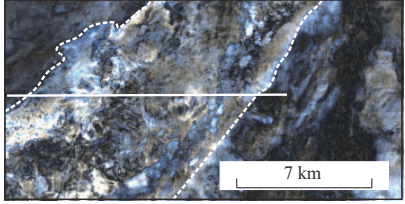
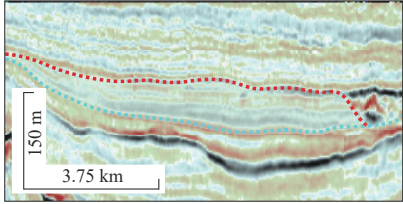
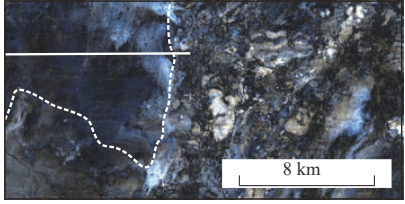
深水水道是本研究中最老的沉积单元,其直接在初始地貌上发育。沉积单元发育的相对顺序主要是根据它们之间的切割、叠置关系确定(图5,图7),朵叶体和MTCs均上覆在深水水道之上,说明深水水道是最先形成的。而且,在目的层从下到上的3个界面(H1—H3)中,深水水道只出现在最下部的H1中,在上部的H2和H3中均缺失(图6),这同样说明深水水道是最先

沉积的。如图6a所示,深水水道统一被限制在初始地貌的主要地貌低点中,其流向与主要地貌低点最深谷底线的延伸方向一致(图6a)。需要说明的是,由于后期MTCs的侵蚀,深水水道仅下游部分被保存在沉积记录中(图6a,图7)。残留的深水水道长度约为13.2 km,对应主要地貌低点最深谷底线的12.0~25.2 km部分,这表明其主要保存在主要地貌低点的B段,仅有近端少量部分分布于A段(图6a,图8a)。

另外,本研究还定量表征了深水水道的外部形态。沿着流向在总计28个垂直最深谷底线走向的地震剖面中对深水水道的宽度和厚度进行了测量(图9),结果表明,深水水道宽度范围在1 250~7 948 m,其沿主要地貌低点最深谷底线表现为明显的增长趋势(图9a)。深水水道的厚度在50~169 m,在主要地貌低点A段沿流向表现为增长趋势,而在B段呈现出减小趋势(图9a)。与上述宽度和厚度变化相对应,深水水道的

表1 研究区目的层4种主要地震相

Table 1 Four major seismic facies documented in the study interval of the study area

地震相及对应沉积解释	特征描述	典型地震剖面	典型RGB三色融合图
地震相1: 深水水道 ^[37-38]	剖面:振幅变化不定、低频、连续性较差的反射; 底部为U/V型侵蚀面; 平面:条带状		
地震相2: 朵叶体 ^[1,39]	剖面:强振幅、中频、连续性较好的平行反射; 平面:在地震相1末端呈扇形或舌状堆积		
地震相3:块体搬运沉积复合体(MTCs) ^[22-23]	剖面:振幅变化不定的杂乱反射,具有侵蚀型底界面和不规则顶界面; 平面:拉长的不规则形态		
地震相4:深海披覆沉积 ^[4,40]	剖面:低振幅、中高频、连续性较好的平行反射; 平面:席状		

剖面几何形态同样表现出规律性变化。沿着主要地貌低点最深谷底线,水道剖面形态顺流向依次出现V型、深U型以及碟型的变化(图9b)。

3.3.2 朵叶体

如图6b中H2所示,深水水道发育之后,朵叶体紧接着在水道末端堆积。在地震剖面上,这些朵叶体上覆于早期的深水水道之上,下伏于后期的MTCs,仅有远物源一端少部分未被MTCs覆盖(图6,图7c,图7d)。这些朵叶体展布面积约为250 km²,一部分位于主要地貌低点的远物源一端,另一部分则位于研究区西北角的次要地貌低点中(图5,图6b,图7c,图7d)。对于分布在主要地貌低点的朵叶体来说,其延伸长度约10.2 km,对应15.0~25.2 km部分的最深谷底线,这说明其和深水水道相似,同样发育在主要地貌低点的B段(图6b,图8a)。

朵叶体厚度普遍在75 m以下,根据图10展示的厚度图,朵体沉积厚度主要表现出两个变化趋势。首先,分布于主要地貌低点的朵体沉积厚度普遍高于分布于

次要地貌低点部分的厚度。例如,在主要地貌低点中,朵体沉积的最大厚度可达75 m,但是在次要地貌低点,最大厚度却只有40 m(图10)。其次,对于分布于主要地貌低点的朵叶体来说,其厚度沿着最深谷底线呈现明显增大趋势,从近物源一端到远物源一端,厚度逐渐从0 m增大到75 m(图8a,图10)。

3.3.3 块体搬运沉积复合体(MTCs)

MTCs是本研究最年轻的沉积单元,在其发育过程中,块体流对下伏基底具有较高的侵蚀率,因此,深水水道的上游部分被MTCs完全侵蚀(图6,图7,图8a)。在地震剖面上可以看出,MTCs被限制在浅U型的侵蚀面上,在平面上,其在3个界面(H1—H3)内均有出现(图5,图6,图7)。另外,需要强调的是,这些MTCs呈拉长形态,且同样沿主要地貌低点发育;延伸约21 km,在主要地貌低点的A段和B段均有分布,且对应0~21.0 km部分的最深谷底线(图6,图8a)。

因为大部分MTCs被限制在主要地貌低点,沿沉积走向MTCs的厚度向两侧的地貌高点逐渐尖灭

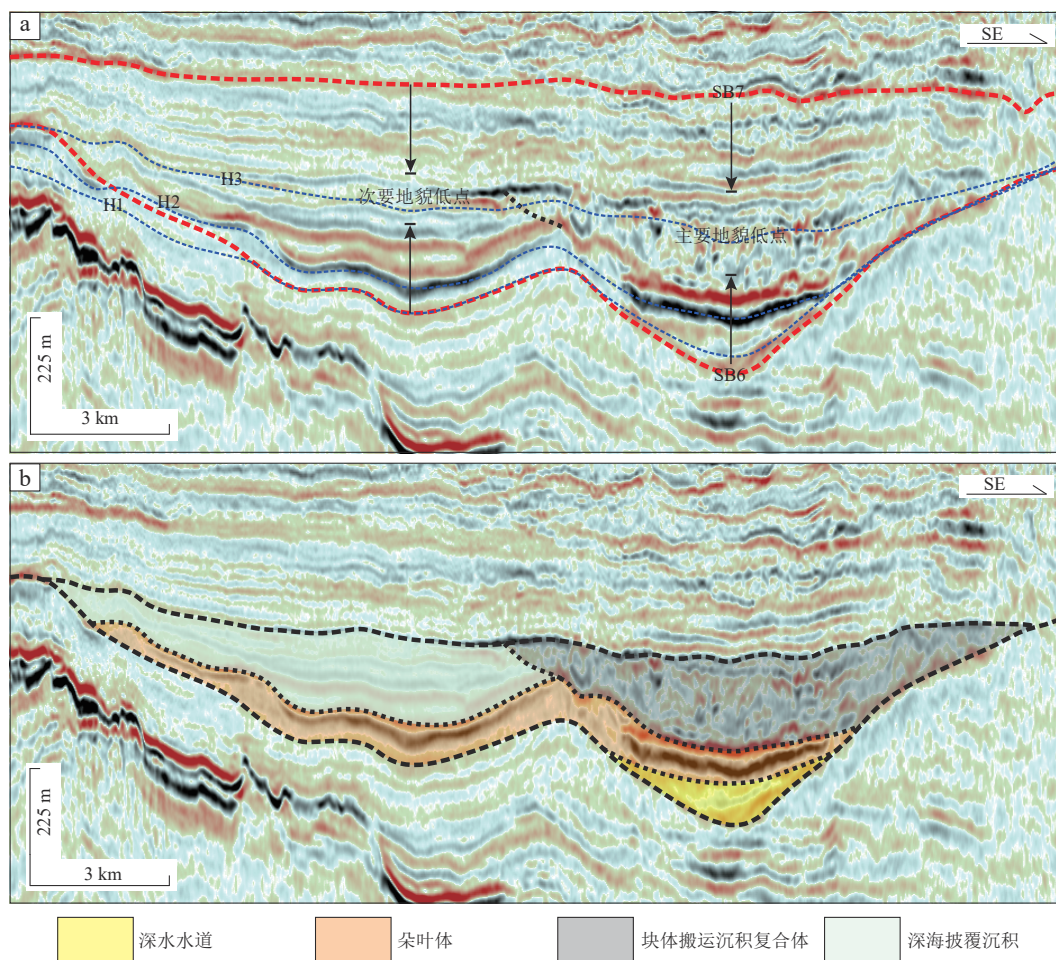


图5 研究区目的层4种主要地震相典型地震剖面

Fig. 5 A typical seismic section showing four main kinds of seismic facies in the study interval

a, b. 分别为未解释和解释的剖面(剖面位置见图1和图3a)

(图7,图11)。沿着沉积倾向,MTCs的厚度则呈现为逐渐增大的趋势,从近物源一端的170 m增长到远物源一端的298 m(图8a,图11)。此外,在MTCs内部,同样存在其他明显的地貌特征。例如,在主要地貌低点近物源一端的核心区域,MTCs的底界面显示出明显的冲刷痕迹,这里被统一解释为底部冲沟(basal grooves)(图11)^[22-23]。在MTCs的末端终止处,沿沉积倾向的地震剖面上则显示出平行且向陆地方向高角度倾斜的反射结构,其被统一解释为MTCs发育过程中形成的压力脊(pressure ridges)或“同生逆冲断层”(thrust-like feature)(图11)。

4 讨论

4.1 早期深水水道与朵叶体在初始地貌上的发育演化

在本次研究中,深水水道被完全限制在初始地貌的

主要地貌低点中,而且这些深水水道的流向与主要地貌低点最深谷底线延伸方向完全一致(图6a,图8a)。这充分说明形成深水水道的沉积物重力流以主要地貌低点作为流动路径下切入负地貌当中,并且不会越过两侧的地貌高点。由于泥火山分别在研究区的东部和西部发育,这种地形提供的限制性是初始地貌中固有的,会捕获来自上游地区的沉积物重力流,从而促进深水水道的发育(图12a)。

事实上,深水水道在成因机制上总是倾向于利用已经存在的负地貌。除了构造活动形成的负地貌,海底串珠状的冲沟(纯侵蚀型的旋回坎)同样可以起到汇聚流体的作用^[41-42]; Kostic (2011)^[43]的数值模拟和 Spinewine 等(2009)^[44]的水槽实验均证实在超临近流体的作用下,海底会形成一系列串珠状的冲沟,其往往是完整水道的雏形。此外,由于流体的溢出,海底还会形成麻坑,其同样可以捕获沉积物重力流;在西非陆缘的大陆坡上,众多深水水道就是起源于这种海底麻

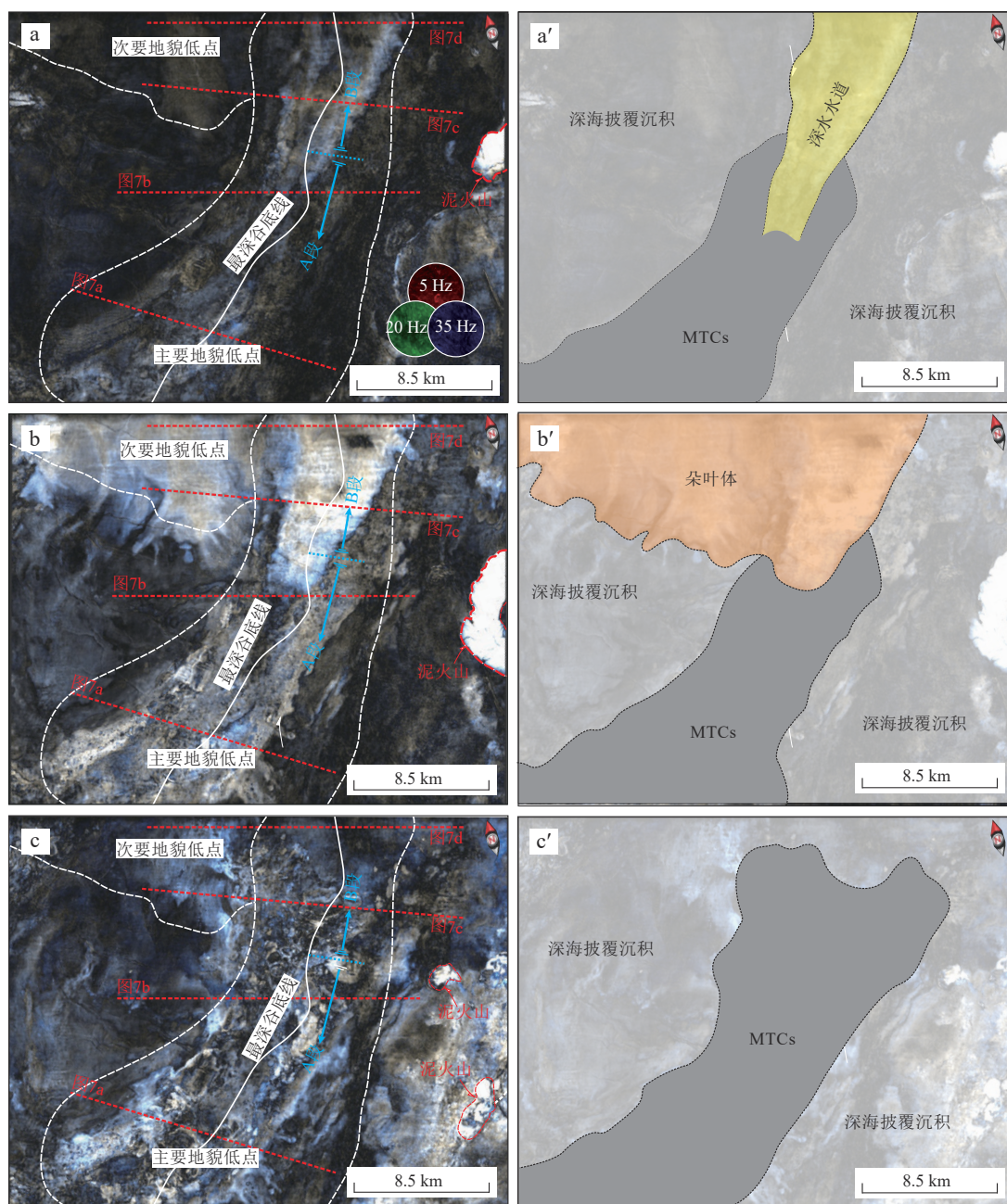


图6 研究区H1—H3界面的分频RGB三色融合属性图(a—c)及其对应的沉积解释(a'—c')

Fig. 6 Spectral decomposition RGB color blends (a—c) of H1—H3 and their interpretations (a'—c') in the study area (5, 20 and 35 Hz为分频属性频率; 白色虚线为谷顶线; 红色虚线为剖面线; 蓝色虚线为A段和B段界线。)

坑^[12,45]。在重力流被泥火山坡脚的负地貌捕获后,随后的流体会持续向这里集中,造成基底进一步的侵蚀,从而形成连续的深水水道(图12b)。

如前所述,深水水道外部形态沿流向表现出明显的变化(图9),这种变化与主要地貌低点斜坡坡度改变有关。在一定的流体参数条件下,理论上存在一个斜坡沉积倾向于达到的平衡剖面(equilibrium profile)^[14,25],这使得沉积物重力流的活动会随着斜坡坡度的改变而改变,从而最终导致深水水道外部形态的变化。在主

要地貌低点深水水道的分布区域(12.0 ~ 25.2 km部分的最深谷底线)(图8a),斜坡坡度表现出明显地降低,从最大值的7.0°减少为最小值的0.2°(图4)。当沉积物重力流在逐渐变缓的斜坡上流动时,其速度会显著降低,从而不足以对基底造成强烈侵蚀,这使得深水水道的厚度逐渐降低。相应地,在相对比较平缓的斜坡上,以上难以向下侵蚀的沉积物重力流会倾向于侧向拓宽基底,从而使得深水水道宽度呈现为增大趋势(图9a,图12b)。因为沿着流向水道厚

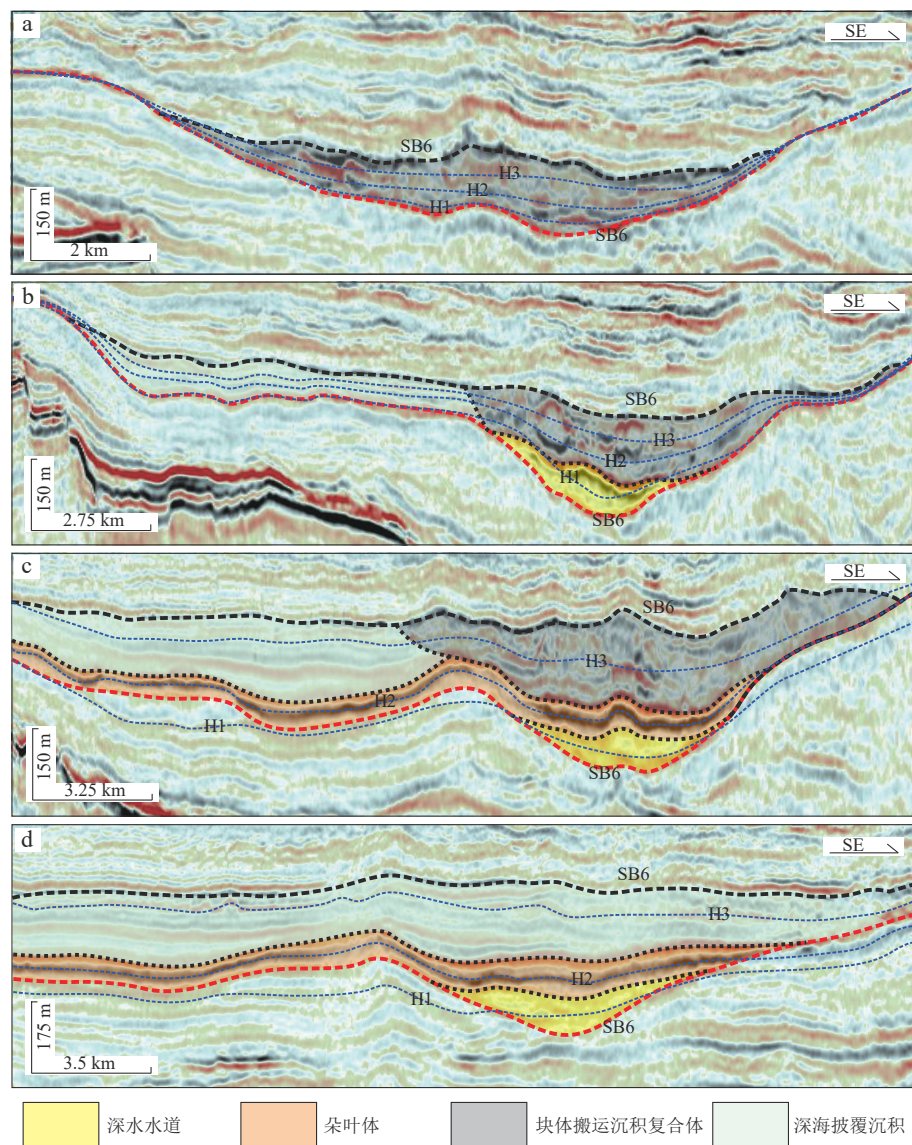


图7 研究区过深水沉积体系不同位置的一系列地震剖面(剖面位置见图6)

Fig. 7 A series of seismic sections across different segments of the studied submarine depositional system (see Fig. 6 for the map-view locations)

a. 过深水沉积体系上游部分的地震剖面(深水水道被MTCs完全侵蚀);b. 过深水沉积体系中游部分的地震剖面(深水水道被MTCs部分侵蚀);c. 过深水沉积体系下游部分的地震剖面(从下到上深水水道、朵叶体和MTCs依次发育);d. 过深水沉积体系下游部分的地震剖面(MTCs缺失且朵叶体上覆于深水水道之上)

度逐渐减小但是宽度却逐渐增大,深水水道的剖面几何形态依次出现了V型、深U型以及碟型的变化(图9b,图12b)。

随着宽度的增大以及厚度的减小,深水水道的沉积起伏表现为向下游逐渐降低的趋势。当该起伏降低到不足以限制重力流时,限制性的深水水道会过渡为非限制性的朵叶体(图12c)^[46]。此种深水水道向朵叶体的转换可能发生在研究区的下游方向,因为三维地震工区的覆盖范围有限,本研究未能准确识别到该过渡点(图12c)。Posamentier等(2019)^[46]认为深水沉积

从限制性向非限制性的过渡与斜坡坡度的变化有关;斜坡越平缓,深水水道向盆地方向延伸的距离越短,相应的水道与朵叶体的过渡点越靠近陆地方向。在本研究中,随着朵叶体在远物源一端的发育,主要地貌低点的斜坡变得越来越平缓,使得朵体沉积向上游方向逐渐迁移,最终充填于水道之中并覆盖在早期水道充填沉积之上(图6,图7c,图7d,图8a,图12c)。然而,由于水道剩余的可容空间不足以容纳所有的非限制性流体,其不可避免溢出到研究区西北角的次要地貌低点中,从而造成朵叶体在此处同样发育(图5,

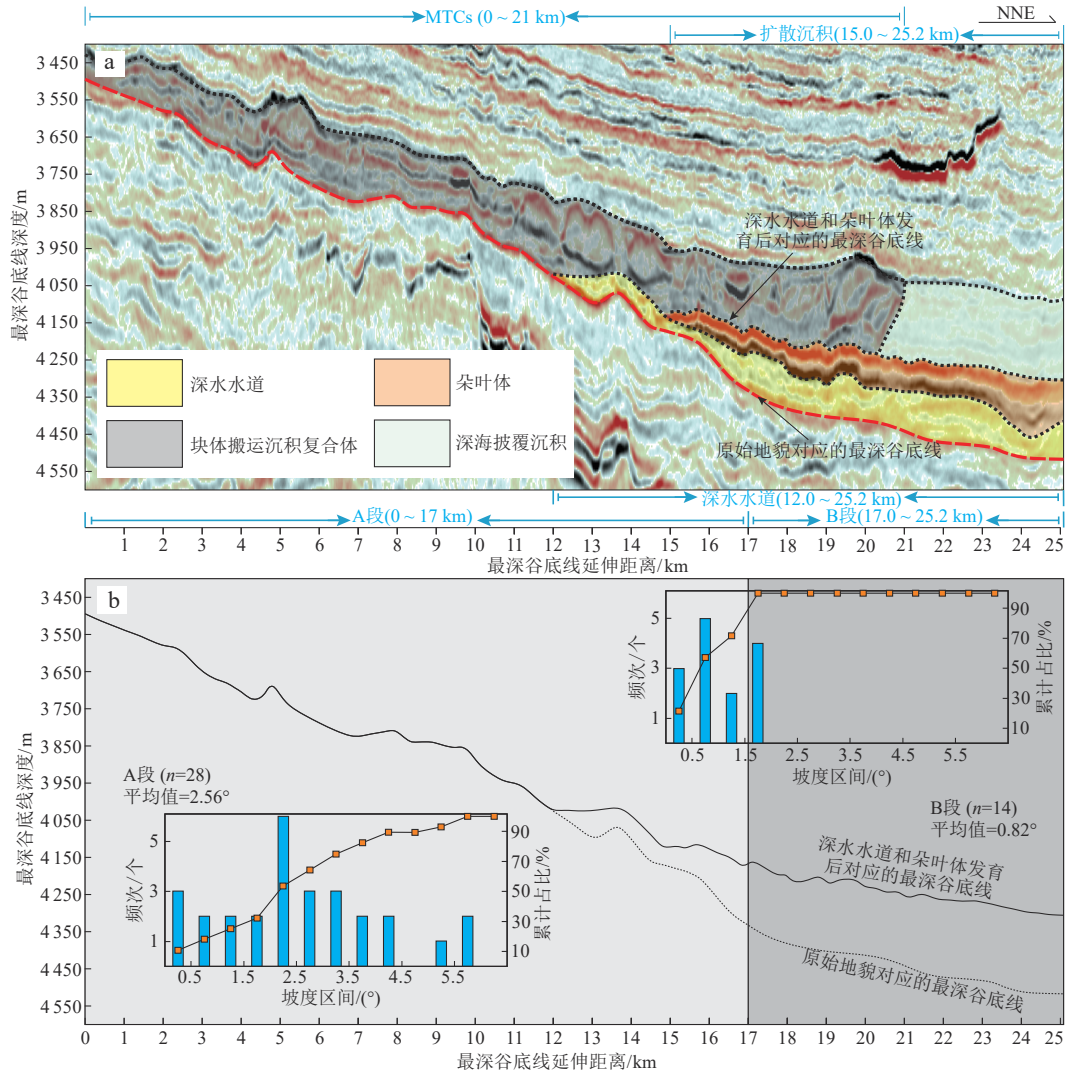


图8 研究区主要地貌低点斜坡坡度随时间的变化

Fig. 8 Changes of slope gradients of the main topographic low with time in the study area

a. 沿主要地貌低点最深谷底线的地震剖面(剖面位置见图3a和图6中的白色实线);b. 主要地貌低点最深谷底线深度在深水水道和朵体沉积发育后的变化以及对新斜坡坡度在主要地貌低点A段和B段的分布频率

图6b,图12c)。因为朵叶体首先在主要地貌低点的远物源一端堆积,其次再向上游方向迁移并溢出到次要地貌低点中,所以,沿着沉积倾向及走向(图10中地震剖面A—A'和B—B'所指示的从次要地貌低点至主要地貌低点的方向),朵体的沉积厚度表现为明显的增长趋势。

4.2 晚期MTCs在后期地貌上的发育演化

在深水水道和朵叶体形成之后,MTCs开始沿研究区主要地貌低点发育。然而,需要说明的是,此时的MTCs是在经过水道和朵叶体调整后的后期地貌上堆积。深水水道和朵叶体分别对应主要地貌低点12.0~25.2 km和15.0~25.2 km部分的最深谷底线,其绝大部分属于B段(图6a,图6b,图8a,图12c)。因此,主要

地貌低点B段所对应的初始地貌被沉积过程进行了调整,斜坡坡度明显降低。如图8和图12c,将主要地貌低点近物源一端的SB6界面与远物源一端的深水水道和朵体沉积的顶界面进行结合,即可得到研究区的后期(深水水道和朵体发育后)海底地貌。根据计算结果,主要地貌低点后期斜坡坡度的平均值相较于初始地貌变得非常小,直接下降到了0.82°(图4,图8)。然而,对于主要地貌低点的A段,因为基本上没有受到早期沉积过程的影响,其斜坡坡度变化非常有限,平均值仅从2.83°仅下降到了2.56°(图4,图8)。

虽然部分初始地貌被深水水道和朵体沉积进行了调整,主要地貌低点在后期仍然存在,也就是说,地形提供的限制性对来自上游的流体仍起着显著的汇聚作用。而且,在MTCs发育前,深水水道还未被完全充

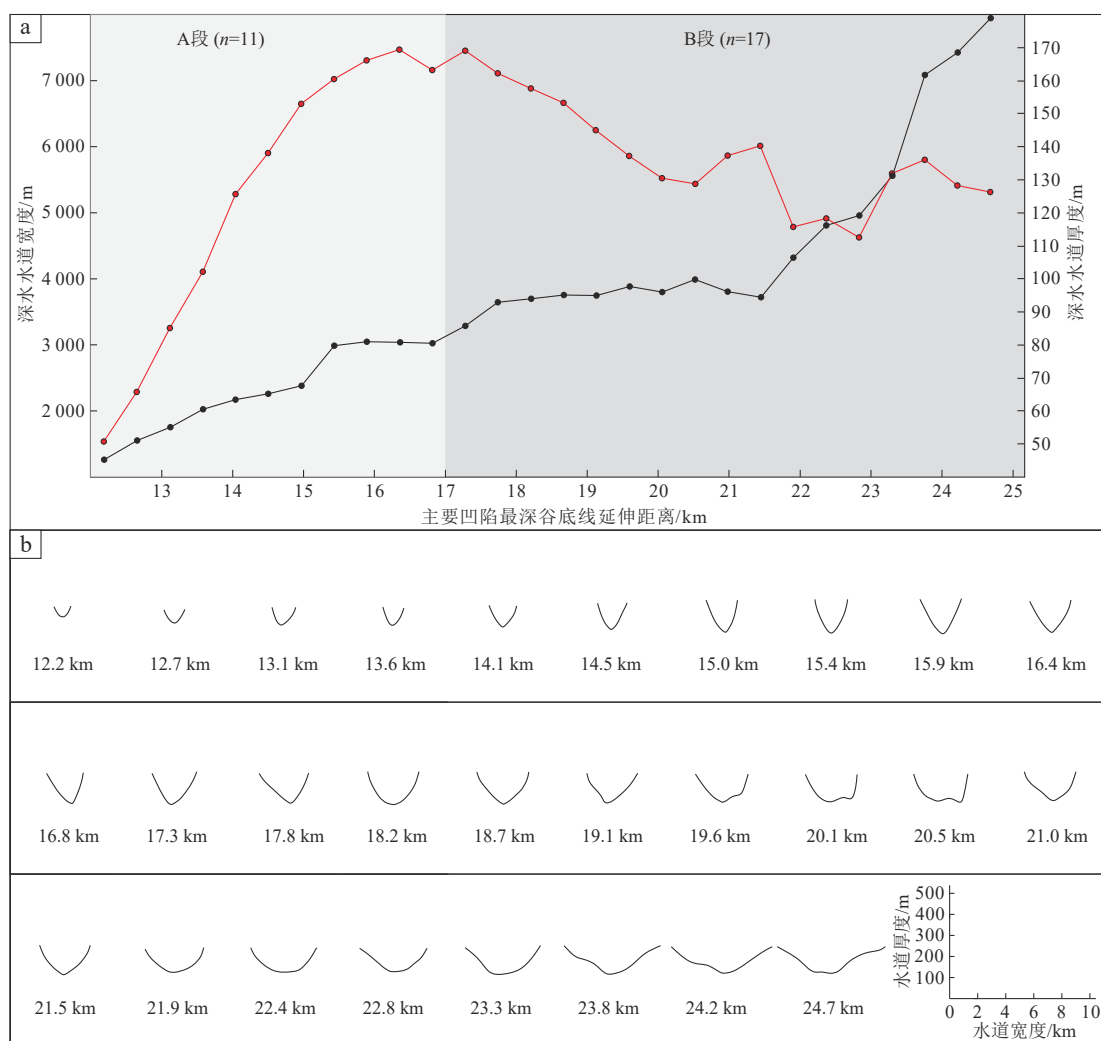


图9 研究区深水水道外部形态特征

Fig. 9 External morphology of the submarine channels in the study area

a. 深水水道宽度和厚度参数沿流向的变化; b. 深水水道剖面几何形态沿流向的变化(来自28个垂直主要地貌低点最深谷底线的地震剖面解释。)

填,仍表现为负地貌特征,其与固有的地形提供的限制性使得主要地貌低点轻松捕获了后期的块体流。因此块体流倾向于利用之前存在的水道通道向下游流动,导致最终形成的MTCs同样沿着主要地貌低点最深谷底线展布(图6,图8a,图12d)。由于自身密度比较高,块体流具有很强的侵蚀能力,其对下伏的深水沉积具有明显的削蚀作用^[22,47-49]。当块体流沿着之前存在的水道通道流动时,其夹带走了早期的水道充填沉积,破坏了水道的几何形态,从而造成了主要地貌低点近物源一端深水水道的缺失(图6,图7a,图8a,图12d)。

根据以上对MTCs的表征,其分布范围对应主要地貌低点0~21.0 km部分的最深谷底线(图6,图8a),这说明块体流在研究区远物源一端边界之前停了下来。而且,在研究区近物源一端边界,海底滑坡发生的标志——头部悬崖(headwall escarpment)^[22-23,49-50]并没

有被观察到,这表明块体流最有可能起源于研究区上游地区的斜坡垮塌^[51]。从主要地貌低点的A段到B段,由于深水水道和朵叶体发育后斜坡进一步变缓(图8b),块体流的速度逐渐降低,侵蚀能力也伴随着不断减弱,并最终在平缓的主要地貌低点B段停了下来。因此,沿着主要地貌低点的最深谷底线,越来越多的深水水道沉积得以保存,这也解释了为什么深水水道的厚度在沿变缓的斜坡大规模下降前首先表现出一段增长趋势(图9a)。随着块体流速度和侵蚀能力向下游方向逐渐降低,其携带沉积物的能力也明显减弱,从而造成了MTCs的广泛堆积。这种块体搬运过程与MTCs的展布规律是一致的,MTCs的厚度向下游方向表现出明显增大趋势(图11)。在MTCs的远物源一端,由于流体的减速以及惯性力的存在,块体流主体发生了明显的挤压和内部收缩,从而导致了同生逆冲断

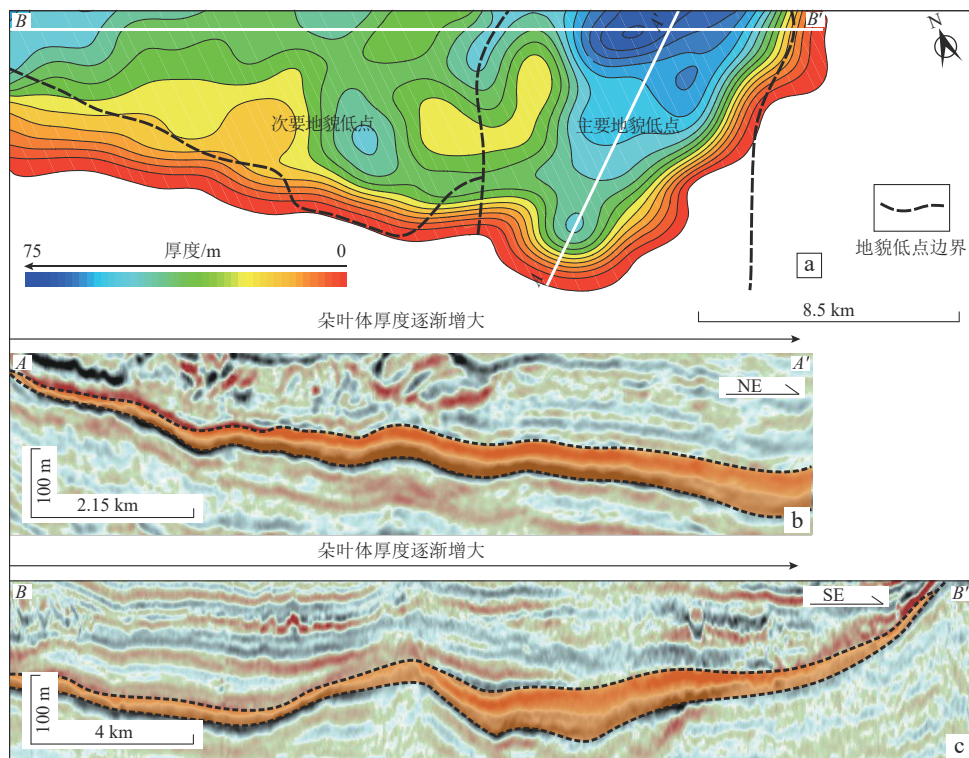


图 10 研究区远物源一端朵叶体沉积厚度及其变化趋势

Fig. 10 Isopach map of lobes occurring at the distal part of the study area and seismic sections showing the specific variations of the lobe thicknesses

a. 远物源一端朵叶体厚度; b. 三维地震剖面 A—A'; c. 三维地震剖面 B—B'

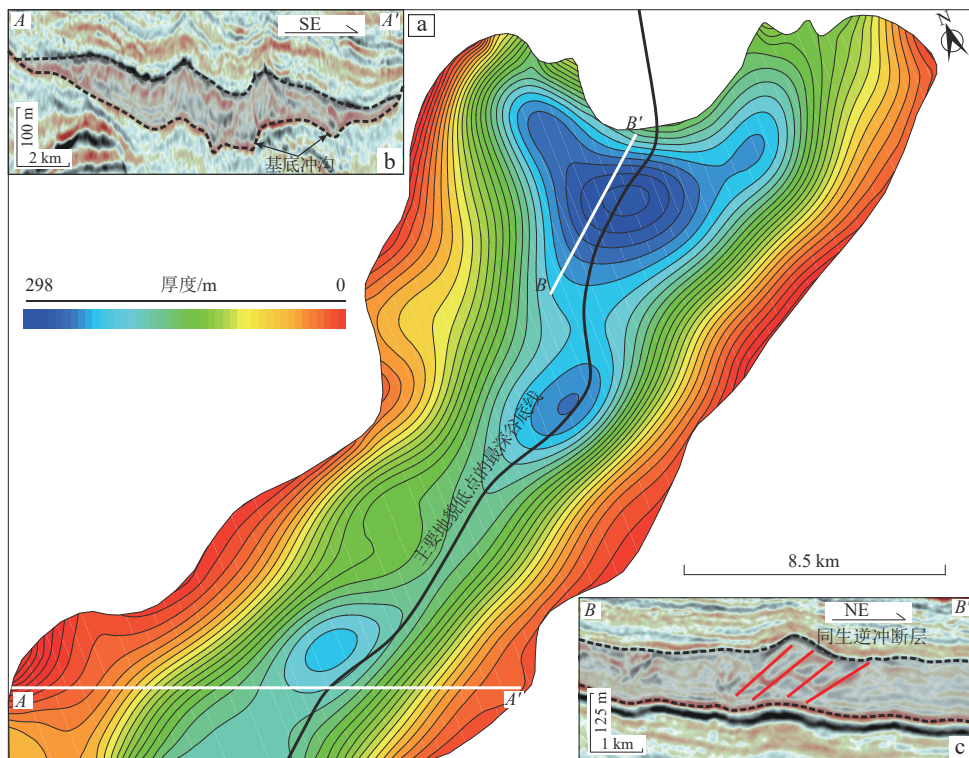


图 11 研究区沿主要地貌低点展布的 MTCs 厚度等值线及 MTCs 内部地貌特征

Fig. 11 Isopach map of MTCs emplaced along the orientation of the main topographic low and seismic sections showing their internal geomorphological characteristics

a. 沿主要地貌低点展布的 MTCs 厚度等值线; b. 地震剖面 A—A' MTCs 结构特征; c. 地震剖面 B—B' MTCs 结构特征

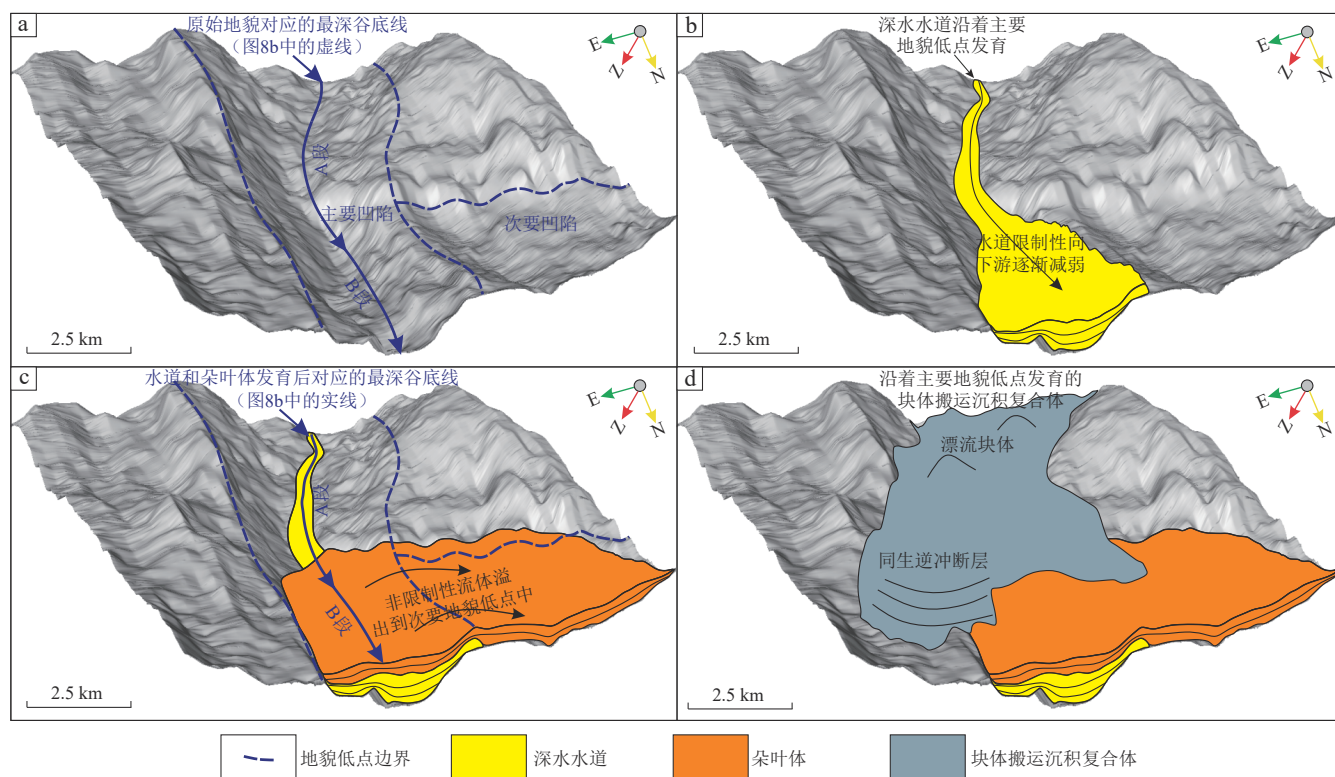


图 12 沉积物重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化模式

Fig. 12 Sketch diagram showing the development of submarine depositional systems as a consequence of dynamic interplays of sediment gravity flows and the evolving seafloor topography

a. 原始地貌特征; b. 早期水道发育特征; c. 中期朵叶体充填特征; d. 晚期 MTCs 发育特征

层的形成(图 11, 图 12d)。此种同生逆冲断层在墨西哥湾的格林峡谷区^[1]以及特立尼达拉岛的外海区域^[22]同样有被发现。另外,在 MTCs 的近物源一端,因为斜坡坡度相对比较陡(图 8),块体流具有较高的流速^[52-53],其搬运沉积物的能力也相对较强,这使得漂流的块体在下伏基底上造成明显的刻痕,从而形成了底部冲沟(图 11, 图 12d)。在巴西东南部的北海^[50]以及中国南海北部陆缘^[54],同样观察到了与这些底部冲沟相似的冲刷痕迹。

5 结论

1) 初始地貌对早期深水水道和朵叶体的发育演化具有重要控制作用。初始地貌中的主要地貌低点有效捕获了来自上游的重力流,促进了深水水道的形成;斜坡坡度沿主要地貌低点明显变缓,导致重力流的速度和能量逐渐减小,向下侵蚀能力变弱,侧向拓宽能力增强,从而使深水水道的剖面形态沿流向依次出现 V 型、深 U 型及碟型演化。随着水道的限制性向下游方向减弱,朵叶体在末端非限制性区发育,其向近物源一端逐渐生长并上覆于水道充填沉积;水道剩余可容空

间的不足导致非限制性流体溢出到工区西北角的次要地貌低点中并在此处同样发育朵叶体。

2) 早期发育的深水水道和朵叶体在一定程度上改造了研究区初始地貌。深水水道和朵叶体均发育在主要地貌低点远物源一端,填平补齐了西北角的次要地貌低点并平滑了主要地貌低点的 B 段。相较于初始地貌, B 段斜坡坡度明显变缓, A 段几乎不变。

3) MTCs 发育在深水水道和朵叶体改造后的海底地貌上。在主要地貌低点自身地形以及深水水道沉积起伏提供的综合限制性作用下,来自上游的块体流被有效捕获,导致 MTCs 同样沿着主要地貌低点展布。从主要地貌低点的 A 段到 B 段,因斜坡在深水水道和朵叶体发育后进一步变缓,块体流携带沉积物能力显著降低,使得 MTCs 在更加平缓的 B 段广泛堆积。

致谢: 论文撰写得到了冯志强教授的悉心指导,他在转换陆缘结构和沉积特征方面的认识,对转换陆缘深水油气勘探具有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] POSAMENTIER H W, KOLLA V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J].

- Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(3): 367–388.
- [2] MAYALL M, JONES E, CASEY M. Turbidite channel reservoirs—Key elements in facies prediction and effective development [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(8): 821–841.
- [3] 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 Yankun, WAN Lunkun, JI Zhifeng, et al. Progress of research on deep-water mass-transport deposits [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 140–152.
- [4] 林畅松. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 685–700.
- LIN Changsong. Sedimentary dynamics of basin: Status and trend [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 685–700.
- [5] WEIMER P, SLATT R M, BOUROLLEC R, et al. Introduction to the petroleum geology of deepwater setting [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2006: 57–111.
- [6] MCHARGUE T, PYRCZ M J, SULLIVAN M D, et al. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: Patterns and predictions [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(3): 728–743.
- [7] COVAULT J A, KOSTIC S, PAULL C K, et al. Cyclic steps and related supercritical bedforms: Building blocks of deep-water depositional systems, western North America [J]. Marine Geology, 2017, 393: 4–20.
- [8] STOW D A V, READING H G, COLLINSON J D. Deep seas [M]//READING H G. Sedimentary Environments: Processes, Facies, and Stratigraphy. 3rd ed. Cambridge: Blackwell Science, 1996: 395–453.
- [9] RICHARDS M, BOWMAN M, READING H. Submarine-fan systems i: Characterization and stratigraphic prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15(7): 689–717.
- [10] KOLLA V. A review of sinuous channel avulsion patterns in some major deep-sea fans and factors controlling them [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6/9): 450–469.
- [11] PICOT M, DROZ L, MARSSET T, et al. Controls on turbidite sedimentation: Insights from a quantitative approach of submarine channel and lobe architecture (Late Quaternary Congo Fan) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 72: 423–446.
- [12] ZHAO Xiaoming, QI Kun, LIU Li, et al. Development of a partially-avulsed submarine channel on the Niger Delta continental slope: Architecture and controlling factors [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 95: 30–49.
- [13] HUYGHE P, FOATA M, DEVILLE E, et al. Channel profiles through the active thrust front of the southern Barbados prism [J]. Geology, 2004, 32(5): 429–432.
- [14] FERRY J N, MULDER T, PARIZE O, et al. Concept of equilibrium profile in deep-water turbidite system: effects of local physiographic changes on the nature of sedimentary process and the geometries of deposits [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2005, 244(1): 181–193.
- [15] GEE M J R, GAWTHORPE R L. Submarine channels controlled by salt tectonics: Examples from 3D seismic data offshore Angola [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(4): 443–458.
- [16] CLARK I R, CARTWRIGHT J A. Interactions between submarine channel systems and deformation in deepwater fold belts: Examples from the Levant Basin, Eastern Mediterranean sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1465–1482.
- [17] JOLLY B A, LONERGAN L, WHITTAKER A C. Growth history of fault-related folds and interaction with seabed channels in the toe-thrust region of the deep-water Niger Delta [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 70: 58–76.
- [18] ZUCKER E, GVIRTZMAN Z, STEINBERG J, et al. Diversion and morphology of submarine channels in response to regional slopes and localized salt tectonics, Levant Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 81: 98–111.
- [19] SMITH R. Silled sub-basins to connected tortuous corridors: sediment distribution systems on topographically complex sub-aqueous slopes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 222(1): 23–43.
- [20] BEAUBOUF R T, ABREU V. Basin 4 of the Brazos-Trinity slope system: Anatomy of the terminal portion of an intra-slope lowstand systems tract [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2006, 56: 39–49.
- [21] ZHAO Xiaoming, LI Minghua, QI Kun, et al. Development of a distinct submarine depositional system on a topographically complex Niger Delta slope [J]. Geological Journal, 2020, 55(5): 3732–3747.
- [22] MOSCARDELLI L, WOOD L, MANN P. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(7): 1059–1088.
- [23] 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.
- [24] ALVES T M. Submarine slide blocks and associated soft-sediment deformation in deep-water basins: A review [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 262–285.
- [25] KNELLER B. The influence of flow parameters on turbidite slope channel architecture [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(6/8): 901–910.
- [26] FRANCE-LANORD C, SPIESS V, KLAUS A, et al. Neogene and Late Paleogene record of Himalayan orogeny and climate: A transect across the Middle Bengal Fan: International Ocean Discovery Program expedition 354 preliminary report [R]. College Station: IODP, 2015.
- [27] GONG Chenglin, WANG Haiqiang, SHAO Dali, et al. How did the world's largest submarine fan in the Bay of Bengal grow and evolve at the subfan scale? [J]. AAPG Bulletin, 2022, 106(7): 1431–1451.
- [28] DARROS DE MATOS R M. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic [M]//MOHRIAK W, TAIWANI M. Atlantic Rifts and Continental Margins. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2000: 331–354.
- [29] BROWNFIELD M E, CHARPENTIER R R. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea province of West Africa: b2207C [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2006: 32.

- [30] STOLTE J T, DARDEN M P. Testing the Atlantic Mirror theory [J]. *Oil & Gas Financial Journal*, 2013, 10(4): 18–20, 22–23.
- [31] MAIA DE ALMEIDA N, ALVES T M, NEPOMUCENO FILHO F, et al. Tectono-sedimentary evolution and petroleum systems of the Mundaú subbasin: A new deep-water exploration frontier in equatorial Brazil[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(4): 795–824.
- [32] DA CRUZ PESSOA NETO O, SOARES U M, DA SILVA J G F, et al. Bacia Potiguar[J]. *Boletim de Geociencias-Petrobras*, Rio de Janeiro, 2007, 15(2): 357–369.
- [33] MELO A H, ANDRADE P R O, MAGALHÃES A J C, et al. Stratigraphic evolution from the early Albian to late Campanian of the Potiguar Basin, Northeast Brazil: An approach in seismic scale [J]. *Basin Research*, 2020, 32(5): 1054–1080.
- [34] DA SILVA E B, SEVERIANO RIBEIRO H J P, SOARES DE SOUZA E. Exploration plays of the Potiguar Basin in deep and ultra-deep water, Brazilian Equatorial Margin [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 111: 103454.
- [35] DE OLIVEIRA CUNHA J A, CÓRDOBA V C, SOARES U M, et al. Evolution of shallow and deep-water deposits included in the regressive drift succession of the Potiguar Basin (Brazilian Equatorial Margin) during the Late Cretaceous to Holocene [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 110: 103420.
- [36] FONSECA J C L G, VITAL H, PEREZ Y A R, et al. Seismic stratigraphy of a deep water basin in the Brazilian equatorial margin: The eastern portion of Potiguar Basin and Touros High [J]. *Geo-Marine Letters*, 2020, 40(6): 977–988.
- [37] DEPTUCK M E, SYLVESTER Z, PIRMEZ C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/9): 406–433.
- [38] HANSEN L, L' HEUREUX J S, SAUVIN G, et al. Effects of mass-wasting on the stratigraphic architecture of a fjord-valley fill: Correlation of onshore, shear-wave seismic and marine seismic data at Trondheim, Norway [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 289: 1–18.
- [39] SALLER A, WERNER K, SUGIAMAN F, et al. Characteristics of Pleistocene deep-water fan lobes and their application to an upper Miocene reservoir model, offshore East Kalimantan, Indonesia[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(7): 919–949.
- [40] CROSS N E, CUNNINGHAM A, COOK R J, et al. Three-dimensional seismic geomorphology of a deep-water slope-channel system: The Sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(8): 1063–1086.
- [41] FILDANI A, HUBBARD S M, COVAULT J A, et al. Erosion at inception of deep-sea channels [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 48–61.
- [42] MAIER K L, FILDANI A, PAULL C K, et al. Deep-sea channel evolution and stratigraphic architecture from inception to abandonment from high-resolution Autonomous Underwater Vehicle surveys offshore central California [J]. *Sedimentology*, 2013, 60(4): 935–960.
- [43] KOSTIC S. Modeling of submarine cyclic steps: Controls on their formation, migration, and architecture [J]. *Geosphere*, 2011, 7(2): 294–304.
- [44] SPINELINE B, SEQUEIROS O E, GARCIA M H, et al. Experiments on wedge-shaped deep sea sedimentary deposits in minibasins and/or on channel levees emplaced by turbidity currents. Part II. Morphodynamic evolution of the wedge and of the associated bedforms [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(8): 608–628.
- [45] GAY A. Reply to comment on: Seafloor facies related to upward methane flux within a Giant Pockmark of the Lower Congo Basin [J]. *Marine Geology*, 2006, 232(1/2): 103–104.
- [46] POSAMENTIER H W, KOLLA V, 刘化清. 深水浊流沉积综述 [J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 879–903.
POSAMENTIER H W, KOLLA V, LIU Huaqing. An overview of deep-water turbidite deposition [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 879–903.
- [47] SHANMUGAM G. Submarine fans: A critical retrospective (1950–2015) [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 5(2): 110–184.
- [48] ORTIZ-KARPF A, HODGSON D M, JACKSON C A L, et al. Influence of seabed morphology and substrate composition on mass-transport flow processes and pathways: Insights from the Magdalena Fan, offshore Colombia [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(3): 189–209.
- [49] QIN Yongpeng, ALVES T M, CONSTANTINE J, et al. The role of mass wasting in the progressive development of submarine channels (Espírito Santo Basin, SE Brazil) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(5): 500–516.
- [50] GAMBOA D, ALVES T M. Bi-modal deformation styles in confined mass-transport deposits: Examples from a salt minibasin in SE Brazil [J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 176–193.
- [51] WU Gaokui, KONG Fanjun, TIAN Naxin, et al. Structural characteristics and deep-water hydrocarbon accumulation model of the Scotian Basin, Eastern Canada [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(3): 100152.
- [52] 田纳新, 龚承林, 吴高奎, 等. 转换陆缘海底扇的沉积特征与沉积模式——以赤道大西洋漂移晚期陆缘为例 [J]. *沉积学报*, 2023, 41(6): 1798–1809.
TIAN Naxin, GONG Chenglin, WU Gaokui, et al. Depositional characteristics and models of submarine fans on transform margins: A case study from the late drift stage of the equatorial Atlantic margin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(6): 1798–1809.
- [53] 吴高奎, 张忠民, 陈华, 等. 下刚果盆地中新统重力流沉积演化及控制因素 [J]. *沉积学报*, 2023, 41(1): 73–84.
WU Gaokui, ZHANG Zhongmin, CHEN Hua, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of Miocene gravity flow deposits in the Lower Congo Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 73–84.
- [54] WU Wei, LI Quan, YU Jing, et al. The central canyon depositional patterns and filling process in east of Lingshui Depression, Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2018, 53(6): 3064–3081.