

琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇沉积特征及沉积模式

杨宏宇¹, 胡明毅¹, 蔡全升¹, 陈志宏², 刘 为²

[1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中海石油(中国)有限公司 海南分公司, 海南 海口 570312]

摘要: 深入研究琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇的沉积特征及其沉积模式, 对于指导该区域梅山组天然气勘探具有重要意义。通过岩心精细观察, 结合地震、测井以及分析测试资料, 并运用层序地层学与沉积学理论, 研究了琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇的沉积特征和沉积模式。研究表明: ① 乐东北坡梅山组海底扇的物源分别来自西部和北部。西部物源海底扇主要分布于坡折带以下的盆地沉积区。受构造限制西部物源海底扇在低洼区沉积, 剖面上水道密集分布, 扇体侧边缘具明显上超特征。北部物源海底扇在乐东凹陷东北坡发育, 剖面上扇端砂体不断前积, 表现为下超特征。西部物源海底扇与北部物源海底扇扇体明显不同。西部物源海底扇没有典型的扇体外形和水道地震响应, 厚层砂岩直接超覆沉积于两侧斜坡区上, 岩性以灰色细砂岩为主, 砂岩厚度较大, 砂岩组分以石英为主, 石英含量平均为76%, 长石含量平均为12%; 北部物源海底扇岩性以灰色粉砂岩为主, 砂岩厚度较小, 砂岩组分以石英和岩屑为主, 石英含量平均为55%, 岩屑含量平均为30%。② 乐东北坡梅山组海底扇的发育主要受控于海平面变化、物源供给及古地貌特征。坡折带的形成以及较低海平面是海底扇形成的有利条件, 而物源供给量与盆地古地貌则约束了海底扇的类型, 高物源供给易于形成限制型海底扇, 而低物源供给则有利于非限制型海底扇的形成。西部物源海底扇属于限制型海底扇, 局限的盆地边界导致西部扇体砂质碎屑流沉积极为发育, 水道频繁迁移改造, 浊流沉积发育较弱。据此, 总结了乐东北坡梅山组限制型海底扇发育特征及主控因素, 建立了限制型海底扇沉积模式, 以期为类似沉积体油气勘探工作提供参考。

关键词: 沉积特征; 沉积模式; 限制型海底扇; 梅山组; 乐东凹陷; 琼东南盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sedimentary characteristics and models of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

YANG Hongyu¹, HU Mingyi¹, CAI Quansheng¹, CHEN Zhihong², LIU Wei²

[1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. CNOOC (China) Limited Hainan Branch, Haikou, Hainan 570312, China]

Abstract: Gaining a deep understanding of the sedimentary characteristics and models of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag in the Qiongdongnan Basin holds great significance for guiding natural gas exploration in this formation. Using detailed core observations and descriptions, as well as data from seismic surveys, well logging, analysis, and tests, we investigate the sedimentary characteristics and models of submarine fans in the study area based on sequence stratigraphy and sedimentology. The results indicate that the submarine fans developed in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag are supplied by the western and northern provenance areas. The western provenance area-sourced submarine fan is primarily distributed in the sedimentary basin region below the slope break zone. Since the deposition occurs in the low-lying area as restricted by structures, the western provenance area-sourced submarine fan exhibits intensively distributed channels on the seismic section, with their literal edges displaying a pronounced onlap pattern. While the northern provenance area-sourced submarine fan occurs on the northeastern continental slope of the Ledong Sag. On the seismic section, its sand bodies close to the distal end of the fan show continuous progradation, leading to a downlap pattern. The two submarine fans differ significantly. Specifically, the western provenance area-sourced submarine fan lacks typical fan body shape and seismic responses of channels, with

收稿日期: 2024-08-28; 修回日期: 2025-01-08。

第一作者简介: 杨宏宇(1999—), 男, 硕士研究生, 沉积学与石油地质学。E-mail: yanghycjdx@163.com。

通信作者简介: 胡明毅(1965—), 男, 教授, 沉积学与石油地质学。E-mail: humingyi65@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202161); 中海油海南分公司外部协作项目(CCL2022HNFN0434)。

thickly laminated sandstones directly overlapping the slope areas on both sides, and it mainly involves gray fine-grained sandstones at great thickness and with a composition of quartz (average content of 76 %) and feldspar (average content of 12 %). The northern provenance area-sourced submarine fan, on the other hand, is composed predominantly of gray siltstones at small thickness, with sandstones mainly composed of quartz (average content of 55 %) and lithic fragments (average content of 30 %). The formation and evolution of submarine fans in the study area are principally governed by sea level, provenance, and paleogeography. The formation of slope break zones and low sea level create favorable conditions for the formation of submarine fans, while sediment supply and basin landforms determine submarine fan types. Sufficient sediment supply greatly facilitates the formation of confined submarine fans; otherwise unconfined submarine fans are likely to develop. The western provenance area-sourced submarine fan is classified as the confined type, where restricted basin boundaries result in extremely developed sandy debris-flow deposits, frequent migration and diversion of channels, and weakly developed turbidite-flow deposits. Based on these findings, we summarize the developmental characteristics and major factors controlling the confined submarine fan of the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag and establish its sedimentary model, aiming to provide a reference for hydrocarbon exploration in similar sedimentary bodies.

Key words: sedimentary characteristics, sedimentary model, confined submarine fan, Meishan Formation, Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

引用格式:杨宏宇,胡明毅,蔡全升,等. 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇沉积特征及沉积模式[J]. 石油与天然气地质,2025,46(2):550–566. DOI: 10.11743/ogg20250214.

YANG Hongyu, HU Mingyi, CAI Quansheng, et al. Sedimentary characteristics and models of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 550–566. DOI: 10.11743/ogg20250214.

海底扇作为“源-汇系统”在大陆斜坡区发育的最末端沉积单元,不仅记录了区域海平面的升降变化过程,同时还蕴含了盆地古构造地貌演化的地质信息,是开展区域地质环境演化研究的重要对象。自1962年Bouma等人提出浊流沉积的“鲍马序列”以来,人们对海底扇的沉积特征、流体性质、主控因素和沉积模式等开展了大量研究工作^[1-4],普遍认为沉积物失稳是海底扇触发的主要机制,主要受到构造活动、海平面升降以及沉积物过量供给等的控制^[5-11]。在海底扇的形成过程中涉及的流体类型不仅包括浊流,还有碎屑流,且这些地质流体形成的沉积物还会受到底流改造的影响^[6]。为了更好地识别海底扇的沉积特征,人们依据不同的要素将海底扇划分为多种类型^[12-14],如基于陆架背景划分的主动大陆边缘海底扇与被动大陆边缘海底扇,基于砂、泥含量划分的富泥型海底扇、富砂型海底扇和砂-泥混合型海底扇等,并在此基础上将海底扇划分为水道、堤岸以及朵体3个次级的沉积单元,只是在不同的扇体部位这些沉积单元的构成特征及分布模式存在差异。除了基于上述要素的划分方案外,一些学者研究发现,相同物源体系下,汇聚盆地规模对扇体的发育也有重要影响,据此提出了限制型海底扇与非限制型海底扇的划分方案,认为不同限制程度的海底扇沉积特征具有明显差异^[15-17]。但到目前为止,对于非限制型海底扇与限制型海底扇的沉积差异与发育

模式还缺乏系统深入的对比研究,两者对油气储层特征的影响尚不清楚,这不仅制约了人们对于海底扇沉积体的深入认识,同时也制约与该类沉积储层有关的油气勘探工作。

琼东南盆地作为中国近海重要的新生代含油气盆地,油气资源极其丰富。近年来,针对该区新近系梅山组的油气勘探研究发现,梅山组发育丰富的海底扇沉积,其中在地貌特殊的乐东北坡,梅山组既发育限制型海底扇,同时还发育非限制型海底扇,两者均是岩性圈闭的有利目标^[18]。然而,这两类海底扇物源体系、地貌背景以及沉积规模均具有明显差异。为了进一步分析这两类海底扇,本文以乐东北坡梅山组为例,在前人研究的基础上,综合利用钻井、岩心、测井以及地震资料,系统对比分析了该区梅山组2种不同类型海底扇的沉积特征,总结了不同类型海底扇的沉积差异,探讨了不同类型海底扇发育的控制因素,并建立了两种海底扇沉积体的发育模式,以期为该区海底扇的油气勘探工作及相类似海底扇的沉积地质研究提供参考。

1 区域地质概况

琼东南盆地是南海北部新生代大陆边缘的断-拗盆地,近东北向展布,可分为北部拗陷带、中部隆起带、中央拗陷带、南部隆起带和南部拗陷带,呈“三拗两隆”

的构造格局^[19]。其构造演化经历了古近纪断陷阶段和新近纪—第四纪裂后拗陷阶段,依次沉积了渐新统崖城组和陵水组,中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺歌海组及第四系乐东组。

乐东凹陷位于琼东南盆地中央拗陷带西部(图1),北部为崖南低凸起,东北为陵水低凸起,东部为陵水凹陷,南部为陵南低凸起,西部与中建凸起相接,北斜坡靠近崖南低凸起,呈四周凸起环绕的地貌特征。乐东凹陷在崖城组、陵水组及三亚组沉积时期主要为海—陆过渡相和滨浅海相沉积环境,梅山组、黄流组、莺歌海组和第四系乐东组沉积时期则表现为半深海相—深海相沉积特征。

受热沉降作用影响,梅山组沉积时期乐东凹陷和陵水凹陷分别形成了北东向和南西向沉积坡折带和凹陷区,整体处于欠补偿的半深海环境,在区域性海退背景下,陆架上部高位三角洲砂岩受重力流控制越过沉积坡折带在东北陆坡、北部斜坡和低洼区沉积,形成海底扇富集区(图1)。

2 梅山组层序地层格架和物源体系

2.1 层序地层格架

前人研究表明,梅山组沉积期(中新世兰盖阶—赛拉瓦莱阶沉积期)全球海平面发生了多期升、降旋回变化,具体表现为3次显著的海平面下降与2次快速的海

平面上升事件(图2)^[20-21]。梅山组作为当时琼东南盆地的主要沉积产物,也记录了这些重要海平面变化的信息。已有钻井与地震资料显示^[21-22],研究区梅山组底界(T_3^0)发育厚层砂岩,岩性粒度自下而上逐渐变细,过渡为半深海相泥岩沉积,随后砂岩发育规模逐渐增大,并在兰盖阶晚期,随着海平面的进一步下降,区域上沉积了厚层砂砾岩,而后发生的快速海侵导致区域上的厚层砂岩直接被后续深海相泥岩覆盖,这些沉积特征与全球性海平面变化一致。只是该区梅山组并没有记录塞拉瓦莱阶晚期的海平面波动式下降过程,可能与盆地周缘构造差异沉降有关。

因此,基于研究区梅山组地层的岩性序列以及地震反射界面响应特征,可将梅山组划分为2个三级层序^[22]:下部三级层序对应于梅山组二段(梅二段, $Sq1$, $T_3^0-T_4^1$),包含一个完整的沉积旋回,底界 T_3^0 对应梅山组与三亚组的不整合界面,顶界 T_4^1 对应兰盖阶晚期的最大海退面(大套厚层砂岩底界面),内部根据岩性序列变化识别出了初始海泛面与最大海泛面;上部三级层序对应于梅山组一段(梅一段, $Sq2$, $T_4^1-T_4^0$),也可以划分为低位体系域(LST)与海侵体系域+高位体系域(TST+HST),只是受梅山组晚期构造活动与海平面上升的影响,区域物源体系发生调整。莺歌海盆地三角洲砂体无法越过中建凸起到达研究区,导致研究区梅一段海侵体系域与高位体系域均以泥质沉积为主,在地震上呈明显的低频、弱振幅响应特征。

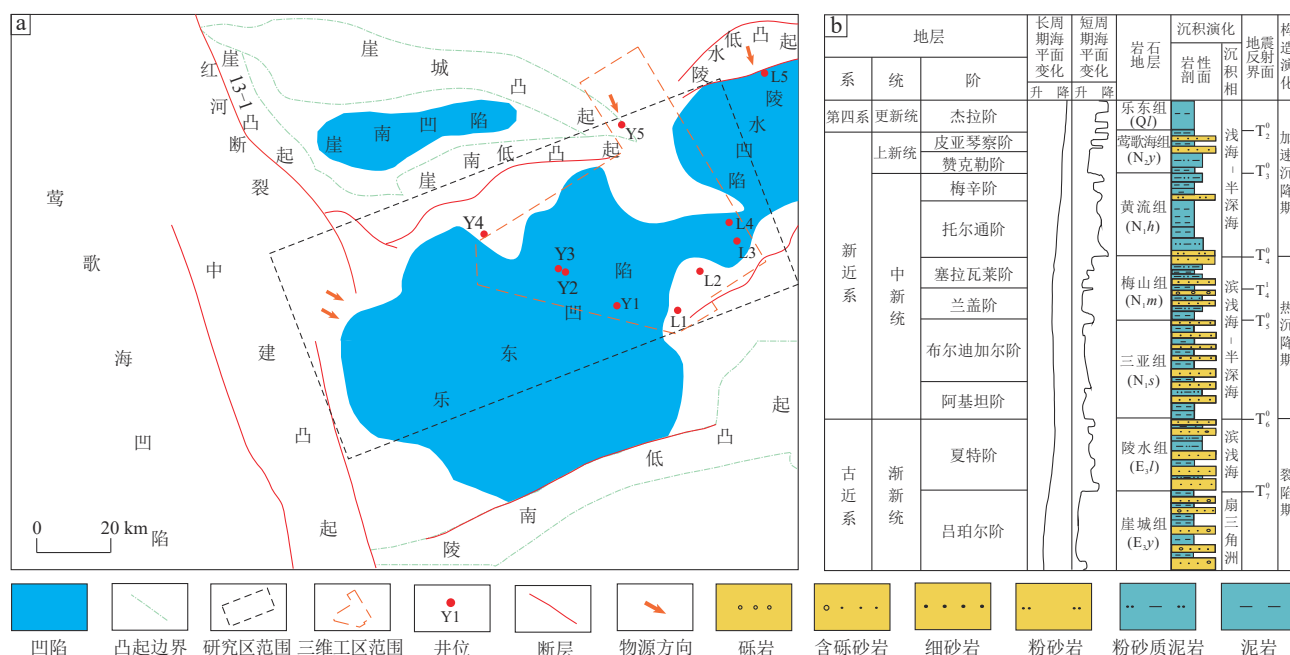


图1 琼东南盆地构造分区(a)与地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural division (a) and composite stratigraphic column (b) of the Qiongdongnan Basin

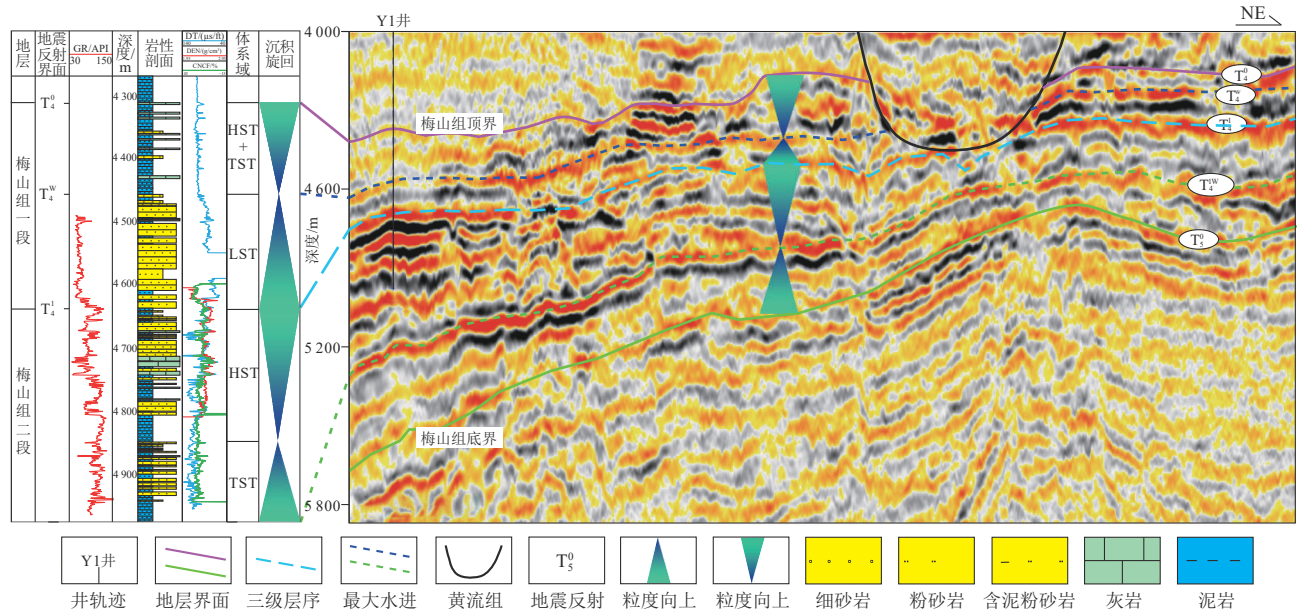


图2 琼东南盆地乐东北坡梅山组地层层序与地层格架(Y1井)

Fig. 2 Stratigraphic sequence column and framework in well Y1 of the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

LST. 低位体系域;HST. 高位体系域;TST. 海侵体系域。

2.2 物源体系

乐东凹陷西部与莺歌海盆地相接,且莺歌海盆地西部的昆崙隆起带在梅山组沉积时期发育大型三角洲^[23],使西部越南方向提供物源成为可能。来自昆崙隆起三角洲沉积的巨厚砂岩提供物源,在坡折作用下形成重力流,通过中建隆起与崖13-1低凸起之间的沟谷,在乐东凹陷-陵水凹陷发育西部物源海底扇^[24-26](图3a)。乐东凹陷东北部发育明显的构造坡折带以及北东-南西向下切谷,陆架坡折带之上在梅山组高位体系域沉积时期发育由海南隆起提供物源的陆架三角洲。受梅山组沉积时期区域性海退作用的影响,坡折带不断进积前移,三角洲富砂沉积受重力流控制越过坡折带在乐东凹陷-陵水凹陷发育北部物源海底扇^[27](图3b)。

分别对西部海底扇和北部海底扇碎屑颗粒进行观察分析发现,西部海底扇砂岩重矿物中锆石含量占31%~48%,白钛矿含量占29%~45%,重矿物组合以锆石+电气石+白钛矿为主,沉积岩重矿物组合占比大于50%,岩浆岩重矿物组合占比大于30%,说明其来源于沉积岩和岩浆岩基底;北部海底扇砂岩重矿物中磁铁矿含量占41%~57%,白钛矿含量占22%~24%,重矿物组合以磁铁矿+白钛矿为主,岩浆岩重矿物组合占比大于60%,说明其母岩主要为岩浆岩

(图4)。海南岛母岩以岩浆岩为主,而越南方向母岩以沉积岩和岩浆岩为主^[28-32],说明西部海底扇与北部海底扇的物源方向不同,即乐东凹陷梅山组海底扇存在西部与北部2套物源供给体系。

3 梅山组海底扇沉积特征

3.1 岩石学特征

岩心观察显示该区梅山组总体主要为含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩,矿物组分中有孔虫广泛分布(图5a),自生海绿石发育(图5b),指示半深海相-深海相沉积环境。北部物源海底扇岩性以灰色粉砂岩为主,砂岩厚度较小,砂岩组分以石英和岩屑为主,石英含量平均为55%,岩屑含量平均为30%,主要为岩屑石英砂岩和岩屑砂岩(图5f),可见砾石漂浮的砂质碎屑流特征。西部物源海底扇岩性以灰色细砂岩为主,砂岩厚度较大,砂岩组分以石英为主,石英含量平均为76%,长石含量平均为12%,主要为长石石英砂岩和岩屑石英砂岩(图5c)。

C-M图反映该区梅山组总体为递变悬浮和均匀悬浮搬运沉积,投点大致分布在与C=M线平行的平均线附近,显示重力流沉积特征。北部物源海底扇C-M图显示(图6),C值(对应粒度累计曲线上1%值处,最

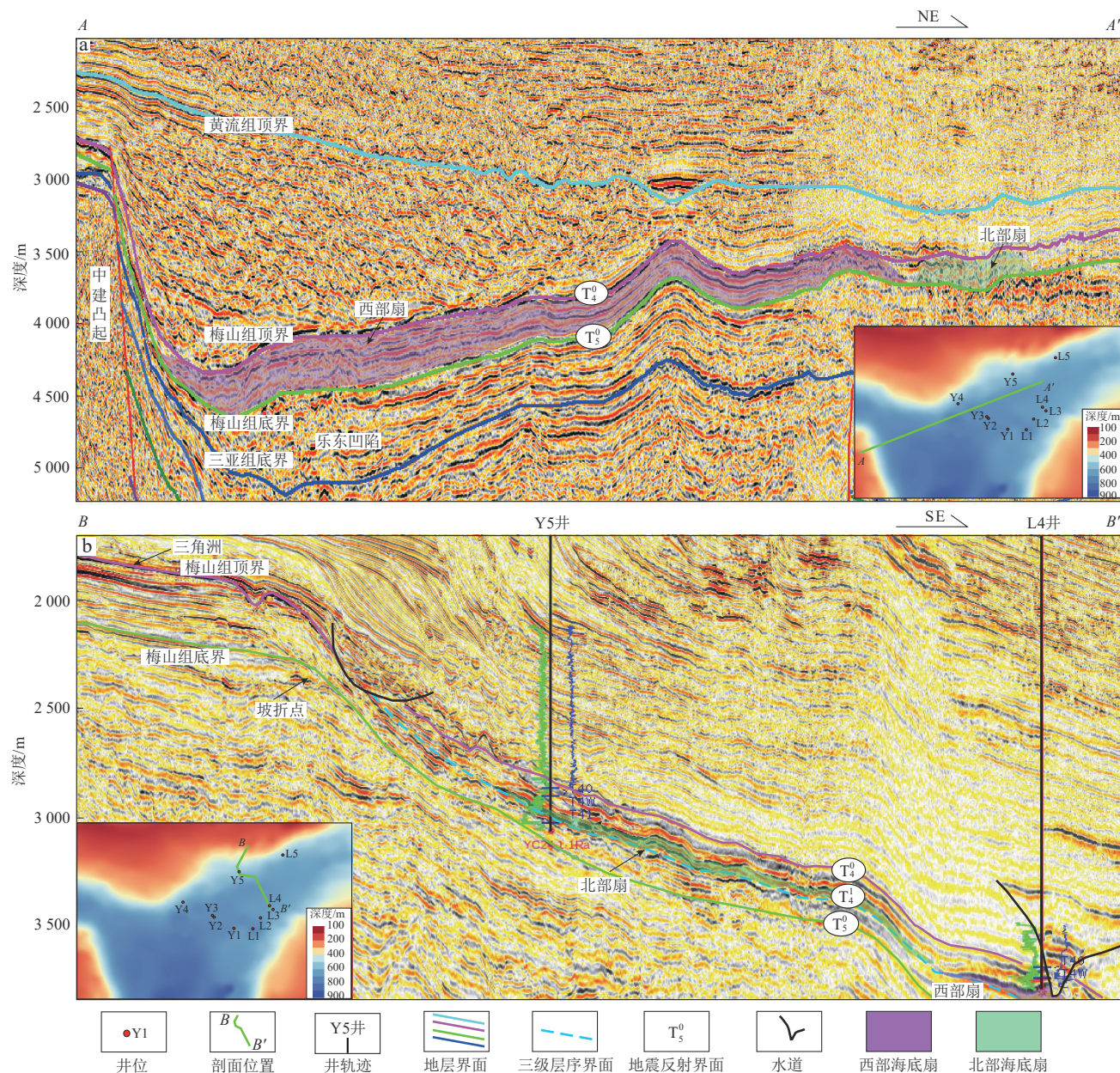


图3 琼东南盆地乐东北坡梅山组西部物源海底扇(a)和北部物源海底扇(b)地震剖面

Fig. 3 Seismic sections of the western- (a) and northern provenance area-sourced (b) submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

粗粒径)集中在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, M 值(对应粒度累计曲线上 50 % 值处, 粒径中值)集中在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$, 悬浮物质为粉砂和泥质的混合物(如 L5 井)。西部物源海底扇 $C-M$ 图显示以均匀悬浮搬运为主(图 6), C 值集中在 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$, M 值集中在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$, M 值变化较大, 指示较强水动力。部分井段投点较分散(如 L4 井), 反映其混有砂、砾岩, 具有砂质碎屑流主导的海底扇水道沉积特征; 部分井段投点较集中(如 Y3 井), 粒度细、分选好, 具有浊流主导的海底扇朵体沉积特征。

3.2 沉积构造特征

岩心观察显示研究区梅山组沉积构造丰富, 其中 Y3 井取心段砂岩可见砾石漂浮(图 7a)和泥岩撕裂屑(图 7b)发育于砂岩底部, 指示深水重力流沉积中含砂质碎屑流^[33-37]。由于砂质碎屑流底部剪切作用的存在, 砂岩具有两段韵律特征: 上部为碎屑漂浮, 具块状层理, 发育泥岩撕裂屑的刚性筏流段(图 7b)^[35]; 下部为具似平行层理的层流段(图 7b)。刚性筏流段接受不断卷入上部的泥质和砂质沉积, 高密度的塑性流体

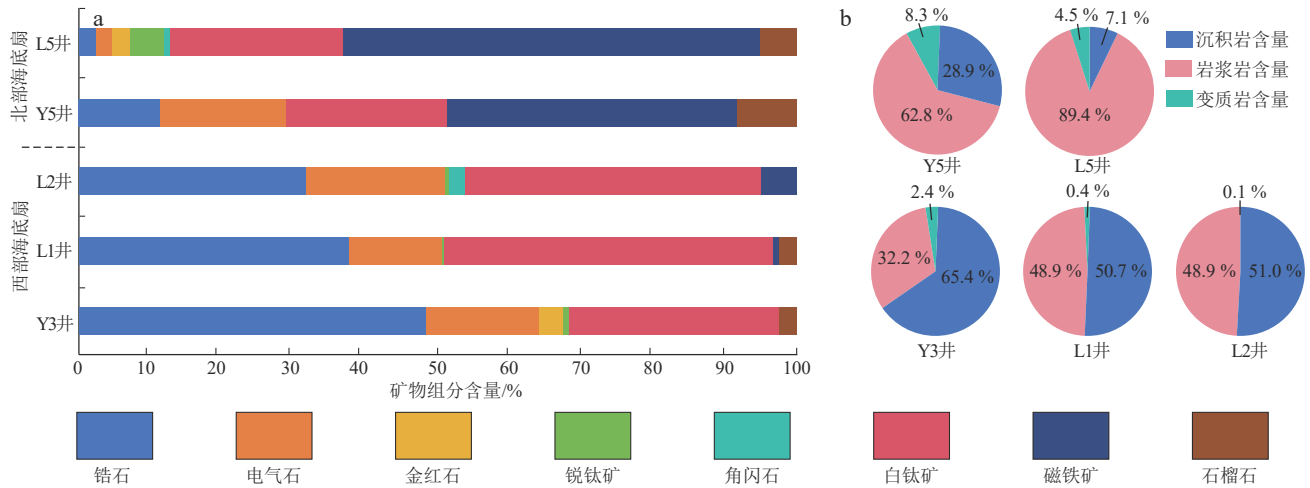


图4 琼东南盆地乐东北坡梅山组砂岩重矿物组合特征及物源分析

Fig. 4 Heavy mineral assemblages and provenance analysis of sandstones in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

a. 各井砂岩矿物组分含量条形图; b. 各井砂岩矿物组分含量玫瑰花图

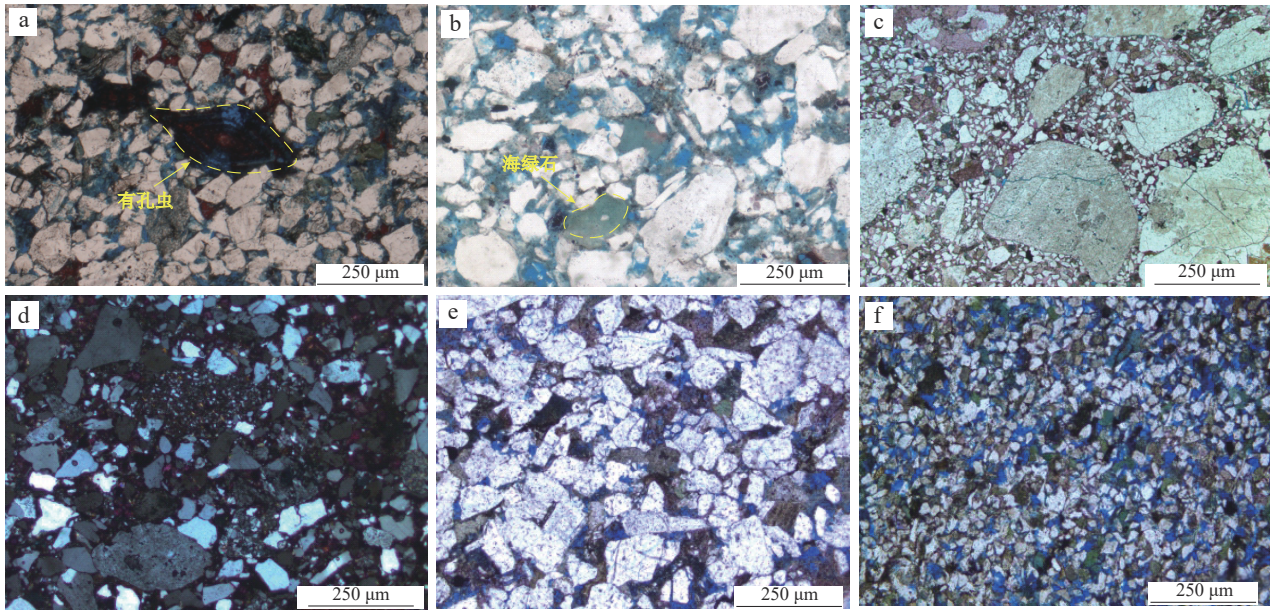


图5 琼东南盆地乐东北坡梅山组岩石显微照片(铸体薄片)

Fig. 5 Micrographs of rock samples from the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin (cast thin sections)

a. Y1井, 岩屑长石石英细砂岩, 有孔虫发育, 分选好, 埋深4 670.20 m, 单偏光; b. Y1井, 岩屑长石石英细砂岩, 海绿石胶结, 粒内溶孔发育, 分选中等, 埋深4 736.90 m, 单偏光; c. Y3井, 含砾长石石英砂岩, 铁方解石胶结, 分选差, 埋深4 823.19 m, 单偏光; d. Y3井, 含砾长石石英砂岩, 分选差, 埋深4 826.54 m, 正交偏光; e. Y5井, 岩屑石英中砂岩, 分选差, 埋深4 002.00 m, 单偏光; f. L5井, 岩屑石英粉砂岩, 分选好, 埋深3 610.00 m, 单偏光

使碎屑漂浮, 又受刚性筏流段砂岩限制及砂岩和泥岩差异性抗剪切强度的作用, 泥质碎屑呈拉长尖角变形^[35, 38]。层流段以泥质沉积为主, 屈服强度低, 易破裂形成似平行层理^[38-39]。突发的重力流侵蚀地层, 形成多期次的冲刷面(图7c), 侵蚀后力量释放, 可见砾石充填在凹坑中。由于重力流沉积物快速堆积, 颗粒支撑的骨架被破坏, 孔隙水排出, 形成了碟状构造(图7d)。岩心典型特征表明, 乐东北坡梅山组海底扇

砂质碎屑流沉积和浊流沉积并存, 以前者为主, 后者较少发育。

3.3 测井响应特征

通过对梅山组海底扇研究分析, 共识别出6种沉积微相: 水道、水道间、朵体、朵体外缘、半深海泥以及浊积灰岩^[40-41]。海底扇内扇水道厚度大, 以厚层砂砾岩沉积为主, 局部夹薄层砂岩, 自然伽马(GR)测井曲

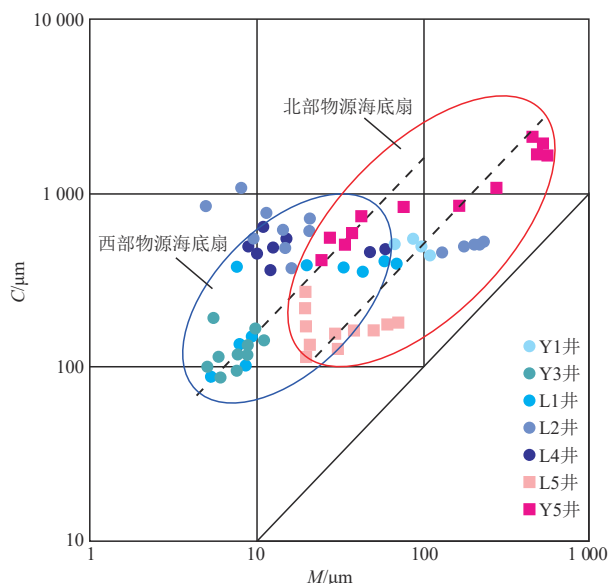


图6 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇C-M图

Fig. 6 C-M diagram of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

线为高幅箱型,底部可见明显的岩性突变,呈垂向上无递变结构的砂质碎屑流整体沉积,厚层砂岩顶部不具正粒序特征。水道微相岩性为含砾砂岩-中砂岩,沉积厚度大,GR曲线为高幅齿化箱形;水道间微相岩性以粉砂质泥岩和泥岩为主,GR曲线为低幅漏斗形或线形;朵体微相岩性为细砂岩和粉砂岩,为浊流沉积的产

物,具有很好的粒度递变特征,GR曲线为中-高幅钟形;朵体外缘微相常见于海底扇外扇沉积,岩性为粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩,砂岩厚度薄,砂岩与泥岩频繁互层,GR曲线为低幅线形或指形;浊积灰岩微相岩性为灰岩,GR曲线为高幅指形,声波时差曲线突变低值,声波时差曲线对浊积灰岩有很明显的响应特征;半深海泥微相为大套泥岩,GR曲线为低幅齿状线形。

西部物源海底扇中扇水道发育,中-薄层砂岩与泥岩互层,厚度大,冲刷面发育,GR曲线表现为小规模箱形(图8a),而北部物源海底扇中扇水道较发育,以粉砂岩为主(图8b),粒度较西部物源海底扇细,与水道间泥岩频繁交替,GR曲线表现为不明显齿化箱形。西部物源海底扇外扇为薄层砂岩与泥岩互层,朵体砂岩厚度较大,GR曲线为钟形,而北部物源海底扇朵体厚度薄、粒度细,多为粉砂-极细砂岩,GR曲线为指形或钟形(图8c)。

3.4 地震响应特征

地震相是振幅及连续性等特征对沉积体内部结构的反映。通过对地震剖面研究发现,西部和北部物源海底扇有所不同。Y1井钻遇梅山组,梅山组顶部为强振幅中等连续反射界面 T_4^0 ,其上表现为弱反射特征。梅山组与三亚组之间为强振幅高连续反射界面 T_5^0 ,此

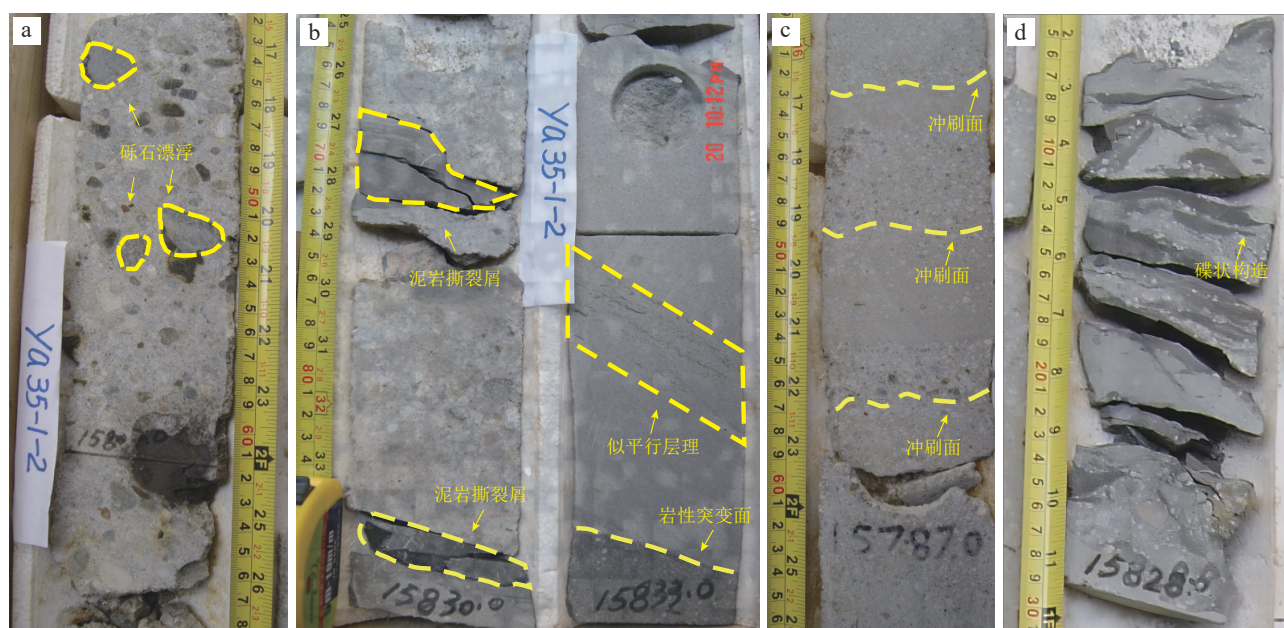


图7 琼东南盆地乐东北坡梅山组岩心沉积构造特征(Y3井,岩心照片)

Fig. 7 Sedimentary structure characteristics seen from cores from the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag in well Y3, Qiongdongnan Basin

a. 含砾砂岩,砾石漂浮,砂质碎屑流沉积,埋深4 818 m; b. 砂岩夹泥岩,撕裂层、似平行层理,砂质碎屑流沉积,埋深4 825 m; c. 砂岩,冲刷面,浊流沉积,埋深4 812 m; d. 砂岩和泥岩,碟状构造,浊流沉积,埋深4 824 m

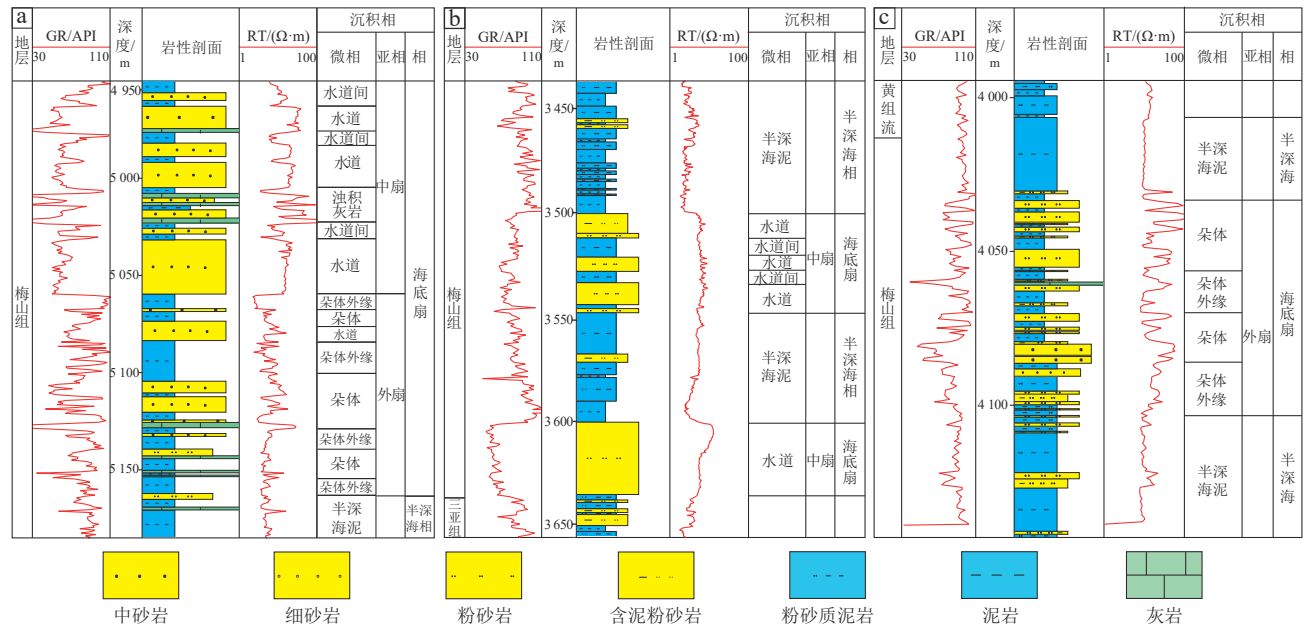


图8 琼东南盆地乐东北坡梅山组西部物源海底扇(a)和北部物源海底扇(b, c)测井响应特征

Fig. 8 Logging response characteristics of the western (a) and northern provenance area-sourced (b, c) submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

a. Y3井,埋深4 950.0~5 185.5 m; b. L5井,埋深3 440.0~3 660.0 m; c. L4井,埋深3 098.5~4 105.3 m

界面之下为弱振幅反射。 T_4^w 界面之上为低频连续强振幅特征,为主水道微相; T_4^l 界面之下为中、低频连续中振幅特征,下切明显,识别为水道微相; T_5^0 界面之上表现为中、低频连续弱振幅,无下切,呈朵体微相特征(图9a)。

地震剖面显示,西部物源海底扇主要分布于坡折带以下的盆地沉积区。乐东凹陷南北都受断裂夹持,呈现“双断式”地堑特征。西部物源海底扇在低洼区沉积由于受构造限制,剖面上水道密集分布,扇体侧边缘具明显上超特征(图9a)。北部物源海底扇在乐东凹陷东北陆坡发育,剖面上扇端砂体不断前积,表现为下超特征(图9b)。

4 梅山组海底扇层序-沉积演化

4.1 垂向沉积序列

梅二段海侵体系域沉积时期海平面升高,物源供应不足,乐东凹陷北坡西部物源海底扇朵体沉积厚度较薄。高位体系域沉积时期,随着海平面下降,水道向前推进,充足的物源供给使浊流向碎屑流转化,在乐东凹陷北坡发育海底扇外扇朵体和中扇水道沉积。其中外扇朵体岩性以细砂岩、粉砂岩和泥岩为主,砂岩具有正粒序,为低能浊流或半深海沉积的产物;中扇水道沉

积为主,厚度较大,岩性为中砂岩、细砂岩和泥岩,砂岩为块状构造,为高能浊流或碎屑流沉积的产物。梅一段低位体系域沉积时期,海底扇沉积范围达到最大,水道前移导致的近物源使沉积物粒度较粗,发育以含砾砂岩和细砂岩为主的主水道微相(图10a);北部物源海底扇水道单一,垂向上无明显水道交错叠置现象,内扇为明显的主水道特征,砂岩粒度粗,厚度大,外扇朵体厚度较薄,物源来自斜坡之上的三角洲沉积,沿斜坡坡折运移形成海底扇,并伴有滑塌沉积(图10b)。梅一段海侵及高位体系域沉积时期,岩性以泥岩为主,夹薄层粉砂岩。

4.2 平面演化特征

运用层间均方根振幅属性约束,刻画沉积相平面展布特征。通过刻画不同时期沉积展布特征,分析海底扇平面演化特征(图11)。

较之前的三亚期海平面上升,梅山组沉积时期盆地持续沉降,乐东凹陷基本处于半深海环境。由于构造热沉降,从三亚期到梅山期,乐东凹陷北斜坡都处于欠补偿环境。由于南部隆起被碳酸盐岩覆盖,难以提供碎屑岩物质,这一时期主要发育北部物源海底扇和西部物源海底扇。其中北部物源海底扇扇体呈标准朵叶形,碎屑物质供应较少,规模较小;西部物源海底扇扇体呈狭长舌状,受梅山期内两次海退影响,经由主水

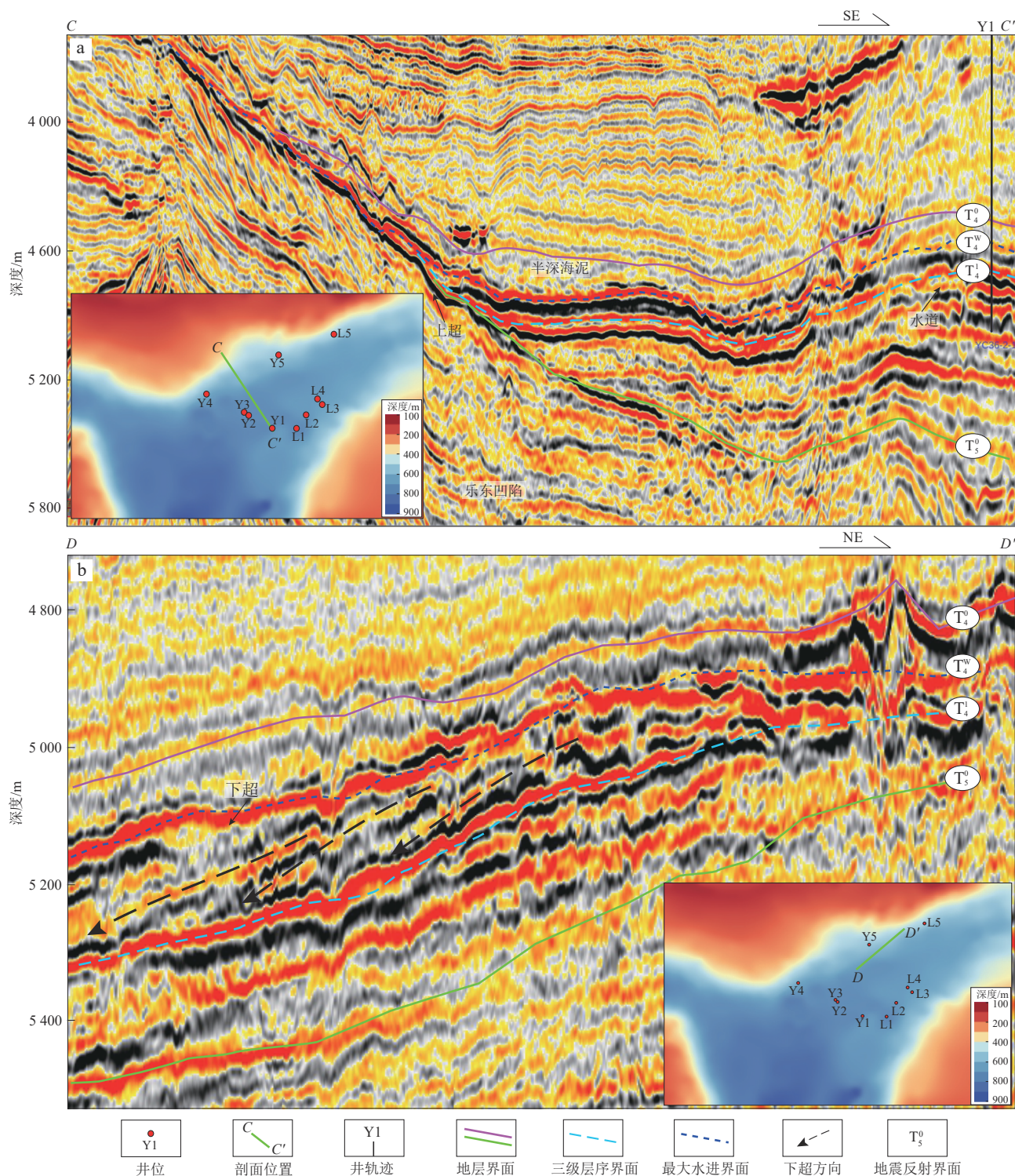


图9 琼东南盆地乐东北坡梅山组西部物源海底扇(a)和北部物源海底扇(b)扇端地震响应特征

Fig. 9 Seismic response characteristics of the distal ends of the western (a) and northern provenance area-sourced (b) submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

道和海底峡谷,大量碎屑物质被输送到乐东凹陷,物源供应较多,扇体规模较大。

梅二段沉积早期(T_5^0 — $T_4^{W_1}$),梅山期第一次大规模海退,西部物源供给较三亚期增强,在限制型低洼区沉积了大规模的低位体系域海底扇(图11a),在Y1,Y2

和Y3井区发育海底扇中扇和外扇沉积,受地形限制,水道彼此交织,朵体互相叠置,推动着沉积物不断向前运移,形成了平面上水道特征不明显、无标准朵叶状外形的特征。并且海底扇在沉积后又向前搬运,在L3和L4井区也形成了海底扇中扇和外扇沉积。梅二段沉

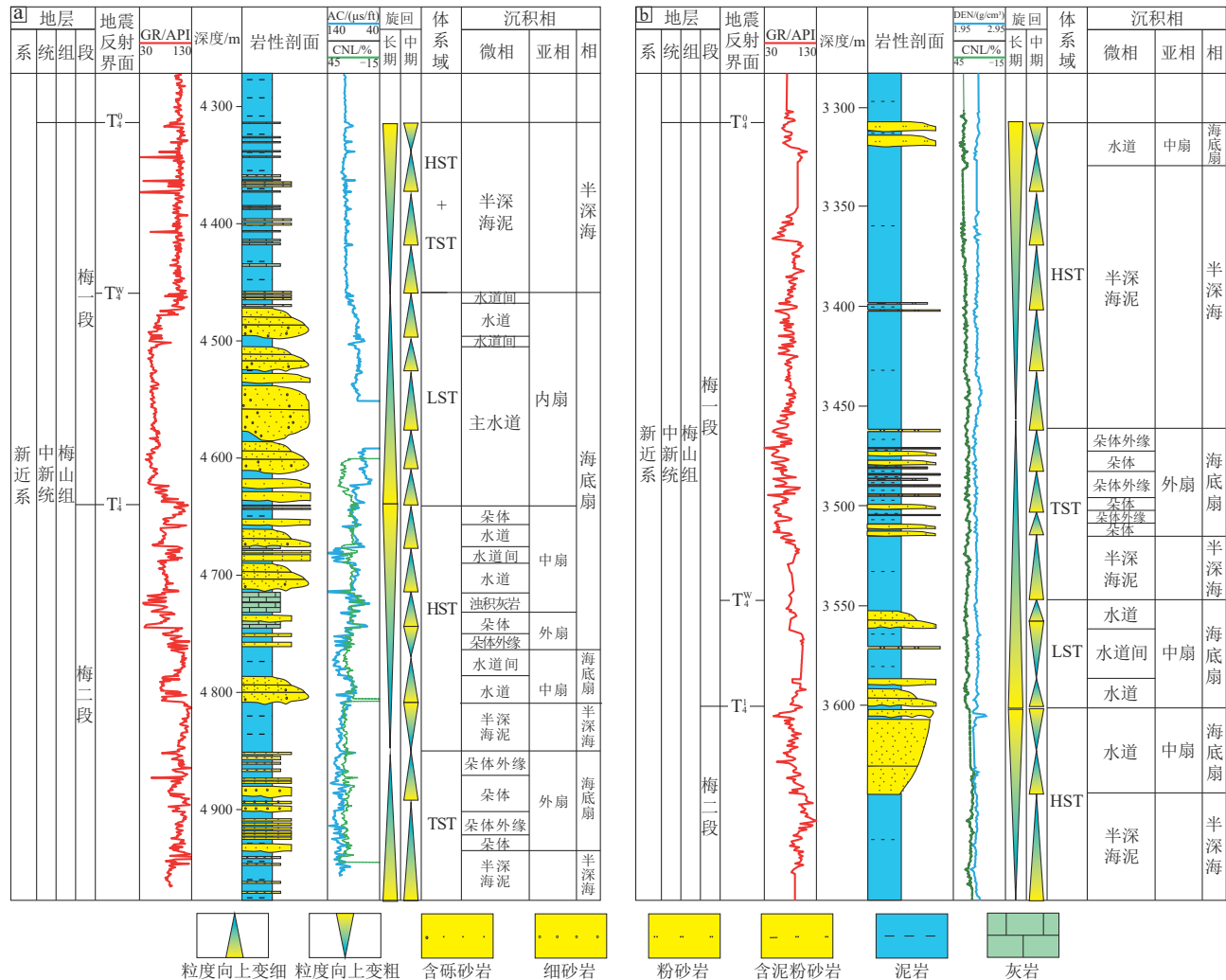


图10 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇典型沉积序列

Fig. 10 Typical sedimentary sequences of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

a. 西部物源海底扇, Y1井, 埋深4 280.0 ~ 4 975.5 m; b. 北部物源海底扇, Y5井, 埋深3 282.5 ~ 3 700.0 m

积中期, 由于海平面上升, 主要发育半深海泥沉积。梅二段沉积晚期($T_4^w-T_4^l$), 随着海平面下降, 乐东北坡高位扇发育(图11b), 在Y1, Y2和Y3井区发育海底扇外扇和中扇沉积, 高位体系域沉积时期海底扇规模较低位体系域沉积时期变小。

梅一段沉积早期($T_4^w-T_4^l$), 梅山期第二次大规模海退, 乐东北坡低位扇发育(图11c), 在Y1, Y2和Y3井区发育海底扇内扇沉积, L1和L2井区发育海底扇中扇沉积, L3和L4井区发育海底扇外扇沉积, 西部物源海底扇发育规模较大, 北部物源海底扇规模达到最大, 水道明显, 呈标准朵叶形展布。梅一段沉积晚期($T_4^w-T_4^l$), 受物源体系调整影响, 海底扇萎缩, 区内普遍发育半深海相沉积(图11d), 在Y2和Y3井区发育海底扇外扇沉积。

5 梅山组海底扇沉积控制因素及发育模式

5.1 沉积控制因素

前人研究表明, 海底扇的形成和发育往往会受到气候变化、构造运动、物源供给、海平面升降和地形等多种因素的控制^[42-46], 其中构造差异沉降、物源供给以及海平面升降对海底扇发育的影响最为明显。一般来说, 构造差异沉降控制着沉积盆地的规模与地形地貌, 盆地规模越大, 坡折带坡度越陡, 越有利于大规模海底扇的形成。盆地物源供给越充足也越有利于在坡折带之下形成大型海底扇, 而海相盆地物源的供给往往与

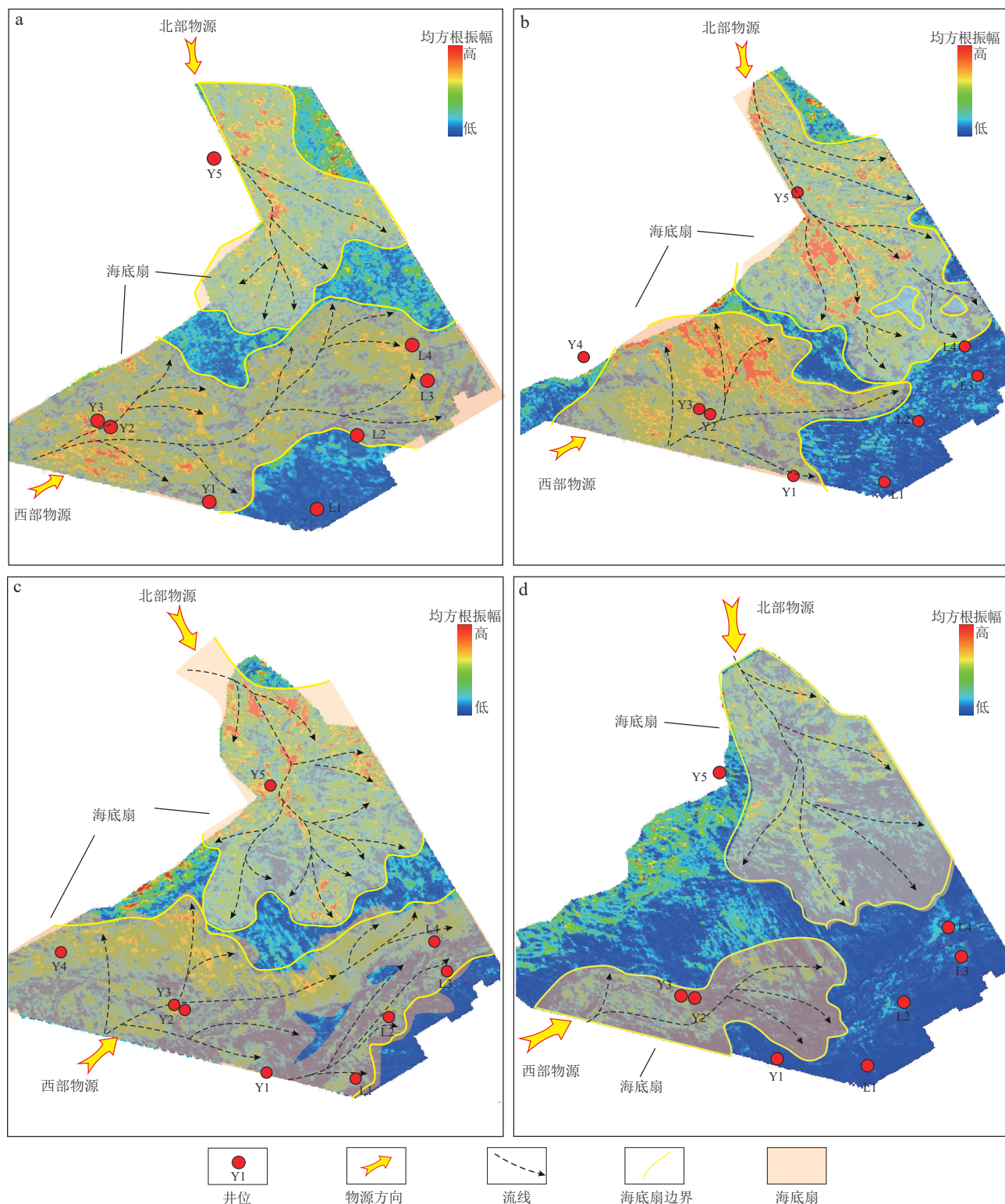


图 11 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇地震响应特征及发育分布

Fig. 11 Seismic response characteristics and distribution of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

a. 梅二段, 低位体系域沉积时期; b. 梅二段, 高位体系域沉积时期; c. 梅一段, 低位体系域沉积时期; d. 梅一段, 海侵体系域沉积时期

海平面变化密切相关。海平面快速下降通常导致物源区地层大规模暴露, 坡折带之上河流下切作用明显, 提供了充足的物源, 使得粗粒沉积物能够在盆地中长距

离搬运, 形成更大规模的海底扇^[47]; 而海平面上升则会削弱盆地的物源供给, 使得粗粒沉积物无法经长距离搬运至坡折带附近, 导致海底扇发育规模减小, 甚至

不发育^[7, 48-49]。

在梅山组沉积期,琼东南盆地处于整体拗陷阶段,早期的差异断陷及沉降使得研究区形成了一个近北东-南西向的狭长凹槽(图3),古地貌上具有东高西低的特征,独特的地貌为海底扇的沉积提供了充足的可容纳空间。前人研究表明,研究区西侧莺歌海盆地以及北侧海南岛隆起周缘发育大型三角洲沉积,这些三角洲沉积物可为海底扇的形成提供充足的物源。

梅二段低位体系域沉积时期,琼东南盆地区域性海平面下降^[49],来自昆崙隆起和海南岛河流的大量碎屑物质被搬运到陆架边缘,形成大型三角洲,由于陆架坡折处极不稳定^[47],在一定触发机制及重力作用下发生滑塌,通过下切谷搬运到盆地中,随着物源持续、大量的供给,形成大规模的海底扇,钻井揭示了该时期砂岩粒度粗、泥质含量低;梅二段海侵体系域沉积时期,海平面相对上升,物源供给少,沉积物颗粒变细、泥质含量增高;梅二段高位体系域沉积时期,随着海平面下降,剥蚀面积增大,三角洲向乐东凹陷推进,物源供给增加,垂向上表现为沉积物粒度由细变粗的特征(图12)。梅一段低位体系域沉积时期,海平面快速下降,研究区西部和北部下切谷十分发育^[42],大量滑塌沉积快速搬运到盆地中沉积,形成大规模海底扇;梅一段海侵体系域沉积时期,海平面快速上升,再次形成以泥岩为主的沉积;梅一段高位体系域沉积时期,海平面下降,但由于北部海南隆起和西部越南物源体系在这一时期均发生调整^[8],导致研究区内以泥岩沉积为主,在地震上表

现为弱振幅响应特征(图9)。

西部物源海底扇物源供给较强,水道化显著(图12a),粗粒沉积不断冲刷前期细粒沉积,在岩心上可见多期冲刷侵蚀面(图7c),扇体厚度大、粒度粗(图10a),受地形限制,大量沉积物不断堆积,无法正常展布,地震上见扇缘两侧不断向斜坡上超(图9a),形成沉积形态受限的限制型海底扇;而北部物源海底扇物源供给相对较弱,扇体厚度较薄、粒度细(图10b),经下切沟谷搬运后呈朵叶形展布(图12b),地震上见扇缘两侧前积(图9b),形成非限制型海底扇。

综上,构造差异沉降、物源供给以及海平面升降控制了海底扇体的岩性粒度、发育形态与规模,在乐东北坡梅山组沉积时期发育了限制型海底扇与非限制型海底扇2大类海底扇。

5.2 发育模式

在上文分析的基础上,结合前人研究成果^[17, 50],综合梅山组海底扇沉积特点及空间分布特征,建立了梅山组海底扇发育模式。由于“滑水效应”^[51],碎屑流沿斜坡向下运动时,碎屑从底部向上方运动,在流体的摩擦界面处产生开尔文-亥姆霍兹(Kelvin-Helmholtz)不稳定性。根据流变学原理^[52-53],由于流体中沉积物浓度降低,流体由砂质碎屑流向浊流转变,浊流侵蚀下部地层形成水道,并将沉积物带到流体中^[54]。海底扇内扇主水道为物质输送的主要通道,发育颗粒流沉积的

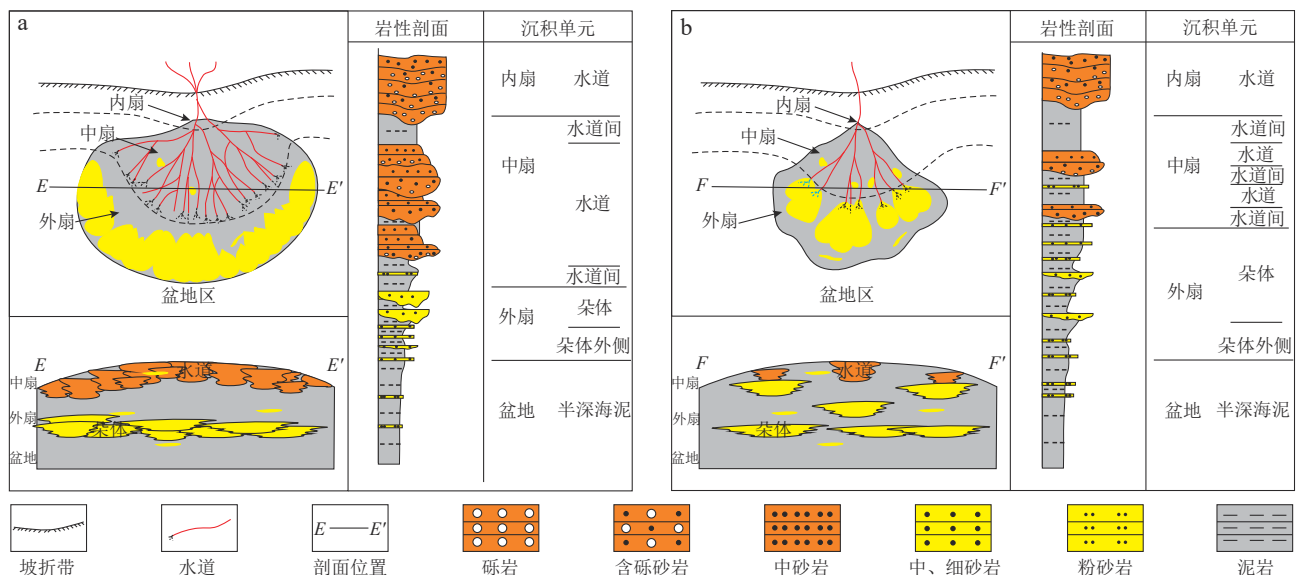


图12 琼东南盆地乐东北坡梅山组限制型海底扇与非限制型海底扇沉积特征与差异

Fig. 12 Sedimentary characteristics and differences of confined and unconfined submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

a. 限制型海底扇; b. 非限制型海底扇

厚层砂砾岩和砂质碎屑流沉积的块状砂岩;随着碎屑流遭受周围流体的稀释改造,碎屑流中基质含量不断下降,流体强度逐渐降低而流动性逐渐增加,变为中-弱碎屑流和浊流,形成下部为砂质碎屑流沉积的砂岩,上部为浊流沉积的粉砂岩和泥岩的水道和朵体;随着碎屑物质不断向前搬运,经过很长的距离之后,流体转变为浊流,浊流携带细粒物质悬浮搬运,形成以粉砂质和泥质为主的、具有正粒序的浊积岩^[55-57]。

根据前人研究经验^[58-62],在乐东凹陷梅山组北部物源海底扇建立了水道-朵体型海底扇沉积模式,但在对西部物源海底扇研究时发现该沉积模式不适用。西部物源限制型海底扇没有明显的朵体期次,表现为多段厚度较小的叠置砂体,与北部物源非限制型海底扇薄层朵体砂体有明显区别。限制型海底扇由于受地形限制,扇体发育受影响,只能沿地形坡脚发育,扇体侧缘在地震剖面上可见明显的上超特征,扇体外形呈长条状,在平面上不具有非限制型海底扇的标准的朵叶形扇体。并且,水道受地形和物源供给影响,形成多条分支水道,携带碎屑物质向前运移,造成地震属性图上水道分布不明显。因此,结合西部物源海底扇平面和剖面形态、物源、海底古地貌以及海平面升降等对其的控制作用,总结出限制型海底扇的发育模式:陆源碎

屑经坡折带向盆地内输送,初期均为非限制型海底扇沉积,当海平面下降时陆架宽度减小、水道前移,在盆地内沉积大规模海底扇,当物源供给显著增强时,若海底扇发育受可容纳空间限制,则海底扇无法正常展布,不同期次水道和朵体发育互相影响、切割及叠置,形成非典型的扇体外形;随着海平面逐渐上升,扇体逐渐萎缩,物源供给相对不足,在可容纳空间充足的盆地中发育正常的非限制型海底扇沉积(图13)。

6 结论

1) 琼东南盆地乐东北坡梅山组发育了大型海底扇沉积。岩性主要为中-细砂岩和粉砂岩,可见粒序层理、冲刷面、泥岩撕裂屑等沉积构造,镜下可见漂砾,为砂质碎屑流和浊流共同作用的产物。

2) 基于地貌背景、物源供给差异及沉积特征,将乐东北坡梅山组2个海底扇划分为2种类型,分别是西部物源的限制型海底扇和北部物源的非限制型海底扇。其中,西部限制型海底扇规模大,砂体厚,冲刷面多,水道化特征明显;而北部物源非限制型海底扇砂体规模厚度小,泥岩夹层多,朵体特征明显。

3) 梅山组海底扇的发育主要受控于海平面变化、

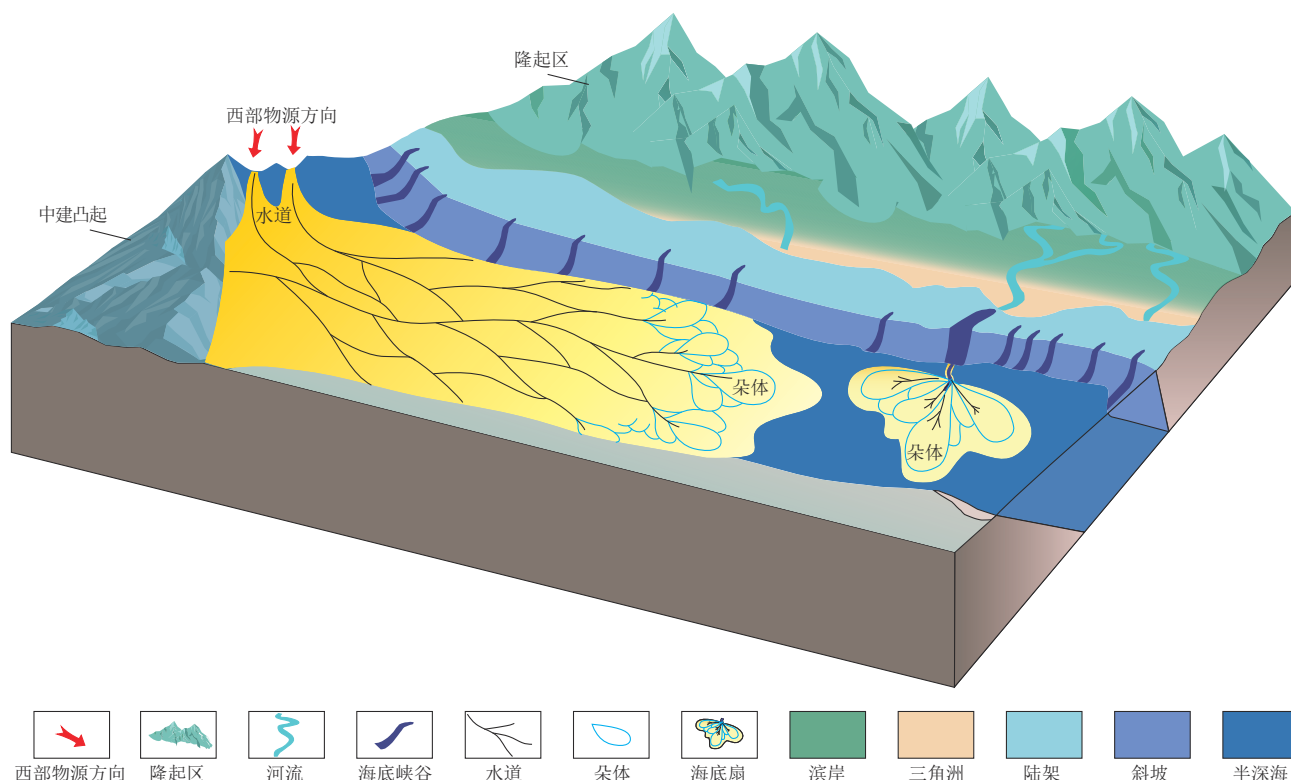


图13 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇发育模式示意图

Fig. 13 Development model of the submarine fan in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

物源供给及古地貌特征。坡折带的形成及较低海平面是海底扇形成的有利条件,而物源供给量与盆地地貌则约束了海底扇的类型。对于局限性盆地,高物源供给易于形成限制型海底扇,而低物源供给则有利于非限制型海底扇的形成。

参 考 文 献

- [1] SHEW R D, ROLLINS D R, TILLER G M, et al. Characterization and modeling of thin-bedded turbidite deposits from the Gulf of Mexico using detailed subsurface and analog data [M]//WEIMER P, BOUMA A H, PERKINS B F. Submarine Fans and Turbidite Systems—Sequence Stratigraphy, Reservoir Architecture and Production Characteristics Gulf of Mexico and International. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1994: 349–356.
- [2] RICHARDS M, BOWMAN M, READING H. Submarine-fan systems i: Characterization and stratigraphic prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15(7): 689–717.
- [3] WEIMER P, SLATT R M, DROMGOOLE P, et al. Developing and managing turbidite reservoirs: Case histories and experiences: Results of the 1998 EAGE/AAPG research conference [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(4): 453–465.
- [4] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇 [J]. 科学通报, 2011, 56(10): 781–787.
WANG Yingmin, XU Qiang, LI Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(10): 781–787.
- [5] 孙辉. 南海西北部深水重力流沉积体系特征及其控制因素分析 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2015: 29–54.
SUN Hui. Characteristics and controlling factors on gravity flow sedimentary systems development in deep water A rea, northwestern South China Sea [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015: 29–54.
- [6] 郑胜, 吕成福, 陈国俊, 等. 南海西北部晚中新世红河海底扇储集层特征 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1754–1762.
ZHENG Sheng, LYU Chengfu, CHEN Guojun, et al. Reservoir characteristics of Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(5): 1754–1762.
- [7] 左倩媚, 张道军, 王亚辉, 等. 琼东南盆地深水新近系海底扇沉积特征与资源潜力 [J]. 海洋学报, 2016, 38(11): 105–116.
ZUO Qianmei, ZHANG Daojun, WANG Yahui, et al. Sedimentary characteristics and exploration potential of Neogene submarine fan in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(11): 105–116.
- [8] 李安琪, 胡林, 王真真, 等. 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇沉积演化及油气地质意义 [J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 76–84.
LI Anqi, HU Lin, WANG Zhenzhen, et al. Sedimentary evolution of Meishan Formation submarine fan in Ledong Sag, Qiongdongnan Basin and its significance in hydrocarbon exploration [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 76–84.
- [9] 李胜勇, 胡林, 杨希冰, 等. 琼东南盆地梅山组海底扇成因演化特征与勘探建议 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 18–30.
LI Shengyong, HU Lin, YANG Xibing, et al. Genetic evolution and exploration strategy of submarine fan in the Meishan Formation, Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 18–30.
- [10] 姚兴宗. 琼东南盆地陵水 15-2 区块梅山组地震沉积学及成藏条件研究 [D]. 西安: 西北大学, 2021: 36–49.
YAO Xingzong. Study on seismic sedimentology and accumulation conditions of Meishan Formation in Lingshui 15-2 Block, Qiongdongnan Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2021: 36–49.
- [11] 甘军, 梁刚, 李兴, 等. 琼东南盆地梅山组海底扇天然气成因类型及成藏模式 [J]. 地质学报, 2022, 96(3): 1069–1078.
GAN Jun, LIANG Gang, LI Xing, et al. Genetic types and accumulation model of submarine fan gas in the Meishan Formation, Qiongdongnan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(3): 1069–1078.
- [12] 朱沛苑, 尤丽, 元庆涛, 等. 乐东—陵水凹陷梅山组海底扇储层物性与孔喉结构 [J]. 天然气技术与经济, 2018, 12(5): 1–4, 64.
ZHU Peiyuan, YOU Li, YUAN Qingtao, et al. Petrophysical property and pore-throat structure of submarine-fan reservoirs in Meishan Formation, Ledong-Lingshui Sag [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2018, 12(5): 1–4, 64.
- [13] 罗泉源, 焦祥燕, 刘昆, 等. 乐东—陵水凹陷梅山组海底扇识别及沉积模式 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(2): 90–99.
LUO Quanyuan, JIAO Xi anyan, LIU Kun, et al. Identification of submarine fan in the Meishan Formation of the Ledong-Lingshui Sag in the Qiongdongnan Basin and its depositional model [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(2): 90–99.
- [14] 李建平, 熊连桥, 黄琪斐, 等. 琼东南盆地梅山组浊积扇分类及其勘探意义 [J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(6): 1–12.
LI Jianping, XIONG Lianqiao, HUANG Qifei, et al. Classification of turbidite fans of Meishan Formation in Qiongdongnan Basin and their exploration significance [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 1–12.
- [15] 李华, 王英民, 徐强, 等. 莺—琼盆地中新统限制型海底扇沉积特征及模式 [C]//中国石油学会石油地质专业委员会, 北京石油学会. 第八届中国含油气系统与油气藏学术会议论文摘要汇编. 武汉: 长江大学地球科学学院, 2015: 46–47.
LI Hua, WANG Yingmin, XU Qiang, et al. Sedimentary characteristics and mode of sino-new restricted submarine fans in Ying-Qiong Basin [C]//Petroleum Geology Professional Committee of China Petroleum Society, Beijing Petroleum Society. Abstract Compilation of the 8th China Conference on Oil and Gas Development Systems and Reservoir. Wuhan: College of Earth Sciences, Changjiang University, 2015: 46–47.
- [16] 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.
- [17] 谈明轩, 吴峰, 马皓然, 等. 海底扇沉积相模式、沉积过程及其沉积记录的指示意义[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 435-449.
- TAN Mingxuan, WU Feng, MA Haoran, et al. Facies model, sedimentary process and depositional record of submarine fans, and their implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 435-449.
- [18] 尤丽, 江汝锋, 龚宇, 等. 琼东南盆地深水海底扇岩性圈闭成藏主控因素与勘探突破[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 749-758.
- YOU Li, JIANG Rufeng, GONG Yu, et al. Main controlling factors of accumulation and exploration breakthrough of deep-water submarine fan lithologic trap in the Qiongdongnan Basin [J]. *Earth Science*, 2024, 49(2): 749-758.
- [19] 吴克强, 解习农, 裴健翔, 等. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义——以琼东南盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 651-661.
- WU Keqiang, XIE Xinong, PEI Jianxiang, et al. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: A case study of Qiongdongnan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 651-661.
- [20] 王根发, 吴冲龙, 周江羽, 等. 琼东南盆地第三系层序地层分析[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 124-128.
- WANG Genfa, WU Chonglong, ZHOU Jiangyu, et al. Sequence stratigraphic analysis of the Tertiary in the Qiongdongnan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1998, 20(2): 124-128.
- [21] 杨希冰, 傅恒, 何小胡, 等. 琼东南盆地南部隆起带新生界沉积体系及其构造-沉积演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2019, 39(3): 1-10.
- YANG Xibing, FU Heng, HE Xiaohu, et al. Cenozoic sedimentary systems and their tectonic-sedimentary evolution in southern uplift zone of the Qiongdongnan Basin [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2019, 39(3): 1-10.
- [22] 陈宏言, 孙志鹏, 翟世奎, 等. 琼东南盆地井震地层对比分析及区域地层格架的建立[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 1-14.
- CHEN Hongyan, SUN Zhipeng, ZHAI Shikui, et al. Analysis of well-seismic stratigraphic correlation and establishment of regional stratigraphic framework in the Qiongdongnan Basin of northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(5): 1-14.
- [23] 尹娜, 杨海长, 马明, 等. 琼东南盆地上中新统一上新统中央峡谷沉积物来源[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1582-1592.
- YIN Na, YANG Haichang, MA Ming, et al. Provenance of central canyon in the Upper Miocene to the Pliocene in the Qiongdongnan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(10): 1582-1592.
- [24] 尤丽, 江汝锋, 徐守立, 等. 琼东南盆地深水区乐东-陵水凹陷梅山组天然气成藏特征与勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 24-31.
- YOU Li, JIANG Rufeng, XU Shouli, et al. Accumulation characteristics and exploration potential of Meishan Formation gas in Ledong-Lingshui sag, deep water area of Qiongdongnan basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(5): 24-31.
- [25] 尤丽, 刘才, 钟佳, 等. 琼东南盆地西区梅山组海底扇岩相-地球化学特征及源区意义[J]. 地球科学, 2017, 42(9): 1531-1540.
- YOU Li, LIU Cai, ZHONG Jia, et al. Petrography-geochemistry and source significance of submarine fan from west area of Qiongdongnan Basin [J]. *Earth Science*, 2017, 42(9): 1531-1540.
- [26] 裴健翔, 郭潇潇, 薛海涛, 等. 莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成环境及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 937-945.
- PEI Jianxiang, GUO Xiaoxiao, XUE Haitao, et al. Environment and controlling factors of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 937-945.
- [27] 龚胜利, 闫琢玉, 李百强, 等. 琼东南盆地中中新统海底扇碎屑岩锆石 U-Pb 年龄特征及物源分析[J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 45-54.
- GONG Shengli, YAN Zhuoyu, LI Baiqiang, et al. U-Pb age characteristics of detrital zircon and provenance analysis of a Middle Miocene submarine fan in the Qiongdongnan Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(5): 45-54.
- [28] 李冬, 徐强, 王永凤, 等. 南海晚中新世—上新世红河沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 32-37.
- LI Dong, XU Qiang, WANG Yongfeng, et al. Research on Red River sedimentary system of late Miocene-Early Pliocene, South China sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 32-37.
- [29] 王策, 梁新权, 童传新, 等. 莺歌海盆地东北部邻区7条主要入海河流重砂矿物特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 228-237.
- WANG Ce, LIANG Xinquan, TONG Chuanxin, et al. Characteristics and geological implications of heavy minerals from seven rivers in adjacent areas of northeastern Yinggehai Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 228-237.
- [30] 李冬, 王英民, 王永凤, 等. 晚中新世红河海底扇物质来源分析[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第13届学术年会论文集. 北京: 中国石油大学(北京)地球科学学院, 2011: 562.
- LI Dong, WANG Yingmin, WANG Yongfeng, et al. Analysis of material sources of the Late Miocene Red River submarine fan [C]// Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry. Proceedings of the 13th Annual Meeting of the Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Beijing: School of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), 2011: 562.
- [31] 徐强, 李冬, 朱伟林, 等. 晚中新世红河海底扇碎屑锆石

- SHRIMP U-Pb 年龄: 物源区制约及红河袭夺事件探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(3): 20-30.
- XU Qiang, LI Dong, ZHU Weilin, et al. SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons: Discussions on provenance control and the Red River Capture Event [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(3): 20-30.
- [32] 董晓芳, 曲希玉, 尤丽, 等. 乐东—陵水凹陷古近系黄流组峡谷水道碎屑岩的源区分析[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(10): 12-22.
- DONG Xiaofang, QU Xiyu, YOU Li, et al. Provenance analysis of the canyon channel fillings of Huangliu Formation in the Ledong-Lingshui Sag [J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34 (10) : 12-22.
- [33] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 168.
- [34] SHANMUGAM G, ZIMBRICK G. Core-based evidence for sandy slump and sandy debris flow facies in the Pliocene and Pleistocene of the Gulf of Mexico: Implications for submarine fan models[C]// AAPG Convention and Exhibition 19-22 May 1996, San Diego, 1996. Tulsa: AAPG, 1996: 91019.
- [35] 高红灿, 郑荣才, 魏钦廉, 等. 碎屑流与浊流的流体性质及沉积特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 815-827.
- GAO Hongcan, ZHENG Rongcai, WEI Qinlian, et al. Reviews on fluid properties and sedimentary characteristics of debris flows and turbidity currents [J]. Progress in Earth Science, 2012, 27(8): 815-827.
- [36] 李利阳. 浊流沉积研究的新进展: 鲍马序列、海底扇的重新审视[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(4): 106-112.
- LI Liyang. Current advances in the research of turbidity current deposits: Reinterpretation of the Bouma sequence and submarine fan deposits [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2015, 35(4): 106-112.
- [37] 裴羽, 何幼斌, 李华, 等. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨[J]. 地质论评, 2015, 61(6): 1281-1292.
- PEI Yu, HE Youbin, LI Hua, et al. Discuss about relationship between high-density turbidity current and sandy debris flow [J]. Geological Review, 2015, 61(6): 1281-1292.
- [38] 李安琪, 叶绮, 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.
- [39] SHANMUGAM G. Deep-water processes and facies models: Implications for sandstone petroleum reservoirs[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [40] 傅烱培, 刘群, 胡修棉. 水下沉积物重力流与海底扇相模式研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(2): 124-136.
- FU Hanbu, LIU Qun, HU Xiumian. Review on subaqueous sediment gravity flow and submarine fan [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(2): 124-136.
- [41] 李华, 杨朝强, 周伟, 等. 莺歌海盆地东方 1-1 气田中新统黄流组浅海多级海底扇形成机理及储层分布[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 429-440.
- LI Hua, YANG Zhaoqiang, ZHOU Wei, et al. Genetic mechanism and reservoir distribution of shallow-marine multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 429-440.
- [42] 陈杨, 张道军, 黄灿, 等. 莺歌海盆地莺东斜坡南段梅山组大型海底扇沉积特征及控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(4): 40-49, 7.
- CHEN Yang, ZHANG Daojun, HUANG Can, et al. Controlling factors and sedimentary characteristics of the large submarine fan in Meishan Formation in the South parts of the Yingdong Slope area, Yinggehai Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(4): 40-49, 7.
- [43] 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.
- 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.
- [44] 王敏, 张佳佳, 王瑞峰, 等. 东非鲁伍马盆地深水海底扇储集层质量差异及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 491-501.
- WANG Min, ZHANG Jiajia, WANG Ruifeng, et al. Quality variations and controlling factors of deepwater submarine-fan reservoirs, Rovuma Basin, East Africa [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 491-501.
- [45] 王宏语, 张峰, 杨雄兵. 塞内加尔盆地北部次盆白垩系被动大陆边缘深海扇演化特征及主控因素[J]. 地学前缘, 2021, 28(2): 362-375.
- WANG Hongyu, ZHANG Feng, YANG Xiongbing. Evolutionary characteristics and controlling factors of deep-sea fans in Cretaceous passive continental margin basin, Northern Subbasin, Senegal Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28 (2) : 362-375.
- [46] 杨朝强, 周伟, 王玉, 等. 莺歌海盆地东方区黄流组一段小层划分及海底扇沉积演化主控因素[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 55-65.
- YANG Zhaoqiang, ZHOU Wei, WANG Yu, et al. Subdivision of the first member of Huangliu Formation in Dongfang area of Yinggehai Basin and the main factors controlling the sedimentary evolution of submarine fan [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 55-65.
- [47] JAMIL M, SIDDIQUI N A, AHMED N, et al. Facies analysis and sedimentary architecture of hybrid event beds in submarine lobes: Insights from the Crocker Fan, NW Borneo, Malaysia [J]. Journal

- of Marine Science and Engineering, 2021, 9(10): 1133.
- [48] 李建平, 贾万丽, 李宏义, 等. 物源—地貌双控背景下海底扇沉积储层特征及勘探意义: 以琼东南盆地梅山组为例[J]. 地质科学, 2024, 59(1): 148-165.
- LI Jianping, JIA Wanli, LI Hongyi, et al. Sedimentary reservoir characteristics and exploration significance of submarine fan under the dual control of provenance and geomorphology: Taking the Meishan Formation in Qiongdongnan Basin as an example [J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(1): 148-165.
- [49] 谢玉洪, 范彩伟, 周家雄, 等. 琼东南盆地中中新世重力流海底扇沉积特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 220-228.
- XIE Yuhong, FAN Caiwei, ZHOU Jiaxiong, et al. Sedimentary features and controlling factors of the gravity flows in submarine fan of Middle Miocene in the Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 220-228.
- [50] LI Chao, CHEN Guojun, ZHOU Qianshan, et al. Seismic geomorphology of three types of deepwater fans and their relationship with slope morphology: Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 124: 104814.
- [51] MOHRIG D, ELLIS C, PARKER G, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows [J]. GSA Bulletin, 1998, 110(3): 387-394.
- [52] LOWE D R. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. Journal of Sedimentary Research, 1982, 52(1): 279-297.
- [53] KNELLER B, NASR-AZADANI M M, RADHAKRISHNAN S, et al. Long-range sediment transport in the world's oceans by stably stratified turbidity currents[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(12): 8608-8620.
- [54] KANE I A, PONTEN A S M. Submarine transitional flow deposits in the Paleogene Gulf of Mexico [J]. Geology, 2012, 40(12): 1119-1122.
- [55] 骆帅兵, 张莉, 雷振宇, 等. 陆坡盆地体系深水重力流形成机制、沉积模式及应用实例探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(6): 747-754.
- LUO Shuaibing, ZHANG Li, LEI Zhenyu, et al. Formation mechanism, sedimentary model and typical example of a deep-water gravity flow in continental slope-basin systems [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(6): 747-754.
- [56] 周荔青, 江东辉, 杨鹏程, 等. 琼东南盆地陵水北坡LS13-2区勘探思路与突破方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 673-683.
- ZHOU Liqing, JIANG Donghui, YANG Pengcheng, et al. Philosophy and potential breakthroughs for hydrocarbon exploration in Block LS13-2 on the northern slope of the Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 673-683.
- [57] 付超, 谢玉洪, 赵雨初, 等. 深水峡谷上游复合浊积砂岩储层类型及其展布规律——以琼东南盆地中央峡谷陵水气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 516-529.
- FU Chao, XIE Yuhong, ZHAO Yuchu, et al. Types and distribution patterns of complex turbidite sandstone reservoirs in the upper reaches of deep-water canyons—A case study of the Lingshui Gas Field in the Central Canyon of Qiongdongnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 516-529.
- [58] TALLING P J, MASSON D G, SUMNER E J, et al. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. Sedimentology, 2012, 59(7): 1937-2003.
- [59] VAIL P R, MITCHUM R M, Jr, THOMPSON S III. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap [M]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 63-81.
- [60] LI Dongwei, GONG Chenglin, GE Daoyao, et al. Stratigraphic architecture and distribution patterns of submarine fan-reservoir elements: Insights derived from the Pliocene and Pleistocene Bengal Fan [J]. Journal of Sedimentary Research, 2023, 93(7): 469-487.
- [61] YAO Yue, GUO Shaobin, ZHU Hongtao, et al. Source-to-sink characteristics of the channelized submarine fan system of the Huangliu Formation in the Dongfang block, Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 206: 109009.
- [62] LI Hua, VAN LOON A J (TOM), XU Yanxia, et al. Reservoir characteristics and potential of a shallow-marine multi-level fan in the Miocene Huangliu Fm. within the DF1-1 gas field (Yinggehai Basin, S China) [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 230: 212202.

(编辑 张 晟)