

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.

# 琼东南盆地梅山组海底扇成因演化特征与勘探建议

李胜勇<sup>1</sup>, 胡林<sup>2</sup>, 杨希冰<sup>1</sup>, 吴其林<sup>3</sup>, 王真真<sup>2</sup>, 李安琪<sup>2</sup>, 罗威<sup>2</sup>, 陈奎<sup>1</sup>, 郑飞<sup>2</sup>

(1 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057; 2 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570100;

3 广东石油化工学院石油工程学院, 茂名 525000)

**摘要:**梅山组海底扇作为中央峡谷水道之外最引人注目的大型储集体,是琼东南盆地尤其是深水常规碎屑岩领域下一步最为重要的勘探对象。总结了琼东南盆地各凹陷钻井资料所揭示的梅山组海底扇差异分布现象,通过研究区大陆架发育特征、陆架坡折带发育特征,结合物源供给与优势海流方向,首次从宏观格局解释了琼东南盆地中央坳陷带不同凹陷海底扇发育地质背景的差异及成因,提出乐东凹陷梅山组大型海底扇主物源来自东北方向海南隆起。通过细化中中新世大海退内部次级海平面旋回特征,首次建立了本区梅山组层序充填与海平面旋回的精确对应关系,从层序成因角度厘清了梅山组各期次海底扇发育演化特征与凹陷级别的有利储层展布特征,并据此提出相应的勘探建议,指出乐东凹陷梅山组中-晚期海底扇储层风险低,是梅山组海底扇领域突破的首选区带;陵水凹陷早期海底扇圈闭有效性较好,是梅山组海底扇大规模成藏的有利勘探方向。该研究为梅山组海底扇领域的勘探部署提供了新思路。

**关键词:**梅山组; 海底扇; 物源方向; 海平面变化; 层序演化; 深水油气勘探; 琼东南盆地

中图分类号:P736; P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.092

## 0 引言

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘,面积约 6 万 km<sup>2</sup>,是在中生代基底之上形成的新生代陆缘拉张性盆地<sup>[1-2]</sup>,北靠海南岛,南临中建南盆地,东西两侧分别与珠江口盆地和莺歌海盆地相接,整体具有“三隆两坳”的构造格局(图 1),是中国海上尤其是深水天然气勘探开发的重要基地。琼东南盆地周缘不发育继承性大河流域,外部物源供给有限,加上海侵较早,各凹陷在早渐新世就开始连通,接受区域广布的海相沉积<sup>[3-5]</sup>,逐渐从滨-浅海向半深海-深海演变,大量粗碎屑主要分布在靠近大陆边缘的北部坳陷带及其周缘,导致远离物源区的中央坳陷

沉积物粒度普遍较细,以富泥地层为主,仅局部发育深海重力流沉积,整体表现为“富泥贫砂”的地层特征,成藏层系相对较少。莺歌海-黄流组峡谷水道领域与梅山组海底扇领域是琼东南盆地深水新近系最为重要的勘探领域<sup>[6-7]</sup>,目前中央峡谷水道领域已取得较好勘探成效,发现包括陵水 17A、陵水 18A、陵水 25A 等在内的多个大中型优质气田<sup>[8-10]</sup>,但该领域剩余圈闭资源规模较小,可供勘探的剩余圈闭数量有限,亟须寻找新的商业突破方向。

梅山组海底扇领域整体成藏条件较好,勘探程度低,是继中央峡谷水道领域之后公认的有利勘探方向,但该领域自 20 世纪 90 年代开始油气勘探以来,分别在陵水低凸起、松南宝岛凹陷、陵水凹陷以及乐东凹陷等多个区带进行勘探,持续耕耘 20 余载一直未取得重大商业突破,且各区带勘探特征与失利原因各有不同,较为复杂。研究表明,储层条件与圈闭有效性是影响梅山组海底扇领域取得商业成功的关键,但由于海底扇的分布规律与成因演化认识不清晰,且主物源方向的认识差异较大<sup>[6-7, 11-12]</sup>,

收稿日期: 2022-04-02

资助项目: 广东省高校特色创新项目(2020KTSCX084); 广东省普通高校创新团队-油气资源勘探开发创新团队项目(2022KCXTD018)

作者简介: 李胜勇(1986-),男,硕士,工程师,主要从事油气勘探综合地质方面的研究工作。E-mail: lishy10@cnooc.com.cn

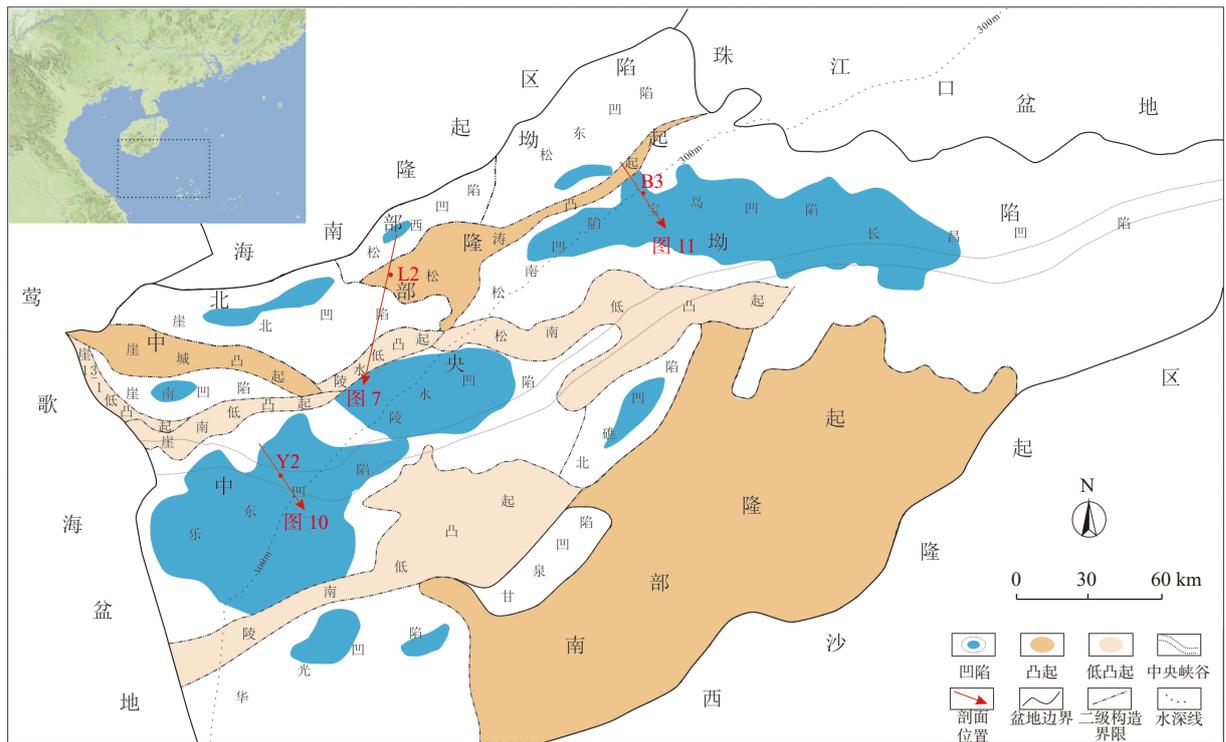


图 1 琼东南盆地构造区划分布图

Fig.1 Tectonic setting of the Qiongdongnan Basin

影响勘探决策判断, 加上梅山组海底扇常发育地层异常压力以及处于海水深度普遍 >300 m 的深水区域等复杂钻井工程作业因素综合影响, 使得梅山组海底扇整体勘探部署思路不明确。因此, 厘清琼东南盆地梅山组海底扇的成因演化与优质储层展布规律, 明确梅山组海底扇勘探思路, 是琼东南盆地海底扇领域取得勘探突破的重要工作。

### 1 梅山组海底扇分布特征与成因

钻井资料揭示梅山组海底扇主要分布在中央凹陷西部的乐东-陵水凹陷<sup>[11-14]</sup>, 尤其是乐东凹陷, 砂岩厚度大、粒度粗, 连片分布规模大; 而东部松南-宝岛-长昌凹陷的海底扇则相对发育不佳, 砂岩厚度薄、粒度细, 且整体规模较小。这究竟是钻井的“一孔之见”还是区域分布规律尚无定论, 文献较少探究这一现象及其地质成因。同时, 从地理位置看, 由于乐东凹陷西接莺歌海盆地, 除了北侧海南岛方向物源的直接供给, 还可接受西侧红河物源或越南方向物源<sup>[7,11]</sup>, 使得对规模较大的乐东凹陷梅山组海底扇的物源认识存在不同观点, 这些分歧直接影响沉积过程和储层展布的准确认识以及岩性圈闭的整体评价思路。为了降低这些不确定性给勘探生产带来的风险, 笔者根据该区坡折带特征并结合

现今南海海流体系进行分析, 尝试从新的角度梳理这一问题。

前人主要从成因机制角度将琼东南陆架坡折带分为断裂坡折、沉积坡折和挠曲坡折进行分析<sup>[12, 15-16]</sup>, 强调坡折带对陆架之下沉积体系的差异控制作用。本文主要根据陆架之上物源供给、沉积趋势与水动力条件等因素, 分析陆架坡折带不同形态特征产生的原因, 进而落实陆架之下各凹陷海底扇差异分布的地质成因及其物源方向。

琼东南盆地新近系陆架坡折带演化特征横向上具有明显的规律性(图 2), 西侧(乐东-陵水凹陷)整体表现为进积型坡折, 中-东侧(松南-宝岛至长昌凹陷)表现为加积-退积型坡折。分析认为, 西侧陆架宽度约 60~100 km, 相对较窄, 离海南隆起物源区近, 发育水系较多, 陆架之上地层以前积反射特征为主, 坡折带层层推进前移, 表现为缓坡进积型坡折(图 3a), 反映了物源供应充足, 是物源的优势卸载区; 东侧陆架较为宽广约 150~200 km, 与华南陆源区之间间隔了隶属于珠江口盆地珠三拗陷和宽阔的神狐隆起区, 离物源区较远, 且缺乏类似珠江这样的大河流域, 使得东侧表现为持续性断裂陡坡控制的加积-退积型坡折(图 3b、c), 反映了物源供给量小于其构造沉降量, 物源供应相对不充足, 处于欠补偿沉积状态, 发育粗粒沉积物的概率相对

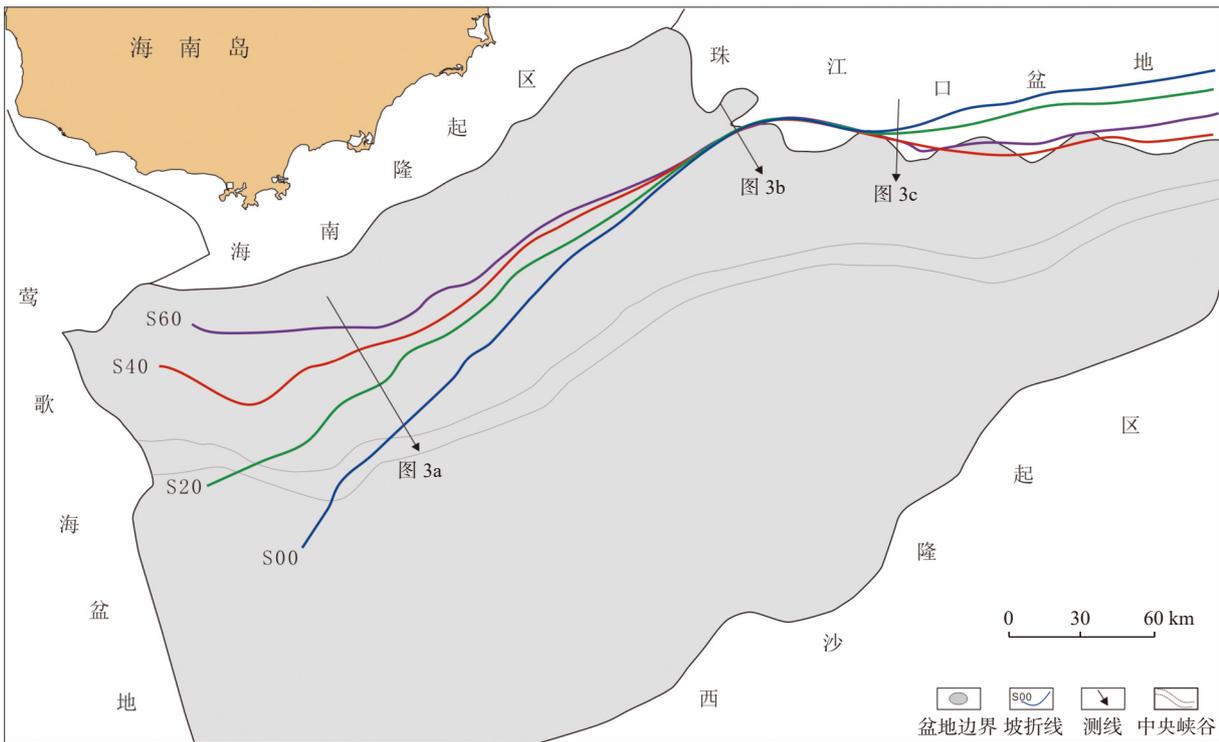


图 2 琼东南盆地新近系坡折带平面分布

Fig.2 Plane distribution of the Neogene slope break zones in Qiongdongnan Basin

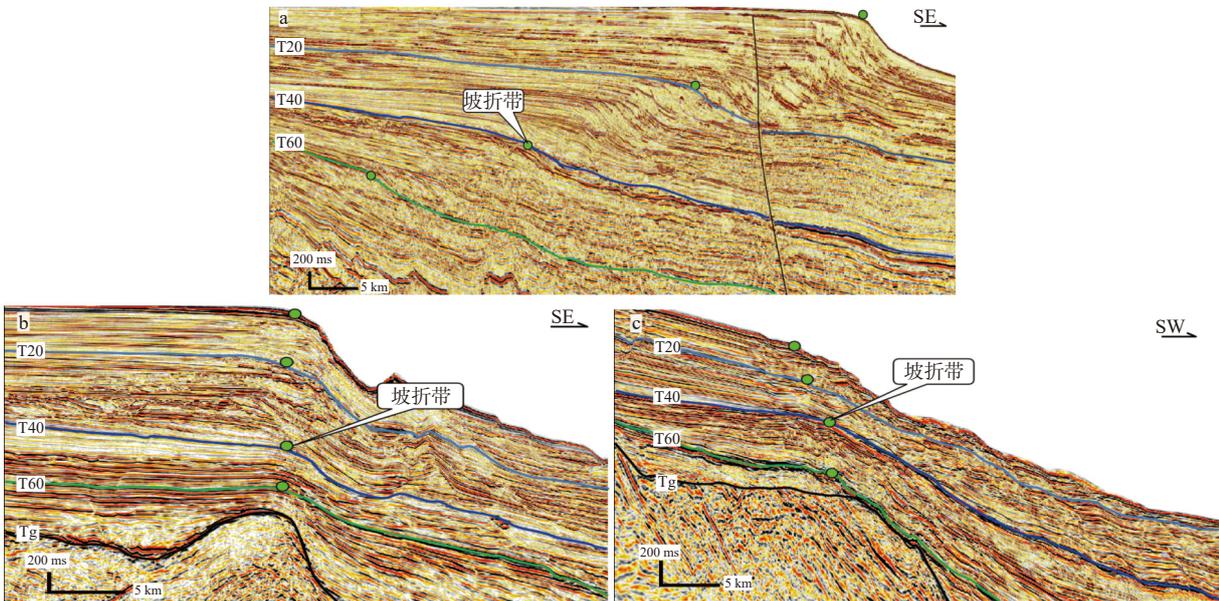


图 3 琼东南盆地不同区域坡折带纵向变化地震剖面

Fig.3 Seismic profiles showing longitudinal variation of slope break zones in different regions of Qiongdongnan Basin

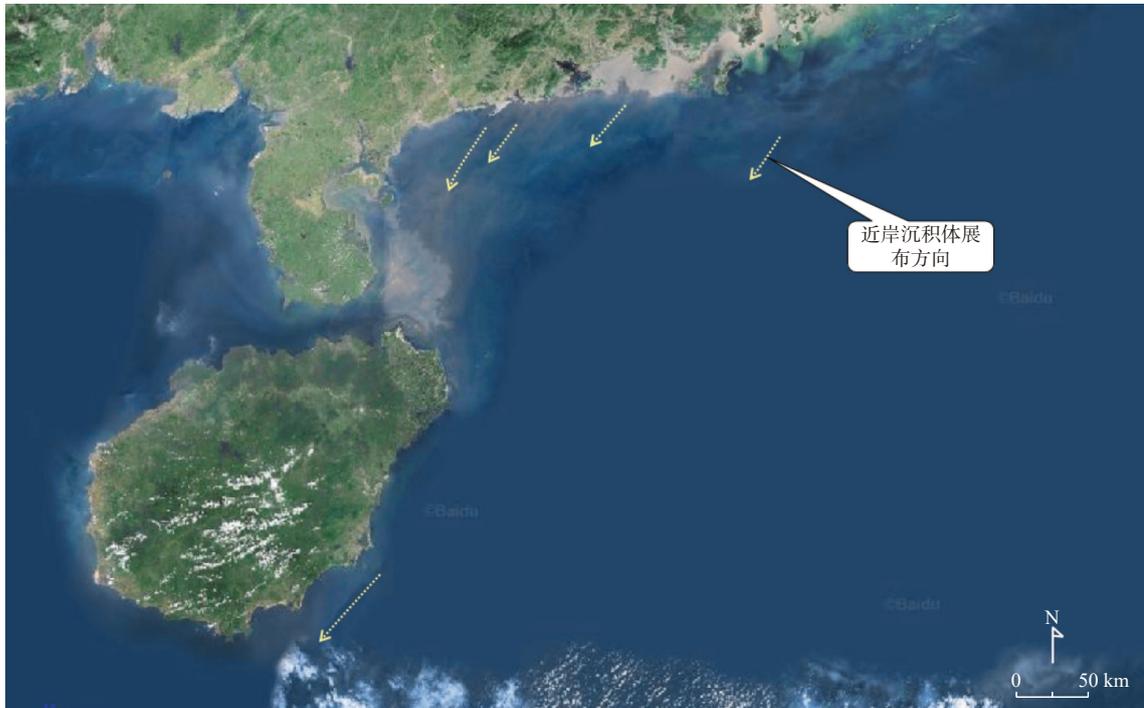
较低,重力流沉积以富泥型为主。

琼东南盆地中央坳陷带东西两侧发育海底扇的地质背景存在上述先天差异,南海北部 NE-SW 向优势表层洋流方向进一步加剧了这一差异的影响。强大的海流体系是影响陆源碎屑展布非常重要的因素,现今卫星影像显示(图 4),整个广东西部海域、海南岛东部及南部海域近海沉积体均呈

NE-SW 向展布,反映了海流体系对物源搬运与沉积体展布的影响,但目前这些认识成果与技术手段更多集中在第四系或海底表层沉积物分布的学术研究<sup>[17-18]</sup>,较少用于更老地层的油气勘探实践。调研显示,现今南海北部洋流体系中陆架之上的华南近岸流、广东沿岸流、冬季表层洋流均是 NE-SW 向,陆架之下的陆坡流与深水洋流也呈 NE-

SW 向, 其中华南近岸流与受黑潮侵入影响的陆坡流和深水洋流方向不随季节的改变而转变<sup>[19-20]</sup>。受这些优势洋流方向影响, 现今海南岛东南部浅水区甚至部分深水海域的样品, 其常微量元素特征指示该区沉积物主要来自雷州半岛与珠江物源的贡

献<sup>[17]</sup>, 反映南海北部海流体系具有较强的搬运能力, 同时也反映了琼东南盆地除北部海南岛近物源外, 可能还存在部分广东西部沿岸河流物源的贡献, 扩大了物源供应的认识格局。



底图据百度卫星影像地图

图 4 广东西部与海南岛东部近岸沉积体展布形态

Fig.4 Distribution of nearshore sediments in the western Guangdong and the eastern Hainan Island

由于琼东南盆地构造活跃期主要在古近纪<sup>[21]</sup>, 始于渐新世的南海扩张与向海延伸的红河断裂带走滑断层均对琼东南盆地的构造格局产生了较大影响, 但至早中新世晚期, 约 16 Ma 即 T50 界面形成时期, 随着南海的停止扩张以及莺琼结合部红河断裂带走滑断层活动的结束<sup>[22-24]</sup>, 中中新世及之后, 琼东南盆地及周缘断裂活动转弱, 断距较小, 整体未对盆地宏观地貌格局产生影响。从图 2、3 中可以发现, 中中新世至今, 琼东南盆地从西至东陆架、陆坡的地貌格局呈继承性渐变特征, 未发生大的截然变化。在这一认识的基础上, 根据琼东南盆地中东部与珠江口盆地西部的中新世三角洲与海底扇整体形态表现为 NE-SW 向的展布特征<sup>[6,12,25]</sup>, 结合上述海流体系认识, 将今论古, 推测梅山组大型沉积体的外形展布特征也受到了类似现今海流体系的影响。这是由于南海是西太平洋最大的边缘海, 对东亚季风气候有重要影响作用, 同时, 南海表层洋流又主要受东亚季风气候环流控制<sup>[26]</sup>。前人研

究显示, 东亚季风在渐新世已具雏形, 在早中新世体系已基本形成, 后期主要是季风环流强度与气候波动周期的变化<sup>[27-31]</sup>, 研究区陆架三角洲的外形展布特征在一定程度上与这一观点吻合。海流体系的引入有利于进一步回答琼东南盆地梅山组海底扇分布差异问题, 这是由于东部(长昌凹陷)大陆架宽广, 远离物源区, 同时也并非优势海流搬运方向, 导致梅山组海底扇欠发育; 中部(松南、宝岛凹陷)大陆架虽窄、离物源区相对较近, 但受优势海流搬运方向影响, 垂直岸线方向并非物源的优势卸载区, 向盆地中心方向推进有限, 因此, 陆坡之下的海底扇规模相对较小且泥质含量重(图 5); 西部(乐东、陵水凹陷)早期大陆架本身较窄, 离海南隆起物源区较近, 加之处于 NE-SW 向优势海流搬运方向, 物源供给充足, 使得坡折带不断向盆地深海方向推进, 导致该区海底扇最为发育, 且越往西南方向乐东凹陷的发育规模更大。如此, 便从宏观角度解释了受物源供给与水动力特征双重因素影响, 导致中

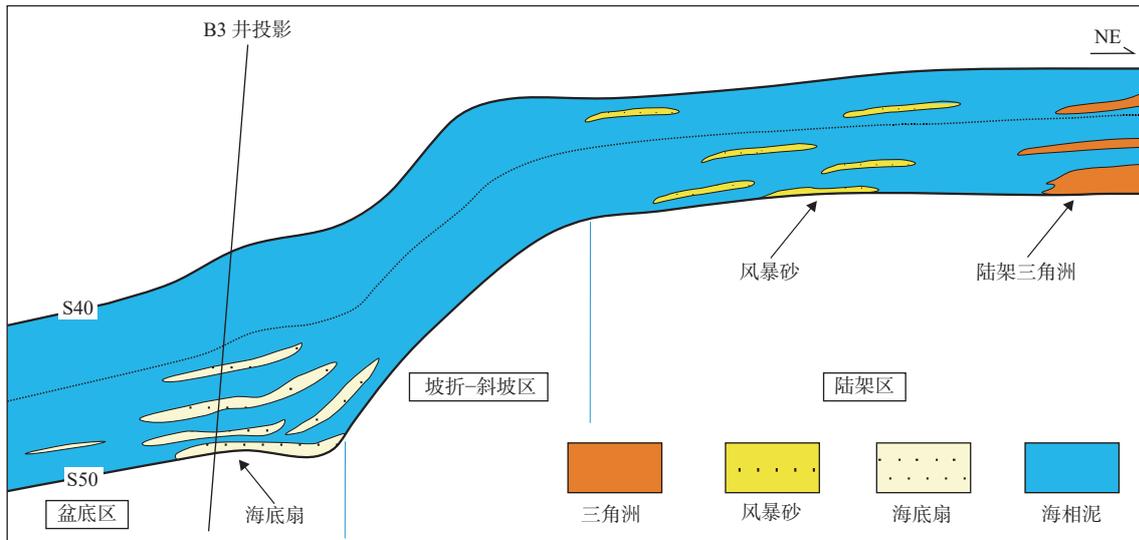


图5 松南-宝岛凹陷梅山组海底扇沉积模式示意图

Fig.5 Schematic diagram of submarine fan sedimentation model of the Meishan Formation in the Songnan-Baodao Sag

央坳陷带东西两侧各凹陷梅山组海底扇发育不均的现象。

至于乐东凹陷梅山组海底扇优势物源方向来自西北侧、东北侧还是西侧、西南侧的争议,可以从物源背景与沉积趋势的角度进行分析论证。乐东凹陷梅山组海底扇北侧崖南低凸起钻井资料显示,乐东北坡在三亚组晚期陆源供应开始减弱,出现富泥沉积,到梅山组演变为以碳酸盐岩为主的浅水台地沉积<sup>[32]</sup>,仅间歇性受到小规模陆源三角洲的影响,反映该区陆源碎屑供应不充足,是大规模海底扇物源方向的可能性较小。西北方向莺-琼结合部大量钻井显示,梅山组砂岩欠发育,整体以薄层粉砂岩、泥质粉砂岩为主,泥质含量重<sup>[33]</sup>,因此,西北方向为乐东凹陷大规模海底扇供源的可能性低。对于西侧或西南侧越南方向物源争议,主要是受资料约束,对中建凸起中中新世地层发育情况认识不清所致。文献调研显示,越南已有多口井钻探证实中中新世中建凸起为大规模碳酸盐岩台地<sup>[34]</sup>,且碳酸盐岩台地之上地层砂岩欠发育,以巨厚层富泥沉积为主,不是梅山组海底扇的物源供给方向,地震资料与锆石测年数据显示,直到黄流组时期西部越南物源才越过中建凸起影响乐东凹陷<sup>[35]</sup>。紧邻中央坳陷的南部陵南低凸起中新世已没入水下,不发育剥蚀区,距离更远的南部永乐隆起虽局部出露海面,但其周缘发育大型碳酸盐岩台地或生物礁滩沉积<sup>[36]</sup>,也无陆源碎屑供给能力。所以,北部、西北部、西部及南部等方向梅山组沉积期不具备大规模海底扇物源的供给背景,而中中新世琼东南东北部松涛凸起陆架区多口井钻探证实发育大规模三角洲沉积<sup>[12-13]</sup>,

砂岩粒度粗,厚度大,反映该时期海南隆起物源充沛,具备海底扇物源供应的物质基础。同时,地震资料显示,在陵水低凸起西侧与乐东凹陷海底扇东北部,梅山组持续发育多个大型下切沟谷<sup>[12]</sup>,且下切谷源头连接陆架边缘三角洲、下倾方向指向西南,与前述 NE-SW 向优势表层洋流搬运方向吻合,“源-渠-汇”条件配置较好,说明该下切谷是乐东凹陷梅山组大型海底扇的物源通道,反映主物源方向来自东北方向的可能性最大。

## 2 梅山组海底扇层序演化特征

引入南海海流体系可解决梅山组各凹陷海底扇宏观展布的差异问题与物源争议,但对海底扇具体演化特征尚不清楚,尤其是对优质储层的展布规律认识不清。关于这一问题,本文主要采用层序地层学手段加以分析和刻画,而海平面变化是了解地层堆积作用机制及其控制因素的重要线索<sup>[37]</sup>。由于 HAQ 等<sup>[38]</sup>在绘制全球海平面变化曲线时并未参考南海地区资料<sup>[39]</sup>,加上南海作为西太平洋独特的边缘海,其特殊的构造演化特征导致使用频率较高的“Haq 曲线”在本区应用指导效果受到一定程度影响,后来不同学者根据新的各种大洋钻探资料对全球海平面变化曲线进行了不同程度的更新或重建<sup>[40-43]</sup>,只是这些新曲线并未在琼东南盆地的相关研究中使用和检验。虽然前人也有针对性地总结绘制莺-琼盆地海平面变化曲线<sup>[44-46]</sup>,但主要是依靠岩屑样品分析,在一定程度上影响了研究精度和使用效果。鉴于琼东南盆地南侧西沙隆起上西科

1 井全井段钻井取芯,除了有更为准确的古生物与古地磁资料、直观的淹没或暴露型沉积建造,还有包括  $K_2O/Na_2O/P_2O_5$  在内的 10 种常量元素分析、包括 U/V/Sr 在内的 42 种微量元素分析、包括 BIT/TEX86 在内的多种分子化合物以及碳氧同位素等全井段系统的各类地球化学指标<sup>[47-48]</sup>,其海平面研究精度更高且距离近,更能反映研究区实际情况,参考指导作用更强。实际对比分析发现,西沙地区高精度海平面变化曲线与研究区梅山组海底扇层序演化特征相关性较强、吻合度较高。

参考西沙地区海平面变化曲线,研究区中中新世在整体大海退背景下,可进一步识别出至少 5 期次一级海平面升降旋回(图 6),每期旋回持续时间约 0.7~1.6 Ma,由于旋回数量较多、地层厚度较薄以及地震分辨率较低等客观因素影响,难以有效区分和刻画每期旋回内部特征,但各期旋回整体升降表现出一定的规律性,因此,可将梅山组(10.5~16.0 Ma)作为一个大的三级层序进行分析。整体上梅山组早期(第 1~2 期)海平面快速上升、高水位波动时间长;中后期(第 3~4 期)下降幅度大,海平面相对较低,且持续时间较长;晚期(第 5 期)具有短暂升降的特点。考虑到不同区域地层沉积过程的复杂性以及不同时间尺度的旋回性和差异性<sup>[49]</sup>,结合本区实际高精度海平面变化曲线,本次研究以层序地层学原理为依托,根据每期升降旋回的沉积充填趋势开展不依靠模型的层序地层学实践<sup>[50]</sup>,取得

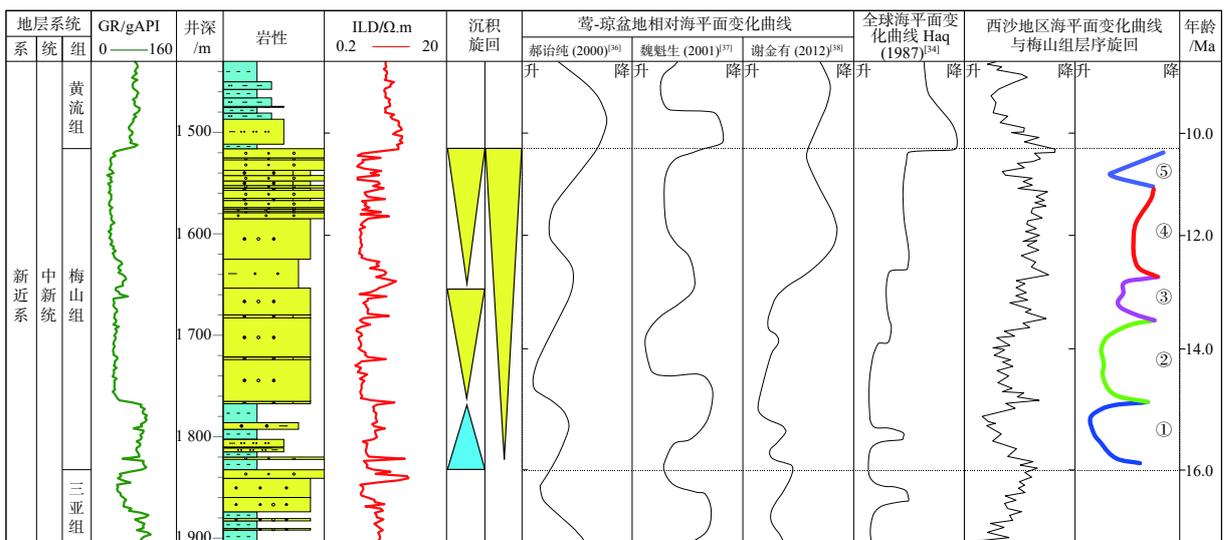
了以下新认识和发现。

通过对比陆架区松涛凸起 L2 井区与陆坡之下的中央拗陷带地震反射特征与钻井特征,发现梅山组层序充填特征与各期海平面旋回对应较好,其中陆架区第 1/2/3/5 期旋回的沉积响应特征较好(图 7),陆坡之下第 1/2/4/5 期旋回的沉积响应特征较好(图 8)。各期具体对应的地震剖面与钻井特征表现如下:

(1)梅山组早期发育多套超覆沉积体层层上超尖灭在下伏三亚组顶界面 S50 之上,钻井特征表现为厚层泥岩夹薄层泥质粉砂岩,自然伽玛曲线整体表现为高值,从下至上表现为小型漏斗形、钟形或指状为主,呈现向上变细的旋回特征,与海平面持续上升为主的第 1 期旋回对应,是低位体系域与海侵体系域响应特征。

(2)随后地震剖面出现以加积和前积为主的反射特征,分布范围相对较广,钻井特征表现为厚层泥质粗砂岩与含砾粗砂岩,自然伽玛曲线为高幅箱形,呈现出向上变粗的旋回特征,对应海平面整体较高且持续时间较长的第 2 期旋回,是高位体系域响应特征。

(3)之后井区又出现一期以前积反射为主的沉积体,局部可见顶超现象,规模相较前一期变小,整体具有明显的楔状外形,沉积体边界为明显的强振幅-高连续反射,井上为厚层箱状含砾粗砂岩,底部泥质含量略为偏重,自然伽玛曲线整体表现为宽缓



①为低位体系域-海侵体系域(LST-TST);②为高位体系域(HST);③为下降体系域早期(FSST);  
④为下降体系域晚期(FSST);⑤为不规则叠加的小旋回

图 6 琼东南盆地松涛凸起 L2 井区梅山组钻井特征与海平面变化综合图

Fig.6 Comprehensive map of stratigraphy, logging, and sea level change across the Meishan Formation in Well L2 of Songtao Uplift in Qiongdongnan Basin

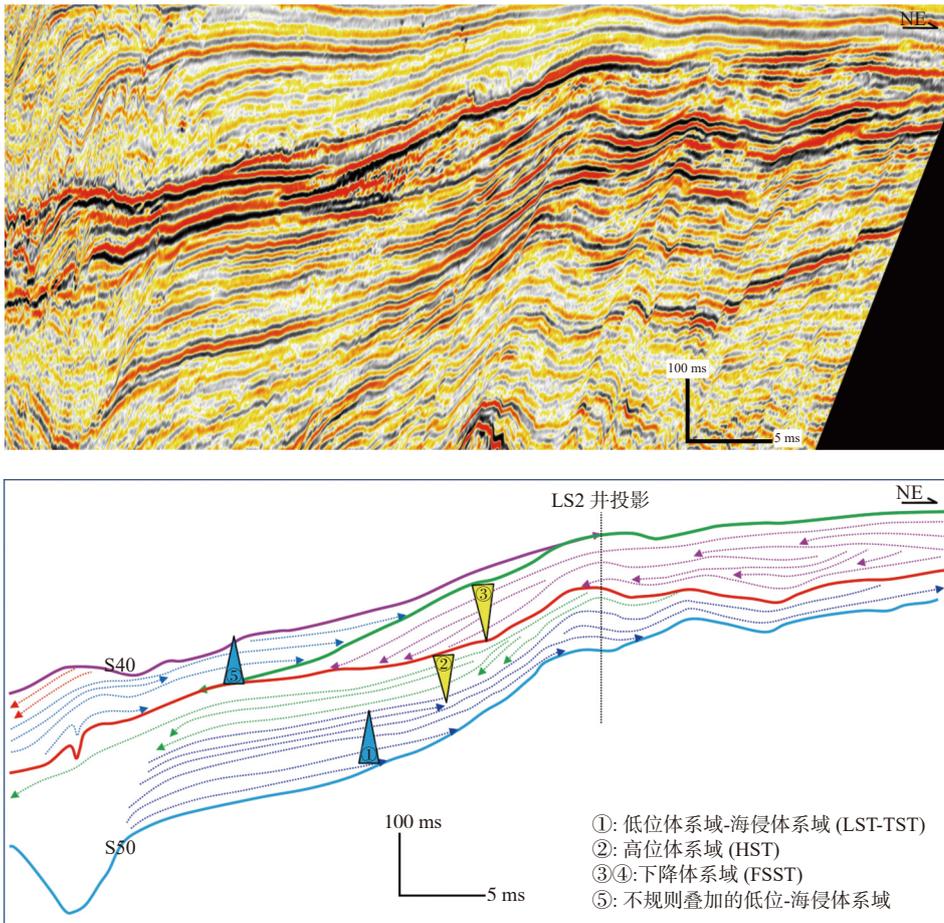


图 7 松涛凸起 L2 井区梅山组地震剖面与层序充填特征

Fig.7 Seismic profile and interpretation of the sedimentary sequence filling of the Meishan Formation in Well L2 of Songtao Uplift

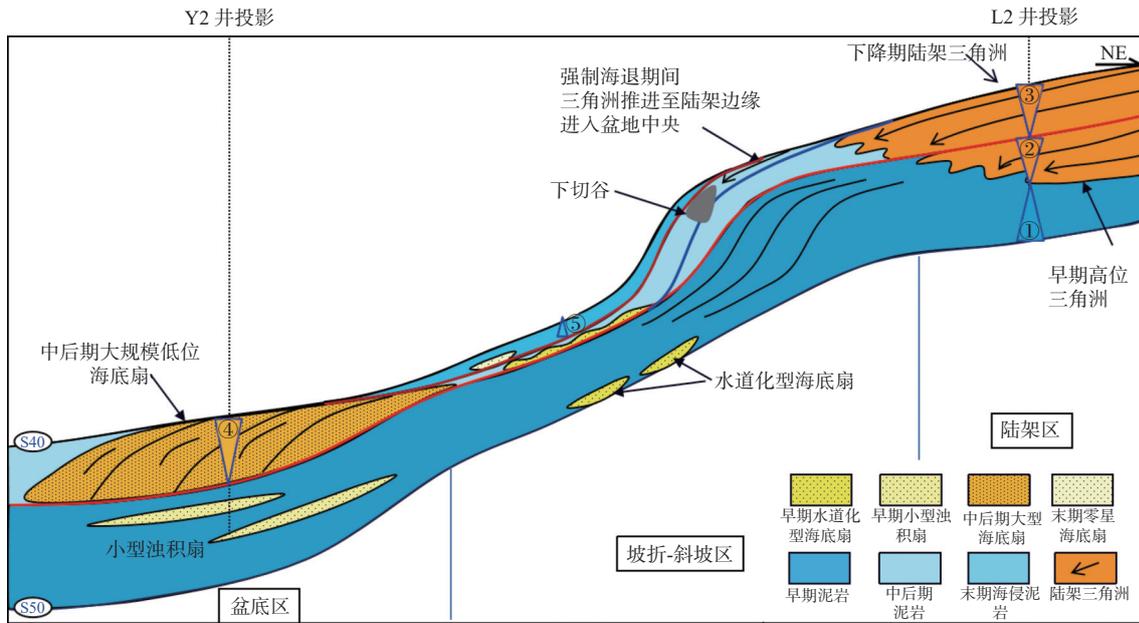


图 8 乐东-陵水凹陷梅山组海底扇层序演化模式图

Fig.8 Model of sequence evolution of the Meishan Formation submarine fan in Ledong-Lingshui Sag

的漏斗形,呈现出向上变粗的旋回特征,对应海平面有所降低的第 3 期旋回,是下降体系域的响应特

征,陆架区的 L2 井钻遇的仅是下降体系域的早期部分,沉积记录的持续时间相对较短、规模较小。

(4) 由于井区处在陆架边缘的特殊位置, 第 3 期旋回所对应的陆架边缘三角洲是井上钻遇梅山组的最后沉积记录, 海平面下降幅度更大、持续时间更长的第 4 期旋回是下降体系域的主要沉积期。由于该旋回期可容纳空间在第 3 旋回的基础上继续降低, 使得陆源碎屑顺着物源前积方向搬运至陆架边缘时通过陆坡或下切谷大规模向盆底搬运, 因此, 该期陆源碎屑主要分布在陆架坡折之下, 形成区域厚层分布的大规模海底扇沉积(图 8), 位置相对较高的陆架 L2 井区未接受沉积, 没有相应的沉积记录。

(5) 中中新世末期一次短暂的海平面升降对应第 5 期旋回, 陆架坡折之下表现为海底扇规模缩小, 仅局部地震反射能量较强, 实际钻探为薄层粉砂岩或泥质粉砂岩, 强反射层具有向北部陆坡退积的特征。虽然本旋回在 L2 井区未钻遇, 但地震资料上井区南侧陆架边缘有部分体现, 表现为上超为主的反射特征, 超覆在第 3 期旋回的楔形沉积体顶部强反射之上。由于海平面短暂上升之后又开始下降, 在陆坡区也可见少量的前积和侵蚀现象。从沉积趋势看本旋回没有延续海平面持续下降的趋势, 不再是典型的下降体系域, 具有小型低位体系域或海侵愈合相沉积的特征<sup>[51]</sup>, 但从区域层序特征与古生物资料综合分析可知, 该旋回沉积体确为梅山组晚

期地层, 这是实际海平面变化的不规则性和复杂性所致。

综上所述, 琼东南盆地陆架区梅山组沉积充填趋势、地震响应特征、钻井地质特征与海平面变化旋回有着较好的响应关系, 这为研究陆坡之下海底扇的层序演化及优质储层的展布规律提供了有利线索和可靠保障。整体来看, 第 1~4 期旋回呈现出完整的三级层序特征, 第 5 期旋回为海平面升降叠加的不规则波动造成。结合梅山组各旋回期海底扇平面分布范围(图 9), 琼东南盆地梅山组海底扇整体具有早期规模小、晚期规模大, 东侧(松南-宝岛凹陷)规模小、西侧(乐东-陵水凹陷)规模大的特征。其中, 早期海底扇主要分布在陵水凹陷, 零星分布在松南-宝岛凹陷; 中后期随着海平面持续下降, 受 NE-SW 向优势海流方向影响, 海底扇逐渐向西南迁移, 海底扇主要分布在乐东凹陷, 具有砂岩更发育、展布范围更广的特征。同时, 由于只有西侧下切谷直接沟通陆架边缘三角洲砂体, 使得乐东凹陷海底扇具有砂岩粒度较粗、物性更好的特征。梅山组末期随着海平面短暂的升降波动结束了长时期低水位格局, 陆架坡折之下的海底扇规模则快速收缩直至消亡, 中中新世之后海平面开始持续上升, 至此结束了琼东南盆地海底扇的黄金发育期。

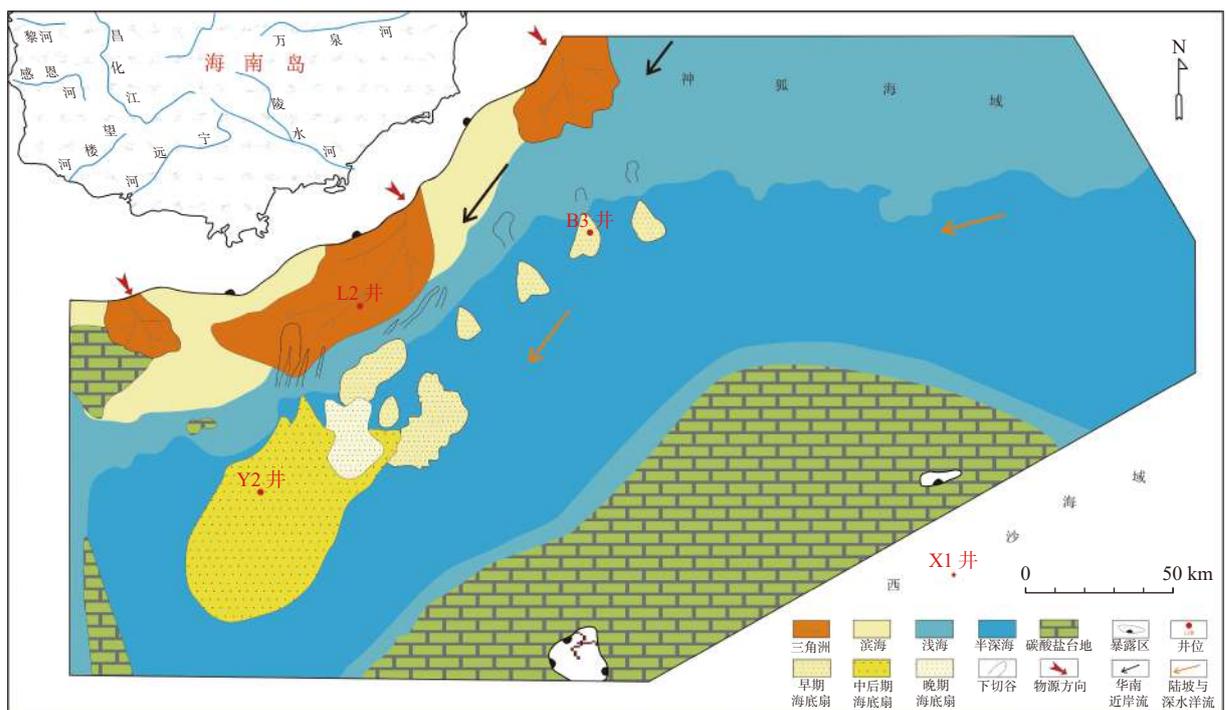


图 9 琼东南盆地梅山组物源区与沉积相平面分布

Fig.9 Plane distribution of provenance area and sedimentary facies of the Meishan Formation in Qiongdongnan Basin

### 3 梅山组海底扇勘探建议

琼东南盆地深水区梅山组海底扇是黄流组中央峡谷水道砂岩之外规模最大的碎屑岩储集体,其形成主要得益于该时期充足的物源供给与大幅度、长时期的相对海平面下降,其分布主要受控于北部海南隆起物源方向、古地貌特征与南海北部水动力条件。梅山组海底扇从东至西、从早至晚在岩石粒度、砂岩厚度、海底扇规模与储层物性等方面表现出一定的规律性,这些特征可作为梅山组海底扇勘探策略研判的有机组成部分,尤其是在岩性圈闭与储层物性风险评估方面起到重要作用。

梅山组海底扇领域的勘探思路经历了探索构造型圈闭到主攻“亮点型”岩性圈闭的转变,但受早期二维地震资料限制、坡折带水深快速变化与厚层欠压实泥岩等因素影响,对地层速度的复杂性认识不足,构造型圈闭基本落空,岩性圈闭勘探整体成效也较低。总结失利原因大致可归纳为3类:第1类是二维地震资料研究显示存在构造,但三维深度域地震资料落实无构造圈闭,或有构造背景但海底扇砂岩欠发育,以富泥地层为主夹薄层泥质粉砂岩,难以形成有效储盖组合,可总结为“无构造或有构造无砂”,以崖城35区和陵水15区为代表(图10);第2类是钻遇厚层优质砂岩储集体,亮点反射特征明显,但圈闭保存条件存在风险,圈闭多被后期黄流组水道切割、或被底辟破坏,因海底扇砂体较厚储层物性较好,岩性封堵难度大,导致圈闭漏失,仅钻遇厚层含气水层,可总结为“有砂无藏”,以陵水25区为代表;第3类是钻遇一定气层或差气层,但海底扇砂岩粒度细、泥质含量重,储层物性差,缺乏

优质储集体,气藏品质欠佳,储量规模较小,难以实现商业突破,俗称“见气不见田”,可总结为“有藏无规模”,以宝岛19区、宝岛31区、松涛36区、陵水13区为代表(图11)。

整体来看,在琼东南盆地富生烃凹陷与油气垂向运移背景下,处于中央峡谷水道千亿立方米气田下部的梅山组海底扇具有更近源优先充注的优势,钻探干井几率较低。其成藏关键是储层条件与圈闭有效性,本质上依然集中在砂体粒度、物性、厚度以及尖灭或连通方面的研究。由于储层条件的地质成因演化具有一定区域规律,而圈闭有效性受局部影响更为明显,因此,勘探策略的研判应向前者倾斜。勘探实践证明,梅山组海底扇钻井特征与海底扇宏观成因演化规律之间吻合性较强,建立在梅山组海底扇宏观成因演化规律之上的勘探策略将会起到事半功倍的效果。

基于此,建议改变以各个凹陷为单元的均衡用力评价策略,改变侧重某一圈闭类型的勘探思路,因为这些分类指标不是影响油气成藏的关键敏感性因素。相应地,采用整体评价思路,改为以整个盆地为研究单元,在梅山组海底扇宏观储层发育背景与演化趋势的分析基础上,结合已钻井勘探成败经验,梳理中央拗陷各凹陷与区带的成藏特征,统筹确定凹陷级别的勘探优先顺序,再根据各期次海底扇发育特征开展有针对性的勘探评价,做到“一期一策、一凹一策”,提升勘探成效,实现梅山组海底扇领域的可持续勘探。

根据上述思路,分析认为受南海北部大陆架东宽西窄、海南隆起物源方向、NE-SW向优势海流方向以及中中新世海平面早高晚低等一系列因素影响,

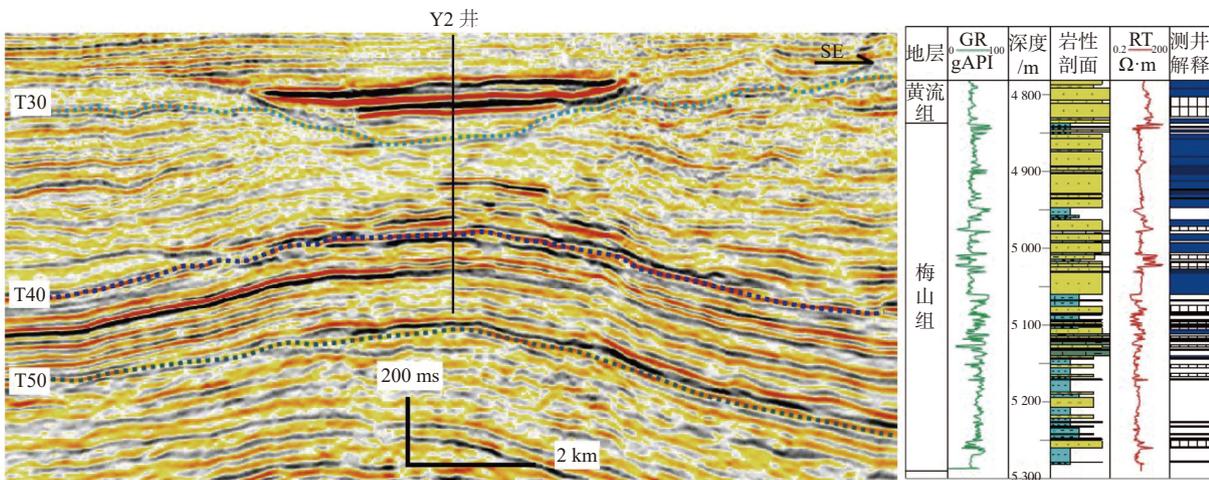


图10 琼东南盆地乐东凹陷Y2井梅山组海底扇地震特征与岩性综合柱状图

Fig.10 Comprehensive histogram and seismic profile showing lithology of Meishan Formation submarine fan in Well Y2 of Ledong Sag, Qiongdongnan Basin

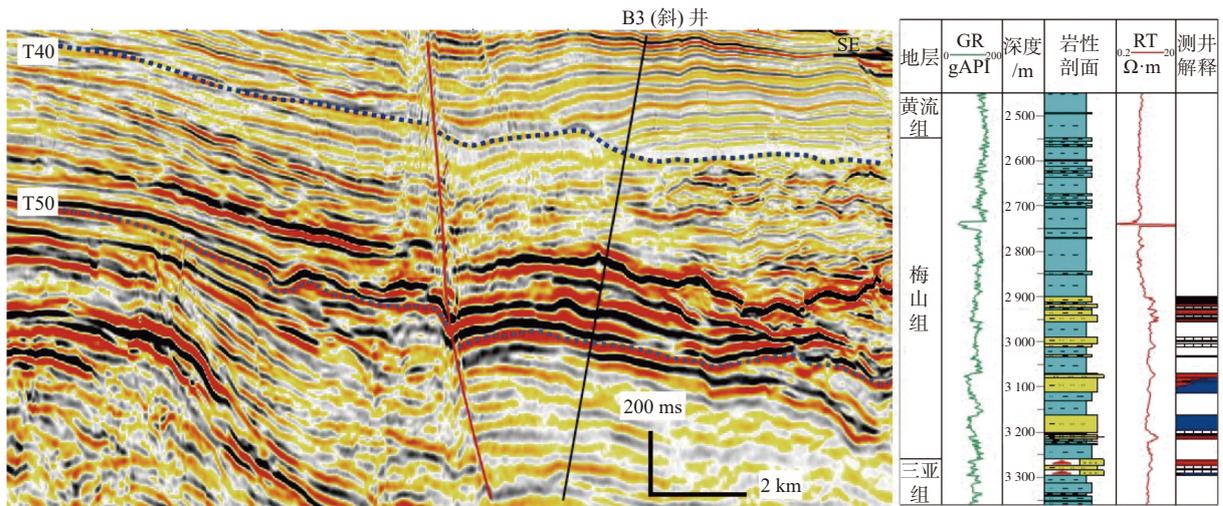


图 11 琼东南盆地宝岛凹陷 B3 井梅山组海底扇地震特征与岩性综合柱状图

Fig.11 Comprehensive histogram of seismic profile showing lithology of subsea fan in the Meishan Formation of Well B3 in Baodao Sag, Qiongdongnan Basin

琼东南盆地中央坳陷从东侧长昌凹陷至西侧乐东凹陷梅山组海底扇的发育规模与储层物性整体具逐渐变好的趋势, 储层发育程度与储层物性风险均具有降低的趋势。据此建议梅山组海底扇凹陷级别的勘探优先级依次为乐东凹陷、陵水凹陷、松南-宝岛凹陷、长昌凹陷, 而海底扇各期次对应的勘探优先顺序建议为先中—晚期海底扇、再早期海底扇。

同时, 针对乐东凹陷中—晚期海底扇主体厚度大、物性好、分布广、砂体连通性强、漏失风险高的特点, 建议优先钻探北、东两侧连片砂体的上倾高部位, 确定大海底扇整体的含油气性情况, 再往中低部位拓展勘探扩大储量规模。其中, 东侧高部位侧翼被黄流组水道切割, 具有一定侧封风险, 影响含气规模; 但北侧高部位未被后期破坏, 圈闭有效性较好, 且该处海底扇上覆黄流组已成功钻遇气层, 油气运移条件得到证实, 下伏梅山组海底扇规模成藏概率较高, 加之乐东凹陷中晚期海底扇非主体部位砂体厚度减薄、分布范围变小, 圈闭侧封风险也相应减弱, 成藏概率进一步提升。但砂泥岩组合特征与地震成像存在多解性, 岩性边界的识别与圈闭范围的确定是研究攻关重点。

早期海底扇虽然在各个凹陷均有分布, 但无论数量还是规模都以陵水凹陷更为发育, 因此, 早期海底扇的重点勘探区域建议集中在陵水凹陷。陵水凹陷海底扇主要包括水道化型与朵页体型 2 种类型。水道化型海底扇主要分布在陆坡, 与传统的斜坡扇更为接近, 主要是陆架三角洲滑塌改造堆积而成, 搬运距离较近, 物性相对较差; 同时由于为条带状, 在迁移叠置过程中砂体存在“藕断丝连”现象,

加之处于斜坡带深度变化快, 使得该类型海底扇整体构造幅度较大, 气柱高度与成藏规模会受一定影响。朵页体型海底扇主要分布在凹陷中心的深海平原, 与传统的盆底扇更为接近, 搬运距离更远, 推测物性相对更好。由于该区地势平缓海底扇呈朵叶体分布, 砂体构造幅度相对较低, 易实现规模成藏, 并且该区海底扇未被黄流组水道切割, 保存条件相对较好, 成藏概率较大。该区主要地质风险来自储层厚度与圈闭大小的不确定性, 因为不同批次的地震资料响应特征差异较大。因此, 建议陵水凹陷梅山组海底扇优先钻探凹中朵页体型海底扇, 再择机钻探陆坡水道型海底扇。松南-宝岛与长昌凹陷因海底扇数量与规模相对较小, 且物性相对较差, 建议作为后备区域, 待梅山组海底扇勘探成熟之后再进一步拓展挖掘。

梅山组海底扇作为中央峡谷水道之外最引人注目的大型储集体, 是琼东南盆地尤其是深水区常规碎屑岩领域下一步最为重要的勘探对象, 虽然目前还未取得与之匹配的勘探成果, 但梅山组海底扇与中央峡谷水道具有相同的烃源条件、运移通道与成藏模式, 成藏条件优越, 勘探潜力大, 相信只要深耕梅山组海底扇石油地质特征, 匹配相应的勘探策略, 海底扇领域油气勘探将会取得更大成功。

#### 4 结论与建议

琼东南盆地梅山组海底扇的形成与该时期充足的物源供给、大幅度长时期的相对海平面下降有关, 其分布主要受控于北部海南隆起物源方向、东

宽西窄的陆架分布特征与南海北部 NE—SW 向的优势水动力条件,其钻井特征、地震响应特征、沉积充填趋势与海平面变化有着较好的响应关系。

中中新世梅山组在大海退背景下,共发育 5 期海平面升降旋回,其中第 1~2 期旋回海平面整体较高,砂体主要分布在陆架之上的三角洲储集体中,少量分布在坡折之下的海底扇,海底扇以陵水凹陷规模最大,松南-宝岛凹陷次之,长昌凹陷规模最小;受海平面大幅下降影响,第 3~4 期旋回,坡折之下海底扇规模明显增加,其中第 4 期旋回海平面下降幅度最低、持续时间最长,海底扇规模最大,主要分布在乐东凹陷,陵水凹陷次之;第 5 期旋回持续时间较短,海底扇规模整体较小,主要分布在乐东凹陷东侧。梅山组海底扇整体具有早期规模小,泥质含量高;中后期规模大,储层更发育;晚期快速萎缩消亡的特征。平面上具有东侧(松南-宝岛凹陷)规模小,西侧(乐东-陵水凹陷)规模大的分布特征。

琼东南盆地梅山组海底扇领域与莺歌海组-黄流组中央峡谷水道领域具有相同的烃源岩条件和相似的成藏模式,其成藏主控因素在于圈闭有效性与储层物性。根据梅山组海底扇时空分布与演化特征,建议海底扇领域的勘探策略应以整个盆地为单元,各期次海底扇为研究对象,宏观统筹凹陷级别的勘探优先级,改变常规以凹陷为单元、以圈闭为研究对象的并列推进。具体凹陷级别的勘探优先顺序建议为乐东凹陷、陵水凹陷、松南-宝岛凹陷、长昌凹陷,海底扇各期次对应的勘探优先顺序建议为先中-晚期海底扇、再早期海底扇。乐东凹陷梅山组中-晚期海底扇储层条件好是梅山组海底扇领域突破的首选区带,陵水凹陷海底扇圈闭有效性较好,是梅山组海底扇大规模成藏的有利勘探方向。

#### 参考文献:

- [1] 邱宁,王章稳,王振峰,等.南海北部琼东南盆地地层结构与地壳伸展特征[J].地球物理学报,2014,57(10):3187-3207.
- [2] 李绪宣,钟志洪,董伟良,等.琼东南盆地古近纪构造特征及其动力学机制[J].石油勘探与开发,2006,33(6):713-721.
- [3] 邵磊,李昂,吴国璋,等.琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J].石油学报,2010,31(4):548-552.
- [4] 李前裕,吴国璋,张丽丽,等.古近纪南海断陷作用和破裂不整合的海相沉积记录[J].中国科学:地球科学,2017,47(12):1447-1459.
- [5] 高阳东,向绪洪,张向涛.南海北部新生代沉积演变及其油气地质意义[J].天然气地球科学,2021,32(5):645-656.
- [6] 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.
- [7] 王振峰,裴健翔,郝德峰,等.莺-琼盆地中新统大型重力流储集体发育条件、沉积特征及天然气勘探有利方向[J].中国海上油气,2015,27(4):13-21.
- [8] 谢玉洪.南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J].天然气工业,2014,34(10):1-8.
- [9] 王振峰,孙志鹏,张迎朝,等.南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J].中国石油勘探,2016,21(4):54-64.
- [10] 张迎朝,徐新德,甘军,等.琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J].地质学报,2017,91(7):1620-1633.
- [11] 范彩伟,李绪深,刘昆,等.琼东南盆地乐东、陵水凹陷中新统岩性地层圈闭成藏条件[J].中国海上油气,2016,28(2):53-59.
- [12] 谭建财,范彩伟,宋鹏,等.琼东南盆地中中新统古沟谷和坡折带特征及油气勘探意义[J].油气地质与采收率,2017,24(3):30-37.
- [13] 王亚辉,张道军,陈杨,等.琼东南盆地陵水凹陷梅山组深水扇特征及控制因素[J].新疆石油地质,2014,35(6):664-667.
- [14] 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.
- [15] 田姗姗,苏明,何云龙,等.琼东南盆地新近系坡折带特征及其对沉积体系的控制[J].科技导报,2010,28(10):73-78.
- [16] 张亚雄,朱筱敏,陈欢庆,等.琼东南盆地渐新统陵水组坡折带类型及层序地层样式[J].石油与天然气地质,2014,35(4):473-479.
- [17] 徐方建,陈世悦,操应长,等.近4400年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义[J].沉积学报,2010,28(6):1198-1205.
- [18] 鄢全树,王昆山,石学法.中沙群岛近海表层沉积物重矿物组合分区及物质来源[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(1):17-24.
- [19] 刘志飞.南海沉积物中的黏土矿物:指示东亚季风演化历史? [J].沉积学报,2010,28(5):1012-1019.
- [20] 舒业强,王强,俎婷婷.南海北部陆架陆坡流研究进展[J].中国科学-地球科学,2018,48(3):276-287.
- [21] 李绪宣,朱光辉.琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J].中国海上油气,2005,17(1):1-7.
- [22] 李学杰,王哲,姚永坚,等.南海成因及其演化模式探讨[J].中国地质,2020,47(5):1310-1322.
- [23] 谢习农,任建业,王振峰,等.南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J].地学前缘,2015,22(1):77-87.
- [24] 雷超,任建业,裴健翔,等.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,2022,52(1):81-97.
- [25] 刘志峰,刘志鹏,肖伶俐,等.珠三坳陷北部珠海组-韩江组沉积演化及储盖组合[J].海洋地质前沿,2013,29(9):25-31.
- [26] WANG P X, WANG L J, BIAN Y H, et al. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: surface circulation and carbonate cycles[J]. Marine Geology, 1995, 127: 145-165.

- [27] GUO Z, RUDDIMAN W F, HAO Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [28] 汪品先, 翦知潜, 赵泉鸿, 等. 南海演变与季风历史的深海证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(21): 2228-2239.
- [29] 刘东升, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. *第四纪研究*, 1998, 8(3): 194-204.
- [30] 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2005, 30(1): 1-18.
- [31] 肖国桥, 张春霞, 郭正堂. 晚渐新世—早中新世青藏高原隆升与东亚季风演化[J]. *自然杂志*, 2014, 36(4): 165-169.
- [32] 邓鸣放, 陈伟煌. 崖13-1大气田形成的地质条件[J]. *中国海上油气(地质)*, 1989, 3(6): 19-26.
- [33] 张道军. 莺歌海盆地新近系重力流沉积特征及有利储层评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [34] FYHN M B W, BOLDREEL L O, NIELSEN L H, et al. Carbonate platform growth and demise offshore Central Vietnam: effects of Early Miocene transgression and subsequent onshore uplift[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 10(25): 152-168.
- [35] 姜涛, 李祥权, 汤苏林, 等. 南海西北部深水裂后期沉积体系研究与海底扇评价[R]. 湛江: 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 2014.
- [36] 杨振, 张光学, 张莉, 等. 西沙海域中新世碳酸盐台地的时空分布及其油气成藏模式[J]. *地质学报*, 2017, 91(6): 1360-1373.
- [37] 梅冥相. 沉积层序形成机制的海平面变化解释: 层序地层学的重要科学命题之二[J]. *地层学杂志*, 2012, 36(4): 792-806.
- [38] HAQ B U, HARDENBOL J A N, VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 1987(235): 1156-1167.
- [39] 张桂林. 18.5 Ma以来南海海平面变化特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [40] MILLER K G, KOMINZ M A, BROWNING J V, et al. The Phanerozoic record of global sea level change[J]. *Science*, 2005, 310(5752): 1293-1298.
- [41] JOHN C M, KARNER G D, BROWNING E, et al. Timing and magnitude of Miocene eustasy derived from the mixed siliciclastic-carbonate stratigraphic record of the northeastern Australian margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3/4): 455-467.
- [42] KOMINZ M A, MILLER K G, BROWNING J V, et al. Miocene relative sea level on the New Jersey shallow continental shelf and coastal plain derived from one-dimensional backstripping: a case for both eustasy and epeirogeny[J]. *Geosphere*, 2016, 12(5): 1437-1456.
- [43] MILLER K G, BROWNING J V, SCHMELZ W J, et al. Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records[J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): 1-15.
- [44] 郝诒纯, 陈平富, 万晓樵, 等. 南海北部莺歌海—琼东南盆地晚第三纪层序地层与海平面变化[J]. *现代地质*, 2000, 14(3): 237-245.
- [45] 魏魁生, 崔旱云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2001, 26(1): 59-66.
- [46] 谢金有, 祝幼华, 李绪深, 等. 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*, 2012, 17(1): 49-58.
- [47] 邵磊, 朱伟林, 邓成龙, 等. 南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学-年代地层与古海洋环境[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2016.
- [48] 罗威, 张道军, 刘新宇, 等. 西沙地区西科1井综合地层学研究[J]. *地层学杂志*, 2018, 42(4): 485-498.
- [49] 吴和源. 朝向层序地层学标准化: 层序地层学研究的一个重要科学命题[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 425-435.
- [50] CATUNEANU O. Model-independent sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 188: 312-388.
- [51] 奥克塔文·卡图尼努. 层序地层学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.

## Genetic evolution and exploration strategy of submarine fan in the Meishan Formation, Qiongdongnan Basin

LI Shengyong<sup>1</sup>, HU Lin<sup>2</sup>, YANG Xibing<sup>1</sup>, WU Qilin<sup>3</sup>, WANG Zhenzhen<sup>2</sup>, LI Anqi<sup>2</sup>,  
LUO Wei<sup>2</sup>, CHEN Kui<sup>1</sup>, ZHENG Fei<sup>2</sup>

(1 Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China; 2 Hainan Branch of CNOOC Ltd., Haikou 570100, China;

3 College of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

**Abstract:** As the most striking large reservoir outside the central canyon channel, the submarine fan of the Meishan Formation is the next most important exploration object in the conventional clastic rock field of the Qiongdongnan Basin, especially in the deep-water area. The differential distribution of submarine fans in the Meishan Formation was revealed by the drilling data of various sags in the Qiongdongnan Basin. Based on the exploration of continental shelf and continental slope break in the study area, the provenance and source supply, dominant paleo-current direction, geological background differences and causes of submarine fans in different sags in the central depression of the Qiongdongnan Basin were analyzed in macro-pattern for the first time. It is proposed that the main material source of the large submarine fan of the Meishan Formation in Ledong Sag was from the Northeast Hainan Uplift. By anatomizing secondary sea-level cycles in the Middle Miocene regression, the accurate corresponding relationship between sequence filling and sea-level cycles of the Meishan Formation in this area was established, and the development and evolution of submarine fans in each sedimentation stage of the Meishan Formation and the favorable reservoir distribution at sag level were clarified from the perspective of sequence genesis. Therefore, the corresponding exploration strategies were put forward, from which the reservoir risk of Meishan Formation submarine fan in Ledong Sag was believed low and thus the submarine fan should be considered the first choice for breakthrough in the future exploration. Meanwhile, the early trap of the submarine fan in Lingshui Sag was effective, providing a favorable condition for large-scale reservoir formation of the Meishan Formation submarine fan. This study presented a new insight to the exploration deployment in the Meishan Formation submarine fan.

**Key words:** Meishan Formation; submarine fan; provenance direction; sea level change; sequence evolution; deep water oil and gas exploration; Qiongdongnan Basin