李智高, 丁琳, 杜家元, 等. 珠江口盆地恩平凹陷中新统沉积特征及河道型岩性圈闭潜力[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 13-21.
LI Zhigao, DING Lin, DU Jiayuan, et al. Sedimentary characteristics and potential of channel-type lithologic traps in Miocene in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 13-21.

珠江口盆地恩平凹陷中新统沉积特征及河道型岩性圈闭潜力

李智高, 丁琳, 杜家元, 李潇, 吴宇翔, 李小平, 刘冬青
(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054)

摘　要: 珠江口盆地恩平凹陷中浅层近年来相继有商业油气发现, 虽目前仍然以构造圈闭为主, 但古珠江三角洲相关岩性目标的评价亟待展开。基于高品质井、震资料, 本次研究以恩平凹陷中新统珠江组上段—韩江组下段(T50—T35)为主要目的层, 以三级层序界面和最大海泛面为界, 建立了恩平凹陷 T50—T35 间的四级层序格架。在高精度层序地层格架的约束下, 进一步采用地震沉积学手段揭示了恩平凹陷以分流河道为主的沉积特征, 并建立了不同海平面背景下的河道沉积模式: 海侵早期和高位末期河道规模较大, 延伸距离较远, 平面上常连片发育; 海侵晚期和高位早期的河道规模适中, 平面上孤立性较强, 且前缘常被波浪改造。研究发现, 不同类型的河道砂体与特定的构造背景结合可发育“河道切割型”岩性圈闭, 并且最大海泛面上下更适合于相关圈闭的发育。据此, 研究锁定了恩平 A 油田西侧斜坡带、E 油田东侧斜坡带和 G 油田西侧披覆构造带等 3 个岩性圈闭有利区及 2 个有利勘探目标, 为盆地岩性油气藏勘探提供了新思路。

关键词: 恩平凹陷; 成因层序; 分流河道; 岩性圈闭; 珠江口盆地
中图分类号: P736.2; P539.2　　**文献标识码:** A　　**DOI:** 10.16028/j.1009-2722.2021.235

0　引言

岩性油气藏是珠江口盆地新近系重要的油气藏类型, 为珠江口盆地连续多年产量超千万立方米做出了重要的贡献。但是, 目前珠江口盆地岩性油气藏的勘探主要集中于珠一坳陷内的惠西南成熟区, 且岩性圈闭类型单一, 以三角洲前缘的“上倾尖灭型”为主[1-4]。由于“上倾尖灭型”岩性圈闭位于三角洲沉积体末端, 其沉积成因决定了该类型岩性圈闭勘探面临的困难, 即砂体厚度薄、泥质含量高、储层物性差、尖灭点识别困难。“新区、新类型”的岩性圈闭研究对于珠江口盆地的油气勘探具有重要意义。恩平凹陷新近系处于古珠江三角洲河道延伸方向的正前方, 沉积环境较为开阔, 具有独特的沉积特征。目前在恩平凹陷南北两侧隆起带中浅层相继有构造油气藏发现, 而岩性油气藏研究尚浅, 从中长期的勘探部署考虑, 需要加快岩性圈闭领域的研究。

收稿日期: 2021-08-31
资助项目: 中海石油(中国)有限公司项目“珠江口盆地东部早—中中新世(T60—T35)浅水区精细沉积相及多成因岩性圈闭潜力”(CCL2021SZPS0113)
作者简介: 李智高(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气勘探和地质方面的研究工作. E-mail: lizhg34@cnooc.com.cn

1　区域地质背景

研究区位于南海北部陆缘珠江口盆地珠一坳陷西部的恩平凹陷, 主体为北西断、东南超的低角度半地堑, 总面积约为 5 000 km^2, 包括恩平 17 洼、恩平 18 洼和恩平 12 洼等 3 个次级洼陷。以恩平 17 洼为中心, 可划分为中央翘倾构造带、北部古隆起披覆构造带、西部古隆起构造带、南部翘倾构造带以及东部的番禺 7 翘倾构造带等 5 个次级构造带[5]。恩平 17 洼文昌组中深湖相泥岩为主力烃源岩层系, 油气沿深大断裂、构造脊

以及次级断层运移至北部古隆起披覆构造带和南部翘倾构造带的珠江组和韩江组，形成 2 个成藏有利区。

研究区及周边经历了复杂的构造-沉积演化历史。在约 30 Ma，南海运动的发生标志着南海海底扩张的正式开始，南海北部陆缘整体进入裂后拗陷期[6-7]，从此海水逐渐侵入南海北部，奠定了以海相环境为主的沉积格局。拗陷期最早沉积的地层为珠海组，主要由近岸沉积体系组成。随后，约 23.8 Ma 发生了白云运动[8]，导致陆架坡折的向北跃迁和古珠江三角洲的整体向北后撤，同时期沉积的珠江组（23.8～16.5 Ma）主要由三角洲和浅海沉积体系构成。在约 16.5 Ma，伴随南海扩张运动的停止，盆地海侵作用进一步加剧，沉积了浅海相韩江组。自 13.8 Ma，南海北部发生了广泛的新构造运动，该时期内沉积的粤海组以及之后沉积的万山组总体上以浅海相细粒沉积为主[9]。

2 数据和方法

本次研究的目的层主要包括珠江组上段—韩江组下段（MFS19.1-SB13.8），所用资料包括三维地震资料、钻测井资料、岩芯和岩矿资料等。三维地震工区面积约为 5 000 km^2（位置见图 1），时间采样率为 2 ms，在目的层段地震资料有效频宽约为 10～80 Hz，主频约为 40 Hz，地震资料分辨率较高，满足研究需求。针对层序地层格架，在前人三级层序格架划分的基础上，通过海进界面的识别和追踪，对层序开展进一步的体系域划分。在层序地层格架基础上，运用地震地貌学和地震沉积学的研究手段[10-12]，对恩平凹陷新近系的沉积特征进行精细刻画，进而分析不同体系域的沉积特征，总结恩平凹陷的岩性圈闭发育模式，并结合构造背景及区域含砂率分析优选岩性圈闭的有利发育区。

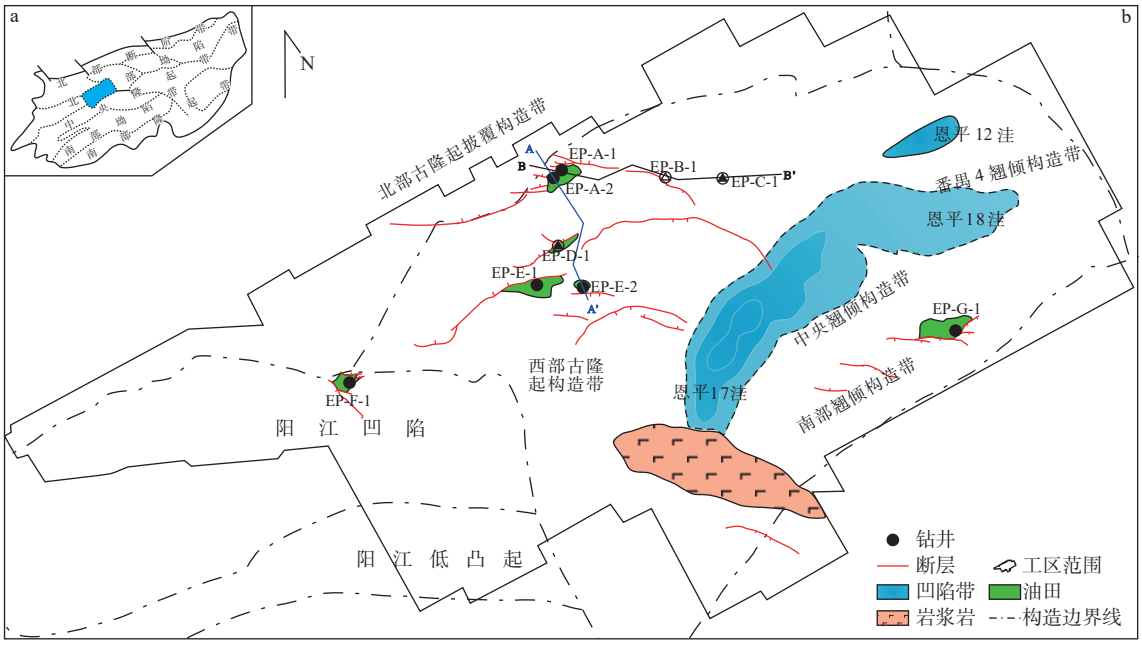


图 1 珠江口盆地构造区划及研究区位置

Fig.1 Tectonic division of the Pearl River Mouth Basin and the location of the study area

3 结果

3.1 层序地层划分方案

经过多年的研究积累，研究人员在恩平凹陷新近系已经建立了三级层序格架。珠江组可以分为下段、上段，其分界面为 MFS19.1，表现为一套稳定的泥岩段，可在区域上进行追踪对比。珠江组下段包括一个半三级层序，即 SQ23.03 与 SQ21-TST。珠江组上段可以划分为三个半三级层序，分别为 SQ21-HST、SQ18、SQ17.25、SQ17.1。韩江组亦可分为下段和上段，其分界面为 SB13.8。前人研究认为，13.8 Ma 时期产生了重大的气候变化，大体对应于南极冰盖的重新扩大增生和由此带来的全球气候变冷事件。韩江组下段包括 3 个三级层序，即

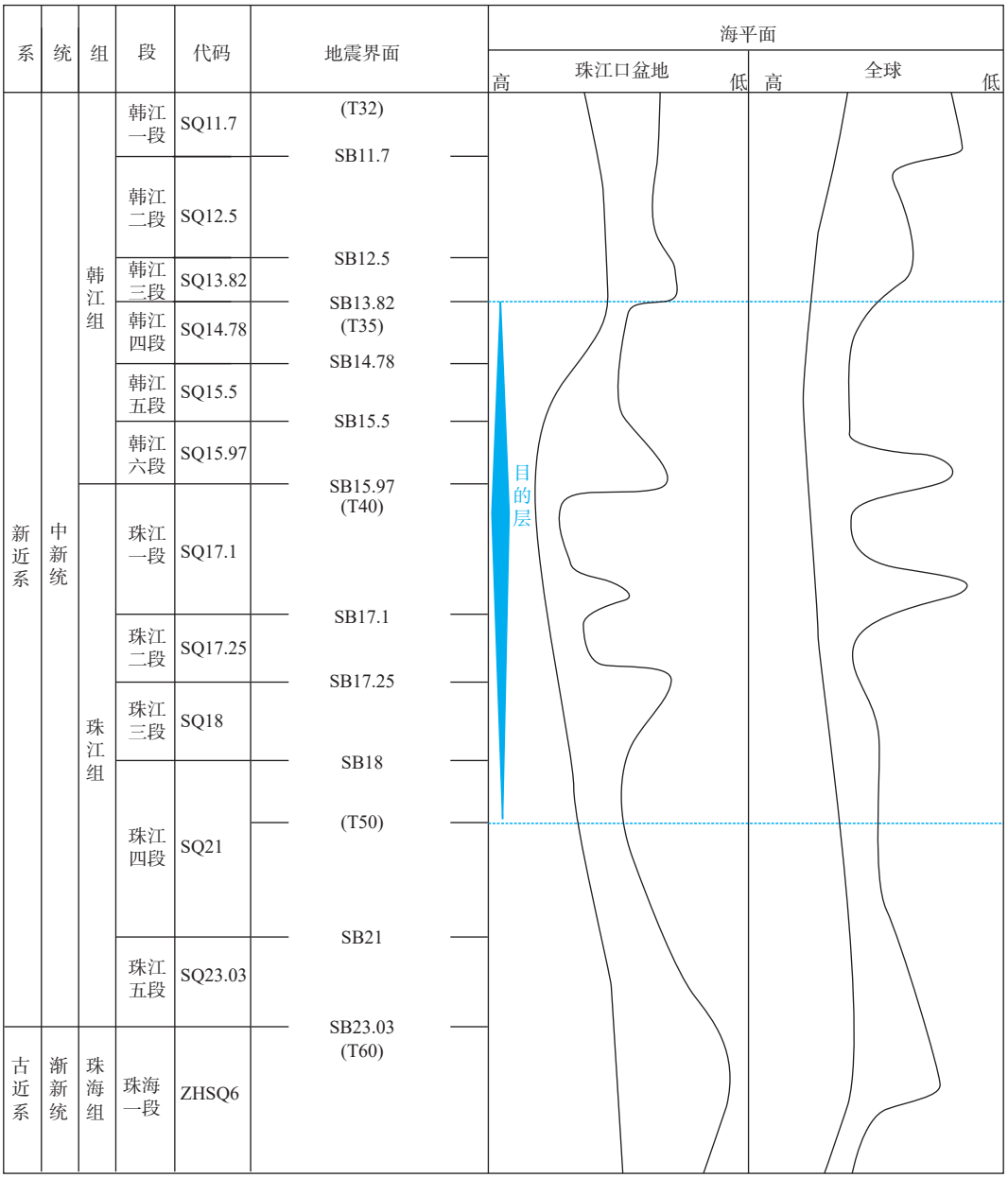


图 2　本文采用的地层划分方案

Fig.2　Stratigraphic division used for this study

SQ15.97、SQ15.5、SQ14.78; 韩江组上段包括 3 个三级层序, 即 SQ13.8、SQ12.5 以及 SQ11.7(图 2)。根据前人区域沉积及成藏认识, 珠江组上段-韩江组下段含砂率适中, 成藏条件优越, 适合岩性圈闭的发育。因此, 此次研究的目的层段为珠江组上段—韩江组下段。

对于砂体级别的岩性圈闭勘探, 三级层序划分精度尚且不足。在三级层序内进行更高精细层序的划分, 界面的选择是关键。近年来, 层序地层的研究厘定了 7 种主要的层序地层学界面[13], 但并非所有的界面类型都可以精确识别, 且部分界面分布范围局限, 并不适用于区域地层对比。大量研究表明, 在陆架区三角洲沉积体系内, 以三级层序地层格架内的海泛面(即最大海泛面)为界所划分的次级层序地层单元可以作为高精度层序地层格架中的基本地层单位(图 3)。其主要具有以下优势: ①海泛面较容易追踪对比; ②以一个海泛面为开始到下一个海泛面结束代表 1 期三角洲的进积和退积, 以及 1 个比较完整的沉积幕; ③在这个四级层序内具备了相对比较完整的储盖组合; ④海泛面附近的海泛泥岩是岩性圈闭勘探最为关注的[14]。

3.2　高精度层序地层格架的建立

最大海泛面是一个层序内部最大海侵所能达

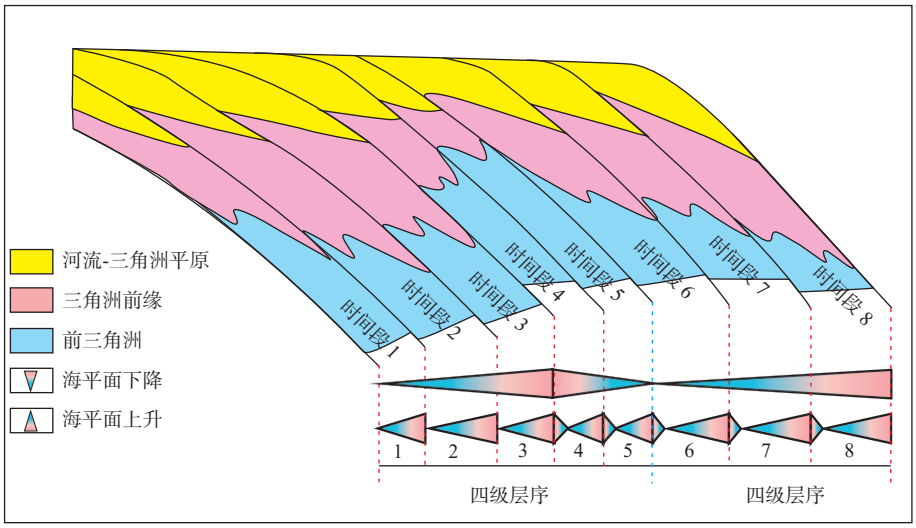


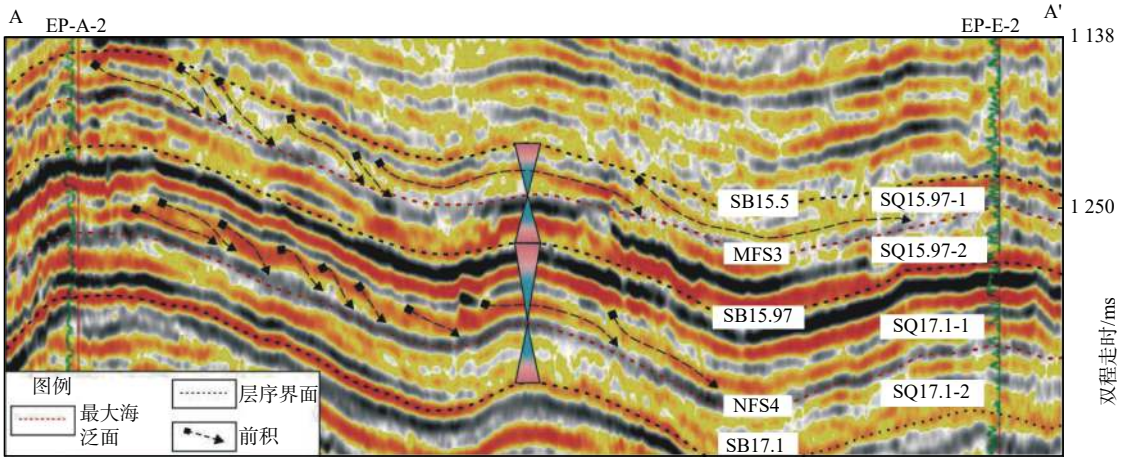
图 3 恩平凹陷四级层序划分方案[14]

Fig.3 Four-order division in sequential stratigraphy of the Enping Sag[14]

到的位置时所形成的界面，其下方为海侵体系域，上覆为高位体系域，高位域的前积层前端常下超于最大海泛面之上。本文以 SQ15.97 层序为例来说明研究层段最大海泛面的识别标志。SQ15.97 层序位于韩江组底部，其底界面为 SB15.97，顶界面为 SB15.5。在顺物源方向的地震剖面上，可见最大海泛面标定于波谷，其上常常被高位三角洲所下超，表现为典型的下超面(图 4)。最大海泛面在钻井上总体为正反旋回的分界面，位于泥岩段 GR 曲线的最大值处，泥岩段厚度 2～8 m，分布广泛(图 5)。无论是钻井资料还是地震资料，最大海泛面均特征明显，易于识别，且对应关系良好。通过对目的层段最大海泛面的系统追踪，建立了恩平凹陷珠江组上段—韩江组下段的高精度层序格架，在 6 个三级层序和 1 个高位体系域中识别出 6 个最大海泛面和 1 个海泛面，共划分出了 14 个四级层序(图 6)。将有利的岩性目标砂体纳入四级层序格架中，赋予其地质意义，将为砂体成因的分析及展布的预测奠定基础。

3.3 高精度层序地层格架下的砂体发育特征

在四级层序格架的约束下，本次研究借用 PaleoScan 软件开展恩平凹陷三维区人工约束下的全三维地震资料解释，并采用地震沉积学的分析思路，制作地层切片，对恩平北部珠江组上段和韩江组下段的砂体沉积特征及展布规律开展了研究。本次研究主要提取了研究区主要目的层段的均方根振幅属性切片、最小振幅属性切片以及 RGB 融合属性切片。分析认为，均方根振幅属性切片与岩性对应关系好，能较好地反映砂体展布特征。强振幅



剖面位置见图 1

图 4 最大海泛面地震反射特征

Fig.4 Seismic reflection characteristics at the maximum flooding surface

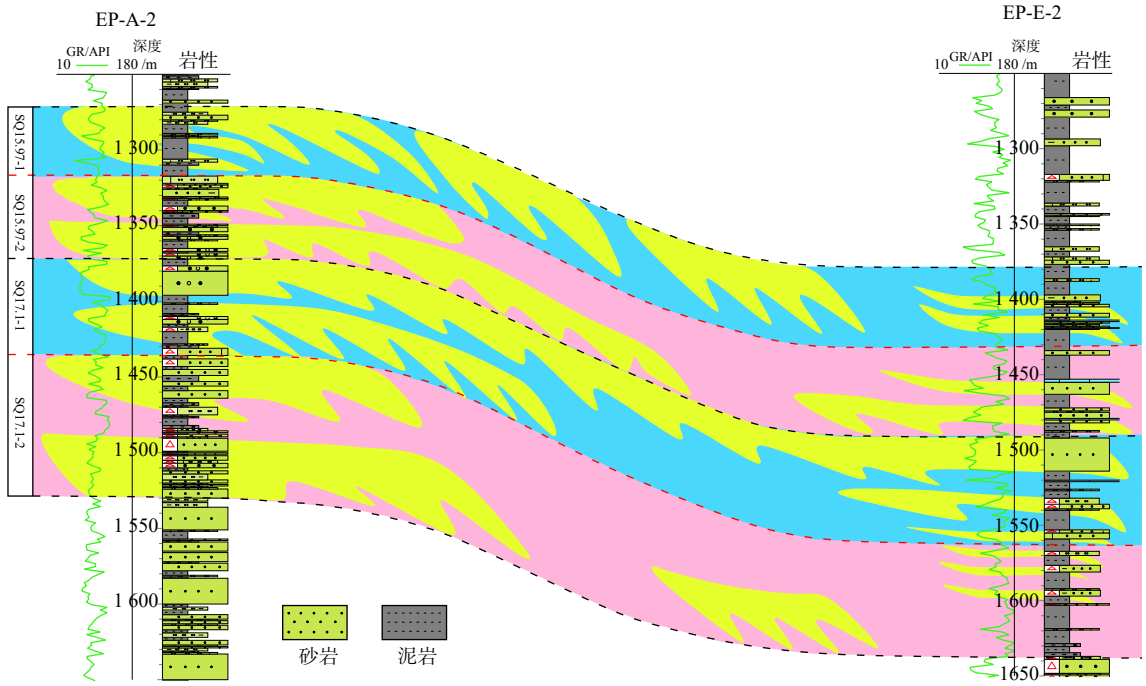


图 5　四级层序下的地层对比剖面

Fig.5　Stratigraphic correlation of the four-order sequence

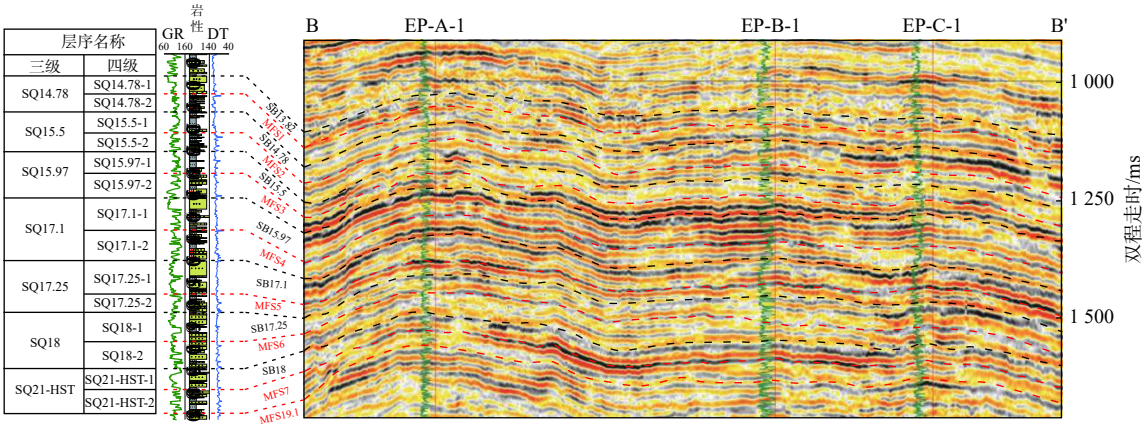


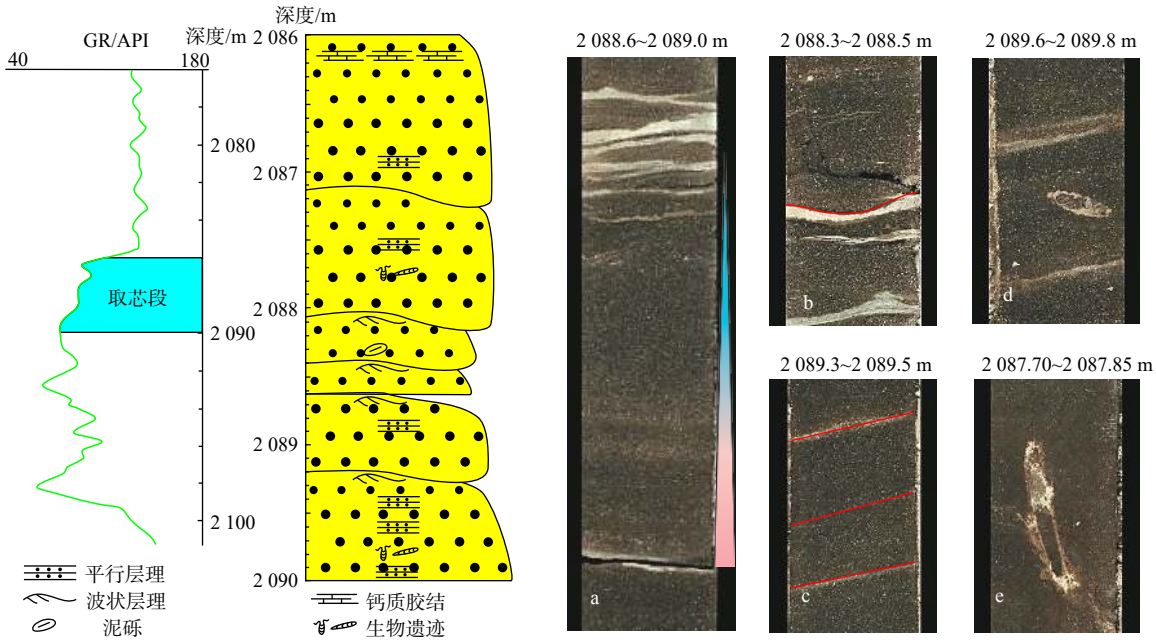
图 6　恩平凹陷四级层序划分结果

Fig.6　The four-order division in sequential stratigraphy of the Enping Sag

(均方根振幅属性切片中的红色)常代表砂岩, 弱振幅(蓝色)代表泥岩。

研究发现, 恩平凹陷以三角洲分流河道沉积发育为典型特征。在恩平凹陷新近系的地震剖面上可见明显的强弱振幅突变现象(图 6), 与珠一坳陷其他凹陷具有显著区别[15-17]。钻井资料和岩芯资料揭示, 地震上的强振幅处在测井曲线上常表现为箱型、倒漏斗型的砂体, 厚度 8～20 m, 而弱振幅处为泥岩。岩芯资料指示强振幅处砂体岩性一般为粗-细砂岩, 砂体底部发育冲刷面及平行层理, 顶部发育波状层理, 且具有明显的向上变细的正韵律(图 7)。对多套砂体的均方根振幅属性切片的地震地貌学分析认为, 其在平面上表现为明显的河道形态。单期河道规模有限, 宽度一般为 0.5～1.2 km(图 8a、b), 而由单期河道切割迁移形成的复合河道规模大, 最宽处可达 12.5 km, 平均 8 km(图 8a、c、d)。综合分析认为, 这些强振幅为分流河道沉积, 强弱振幅的突变代表“河道砂”与“间湾泥”之间的突变。

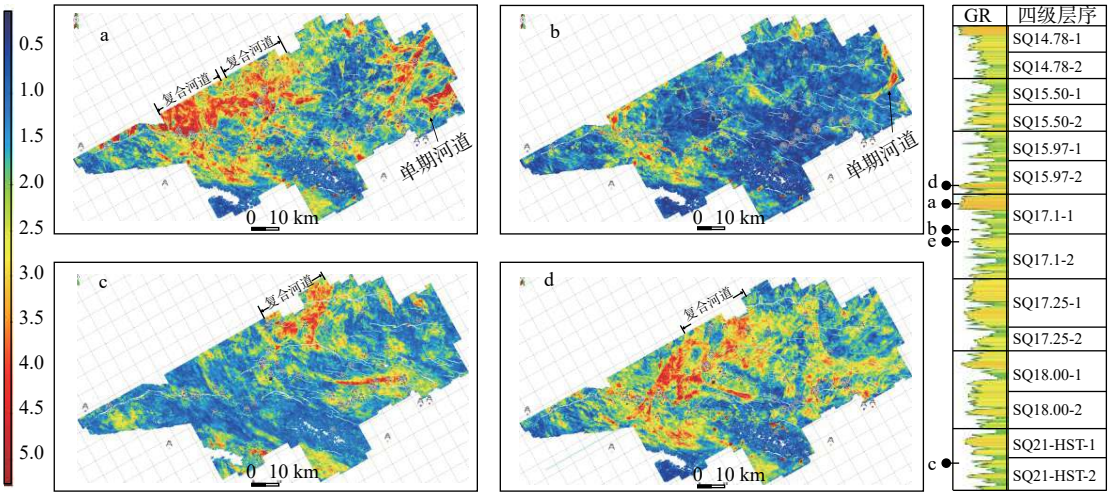
通过对四级层序格架内砂体发育规律的研究, 发现砂体展布规律与体系域具有较好的耦合关系。海侵体系域沉积早期, 海平面相对较低, 可容空间有限, 分流河道持续向盆地推进较远距离, 并在平面上频繁改道, 形成大规模的复合河道沉积(图 8d)。由于河道频繁的切割、迁移, 此时恩平北带复合河道相对连片, 而恩平南带位于物源推进方向的末端, 河道相对分叉, 孤立性较强。海侵体系域沉积晚期,



(a) 正韵律；(b) 冲刷面；(c) 平行层理；(d-e) 生物遗迹

图 7 EP-F-1 井分流河道砂体测井响应及岩心特征

Fig.7 Logging data and core characteristic of distributary channels in Well EP-F-1



(a) 高位域晚期均方根振幅属性切片，以 SQ17.1-1 为例；(b) 高位域早期均方根振幅属性切片，以 SQ17.1-1 为例；
(c) 海侵域晚期均方根振幅属性切片特征，以 SQ21-HST-1 为例；(d) 海侵域早期均方根振幅属性切片特征，以 SQ15.97-2 为例

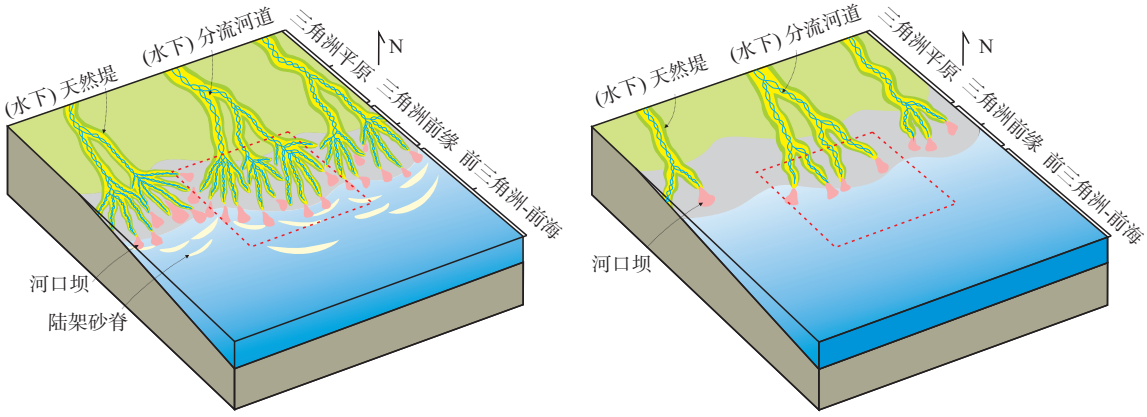
图 8 均方根振幅属性切片所展示的恩平凹陷不同海平面背景下的沉积特征

Fig.8 The depositional characteristics of the Enping Sag in a different sea level status shown by the RMS amplitude attribute slice

海平面持续上升，此时三角洲整体后退，复合河道主要发育于恩平北带(图 8c)。而在河道的前端，由于强的波浪水流的冲刷改造，发育大量浪成砂脊，围绕河道复合体呈弧形分布。

高位体系域发育早期，海平面相对较高并持续缓慢上升，而物源供应能力相对较弱，可容空间大，此时恩平凹陷整体富泥，局部发育具有一定延伸距离的孤立河道(图 8b)。高位体系域发育晚期，三角洲物源能力供应增强，在地震剖面上可看到明显的前积层。此时河道频繁迁移改道，形成连片叠置的复合河道砂体(图 8a)。

总体来看，海侵域晚期和高位域早期的河道砂体规模适中，平面上相对孤立；且含砂率较低，约 30%，纵向上切叠关系弱，更适合于岩性圈闭的发育。结合本地区岩性圈闭勘探的实际需要，建立了海侵域晚期和高位域早期沉积模式。海侵域晚期复合河道规模相对较小，主要发育于研究区北部，在河道的前端发育大量的河口坝以及浪成砂脊(图 9a)。高位域早期，研究区整体富泥，局部发育具有一定延伸距离的孤立河道及河口坝砂体(图 9b)。海侵



(a) 海侵域晚期沉积模式　　(b) 高位域沉积模式

图 9　恩平凹陷不同时期沉积模式

Fig.9　The depositional model of the Enping Sag in different periods

域晚期的复合河道及波浪改造形成的陆架砂脊具有一定的岩性圈闭勘探潜力。而海侵域早期和高位域晚期的河道由于频繁的迁移改道, 砂体平面上连片, 纵向上互相切叠, 油气容易沿叠置砂体漏失。因此, 最大海泛面上下为恩平凹陷开展岩性圈闭勘探的有利层段。

4　对岩性圈闭勘探的启示

4.1　河道型岩性圈闭发育模式

珠一坳陷传统的岩性圈闭勘探类型为上倾尖灭型, 即古珠江三角洲前缘末端的河口坝、席状砂等薄层砂体在新构造运动影响下发生抬升, 沿上倾方向与构造等值线叠合构成的圈闭。目前, 珠一坳陷储量最大的岩性油藏——惠州 25-8 岩性油藏, 即为此类型。但由于该类型圈闭位于三角洲沉积体末端, 其砂体厚度薄, 泥质含量高, 储层物性差, 尖灭点识别困难, 勘探难度越来越大。本次研究发现恩平凹陷三角洲分流河道沉积发育, 且“河道砂”与“间湾泥”之间的突变边界明显, 岩性突变边界可与构造等值线叠合形成“河道型”岩性圈闭。同时, 河道砂体具有厚度大、物性好、产能高、尖灭点易于识别等特征, 有望成为珠一坳陷新的岩性圈闭勘探类型。

4.2　有利勘探区带

恩平凹陷发育 2 个继承性的隆起区, 包括恩平凹陷北部古隆起披覆构造带和恩平南部翘倾构造带, 恩平 17 洼中深湖相烃源岩生成的油气可沿断层-构造脊运移至 2 个构造带的中浅层, 并在构造或岩性圈闭中成藏。目前在这 2 个构造带的高部位已发现多个构造油气田, 包括恩平北带的恩平 A 油田、恩平 E 油田以及恩平南带的恩 G 油田等(图 1)。盆地勘探经验表明[18-19], 岩性圈闭的勘探必须坚持“成藏驱动”, 即在油气运移路径之上寻找有效的岩性砂体。本区油气运移路径之上的“河道型”岩性圈闭具有较大的勘探潜力。根据该地区已经证实的油气运移路径[20-21], 指出 3 个有利的“河道型”岩性圈闭勘探区, 即恩平 A 油田东侧斜坡区、恩平 E 油田东侧斜坡区以及恩平 G 油田西侧斜坡区。在 3 个有利区各三级层序内部最大海泛面上下开展有利砂体的搜索, 指出了 2 个有利勘探目标, 包括恩平 E 油田东侧斜坡(图 10 中 a-a'剖面所示)和恩平 G 油田西侧斜坡上的 ZJ130 河道砂体(图 10 中 b-b'剖面所示), 该砂体位于珠江组一段海侵域晚期, 其上部被珠江组一段的最大海泛面覆盖, 圈闭发育条件优越, 有望开辟珠江口盆地岩性圈闭勘探新领域。

5　结论

(1)以三级层序内部的最大海泛面为界, 建立了恩平凹陷珠江组上段—韩江组下段的四级层序格架, 提升了研究区层序划分精度。

(2) 恩平凹陷新近系以分流河道普遍发育为典型特征, 且高精度层序划分方案对砂体发育规律具有较好的约束作用, 最大海泛面上下更适合于河道型岩性圈闭的发育。

(3) 指出恩平凹陷 3 个有利的岩性圈闭勘探区带是恩平 A 油田东侧斜坡区、恩平 E 油田东侧斜

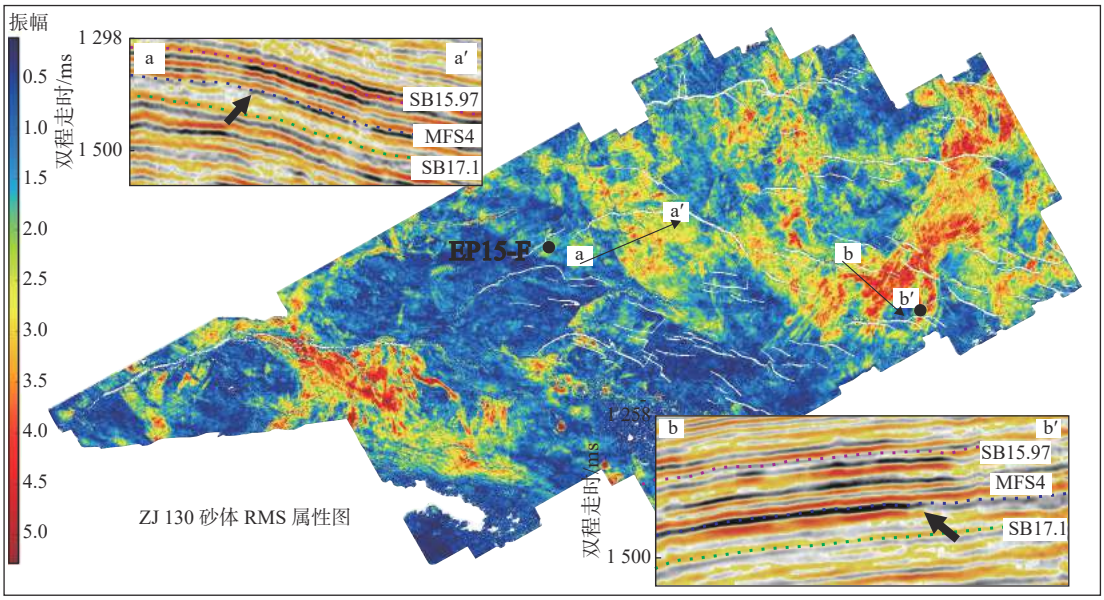


图 10 恩平凹陷 ZJ130 砂体地震剖面特征及 RMS 属性图

Fig.10 Seismic profiles and RMS attribute of the ZJ130 sand body in the Enping Sag

坡区以及恩平 G 油田西侧斜坡区，提出 2 个有利的勘探目标，即恩平 E 油田东侧斜坡和恩平 G 油田西侧斜坡上的 ZJ130 河道砂体，为该地区下一步的岩性圈闭勘探打下了良好的基础。

参考文献：

[1] 丁琳, 杜家元, 张向涛, 等. 珠江口盆地岩性油气藏类型及形成条件：以惠西南地区中新统珠江组为例[J]. 海相油气地质, 2017, 22(2): 67-72.

[2] 朱明, 陈维涛, 杜家元, 等. 珠江口盆地惠西南地区新近系岩性圈闭形成条件及发育类型[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(6): 62-69.

[3] 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 等. 珠江口盆地惠州地区珠江组控砂机制及地层-岩性圈闭发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 449-458.

[4] 丁琳, 杜家元, 张昌民, 等. 古珠江三角洲岩性油藏主控因素分析：以惠西南地区为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 96-102.

[5] 许新明, 陈胜红, 王福国, 等. 珠江口盆地恩平凹陷断层特征及其对新近系油气成藏的影响[J]. 现代地质, 2014, 28(3): 543-550.

[6] 龚再升, 王国纯. 中国近海油气资源潜力新认识[J]. 中国海上油气地质, 1997, 11(1): 1-12.

[7] SUN Z, ZHONG Z H, KEEP M, et al. 3D analogue modeling of the South China Sea: a discussion on breakup pattern[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34: 544-556.

[8] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动：南海北部渐新统—中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 145-151.

[9] 何敏, 朱伟林, 吴哲, 等. 珠江口盆地新构造运动特征与油气成藏[J]. 中国海上油气, 2019, 31(5): 9-20.

[10] 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.

[11] ZENG H, HENTZ T F. High-frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger shoal area, offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88: 153-174.

[12] BOURGET J, AINSWORTH R B, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and geomorphology of a tide or wave dominated shelf-edge delta (NW Australia): process-based classification from 3D seismic attributes and implications for the prediction of deep-water sands[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57: 359-384.

[13] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2006: 375 .

[14] 芮志锋, 林畅松, 郭佳, 等. 珠江口盆地惠州地区珠江组砂体上倾尖灭的地质-地球物理“逐级预测”方法[J]. 现代地质, 2019, 33(6): 1229-1240.

[15] 米立军, 张向涛, 丁琳, 等. 海上成熟探区中浅层岩性油气藏分布特点与勘探策略：以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(6): 10-19.

[16] 杜家元, 陈维涛, 张昌民. 珠江口盆地新近系地层岩性圈闭形成条件及发育规律分析[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 555-561.

[17] 张向涛, 杜家元, 丁琳, 等. 不同水动力机制下砂体沉积响应及岩性圈闭形成模式[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 105-114.

[18] 杜家元, 施和生, 丁琳, 等. 珠江口盆地(东部)地层岩性油气藏勘探有利区域分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26(3): 30-36,55.

[19] 陈维涛, 杜家元, 施和生, 等. 珠江口盆地惠西南地区复式油气成藏特征及富集规律[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 194-199,208.

[20] 朱定伟, 彭光荣, 张忠涛, 等. 油气“穿断运移”模式、评价方法与应用: 以珠江口盆地恩平凹陷为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 140-147.

[21] 赵鹏, 彭光荣, 吴静, 等. 油气穿越未成岩断裂运移富集成藏模式与主控因素: 以珠江口盆地恩平凹陷为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 148-157.

Sedimentary characteristics and potential of channel-type lithologic traps in Miocene in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

LI Zhigao, DING Lin, DU Jiayuan, LI Xiao, WU Yuxiang, LI Xiaoping, LIU Dongqing

（Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518054, China）

Abstract: Commercial petrol resources have been discovered in the middle and shallow layers of Zhuyi Depression in the Pearl River Mouth Basin in recent years. Although structural traps are still the main ones, the evaluation of related lithologic targets in the paleo Pearl River delta needs to be carried out urgently. Based on high-quality well and seismic data, a fourth-order sequence framework between T50-T35 in Enping Sag is established with the upper member of Zhujiang Formation and the lower member of Hanjiang Formation (T50-T35) in Enping Sag as the main target layer, using a set of third-order sequence boundary and the maximum flooding surface as the boundary. With the constraint of high-resolution sequence stratigraphic framework, the sedimentary characteristics of distributary channel in Enping Sag are further revealed by seismic sedimentology method, and the channel sedimentary models under different sea-level backgrounds are established: the channel scale is larger in the early stage of transgression and the end of highstand, the extension distance is longer, and often developed continuously on the plane; in the late transgression and early highstand, the scale of the river channel moderate, the plane isolation is stronger, and the front edge is often transformed by waves. It is found that different types of channel sand bodies combined with specific structural background can develop "channel cutting" lithologic traps, and about the maximum flooding surface are more suitable for the development of related traps. Therefore, three favorable areas for lithologic trap: east slope of Enping A Oilfield , east slope of Enping E Oilfield and west slop of Enping G Oilfield. Two favorable exploration targets are proposed, which provided new ideas for lithologic reservoir exploration in the basin.

Key words: Enping Sag; genetic sequence stratigraphy; distributary channel; lithologic traps; Pearl River Mouth Basin