李智高,丁琳,李小平,等.基于沉积层序理论的高精度层序划分方案及其对岩性圈闭的预测——以珠江口盆地恩平凹陷新近系为例[J]. 海洋地质前沿,2023,39(5):73-82.

LI Zhigao, DING Lin, LI Xiaoping, et al. Division of high-resolution stratigraphy in sedimentary sequence theory and prediction of lithological traps: a case study of the Neogene in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 73-82.

# 基于沉积层序理论的高精度层序划分方案 及其对岩性圈闭的预测

——以珠江口盆地恩平凹陷新近系为例

李智高,丁琳,李小平,李潇,吴宇翔

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院,深圳 518054)

摘 要:南海北部珠江口盆地恩平凹陷大面积三维地震资料揭示了新近系类型丰富的砂体, 在古珠江三角洲演化及相带迁移的控制下形成了较好的岩性圈闭发育条件。近年来,凹陷内 发现的多个构造-岩性圈闭均与河道砂体相关。但在已有的层序地层划分方案中,河道砂体 的成因、分类和展布特征与体系域的耦合关系差,砂体发育规律不明,制约了岩性圈闭的勘探 效果。基于沉积层序理论,利用大范围井震资料,系统厘定了恩平凹陷珠江组一段-韩江组六 段的高精度层序地层框架,并在此基础上开展了精细的三维地震沉积学解剖。分析结果显示, 目的层发育的大型辫状河道、小型曲流河道和中型曲流河道,分别与低位、海侵和高位等特定 体系域具有密切的耦合发育关系,进而建立了层序格架对河道砂体的有效预测模式,系统指 明了凹陷不同区域、不同体系域内岩性圈闭的发育潜力及有利区。本文相关认识对其他海相 三角洲盆地岩性圈闭勘探具有启示作用。

关键词:恩平凹陷; 沉积层序; 河道分类; 岩性圈闭 中图分类号:P736.2; P744.4 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.085

### 0 引言

岩性圈闭是珠江口盆地重要的圈闭类型,经过四十余年的勘探,目前珠江口盆地已发现多个商业型岩性油气藏,为珠江口盆地东部连续20余年产量超千万吨做出了突出贡献<sup>[14]</sup>。珠江口盆地浅水区已发现的岩性圈闭主要集中于惠州凹陷,岩性圈闭类型主要为上倾尖灭型<sup>[5-10]</sup>。由于"上倾尖灭型"砂体多位于三角洲主体沉积末端,砂体粒度细、泥

#### 收稿日期: 2022-03-30

资助项目:中海石油(中国)有限公司项目"恩平凹陷北部珠江组上段-韩 江组下段地震沉积学综合研究""珠江口盆地东部早一中中新世(T60-T35) 浅水区精细沉积相及多成因岩性圈闭潜力"(CCL2019SZPS0327, CCL2021SZPS0113)

**作者简介:** 李智高(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气勘探与地质 方面的研究工作. E-mail: lizhg34@cnooc.com.cn 质含量高,储层厚度薄、物性差,尖灭点识别难度大,随着此类型圈闭勘探难度的不断增大,亟需开展新 区新类型岩性圈闭的探索。

作为近年来珠江口盆地勘探的热点区域,恩平 凹陷新近系具有复杂的层序-沉积演化背景。近期, 研究人员利用大面积三维地震资料,在恩平凹陷新 近纪地层内识别出了大量的河道型沉积体系。已 有勘探实践表明,河道砂体与特定的构造背景叠合 可形成河道型岩性圈闭<sup>[11-12]</sup>,该圈闭类型将可能成 为珠江口盆地岩性圈闭的重要勘探方向。由于研 究人员对恩平凹陷新近系河道的成因、分类和砂体 展布规律等方面尚缺少系统认识,该类型岩性圈闭 的勘探尚未获得预期效果。本文通过引入高精度 沉积层序理论体系,对恩平凹陷新近系广泛发育的 各类河道沉积特征进行研究,深入探讨了恩平凹陷 河道的成因、分类及展布规律,并系统总结了各体 系域河道砂体的岩性圈闭潜力,对本地区及其他类 似沉积背景地区的岩性圈闭勘探具有一定指导意义。

#### 1 区域地质背景

恩平凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷西端,为"北西 断-东南超"的低角度半地堑,总面积约为5000 km<sup>2</sup>, 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、 北部古隆起披覆、西部古隆起、南部翘倾及东部番 禺7翘倾等5个次级构造带<sup>[13]</sup>(图1a)。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。

在西北侧古珠江沉积体系的影响下,恩平凹陷新近系发育类型丰富的河道砂体。这些砂体与特定的构造背景叠合可形成河道型岩性圈闭。勘探实践表明,恩平凹陷珠江组上段到韩江组下段(MFS19.1-SB13.82)含砂率较低(图 1b),约为20%~40%,有利于岩性圈闭的发育。因此,本文选





图1 珠江口盆地恩平凹陷区域概况

Fig.1 Regional geological map of the Enping Sag, the Pearl River Mouth Basin

取恩平凹陷珠江组上段到韩江组下段为主要目的 层,开展高精度层序地层学及砂体沉积特征研究。

2 恩平凹陷新近系高精度层序地层学 研究

目前,珠江口盆地广泛采用成因层序的方案对新 近系进行四级层序划分,即通过最大海泛面将一个 三级层序划分为海侵域(TST)和高位域(HST)<sup>[4,8-9]</sup>, 在此框架下,开展区域地层对比及沉积演化规律分 析,取得了一定效果。但是随着勘探进入砂体级别, 暴露出此种划分方案一些难以解决的问题,比如在 海侵域和高位域均发育大量大规模辫状河道,河道 发育规律和沉积成因不明。此外,该方案划分精度 偏低,制约了河道型岩性圈闭的勘探。

众所周知, 层序地层学主要有 3 大流派, 包括以 GALLOWAY 为代表的成因层序模式、以 VAIL 为代 表的沉积层序模式及以 EMBRY 和 JOHANNESEN 为代表的 T-R 层序模式<sup>[14-15]</sup>。近年来, 虽然 3 种理 论模型均各自发展, 但是相比另 2 种模式, 发源于 石油工业界的沉积层序模型仍是当今海相盆地层 序地层划分的主流方案。其理论体系完备、概念清 晰、地层叠置样式划分标准明确, 更适合于海相三 角洲高精度层序格架的划分, 且其可扩展性强, 足 以应对各精度的层序划分<sup>[16-17]</sup>。

沉积层序通过最大海退面(MRS)及最大海泛 面(MFS)将层序细分为低位体系域(LST)、海侵体 系域以及高位体系域(图 2)。层序界面(SB)在钻井 上对应于箱型砂体的底部,在地震剖面上对应于波 谷强振幅;最大海退面在钻井上对应于箱型砂体向 上变细的部位,代表着海侵作用对砂体改造的起点; 最大海泛面在钻井上对应于泥岩最大伽马(GR)处, 在地震剖面上常与最大海退面重合,标定于零相位。 高频海泛面(FS)在钻井上主要表现为较厚准层序 或准层序组的顶界面(图 3、4)。







剖面方向见图1

图 3 恩平凹陷 MFS19.1-SB13.82 高精度层序划分剖面

Fig.3 High-resolution stratigraphic sequence framework of MFS19.1-SB13.82, Enping Sag

以沉积层序理论为指导,以地层叠置样式为准 绳,以 SB、MRS、MFS 和 FS 作为4种界面类型,在 恩平凹陷珠江组上段--韩江组下段井震结合解释了 37个不同类型的层序地层学界面,共识别出 24个



Fig.4 Division scheme of high-resolution sequence and representative seismic-well section across the Enping Sag

四级层序单元(图 3、4a)。从划分结果来看,沉积 层序对砂体的旋回性及叠置样式具有较好的约束 作用。低位体系域主要发育箱型或倒漏斗形中一粗 砂岩,砂体整体呈正韵律,以垂向加积为主;高位体 系域主要发育漏斗形的细一粉砂岩,砂体整体呈反 韵律,以进积式叠置为主(图 4b、c)。

## 3 高精度沉积层序格架下的河道砂体 类型及发育模式

在高精度沉积层序方案的约束下,利用 Paleoscan 软件开展全三维解释,并结合均方根振幅属性切片、 最小振幅属性切片以及分频融合切片等,开展了地 震沉积学的研究。研究发现,恩平凹陷新近系发育 了丰富类型的河道,且河道类型与体系域具有较好 的耦合关系(图 5)。

根据钻井揭示的河道砂体厚度、地层切片展示 的河道宽度及延伸长度、岩芯上沉积构造所揭示的 水动力强度及所处体系域的含砂率,将河道划分为 低位域大规模辫状河道、海侵域中小规模曲流河道 和高位域等规模曲流河道 3 种类型。低位域主要 由大规模的辫状河流的砂砾质沉积物组成,河道的 彼此切割造成在垂向上互相叠覆、平面上连片分布的 砂体。辫状河道延伸较远,可贯穿整个工区,延伸 长度>30 km,曲率较低约1.0~1.3。单只河道较窄, 宽约0.5 km,但河道迁移摆动形成的辫状河道复合 体规模较大,最宽处可达10 km,一般为3~5 km (图5a、b)。高位域由中等规模的曲流河道砂体和 朵状的河口坝砂体以及间湾泥组成,单个曲流河道 砂体厚度达5~10 m,宽度介于海侵域河道和低位 域河道之间,可延伸数公里(图5c),曲率为1.4~1.7。 海侵域由中小规模曲流河的砂质沉积物和间湾泥 组成,单个曲流河道厚度为3~8 m,宽度数百米,延 伸一般<5 km。河道弯曲度高,曲率约2.5~3,在 分频属性切片上,可看到典型的曲流河截弯取直形 成的废弃河道(图5d)。

在各类型河道沉积特征研究的基础上,结合高 精度层序划分结果,总结了在沉积层序框架下的河 道沉积模式(图 6)。恩平凹陷位于内陆架,低位域 时海平面下降导致河流均衡面向下调整<sup>[18]</sup>,在一定 地貌坡度的控制下可形成可容空间,沉积大规模的 箱型辫状河道砂体。由于可容空间有限,河道频繁





Fig.5 Various fluvial styles in different system tracts in the Neocene strata of the Enping Sag

改道,导致河道砂体侧向和垂向的切叠、连片;海侵 域时陆架区被海水覆盖,物源供给强度较弱,形成 规模较小的高弯度曲流河道;高位域物源供应充足, 形成了较大规模的曲流河道。

### 4 恩平凹陷河道型岩性圈闭潜力

通过系统统计各体系域的河道类型、砂体厚度、 含砂率、砂体水动力、河道规模和河道类型等,总结 了各类型河道的岩性圈闭潜力(表1)。低位域的大 规模辫状河道厚度大、水动力强,加之河道频繁改 道,导致河道砂体纵向叠置、平面连片,砂体的顶底 和侧向封堵条件均较差,其岩性圈闭勘探潜力也较 差。恩平北带某钻井的主力岩性目的层即为此类 型河道,因砂体纵向切割叠置导致顶底封条件差, 造成油气漏失而失利。而海侵域和高位域含砂率 较低,砂体纵向相对孤立,且平面上彼此分隔。海侵 域和高位域水动力相对较弱,砂体厚度中等,形成 的中等规模曲流河道具有较好的岩性圈闭勘探潜 力。此外,由于恩平凹陷南部翘倾构造带比北部古 隆起披覆构造带含砂率低,因此,恩平凹陷南带的 海侵域和高位域均具有更好的岩性圈闭勘探潜力。

在上述研究成果的指导下,在恩平南带某油田 (图1)开展了河道型岩性圈闭潜力的解剖。在精 细的沉积层序格架约束、预测下,厘定出3套有利 的河道砂体。其中,HJ650和ZJ130位于高位域, ZJ110位于海侵域(图7),均位于有利于岩性圈闭 发育的体系域之内。通过进一步的砂体精细对比, 发现 HJ650河道砂体已有开发井钻遇(5.5 m)且为 油层,而高部位钻井钻遇水层,证实了该砂体为河 道型岩性圈闭,由于前期对该砂体沉积模式认识不 清,未申报储量。通过本研究,应用河道型岩性圈闭 模式对该砂体进行了刻画,落实了其储量。ZJ110、 ZJ130和HJ650具有相似的沉积特征及岩性圈闭发



Fig.6 Sequential-sedimentary model of the Neocene strata in the Enping Sag

表 1 恩平凹陷新近系河道分类

Table 1 The fluvial channel classification of the Neocene strata in the Enpin	g Sag
---	-------

体系域	含砂率/%	河道类型	砂体厚度/m	沉积构造	水动力	河道规模	岩性圈闭潜力
HST	35~60	曲流河道	5~10	平行层理	中一强	中一大	好
TST	30~50	弯曲河道	3~8	波状层理平行层理	弱一中	中一小	好
LST	85~100	辫状河道	8~20	交错层理平行层理	强	大	差

育模式,也具有形成河道型岩性圈闭的潜力,相关 研究开辟了珠江口盆地"河道砂-间湾泥"岩性圈闭 勘探新领域。此外,恩平凹陷其他地区新近系丰富 的河道砂体也具有较大的岩性圈闭勘探潜力。

## 5 讨论

#### 5.1 低位体系域的发育条件

基于早期的沉积层序地层模型,部分研究珠江 口盆地海相层序地层学的学者提出低位体系域和 强制海退体系域(FSST)常常发育在陆架坡折之下, 而在陆架沉积背景下只发育海侵域和高位域。众 所周知,沉积可容空间是控制沉积体系发育、保存 的重要控制因素,在以冲积体系、河流体系和三角 洲平原体系为主的区域,其沉积可容空间主要受到 "河流均衡面"的控制。在河流沉积环境中,可容空 间主要包括现存地形和河流均衡面之间的地形差, 河流的长期侵蚀或沉积效应的最终效果是无限接 近于河流均衡面。当河流达到稳定的均衡面状态 时,理想情况下沿该界面将不存在明显的侵蚀和沉 积作用。而当均衡状态被打破时,河流将会通过侵 蚀和沉积作用或者通过改变河流弯曲度进行一系 列的调整,最终重新接近均衡状态。河流均衡面的 打破存在多种情况,例如海平面升降、物源条件改 变等。当海平面下降时,河流均衡面将向下调整. 进而物源区至岸线整个区域将长时间处于侵蚀状 态,剥蚀的沉积物通过各沉积体系的转运最终到达 深水区;相反,当海平面上升,基准面和河流均衡面 也要发生向上的调整,导致沉积作用的发生。值得 注意的是,在特定的构造背景下,相对海平面下降 时,在岸线之上仍可形成沉积作用的发生(图 8)。 因此,不论在何种环境下,低位体系域的沉积均存 在合理性。



(a)横切恩平南带典型河道地震剖面,强弱振幅突变代表河道砂体的尖灭;(b)HJ650 砂体 RMS 属性图,属性切片范围如图 1 南侧红框所示 图 7 恩平凹陷南部河道砂体地震反射及 RMS 属性特征

Fig.7 Typical seismic cross-section and the RMS map showing the channel sand bodies in the southern Enping Sag

#### 5.2 层序格架控制下岩性圈闭发育模式

经过对恩平凹陷北部和南部珠江组上段--韩江 组下段层序地层和沉积体系的分析,认为基于 SB、 MRS、MFS 和 FS 等 4 种界面的高精度层序地层分 析方法,对古珠江三角洲具有良好的适用性。围绕 这些界面,凹陷内发育了类型丰富的潜在岩性圈闭 类型,其总结如图9所示。低位体系域沉积期,大 型辫状河道较为发育,砂体总体厚度较大,但在 高可容空间条件下,部分层序内可被河道末期充填





Fig.8 Schematic diagram of the increase of sedimentary accommodation space caused by sea level falling

的泥岩覆盖,形成岩性圈闭(图 9-①),而低位三角 洲前缘也可在前方或后方形成砂体尖灭(图 9-②、 ③)。海侵和高位体系域总体发育在可容空间较高 时期,三角洲平原以孤立河道为主,在平原泥岩的 包围下形成河道型岩性圈闭,且相比较而言,高位 体系域的河道规模稍微大一些(图 9-⑤、⑦)。同时, 与低位体系域相比,海侵和高位体系域在三角洲前 缘砂体的前方和后方更易于形成尖灭,尤其是前缘 砂体尖灭型圈闭成为目前珠一坳陷内最优的岩性 圈闭类型(图 9-⑥、⑧)。此外,在高位体系域晚期, 部分前缘砂体可能受到层序界面的侵蚀,并被上覆 海侵泥岩覆盖,形成潜在的岩性圈闭(图 9-⑨),但 目前,该岩性圈闭类型尚待进一步探索。



Fig.9 Schematic model for the development of lithological traps in the high-resolution stratigraphic framework in the Enping Sag

## 6 结论

(1)基于沉积层序理论的新进展,以层序界面、 最大海退面、最大海泛面和高频海泛面为基本界面 类型,在恩平凹陷珠江组上段--韩江组下段实现了 高精度的层序地层划分,共识别出 24个四级层序 单元,相比于传统的成因层序划分方案,划分精度 显著提升。

(2)恩平凹陷新近系发育典型的辫状、小型和 弯曲河道砂体,并分别与高精度沉积层序划分方案 中的低位域、海侵域和高位域相对应。本次研究所 采用的层序划分方案对河道砂体的成因、分类及分 布规律具有较好的约束作用。

(3)恩平凹陷北带低位域含砂率高,且辫状河

道砂体切叠关系复杂,岩性圈闭形成需要较为苛刻 的条件;相比而言,海侵域和高位域的曲流河道以 及恩平南带低位域的末端分支河道砂体具有更好 的岩性圈闭潜力。恩平凹陷南带某油田的岩性圈 闭评价实践,印证了本研究思路的可行性,相关的 评价思路有望为盆地同类岩性目标的勘探提供借 鉴和参考。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(1):105-114.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张忠涛,张向涛,孙辉,等.珠江口盆地渐新世陆架边缘三角洲 沉积特征及其对成藏的控制作用[J].石油学报,2019,40(1):81-89.
- [10] 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.
- [11] 任双坡,姚光庆,毛文静.三角洲前缘水下分流河道薄层单砂 体成因类型及其叠置模式:以古城油田泌浅10区核三段W-W

油组为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 582-593.

- [12] 薛永安,杨海风,徐春强,等.渤海湾盆地垦利6-1亿吨级岩性 油田成藏条件及勘探关键技术[J].石油学报,2022,43(2): 307-324.
- [13] 李智高,丁琳,李小平,等.珠江口盆地珠一坳陷西部中新世
  早一中期沉积特征及控制因素[J].古地理学报,2022,24(1):
  99-111.
- [14] SHANLEY K W, MCCABE P J. Perspective on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 1994(78): 544-568.
- [15] 姜在兴. 层序地层学研究进展: 国际层序地层学研讨会综述[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 1-9.
- [16] 李绍虎. 对国外层序地层学研究进展的几点思考及L-H-T 层序地层学[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 735-744.
- [17] 郭岭,姜在兴,李瑞锋.一种辫状河、曲流河复合沉积体层序 特征及其成因[J].大庆石油学院学报,2011,35(2):29-33, 116.
- [18] ABREU V, NEAL J E, BOHACS K M, et al. Sequence Stratigraphy of Siliciclastic Systems: the Exxon-Mobil Methodology
   [M]. Tulsa, Oklahoma, USA: SEPM, 2010: 1-226.
- [19] POSAMENTIER H W, ALLEN G P. Siliciclastic Sequence Stratigraphy—Concepts and Applications [M]. Tulsa, Oklahoma, USA: SEPM, 1999: 1-210.

## Division of high-resolution stratigraphy in sedimentary sequence theory and prediction of lithological traps: a case study of the Neogene in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

LI Zhigao, DING Lin, LI Xiaoping, LI Xiao, WU Yuxiang (Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** Abundant sand-rich deposits in Neogene sequence were identified by a large area of 3D seismic data in the Enping Sag of Pearl River Mouth Basin, in the northern South China Sea (SCS). The mechanism of formation of the lithological traps in the Neogene reservoirs was studied by examining the variation of facies belts in the ancient Pearl River Delta system. Previous studies have shown that many structural-lithological traps in the Shenzhen Branch of the Enping Sag are closely associated with fluvial deposits. However, few studies provide systematic understanding on the origin, classification, and distribution of the fluvial deposits, which impeded the exploration progress in the studied area. A high-precision sequence stratigraphic framework of the first member of the Zhujiang Formation to the sixth member of the Hanjiang Formation was depicted and established systematically through 3D seismic interpretation and sedimentary and seismological analysis. Results show that large braided channel, small curved channel, and medium curved channel developed in the Enping Sag are closely correlated to lowstand, transgression, and highstand systems, respectively. The model of fluvial system was built in combination of stratigraphic variation and channel morphology. This model demonstrates the potentiality and distribution of various types of fluvial deposits in the Enping Sag and other offshore basins in the future.

Key words: Enping Sag; sedimentary sequence; channel classification; lithological trap