

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.144>



珠江口盆地恩平 17 洼深层烃源岩特征及有效烃源灶分布预测

石 创^{1,2}, 彭光荣^{1,2}, 龙祖烈^{1,2}, 李振升^{1,2}, 郑立庆^{1,2}, 曹雨菡^{1,2}, 熊万林^{1,2}

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518054

2. 中海石油深海开发有限公司, 广东深圳 518054

摘 要: 为明晰珠江口盆地恩平 17 洼主力烃源岩特征和有效烃源灶分布, 系统分析洼陷地质背景、烃源岩发育环境和地化特征, 借助热压模拟实验分析烃源岩生烃特征, 建立烃源岩 TOC 概率神经网络预测模型, 结合烃源岩热演化模拟和有效烃源岩 TOC 下限判识, 预测有效烃源灶分布。结果表明恩平 17 洼主要发育文昌组半深湖—深湖相和浅湖相两套烃源岩, 半深湖—深湖相烃源岩油气产率均较高, 具有“生油集中, 晚期爆发式生气”特征; 浅湖相烃源岩气产率相对较高, 具有“宽窗持续生气, 生气下限较高”的特征。有效烃源灶分布于 TOC 大于 1.2% 的区域, 平面上主要分布在洼陷中心和北部近洼区, 垂向上主要分布于文四段, 其次为文三段和文五段, 相带上以半深湖—深湖相为主, 其次为浅湖相, 在高温演化作用下, 油气兼生, 具备发育规模天然气潜力, 为珠江口盆地富油洼陷寻找天然气提供资源基础。

关键词: 烃源岩; 有效烃源灶; TOC 预测; 文昌组; 恩平 17 洼; 珠江口盆地; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2025)12-4604-13

收稿日期: 2025-05-19

Characteristics of Deep Hydrocarbon Source Rocks and Prediction of Effective Source Kitchen Distribution in Enping 17 Sub-Sag, Pearl River Mouth Basin

Shi Chuang^{1,2}, Peng Guangrong^{1,2}, Long Zulie^{1,2}, Li Zhensheng^{1,2}, Zheng Liqing^{1,2}, Cao Yuhan^{1,2}, Xiong Wanlin^{1,2}

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

2. CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, China

Abstract: In order to fully understand the characteristics of main source rocks and the distribution of effective source kitchen in Enping 17 sub-sag, it systematically analyzes the geological background of the depression, the development environment of hydrocarbon source rocks and the geochemical characteristics, the hydrocarbon generation characteristics of hydrocarbon source rocks by means of thermal pressure simulation experiments, establishes the TOC probability neural network prediction model of hydrocarbon source rocks, and predicts the distribution of effective source kitchen in combination with the thermal evolution simulation of hydrocarbon source rocks and the identification of the TOC lower limit of effective hydrocarbon source rocks. The

基金项目: 自然资源部“十四·五”全国油气资源评价项目(No.QGYQZYPJ2022-3); 中国海洋石油集团总公司“十四·五”重大科技项目(No.KJGG2022-0403)。

作者简介: 石创(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事油气成藏与资源评价研究工作 ORCID: 0009-0000-7870-5041. E-mail: shichuang@cnooc.com.cn

引用格式: 石创, 彭光荣, 龙祖烈, 李振升, 郑立庆, 曹雨菡, 熊万林, 2025. 珠江口盆地恩平 17 洼深层烃源岩特征及有效烃源灶分布预测. 地球科学, 50(12): 4604-4616.

Citation: Shi Chuang, Peng Guangrong, Long Zulie, Li Zhensheng, Zheng Liqing, Cao Yuhan, Xiong Wanlin, 2025. Characteristics of Deep Hydrocarbon Source Rocks and Prediction of Effective Source Kitchen Distribution in Enping 17 Sub-Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 50(12): 4604-4616.

results indicate that the Enping 17 sub-sag mainly develops two sets of hydrocarbon source rocks, the semi deep-deep lake and shallow lake facies of the Wenchang Formation. The oil and gas production rates of the semi deep-deep lake facies are relatively high, with the characteristics of concentrated oil generation and late explosive gas generation. Shallow lacustrine mudstone has a relatively high gas production rate and is characterized by wide window continuous gas generation and a high lower limit of gas generation. The effective source kitchen of Wenchang Formation in Enping 17 sub-sag are distributed in the areas where the TOC of source rocks is greater than 1.2%, mainly distributed in the sub-sag center and the northern near sub-sag on the plane, mainly distributed in the 4th member of Wenchang Formation vertically, followed by the 3rd and 5th member of Wenchang Formation. The facies are dominated by semi deep-deep lake facies, while the shallow lake facies source rocks are another set of important source rocks in this area. Under the high thermal evolution, oil and gas are generated simultaneously in the sub-sag, which has the development of large-scale natural gas potential, provides a resource basis for searching for natural gas in oil rich sag of the Pearl River Mouth basin.

Key words: source rock; effective hydrocarbon kitchen; TOC prediction; Wenchang Formation; Enping 17 sub-sag; Pearl River Mouth basin; petroleum geology.

0 引言

恩平17洼是珠江口盆地恩平凹陷重要的油气富集区,围绕着恩平17洼,历经多年的油气勘探和地质研究,发现了多个中型油田群,证实恩平17洼为富烃洼陷,展示出该区巨大的勘探潜力.恩平凹陷已发现油气主要分布在恩平17洼南、北两侧构造带的新近系储层中,其古近纪断裂在晚中新世构造活化期多未继承性活动,新近系缺少直接沟通文昌组烃源岩的长期活动断裂,前人研究显示洼陷中生成的石油经文昌组砂岩输导体系与隆起带断裂输导体系进行“先横后纵”运移,系统总结出区域性砂岩输导层(中转站)及断裂体系进行“接力式”运移和通过“断裂复合汇聚脊”进行远源富集等成藏模式,诠释了新近系成藏过程(吴静等,2021;朱定伟等,2021).在古近系勘探进程中,围绕恩平17洼洼中隆区,先后钻探两口探井,获得天然气发现,虽未取得商业突破,但具有重要的领域意义,为珠江口盆地浅水区富油洼陷寻找天然气开拓了领地.虽然恩平凹陷获得大量的石油发现,但受前期钻井数量和研究手段的限制,对该凹陷主力烃源岩生烃机理以及有效烃源灶的研究相对较少,因此笔者通过对洼陷结构的细致研究,结合已钻井地球化学分析明确主力烃源岩生烃机理,借助地球物理方法和盆地模拟手段预测有效烃源灶分布,为该区下一步勘探提供基础支撑.

1 区域地质背景

恩平凹陷位于珠江口盆地一级构造单元珠一坳陷最西端,西边为阳江凹陷,东边为西江凹陷,南

北分别与番禺低隆起及海南隆起相邻,凹陷总体走向为NE-SW向,面积约5 000 km²,海水深度为80~100 m(图1).恩平凹陷是古近纪开始发育的断陷—拗陷盆地,经历了裂陷阶段(晚白垩世至早渐新世)、拗陷阶段(晚渐新世至中中新世)以及断块升降阶段(晚中新世至今),形成了下断上坳双层结构和先陆相后海相2种沉积体系(高阳东等,2021;赵鹏等,2021).根据凹陷结构特征及文昌组分布范围,恩平凹陷可进一步划分为3个次洼,分别是恩平17洼、恩平18洼和恩平12洼.3个次洼均为北断南超型箕状半地堑.钻井揭示恩平凹陷自下而上发育:始新统文昌组和恩平组,渐新统珠海组,中新统珠江组、韩江组和粤海组,上新统万山组及第四系.其中,裂陷阶段湖相沉积广泛发育,文昌组和恩平组是烃源岩发育层系,恩平组烃源岩由于埋深浅、类型差是次要源岩;钻井原油地球化学特征显示具有高C₃₀ 4-甲基甾烷特征,是珠江口盆地文昌组半深湖—深湖相烃源岩的主要标志,间接证实了凹陷文昌组半深湖—深湖相优质烃源岩的存在(熊万林等,2020).文昌组是主力生烃层系,自下而上分为6个层段,分别是文六段、文五段、文四段、文三段、文二段和文一段,文六段至文四段统称为文昌组下段,文三段至文一段统称为文昌组上段.

2 烃源岩发育条件

2.1 烃源岩发育地质背景

恩平17洼裂陷期受北部NE向低角度边界拆离断层F1主控,西部高角度近N-S向边界走滑断层F2起次级控洼作用.F1沿走向分段差异活动,从早文昌期到晚文昌—恩平期逐渐由中低角度断层向

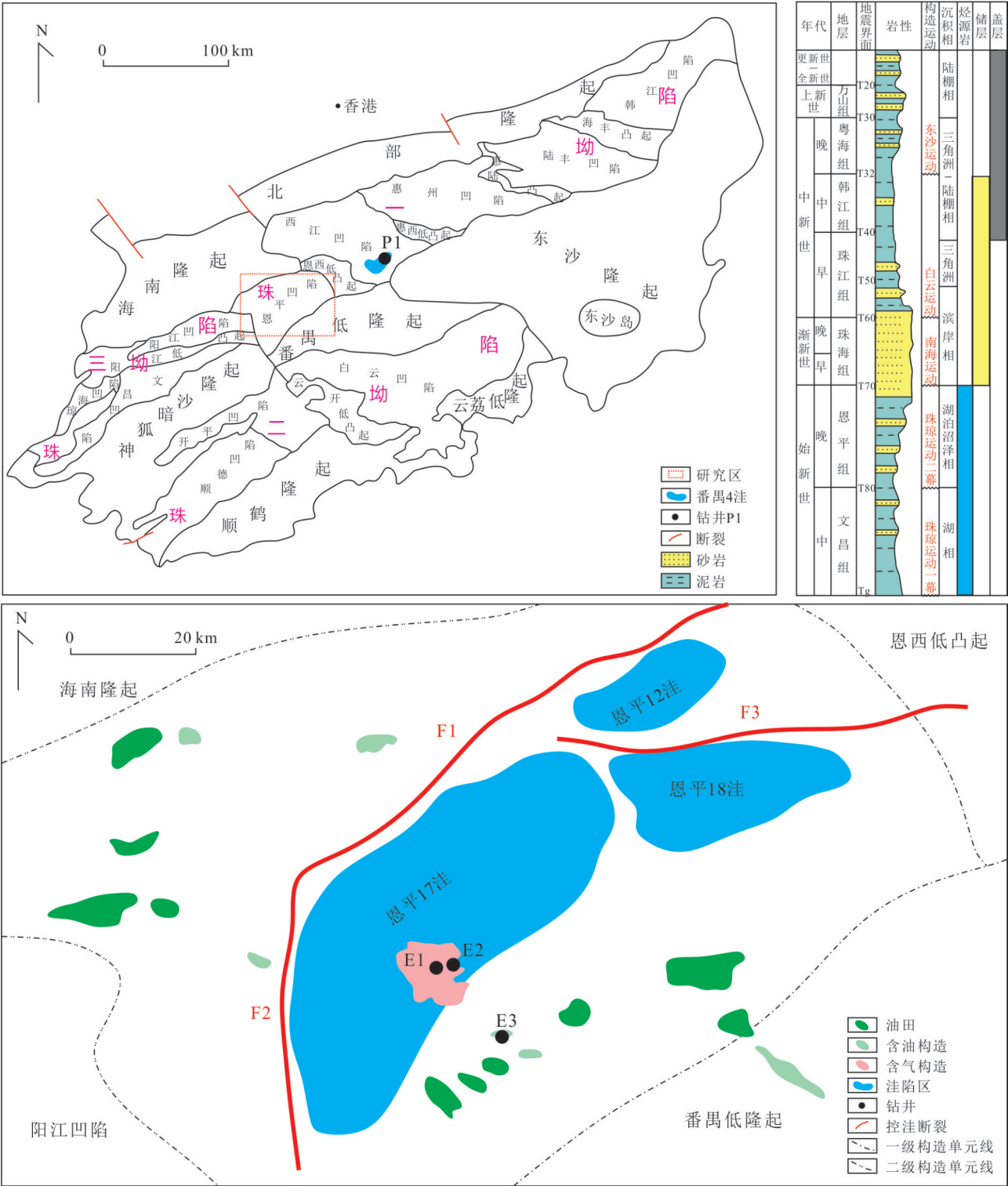


图1 恩平凹陷构造位置与地层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive stratigraphy column chart structural location of in Enping depression

低角度断层转变;而F2从早文昌期到晚文昌期逐渐由中等角度断裂向高角度断裂转变.两条断裂多于恩平末期停止活动(蔡国富等,2022).早文昌期,F1处于软连接状态,断层西南部具有强烈的重力滑脱特征,断层上盘断块掀斜作用强烈,恩平17洼形成窄条形深断箕状半地堑,沉积中心由边界控洼断层控制(图2).随着断陷作用不断加剧,湖盆持续扩大,形成欠补偿环境,有利于稳定的厚层半深湖一

深湖相沉积发育,三角洲规模较小.晚文昌期,F1 北东段和西南段发生硬连接,成为完整的拆离断层,凹陷中部和北部断层活化并派生出多条调节断层,造成沉降中心向洼陷中北部迁移,湖盆面积大幅扩张并连通成片,形成宽缓湖盆(图2).随着沉降中心持续向洼陷中北部迁移,F1 横向伸展量占据较大断层滑移调剂空间,半深湖—深湖相向洼陷中北部小

规模拓展(蔡国富等,2022;彭光荣等,2022).

2.2 烃源岩发育环境分析

岩石中的元素在岩石风化、搬运和沉积过程中受外部环境的影响,会发生规律性的分散和富集,使得元素的含量或不同元素间的比值出现规律性变化.通过元素地球化学方法表征烃源岩发育的古沉积环境已在油气勘探领域广泛应用(石创等,

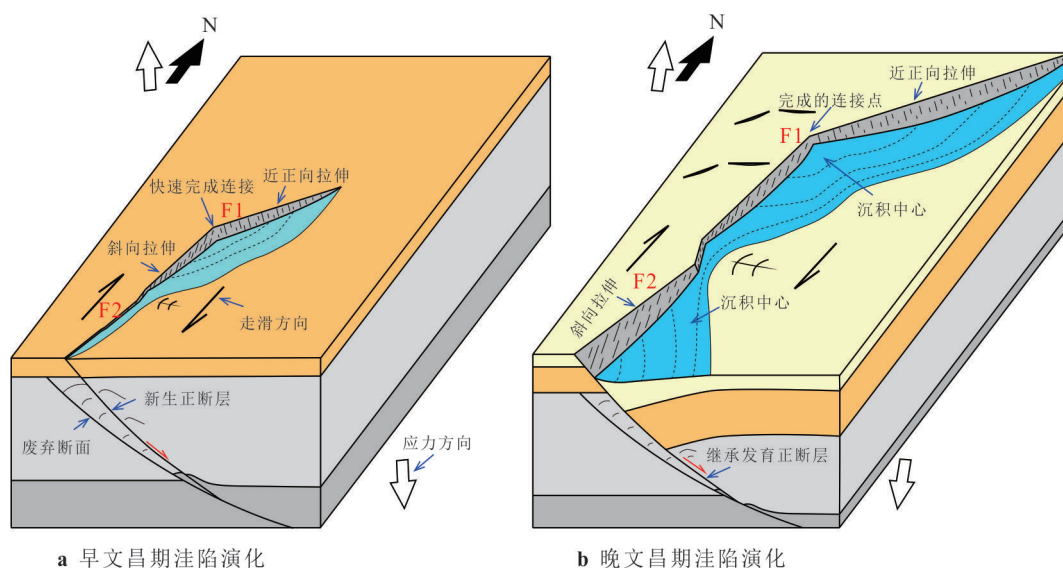


图2 恩平 17 洼陷演化模式

Fig.2 Evolutionary model of Enping 17 sub-sag

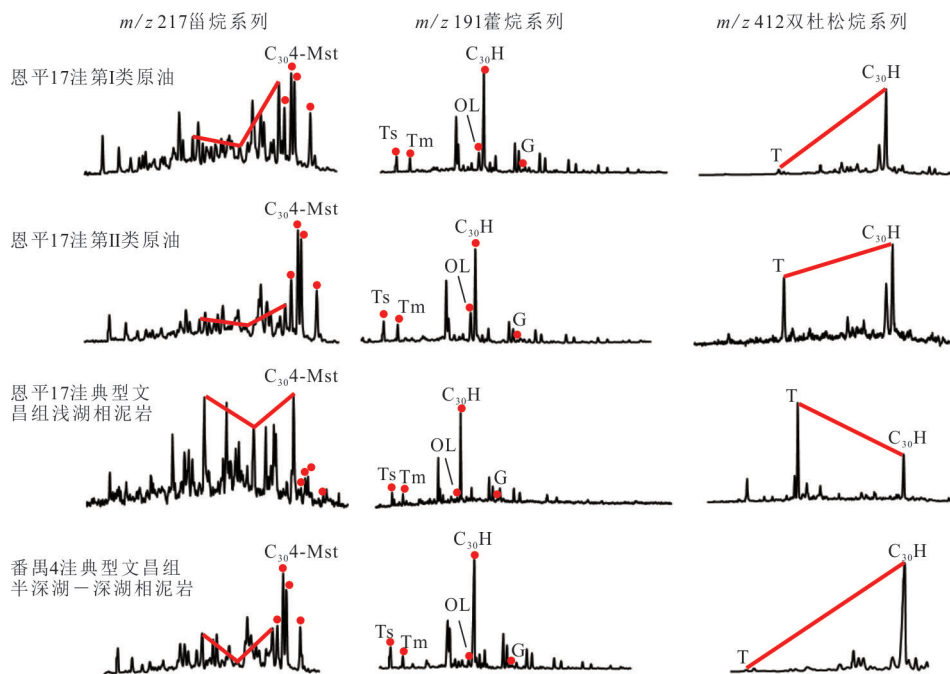


图3 恩平凹陷不同类型原油和泥岩生物标志化合物特征

Fig.3 Characteristics of biomarker compounds in different types of crude oil and mudstone in Enping depression

$C_{30}4\text{-Mst}$ 为 $C_{30}4$ -甲基甾烷; $C_{30}H$ 为 C_{30} 藿烷; T 为双杜松烷

表 1 恩平 17 洼和番禺 4 洼烃源岩发育古环境指标

Table 1 Paleoenvironmental indicators of hydrocarbon source rock development in Enping 17 sub-sag and Panyu 4 sub-sag

洼陷(层段)	井号	古水深		古气候		古氧相		古生产力	
		Mn/Fe	V/Cr	MgO(%)	Sr/Cu	Th/U	V/(V+Ni)	P/Ti(%)	P/Al(%)
恩平 17 洼(恩平组)	E2	0.8—1.3	0.5—1.7	1.2—1.5	0.6—3.3	3.0—4.2	0.52—0.78	5.5—10.1	0.23—0.37
		1.0	1.2	1.3	1.8	3.7	0.68	7.0	0.30
恩平 17 洼(上文昌)	E1、E2	0.9—4.1	0.4—3.0	0.4—2.0	0.6—10.1	2.4—4.4	0.65—0.93	2.2—63.3	0.08—1.88
		2.4	1.4	1.0	2.6	3.6	0.79	22.9	0.67
番禺 4 洼(下文昌)	P1	1.5—4.8	2.1—5.2	1.3—2.7	1.8—11.8	2.9—4.1	0.83—0.90	20.3—42.9	0.72—1.42
		3.3	3.7	1.8	6.3	3.5	0.87	28.2	0.99

注: $\frac{\text{最小值} - \text{最大值}}{\text{平均值}}$.

2020a;彭光荣等,2023).恩平 17 洼未揭示文昌组下段地层,钻井仅钻遇文昌组上段,文昌组上段泥岩生物标志物特征显示 C_{30} 4-甲基甾烷含量非常低,双杜松烷含量高,与已发现原油生物标志化合物特征差异显著(图 3).恩平 17 洼主体发现两类原油,第一类原油富含 C_{30} 4-甲基甾烷,双杜松烷含量极低,与邻区番禺 4 洼(已证实富烃洼陷)文昌组下段半深湖—深湖相烃源岩相似(图 3);第二类原油同样富含 C_{30} 4-甲基甾烷,双杜松烷含量中等(图 3),推测可能为半深湖—深湖相与浅湖相源岩生成的混源油(熊万林等,2020).因此,恩平 17 洼早文昌期湖泊古环境类比番禺 4 洼,通过常量和微量元素测试化验结果分析恩平 17 洼恩平期、晚文昌期以及番禺 4 洼早文昌期的古气候、古水深、古氧相和古生产力等环境指标(表 1),每项指标均采用两种常用判识参数,提升分析结果可靠性.古水深分析采用 Mn/Fe 和 V/Cr,两种参数均随水深增加而增大;古气候分析采用 MgO 和 Sr/Cu,参数值越大表明气候越干燥;古氧相分析采用 Th/U 和 V/(V+Ni),水体还原性越强 Th/U 值越小,V/(V+Ni)值越大;古生产力分析采用 P/Ti 和 P/Al,参数值越大表明水体古生产力水平越高(石创,2022;雷闯等,2024).类比番禺 4 洼早文昌期沉积环境推测恩平 17 洼早文昌期气候湿热,湖盆水体较深,整体处于亚还原环境,水体营养程度较高,有利于优质烃源岩的发育;晚文昌期气候略微转凉,但湖泊其他古环境仍有利于烃源岩发育;恩平期湖泊古环境指标均总体降低,特别是古生产力降低明显,烃源岩发育条件变差.

3 钻井样品烃源岩及其生烃特征

3.1 烃源岩地球化学特征

恩平 17 洼共有 3 口钻井钻遇文昌组上段泥岩,其中,E1 和 E2 井位于洼中隆起区,E3 井位于洼陷西南缘(图 1).E1 和 E2 钻井遇较厚文昌组上段地层(文一段—文三段),E3 井仅钻遇文昌组表层(文一段).洼陷烃源岩有机质丰度是衡量洼陷油气资源潜力的重要依据(薛楠等,2023).选取总有机碳含量(TOC)、生烃潜量(S_1+S_2)、氢指数(HI)和岩石热解峰温(T_{max})来评价恩平 17 洼文昌组烃源岩有机质丰度和类型,通过烃源岩综合评价图判识得到,文昌组上段泥岩 TOC 在 0.9%~4.2%,均值为 1.7%, S_1+S_2 分布在 0.5~6.5 mg/g,均值 1.7 mg/g,为中等—好有机质丰度的烃源岩;HI 普遍较低,介于 38~158 mg/g,均值为 91 mg/g,有机质类型以 II₁-II₂型为主(图 4).

有机质成熟度分析是研究烃源岩生烃过程的基础,通过 T_{max} 、产率指数(PI)和镜质体反射率(R_o)可较好评估烃源岩有机质成熟度(杨海波等,2024).恩平 17 洼文昌组镜质体反射率(R_o)和岩石热解峰温(T_{max})相对较高, R_o 多位于 1.0% 附近, T_{max} 普遍大于 460 °C,显示文昌组上段烃源岩已达到成熟—高成熟阶段(图 5),为该富油洼陷未来勘探寻找规模天然气提供依据.洼陷较高的地温梯度(3.2~3.3 °C/100 m)和钻遇文昌组埋深大(大于 4 000 m)是本地区烃源岩高热演化的主要原因.

已钻井泥岩生物标志物特征显示文昌组上段泥岩姥植比主体介于 2.1~2.4, C_{30} 4-甲基甾烷含量非常低,双杜松烷含量高(图 3),指示陆源高等植物输入明显,是珠江口盆地浅水区典型的浅湖相泥岩特征(熊万林等,2020).受钻井位置、相带和热演化

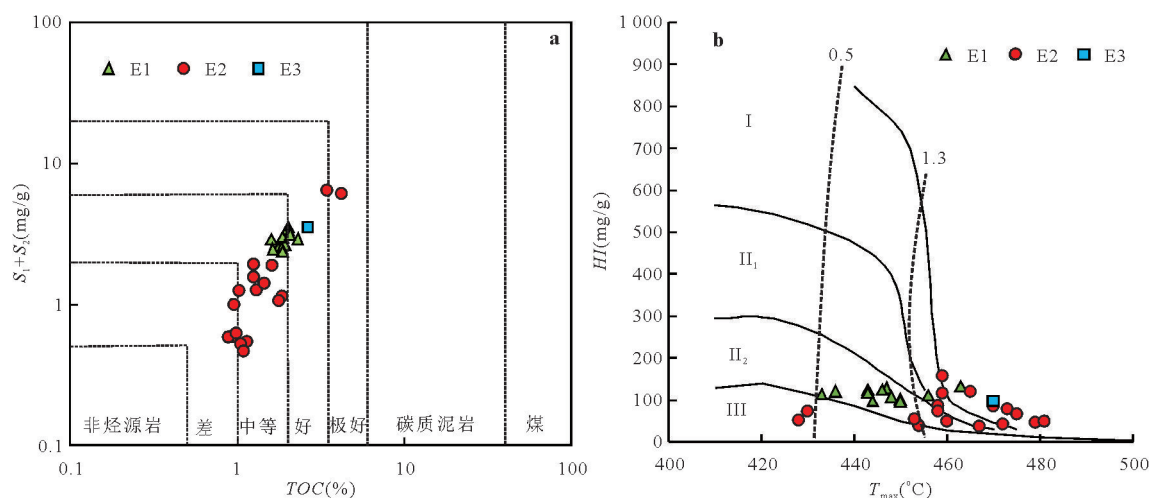


图4 恩平 17 洼文昌组烃源岩评价

Fig.4 Evaluation map of Wenchang Formation source rocks in Enping 17 sub-sag

a. 有机质丰度分析; b. 有机质类型

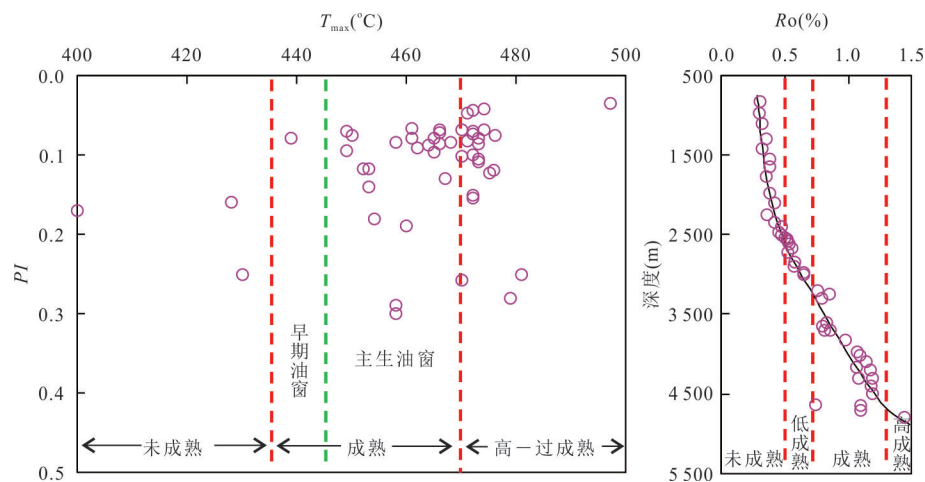


图5 恩平 17 洼文昌组烃源岩成熟度综合评价

Fig.5 Comprehensive evaluation of maturity of Wenchang Formation source rocks in Enping 17 sub-sag

程度的影响,已钻井氢指数普遍较低,难以真实反映洼陷烃源岩生烃潜力。

3.2 烃源岩生烃特征

恩平 17 洼已证实发育文昌组两种类型烃源岩:(1)文昌组半深湖—深湖相烃源岩(原油生物标志物特征揭示);(2)文昌组浅湖相烃源岩(钻井泥岩生物标志物证实)。原油生物标志化合物特征证实恩平 17 洼发育类似番禺 4 洼文昌组下段半深湖—深湖相烃源岩,因此,选取番禺 4 洼文昌组下段半深湖—深湖相泥岩和 E1 井实钻浅湖相泥岩进行黄金管高温高压封闭体系模拟实验,进而研究恩平 17 洼不同类型烃源岩的生烃特征。

对于半深湖—深湖相泥岩,藻类勃发型湖盆的番禺 4 洼文昌组下段半深湖—深湖相泥岩生烃窗口

较窄(图 6),在 EasyRo 约 1.1% 达到生油高峰,最大油产率可达近 700 mg/g·TOC,在 EasyRo 为 1.3%~2.0% 快速生气,烃气最大产率可达近 550 mg/g·TOC,在 2.5% EasyRo 之后达到“生气下限”,整体呈现出早期快速生油,晚期“爆发式”生气特征。恩平 17 洼文昌组上段浅湖相泥岩生烃窗口较宽,0.8% EasyRo 阶段最大油产率仅约 108 mg/g·TOC(图 6),远低于藻类勃发型湖盆番禺 4 洼文昌组下段半深湖—深湖相泥岩油产率,但烃气最大产率较高,可达到近 250 mg/g·TOC,同样呈现出在 EasyRo 1.3%~2.0% 快速生气,之后受原油裂解气贡献影响生气产率持续增加。综合文昌组泥岩产油气特征可知,文昌组半深湖—深湖相泥岩具有较高的生烃能力,油气产率均较高,具有“生油集中,晚期爆

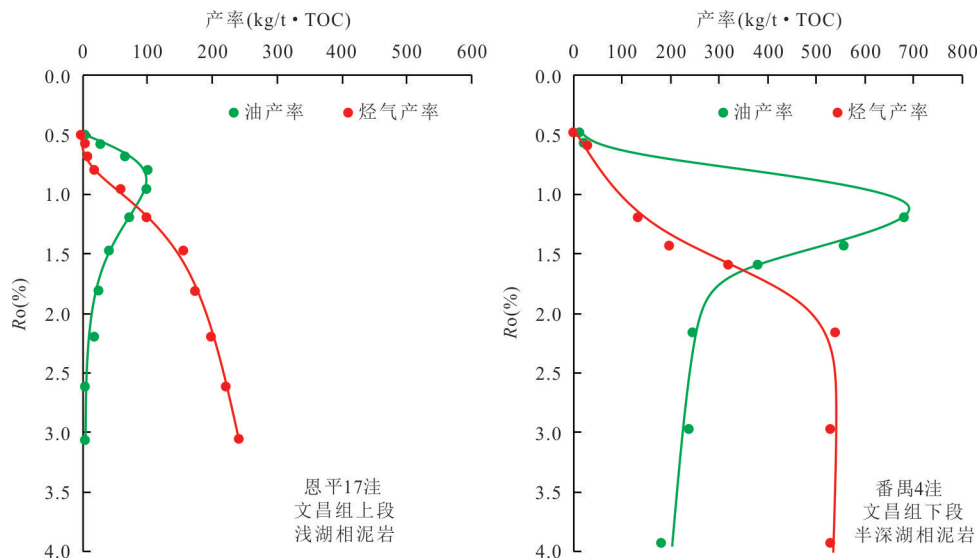


图 6 恩平 17 注和番禺 4 注不同类型烃源岩产烃特征

Fig.6 Characteristics of hydrocarbon production from different types of source rocks in Enping 17 sub-sag and Panyu 4 sub-sag

发式生气”特征.文昌组浅湖相泥岩具有较好的生干酪根裂解气能力,且气产率相对较高,具有“宽窗持续生气”特征,“生气下限”高于半深湖—深湖相泥岩,对于较高地温、较大埋深的恩平凹陷而言,此类烃源岩可作为一类较好的生干酪根裂解气能力较强的气源岩,为珠江口盆地富油洼陷寻找天然气提供资源基础.

4 有效烃源灶分布预测

烃源灶是指具有高丰度有机质源岩的集合,是一系列能生烃源岩的集合体,并非指单层源岩(杨海波等,2024),特指有机质丰度高、类型好、生烃潜力大、达到生油门限且证实为已发现油气聚集提供油气源的烃源岩发育区(王力等,2005).

4.1 文昌组烃源岩有机碳地球物理预测

4.1.1 烃源岩有机碳测井预测 前人研究显示烃源岩 TOC 与电阻率、自然伽马、声波时差、中子孔隙度和密度测井之间具有较弱的相关关系,其中,与前 4 项测井参数之间有弱的正相关关系,与密度测井呈较弱负相关关系,通过五元回归方程建立烃源岩 TOC 测井参数定量预测模型(式 1),预测精度显著提高(石创等,2020b).

$$TOC = \frac{k_1 CNL + k_2 DT + k_3 GR + k_4 RT + k_5}{DEN} + C, \tag{1}$$

式(1)中: k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 和 C 均为常数; CNL 为中子

孔隙度测井参数,%; DT 为声波时差测井参数, $\mu s \cdot ft^{-1}$; GR 为自然伽马测井参数,API; RT 为电阻率测井参数, $\Omega \cdot m$; DEN 为密度测井参数, $g \cdot cm^{-3}$.

根据上述原理并结合实测 TOC 数据,建立恩平 17 注 3 口钻井文昌组烃源岩 TOC 单井预测模型.

E1 井: $TOC = -0.001GR + 0.178RT + 0.641$
 $R' = 0.860,$ (2)

E2 井: $TOC = (0.755CNL - 0.656DT - 0.152GR - 0.001RT + 38.002)/DEN + 8.315$
 $R' = 0.826,$ (3)

E3 井: $TOC = (0.156RT + 97.056)/DEN - 36.83$
 $R' = 0.988.$ (4)

式(2)~(4)中,由于 E1 井和 E3 井缺少部分测井参数,因此选择了 2 种测井参数进行 TOC 预测;E2 井文二段和文三段缺少 CNL 和 DEN,取值为 0.

分析测井预测结果得到 3 口钻井预测结果相关系数较高,均大于 0.8.文昌组 TOC 测井预测结果显示 E1 井文昌组烃源岩 TOC 最大可达 3.9%,平均值为 1.6%,为中等—好烃源岩;E2 井由于砂泥互层,烃源岩 TOC 差异较大,文昌组烃源岩预测 TOC 最大可达 6.5%,平均值为 1.3%,中等—极好烃源岩均有发育,非均质性强;E3 井位于洼陷边缘,钻遇文昌组顶部薄层泥岩,文昌组烃源岩预测 TOC 最大可达 2.9%,平均值为 1.6%,以中等烃源岩为主,总体预测结果与实测结果吻合(图 7).

4.1.2 烃源岩有机碳地球物理预测 为了匹配时间域的地震数据资料,对测井数据进行准确的时深

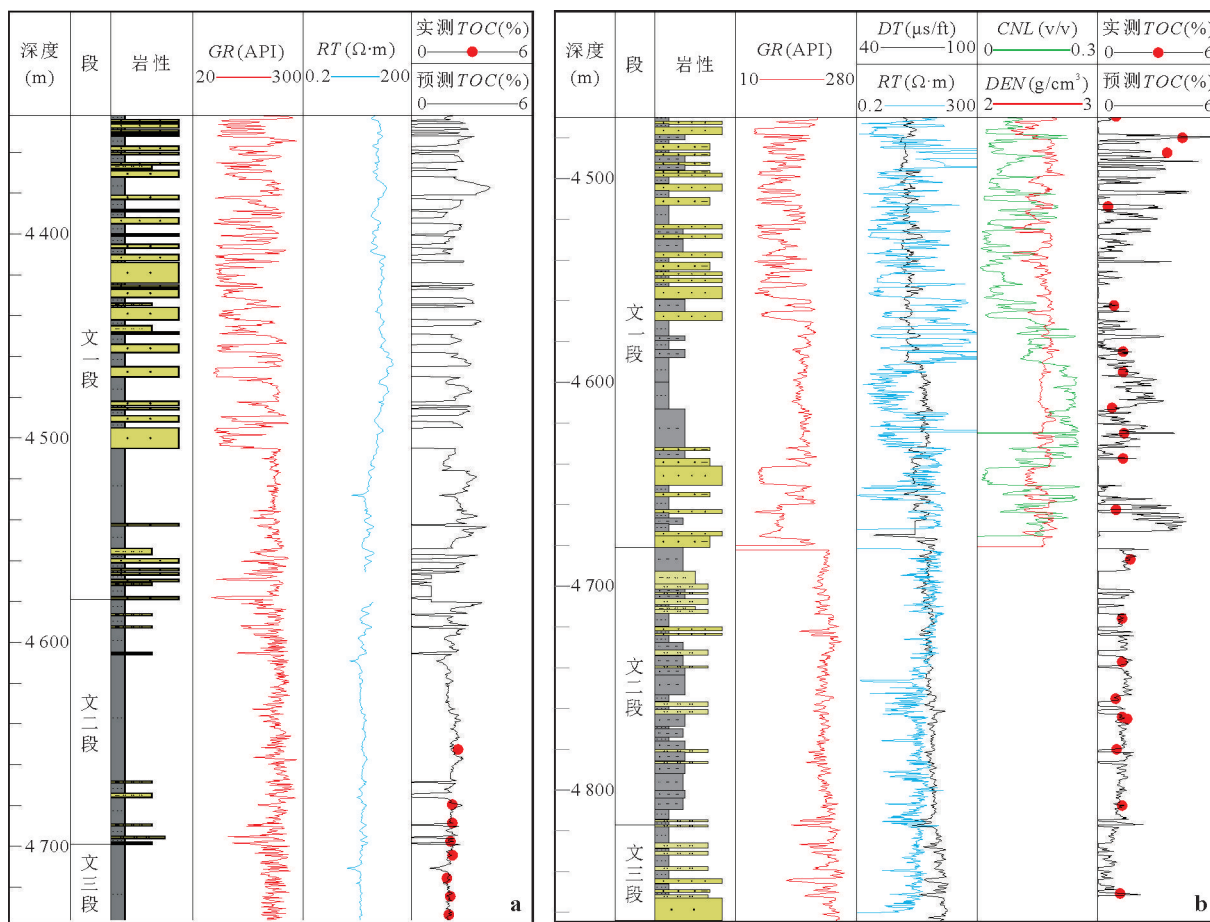


图 7 文昌组烃源岩 TOC 测井预测

Fig.7 Logging prediction of TOC for source rocks of Wenchang Formation

a.E1 井预测结果, b.E2 井预测结果

转换. 以时深转换后的文昌组烃源岩 TOC 测井预测曲线为目标, 通过 HRS 软件中 Emerge 模块分析目标曲线与地震属性的关联性, 优选属性组合, 建立地震属性与 TOC 之间的最佳拟合方程(石创等, 2019), 最终提取 6 个属性与烃源岩 TOC 测井预测曲线进行拟合分析, 建立烃源岩 TOC 地球物理预测模型(式 5).

$$TOC = 3.164 \ 256 \times 10^{-1} A_1 - 6.137 \ 585 \times 10^{-5} A_2 + 8.377 \ 158 \times 10^{-4} A_3 - 2.667 \ 656 \times 10^{-10} A_4 + 1.436 \ 242 \times 10^{-9} A_5 + 2.672 \ 651 \times 10^{-9} A_6 + 4.835 \ 621, \quad (5)$$

式(5)中: A_1 为时间、 A_2 为地震道 X 坐标、 A_3 为主频、 A_4 为余弦瞬时相位、 A_5 为滤波、 A_6 为振幅加权余弦相位. 此组合相关性最高, 达到 0.76, 误差最小, 为 0.62%. 在此基础上引入概率神经网络对模型进行优化, 优化后的模型相关系数达到 0.89, 误差减小到 0.59%. 运用模型于地震数据体, 得到恩平 17 洼高精度文昌组烃源岩 TOC 数据体.

恩平 17 洼文昌组烃源岩 TOC 地球物理预测平面显示, 洼陷中心文昌组烃源岩 TOC 主体分布在 2.5%~5.0%, 为好—极好烃源岩, 洼陷中心文昌组烃源岩 TOC 明显高于洼陷边缘, 表明洼陷中心是优质烃源岩的主要发育场所; 受珠江运动一幕的影响, 早文昌期(文六段—文五段沉积早期)主体发育规模有限的滨浅湖相沉积(彭光荣等, 2022), TOC 预测结果显示文昌组底部烃源岩 TOC 分布普遍小于 3.0%, 主要发育中等—好烃源岩(图 8); 文昌组沉积中期(文五段沉积末期—文三段沉积期), 洼陷主体沉积了半深湖—深湖相泥岩, 垂向上沉积体系具有良好的继承性(彭光荣等, 2022), TOC 预测结果显示文昌组中部烃源岩 TOC 主要分布在 4.0%~5.0%, 为极好烃源岩(图 8); 文昌组沉积末期(文二段—文一段沉积期), 洼陷沉降中心北移, 在洼陷中心和北部发育小规模半深湖—深湖相沉积, TOC 主要分布在 2.5%~4.0%, 以好烃源岩为主(图 8).

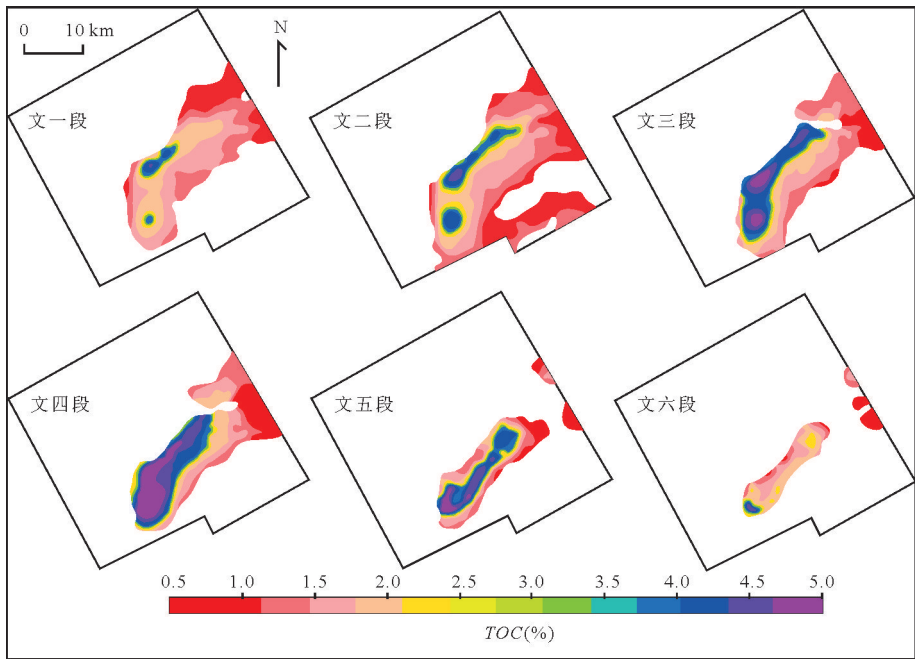


图 8 恩平 17 洼文昌组烃源岩 TOC 预测

Fig.8 TOC prediction of Wenchang Formation source rocks in Enping 17 sub-sag

4.2 文昌组烃源岩热演化模拟

前人基于低温热年代学年龄测试,明确珠江口盆地珠一坳陷自 47.8 Ma 以来经历两期加热,分别为距今 49~38 Ma 和距今 38~33.9 Ma,各凹陷构造沉降差异小,基底热流演化作用相似,不同凹陷达到最高古地温时间为距今 33.9 Ma,之后温度缓慢降低(唐晓音等,2016;胡圣标等,2019).在低温热年代学反演基础上,前人采用非瞬时多期次有限伸展模型,对珠一坳陷进行虚拟井构造正演模拟,结果表明,珠一坳陷新生代以来在始新世经历两期明显的裂陷拉张过程,第一期构造拉张总体强于第二期.第一期为 49~38 Ma,该时期主体受珠琼运动一幕影响,坳陷处于断陷裂谷鼎盛发育阶段;第二期为 38.0~33.9 Ma,该时期受珠琼运动二幕影响,坳陷处于断陷裂谷发育末期;33.9 Ma 后为裂后热沉降期,以区域沉降为主,且沉降速率明显减小(施和生等,2020;庞雄等,2021).构造正演模拟进一步明确了珠一坳陷在 33.9 Ma 达到最高古地温.

基于上述研究成果,在恩平 17 洼实测 R_o 数据约束下,采用 Sweeney *et al.* (1990) 提出的生烃动力学模型,利用 Petromod 盆地模拟软件恢复恩平 17 洼文昌组各三级层序烃源岩热演化史(杨梅华等,2023;高阳东等,2024).模拟结果显示随着埋深的增加,各三级层序烃源岩热演化程度显著增高,埋深最浅的文一段烃源岩热演化主体已达到高成熟阶

段($R_o>1.3\%$),普遍高于珠一坳陷文昌组排烃门限($R_o=0.7\%$),文昌组烃源岩已达到高成熟—过成熟演化阶段,油气兼生(图 9).

4.3 有效烃源灶下限判识与分布

烃源岩的有效性是划分有效烃源岩灶的关键.研究认为,有效有效烃源岩是指能够生成并排出烃类而形成工业油气藏的烃源岩(杨帆等,2024).烃源岩具备生排烃能力需富含有机质,同时达到生排烃门限,且生烃量超过自身吸附量(Tissot *et al.*, 1984; Peters *et al.*, 2005).有机质丰度可通过 TOC 表征,卢双舫(2008)认为 TOC 分布在 0.3%~0.5% 为烃源岩的下限值.烃源岩在达到排烃门限,同时生成的烃类要满足自身吸附后才能排出,因此需要确定烃源岩发生排烃时的门限深度和 TOC 下限.前人研究显示,珠江口盆地珠一坳陷文昌组烃源岩排烃门限深度约 3 500 m,对应 R_o 约 0.7%(朱明等,2019).烃源岩的岩石热解参数游离烃(S_1 , mg/g)和烃指数(S_1/TOC , mg/g)与 TOC 的相对关系变化可用来确定有效烃源岩 TOC 下限(高岗等,2013).研究表明烃源岩生烃早期,生烃量与 TOC 有较好的线性关系,发生排烃作用后线性关系偏离原趋势(匡立春等,2014). S_1 是烃源岩中游离烃含量,生烃早期烃源岩未发生排烃作用, S_1 即为生烃量,排烃作用发生后, S_1 与 TOC 的线性关系趋势出现拐点,该拐点对应的 TOC 值即为烃源岩发生排烃作用的 TOC 下

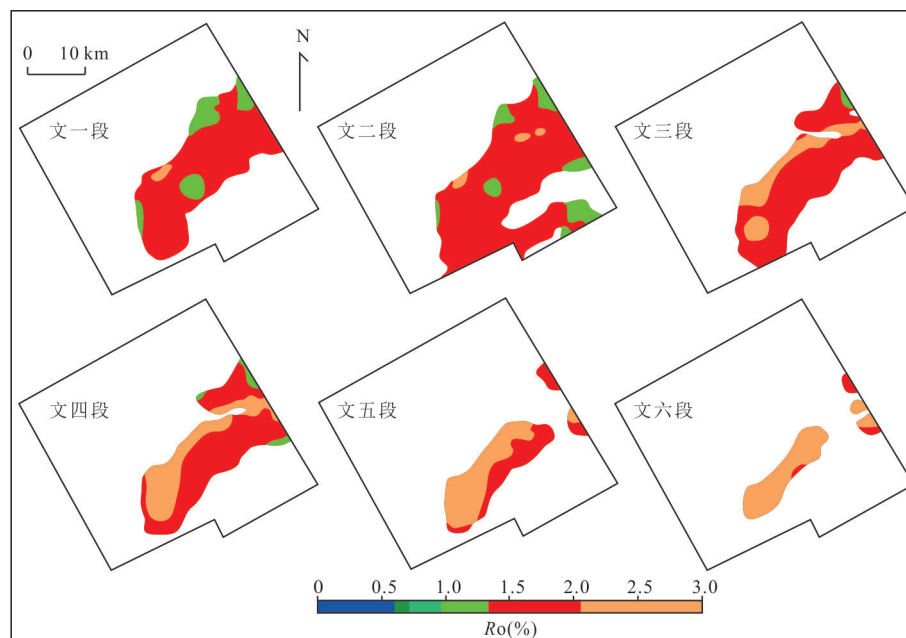
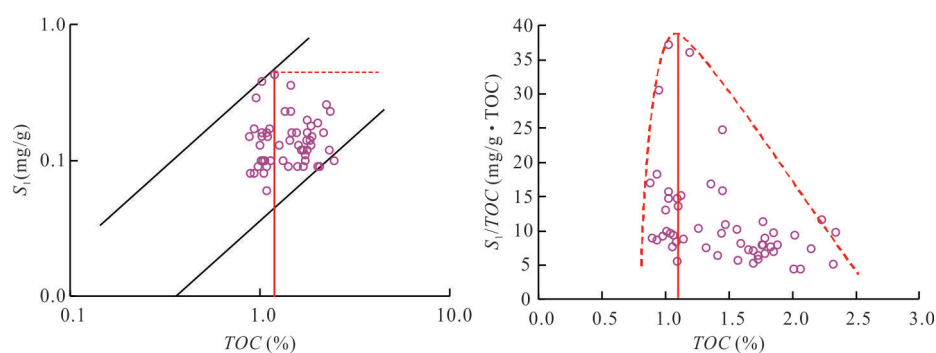
图9 恩平 17 洼文昌组各三级层序烃源岩中间面现今 R_o

Fig.9 Current vitrinite reflectance map of the middle surface of the source rocks in the third order sequences of the Wenchang Formation in Enping 17 sub-sag

图 10 恩平 17 洼文昌组烃源岩 TOC 与热解参数游离烃 S_1 和烃指数 S_1/TOC 关系Fig.10 Relationship between TOC and pyrolysis parameters of S_1 and S_1/TOC of Wenchang Formation source rocks in Enping 17 sub-sag

限值. 烃源岩 TOC 与 S_1 和 S_1/TOC 关系图显示恩平 17 洼文昌组有效烃源岩 TOC 下限约为 1.2% (图 10).

烃源岩热演化模拟结果显示文昌组烃源岩已达到高成熟—过成熟演化阶段, 因此, 恩平 17 洼有效烃源岩灶的划分主要依据烃源岩 TOC , 即 TOC 大于 1.2% 分布区即为有效烃源灶分布区, 平面上主要分布在洼陷中心和北部近洼区, 垂向上主要分布于文四段, 其次为文三段和文五段 (图 8), 相带上该区主力油气源岩为半深湖—深湖相烃源岩, 在高热演化作用下, 文昌组浅湖相烃源岩为该地区另一套重要源岩, 恩平 17 洼具备发育规模天然气潜力,

为珠江口盆地富油洼陷寻找天然气提供资源基础.

5 结论

(1) 早文昌期受边界控洼断层控制, 恩平 17 洼为窄条形深断箕状半地堑, 沉积中心集中在控洼断层活动性强的部位, 为烃源岩发育提供可容纳空间, 半深湖—深湖相沉积靠近控洼断裂 (洼陷中心处) 发育; 晚文昌期受控洼断裂拆离作用影响, 造成沉降中心向洼陷中北部迁移, 半深湖—深湖相向洼陷中北部小规模拓展.

(2) 钻井揭示恩平 17 洼文昌组上段浅湖相烃源岩, 有机质类型为 II_1-II_2 , 而已发现原油生物标志化

合物特征类似于番禺 4 洼文昌组下段半深湖—深湖相烃源岩,间接证实恩平 17 洼半深湖—深湖相烃源岩发育.文昌组半深湖—深湖相泥岩具有较高的生烃能力,油气产率均较高,具有“生油集中,晚期爆发式生气”特征.文昌组浅湖相泥岩具有较好的生干酪根裂解气能力,且气产率相对较高,具有“宽窗持续生气”特征,“生气下限”高于半深湖—深湖相泥岩.

(3) 基于地质—地化—地球物理联合方法优选地震属性,建立烃源岩 TOC 概率神经网络预测模型,通过烃源岩热解参数(S_i 和 TOC),结合盆地模拟结果,明确恩平 17 洼文昌组烃源岩已达到高成熟—过成熟演化阶段,洼陷有效烃源灶分布于烃源岩 TOC 大于 1.2% 的区域,平面上主要分布在洼陷中心和北部近洼区,垂向上主要分布于文四段,其次为文三段和文五段,相带上以半深湖—深湖相为主,其次为浅湖相烃源岩,在高温演化作用下,恩平 17 洼具备发育规模天然气潜力.

References

- Cai, G.F., Peng, G.R., Wu, J., et al., 2022. Sedimentary Filling Response to Detachment Structural Deformation in Shallow-Water Continental Shelf of Pearl River Mouth Basin: A Case Study of Enping Sag. *Earth Science*, 47(7): 2391—2409 (in Chinese with English abstract).
- Gao, G., Wang, Y.H., Liu, G.D., et al., 2013. Confirmation and Distribution Features of Effective Source Rocks in Yinger Sag, Jiuquan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(4): 414—418, 425 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.D., Zhang, X.T., Li, Z.G., et al., 2021. Variability in Sequence Stratigraphic Architectures of Lower-Middle Miocene Pearl River Delta, Northern Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: Implications for Lithological Trap Development. *Earth Science*, 46(5): 1758—1770 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.D., Zhu, W.L., Peng, G.R., et al., 2024. Evaluation of Source Rocks and Prediction of Oil and Gas Resources Distribution in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 986—996 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S.B., Long, Z.L., Zhu, J.Z., et al., 2019. Characteristics of Geothermal Field and the Tectonic-Thermal Evolution in Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40 (Suppl.1): 178—187 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, L.C., Gao, G., Xiang, B.L., et al., 2014. Lowest Limit of Organic Carbon Content in Effective Source Rocks from Lucaogou Formation in Jimusar Sag. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(2): 224—229 (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Ye, J.R., Yin, S.Y., et al., 2024. Constraints of Paleoclimate and Paleoenvironment on Organic Matter Enrichment in Lishui Sag, East China Sea Basin: Evidence from Element Geochemistry of Paleocene Mudstones. *Earth Science*, 49(7): 2359—2372 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S.F., Zhang, M., 2008. Oil and Gas Geochemistry. Petroleum Industry Press, Beijing, 201—206 (in Chinese).
- Pang, X., Zheng, J.Y., Mei, L.F., et al., 2021. Characteristics and Origin of Continental Marginal Fault Depressions under the Background of Preexisting Subduction Continental Margin, Northern South China Sea, China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(5): 1069—1080 (in Chinese with English abstract).
- Peng, G.R., Long, Z.L., Shi, Y.L., et al., 2022. Discussion on Integrated Geological and Geophysical Identification Method for Spatial Distribution of Favorable Source Rocks in Depression with Lack of Drilling Data: A Case Study of Enping 17 Sag, Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(6): 1116—1122 (in Chinese with English abstract).
- Peng, G.R., Shi, C., Long, Z.L., et al., 2023. Relationship between Element Geochemical Characteristics and Organic Matter Enrichment of Wenchang Formation Mudstones in Enping Sub-Sag 21, Pearl River Mouth Basin. *Marine Geology Frontiers*, 39(6): 65—74 (in Chinese with English abstract).
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History (Second ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Shi, C., 2022. REE Characteristics and Geological Significance of Mudstones from Wenchang Formation in Eastern Yangjiang Sag of Pearl River Mouth Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(3): 166—172 (in Chinese with English abstract).
- Shi, C., Long, Z.L., Zhu, J.Z., et al., 2020a. Element Geochemistry of the Enping Formation in the Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin and Their Environmental Implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(5): 79—86 (in Chinese with English abstract).
- Shi, C., Zhu, J.Z., Long, Z.L., et al., 2020b. TOC Prediction for Source Rocks of Wenchang Formation with a Joint Logging and Seismic Method in the Panyu 4 Sag in

- Pearl River Mouth Basin. *Marine Geology Frontiers*, 36(2):26—32(in Chinese with English abstract).
- Shi, C., Zhu, J.Z., Long, Z.L., et al., 2019. Prediction of Total Organic Carbon in Source Rocks by Probabilistic Neural Network: A Case Study of Southern Lufeng Area in Pearl River Mouth Basin. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 26(5):561—565(in Chinese with English abstract).
- Shi, H.S., Du, J.Y., Mei, L.F., et al., 2020. Huizhou Movement and Its Significance in Pearl River Mouth Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3):447—461(in Chinese with English abstract).
- Sweeney, J.J., Burnham, A.K., 1990. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics (1). *AAPG Bulletin*, 74:1559—1570. <https://doi.org/10.1306/0c9b251f-1710-11d7-8645000102c1865d>.
- Tang, X.Y., Huang, S.P., Yang, S.C., et al., 2016. Correcting on Logging-Derived Temperatures of the Pearl River Mouth Basin and Characteristics of Its Present Temperature Field. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8):2911—2921(in Chinese with English abstract).
- Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. Petroleum Formation and Occurrence. Springer, Berlin, Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- Wang, L., Jin, Q., 2005. Tertiary Hydrocarbon Kitchen in Western Qaidam Basin and Its Control on Hydrocarbon Accumulation. *Oil & Gas Geology*, 26(4):467—472(in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Zhu, D.W., Zhao, P., et al., 2021. Controls of Faulted Composite Accumulation Ridge on the Long Distance Migration and Accumulation of Neogene Hydrocarbon: A Case Study of the Eastern Yangjiang Sag and the Enping Sag in the Pearl River Mouth Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1):131—139 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, W.L., Zhu, J.Z., Yang, X.Y., et al., 2020. Study on the Genetic Sources and Accumulation Processes of Oil and Gas in the North Uplift Structural Belt of Enping Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 32(1):54—65(in Chinese with English abstract).
- Xue, N., Shao, X.Z., Zhu, G.Y., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Formation Environment of Source Rocks of Triassic Chang 7 Member in Northern Pingliang Area, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 35(3):51—65(in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Cao, Z.L., Liu, H.L., et al., 2024. Source Rock Evaluation and Prediction of Effective Hydrocarbon Kitchen Distribution of Upper Triassic in Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(2):380—392(in Chinese with English abstract).
- Yang, H.B., Feng, D.H., Yang, X.Y., et al., 2024. Characteristics of Source Rocks and Thermal Evolution Simulation of Permian Pingdiquan Formation in Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 36(5):156—166(in Chinese with English abstract).
- Yang, M.H., Zuo, Y.H., Duan, X.G., et al., 2023. Hydrocarbon Kitchen Evolution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and Its Enlightenment to Hydrocarbon Accumulation. *Earth Science*, 48(2):582—595(in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Peng, G.R., Wu, J., et al., 2021. Accumulation and Key Controls of Lateral Cross-Fault Hydrocarbon Migration: A Case Study of the Enping Sag in the Pearl River Mouth Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1):148—157.(in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.W., Peng, G.R., Zhang, Z.T., et al., 2021. Model of Oil-Gas Cross-Fault Migration, Evaluation and Application: A Case in the Enping Sag of Pearl River Mouth Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1):140—147(in Chinese with English abstract).
- Zhu, M., Zhang, X.T., Huang, Y.P., et al., 2019. Source Rock Characteristics and Resource Potential in Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(Suppl. 1):53—68 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 蔡国富, 彭光荣, 吴静, 等, 2022. 珠江口盆地浅水陆架区拆离断陷的构造变形与沉积充填响应: 以恩平凹陷为例. *地球科学*, 47(7):2391—2409.
- 高岗, 王银会, 柳广弟, 等, 2013. 酒泉盆地营尔凹陷有效烃源岩的确认及其展布特征. *石油实验地质*, 35(4):414—418, 425.
- 高阳东, 张向涛, 李智高, 等, 2021. 珠江口盆地恩平凹陷北带下一中新统层序构型及其差异性分析: 对岩性圈闭发育的启示. *地球科学*, 46(5):1758—1770.
- 高阳东, 朱伟林, 彭光荣, 等, 2024. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩评价及油气资源分布预测. *石油勘探与开发*, 51(5):986—996.
- 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等, 2019. 珠江口盆地地温场特征及构造—热演化. *石油学报*, 40(增刊 1):178—187.
- 匡立春, 高岗, 向宝力, 等, 2014. 吉木萨尔凹陷芦草沟组有效源岩有机碳含量下限分析. *石油实验地质*, 36(2):224—229.
- 雷闯, 叶加仁, 殷世艳, 等, 2024. 东海盆地丽水凹陷古气候和古环境对有机质富集的约束: 来自古新统泥岩的元素地球化学证据. *地球科学*, 49(7):2359—2372.
- 卢双舫, 张敏, 2008. 油气地球化学. 北京: 石油工业出版社.

- 庞雄,郑金云,梅廉夫,等,2021.先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因.石油勘探与开发,48(5):1069—1080.
- 彭光荣,龙祖烈,史玉玲,等,2022.低钻揭洼陷有利烃源岩空间展布地质与地球物理综合识别方法:以珠江口盆地珠一坳陷恩平 17 洼为例.石油实验地质,44(6):1116—1122.
- 彭光荣,石创,龙祖烈,等,2023.珠江口盆地恩平 21 洼文昌组泥岩元素地球化学特征及其与有机质富集的关系.海洋地质前沿,39(6):65—74.
- 石创,2022.珠江口盆地阳江东凹文昌组泥岩稀土元素特征及其地质意义.地质科技通报,41(3):166—172.
- 石创,龙祖烈,朱俊章,等,2020a.珠江口盆地白云凹陷恩平组泥岩元素地球化学特征及环境指示意义.海洋地质与第四纪地质,40(5):79—86.
- 石创,朱俊章,龙祖烈,等,2020b.井震联合预测珠江口盆地番禺 4 洼文昌组烃源岩总有机碳.海洋地质前沿,36(2):26—32.
- 石创,朱俊章,龙祖烈,等,2019.基于概率神经网络的烃源岩 TOC 预测:以珠江口盆地陆丰南区为例.断块油气田,26(5):561—565.
- 施和生,杜家元,梅廉夫,等,2020.珠江口盆地惠州运动及其意义.石油勘探与开发,47(3):447—461.
- 唐晓音,黄少鹏,杨树春,等,2016.南海珠江口盆地钻井 BHT 温度校正及现今地温场特征.地球物理学报,59(8):2911—2921.
- 王力,金强,2005.柴达木盆地西部第三系烃源灶及其对油气聚集的控制作用.石油与天然气地质,26(4):467—472.
- 吴静,朱定伟,赵鹏,等,2021.断裂复合汇聚脊对新近系油气远距离富集的控制作用:以珠江口盆地阳江东凹与恩平凹陷为例.大地构造与成矿学,45(1):131—139.
- 熊万林,朱俊章,杨兴业,等,2020.恩平凹陷北部隆起构造带油气成因来源及成藏过程研究.中国海上油气,32(1):54—65.
- 薛楠,邵晓州,朱光有,等,2023.鄂尔多斯盆地平凉北地区三叠系长 7 段烃源岩地球化学特征及形成环境.岩性油气藏,35(3):51—65.
- 杨帆,曹正林,刘海磊,等,2024.准噶尔盆地上三叠统烃源岩评价与有效烃源灶分布预测.石油实验地质,46(2):380—392.
- 杨海波,冯德浩,杨小艺,等,2024.准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系平地泉组烃源岩特征及热演化史模拟.岩性油气藏,36(5):156—166.
- 杨梅华,左银辉,段新国,等,2023.四川盆地下寒武统筇竹寺组烃源岩灶演化及其对成藏的启示.地球科学,48(2):582—595.
- 赵鹏,彭光荣,吴静,等,2021.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.大地构造与成矿学,45(1):148—157.
- 朱定伟,彭光荣,张忠涛,等,2021.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.大地构造与成矿学,45(1):140—147.
- 朱明,张向涛,黄玉平,等,2019.珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力.石油学报,40(增刊 1):53—68.