

文章编号: 0253-2697(2024)07-1031-13 DOI:10.7623/syxb202407001

珠江口盆地西江凹陷番禺 4 洼古近系 勘探重大发现及其意义

徐长贵¹ 高阳东¹ 刘 军^{2,3} 彭光荣^{2,3} 邱欣卫^{2,3} 张晓钊^{2,3} 贾培蒙^{2,3}

(1. 中国海洋石油有限公司 北京 100010; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518054;
3. 中海石油深海开发有限公司 广东深圳 518054)

摘要:珠江口盆地西江凹陷南部的番禺 4 洼是已证实的富生烃洼陷,早期的油气勘探发现主要分布在中新统珠江组以上的中—浅部层系(埋深小于 3000 m)。近期,中—深层古近系的油气勘探获得重大突破,在番禺 10-6 构造带渐新统珠海组和始新统恩平组高含砂率地层中发现了大—中型油田。为进一步指导番禺 4 洼古近系油气勘探,综合高精度三维地震、钻井和分析化验资料,对番禺 4 洼古近系砂岩油藏形成的烃源条件、储-盖组合、断层圈闭有效性及油气成藏模式等开展了系统研究,总结了珠江口盆地古近系富砂层系大—中型油气田的形成条件及勘探方向。研究结果表明:文昌组中广泛发育的半深湖—深湖亚相优质烃源岩是深层油气规模聚集的烃源基础;恩平组、珠海组均发育辫状河三角洲砂岩,分别与湖(海)泛泥岩、钙质砂岩构成了两类优质储-盖组合;伸展-走滑背景下的张扭断裂增压区和断裂带上盘的钙质胶结作用有利于富砂层段断块圈闭的侧向封堵;与构造带相邻的主通源断裂决定了油气的近距离高效优势汇聚。研究成果有效地指导了番禺 10-6 构造带大—中型油气田的发现,实现了番禺 4 洼古近系新层系的勘探突破,揭示了珠江口盆地富生烃洼陷古近系的勘探潜力,对珠江口盆地其他地区古近系高含砂率地层的勘探具有重要参考意义。

关键词:珠江口盆地;西江凹陷;番禺 4 洼;古近系;高含砂率地层;勘探突破;大—中型油田

中图分类号: TE132.1 **文献标识码:** A

Major discoveries and significance of hydrocarbon exploration in the Paleogene reservoirs of Panyu4 subsag, Xijiang sag, Pearl River Mouth Basin

Xu Changgui¹ Gao Yangdong¹ Liu Jun^{2,3} Peng Guangrong^{2,3} Qiu Xinwei^{2,3} Zhang Xiaozhao^{2,3} Jia Peimeng^{2,3}

(1. CNOOC Limited, Beijing 100010, China; 2. Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Guangdong Shenzhen 518054, China;
3. CNOOC Deepwater Development Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518054, China)

Abstract: Panyu4 subsag in the south of Xijiang sag in Pearl River Mouth Basin is proved to be rich in hydrocarbons. The early oil-gas exploration discoveries were mainly distributed in the middle and shallow strata above the Miocene Zhujiang Formation (buried depth less than 3000 m). Recently, a major breakthrough has been made in the oil-gas exploration for Paleogene reservoirs in the middle and deep layers. Large and medium oilfields have been found in sand-rich strata of the Oligocene Zhuhai Formation and the Eocene Enping Formation in the Panyu10-6 structural belt. To further guide oil-gas exploration in the Eocene reservoirs of Panyu4 subsag, based on high-precision three-dimensional seismic, drilling and analytical data, this paper systematically studies the hydrocarbon source conditions, reservoir-cap assemblage, fault trap effectiveness and hydrocarbon accumulation mode of the Paleogene sandstone reservoirs in Panyu4 subsag, and summarizes the formation conditions and exploration direction of large and medium oil-gas fields in the Paleogene sand-rich strata in Pearl River Mouth Basin. The research results show that the extensive development of high-quality semi-deep to deep lake subfacies source rocks in Wenchang Formation provides a material basis for the large-scale accumulation of deep oil and gas. Braided river delta sandstones are developed in Enping Formation and Zhuhai Formation, which constitute two types of high-quality reservoir-cap assemblages with lake (sea)flooding mudstone and calcareous sandstone, respectively. Under the background of extension and strike-slip, the pressurization zone of transtensional fault and the calcareous cementation on the hanging wall of fault zone are beneficial to the lateral sealing of fault-block traps in the sand-rich strata. The main source faults adjacent to the structural belt determine the high-efficiency accumulation of oil and gas in short distance. The research results have effectively guided the discovery of large-medium oil-gas fields in Panyu10-6 structural belt, realized the exploration breakthrough in the new Paleogene strata of Panyu4 subsag, and revealed the exploration potential of the Paleogene hydrocarbon-rich subsag in Pearl River Mouth Basin.

基金项目:中国海洋石油集团有限公司“十四五”科技重大项目(KJGG2022-0403)、中海石油(中国)有限公司前瞻基础研究项目(KJQZ-2023-2001)和中海石油(中国)有限公司重大生产性科研项目(SCKY-2023-SZ-02)资助。

第一作者:徐长贵,男,1971年10月生,2007年获中国地质大学(北京)工学博士学位,现为中海石油(中国)有限公司勘探副总师、教授级高级工程师,主要从事石油地质与综合勘探研究。Email:xuchg@cnooc.com.cn

通信作者:彭光荣,男,1978年8月生,2005年获中国石油大学(北京)硕士学位,现为中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院地质总师、高级工程师,主要从事石油地质与油气勘探综合研究。Email:penggr@cnooc.com.cn

sin, providing important reference for the exploration of the Paleogene sand-rich strata in other areas of Pearl River Mouth Basin.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Xijiang sag; Panyu4 subsag; Paleogene; sand-rich stratum; exploration breakthrough; large and medium oilfield

引用:徐长贵,高阳东,刘军,彭光荣,邱欣卫,张晓钊,贾培蒙.珠江口盆地西江凹陷番禺4洼古近系勘探重大发现及其意义[J].石油学报,2024,45(7):1031-1043.

Cite: XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, PENG Guangrong, QIU Xinwei, ZHANG Xiaozhao, JIA Peimeng. Major discoveries and significance of hydrocarbon exploration in the Paleogene reservoirs of Panyu4 subsag, Xijiang sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(7): 1031-1043.

南海东部油田所在的珠江口盆地(东部)是中国海域重要的原油产区^[1-3],2022年已实现油气年产量达 $2\,000\times 10^4\text{t}$ 油当量,成为中国海域第二大油气田。其中,珠一坳陷西江凹陷南部的番禺4洼是浅层勘探成熟区和原油主产区之一,其探明原油地质储量已超过 $1.8\times 10^8\text{t}$,为典型的“小而肥”的富生烃洼陷^[4-7]。20世纪末期,番禺4洼内接连发现番禺4-2和番禺5-1两个浅层大型油田(技术可采储量大于 $2\,500\times 10^4\text{m}^3$),浅层的中新统韩江组和珠江组为重点勘探层系^[4]。经过近30年的持续勘探,目前番禺4洼浅层储量发现难度日益增大,勘探方向逐渐由浅层新近系转向深层古近系。其中,下始新统文昌组邻近烃源岩,但由于埋深大、储层物性差且非均质性强^[8],呈现出“有储量、无产量”的状况;此外,钻井揭示上始新统恩平组、渐新统珠海组的含砂率高(大于80%)、储层物性好,但由于缺乏有效盖层,且洼陷内圈闭多以断层圈闭为主,侧向封堵能力差,因此,古近系油气勘探尚未取得实质性突破。

近两年,笔者应用最新的三维地震及探井资料,重新评估了番禺4洼的生烃潜力,并针对古近系珠海组、恩平组的高含砂率地层,开展了储-盖组合、断层侧向封堵及断裂控藏等成藏核心问题研究,明确了珠海组、

恩平组的勘探潜力及方向,在番禺10-6构造带的钻探中取得重大突破,发现了古近系大一中型油田(三级储量规模超过 $5\,000\times 10^4\text{t}$),揭示了珠江口盆地富生烃洼陷古近系的勘探潜力。番禺4洼古近系的勘探发现对于珠江口盆地其他地区古近系高含砂率地层的油气勘探具有重要的指导意义。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于南海北部陆缘,为中生代、新生代伸展盆地^[9-11],呈现“三隆三坳”的构造格局,由北向南依次划分为北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、中部坳陷带、南部隆起带和南部坳陷带^[6,12]。珠一坳陷位于珠江口盆地北部坳陷带,是盆地内最主要的产油区,自西向东依次为恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷和韩江凹陷,各凹陷间被NW向的低凸起分隔[图1(a)]。番禺4洼位于西江凹陷南部,其形成演化受NE—SW向边界断裂控制,古近纪经历了神狐运动、珠琼运动I幕、惠州运动、珠琼运动II幕等多次构造运动^[13-14],造成洼陷内地层遭受多次强烈抬升剥蚀,现今呈NE向窄、SW向宽的反“L”形展布特征。番禺4洼东侧为东沙隆起、西接西恩低凸起,南邻番禺低隆起,可进一步划分为北次洼、南次洼和西北次洼[图1(b)]。

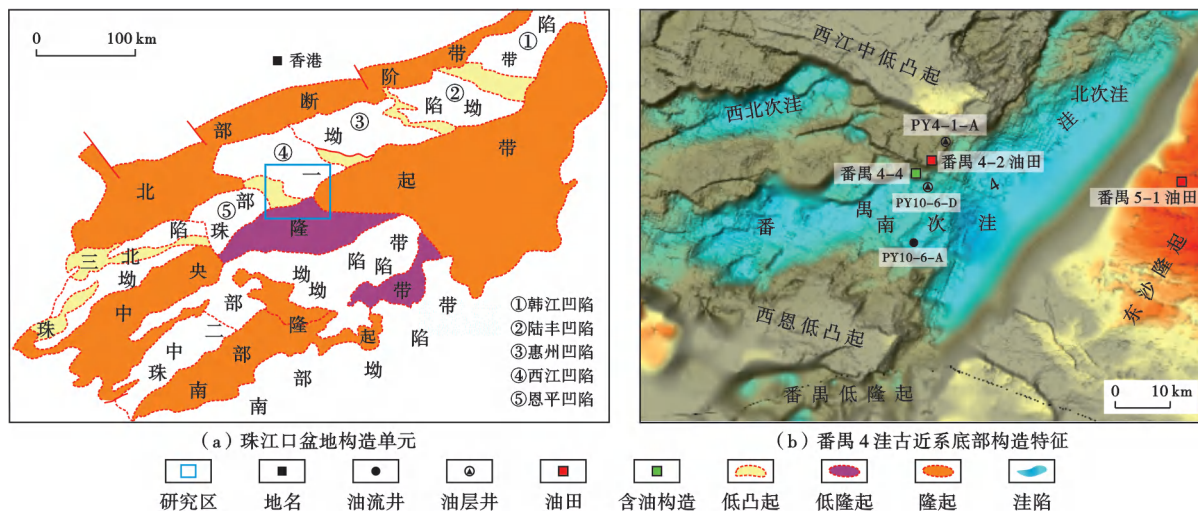


图1 珠江口盆地构造单元及番禺4洼构造区划分

Fig. 1 Division of tectonic units of Pearl River Mouth Basin and tectonic areas of Panyu4 subsag

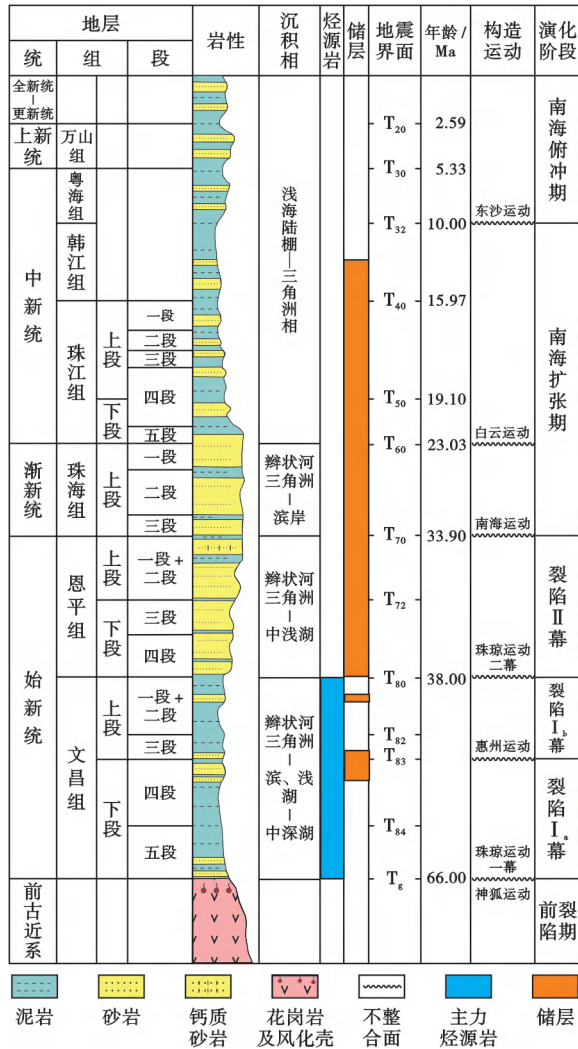


图2 番禺4洼综合地层特征

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Panyu4 subsag

钻井揭示盆地基底为早白垩世花岗岩,基底之上的新生界由老到新依次为文昌组(E_2w)、恩平组(E_2e),珠海组(E_3z)、珠江组(N_1z)、韩江组(N_1h)、粤海组(N_1y)、万山组(N_2w)和第四系(Q),其中,断陷期的文昌组和恩平组下段为陆相沉积,断-坳转换期的恩平组上段和珠海组为海陆过渡相沉积,坳陷期的珠江组以上地层为海相沉积,呈现出“先陆后海”的沉积特征(图2)。洼陷内的烃源岩主要发育在文昌组,优质储层发育在恩平组、珠海组、珠江组和韩江组,整体上表现为“下生上储”的成藏组合。

2 番禺4洼勘探历程

番禺4洼的油气勘探开始于20世纪80年代中期^[4],经历了从合作到自营、从浅层新近系到深层古近系的勘探过程,可大致划分为浅层大型构造圈闭勘探阶段(1985—2007年)、浅层小型构造圈闭勘探阶段(2008—

2016年)、古近系探索及油田设施周边滚动勘探阶段(2017—2021年)和古近系勘探突破阶段(2022年至今)。

2.1 浅层大型构造圈闭勘探阶段(1985—2007年)

该阶段勘探的重点目标为浅层大型构造圈闭。依据二维地震资料解释,初步落实了番禺4洼的洼陷范围,重点评价并钻探了多个浅层大型背斜、断背斜构造。1985年,油田公司在番禺4-1构造上钻探了PY4-1-A井,在韩江组下段及珠江组上段均钻遇油层并见到丰富的录井荧光显示,由此拉开了番禺4洼油气勘探的序幕。对洼陷结构及构造演化的深入研究表明,番禺4洼内表现为“文昌组厚、恩平组薄”的结构特征^[4],这坚定了对番禺4洼的勘探信心。1998—1999年,相继钻探发现番禺4-2和番禺5-1两个大型油田,其油层均位于浅层的韩江组和珠江组,由此也掀起了番禺4洼浅层的勘探高潮,证实番禺4洼为一个“小而肥”的富生烃洼陷。

2.2 浅层小型构造圈闭勘探阶段(2008—2016年)

该阶段勘探的重点目标转向距油田设施不远的浅层小型构造圈闭,并利用新采集的三维地震资料,开展了断裂控藏精细研究,指出了油气富集成藏有利区带。番禺4洼断裂发育时空差异性的研究表明,现今断裂系统具有多期构造运动叠加效应^[15],而晚期断裂“控圈、控运、控藏”特征显著^[16]。基于精细构造解释研究落实了众多浅层小型构造圈闭,先后发现了番禺10-8、番禺10-5等7个小型“卫星”油田。该阶段未获得大—中型油气田发现,勘探方向亟待转型。

2.3 古近系探索及油田周边滚动勘探阶段(2017—2021年)

该阶段的油气勘探方向由新近系转向古近系,兼顾油田设施周边滚动勘探。在古近系勘探方面,番禺4洼内首先探索了古近系文昌组,在裂陷期的陡坡带和缓坡带针对文昌组先后钻探7口探井,均钻遇油层并见到丰富的油气显示,但储层埋深大、成岩作用强、物性较差(平均孔隙度仅为6.5%、渗透率普遍低于2mD),属于超低—特低孔隙度、超低—特低渗透率储层,且非均质性强^[8]。文昌组因储层特征以及受海上油气田开发成本高限制,未能实现商业开发,呈现“有储量、无产量”的状态。与下伏文昌组不同,恩平组和珠海组均为高含砂率地层,但因其盖层条件及圈闭有效性风险大,未能作为主要勘探层系。由此,番禺4洼的古近系勘探陷入停滞状态。该阶段在油田滚动勘探方面聚焦油田设施周边地区的小型或微型构造圈闭,利用平台设施,快速评价上产,取得了番禺4-4等微型油田的勘探发现,为老油田的稳产做出了贡献。

2.4 古近系勘探突破阶段(2022年至今)

2022年,油田公司在番禺4洼全区针对古近系开展了三维地震资料重新处理,地震资料品质得到明显改善,并结合最新的探井资料,对古近系洼陷的结构-构造演化、层序地层、沉积体系、生烃潜力、断裂控藏等开展了系统研究,明确了地质认识和有利勘探方向。2023年3月,以古近系富砂层系珠海组、恩平组为主要勘探目的层,优选番禺10-6构造带作为钻探目标,获得了大一中型油田的发现,实现了番禺4洼富生烃洼陷新层系的勘探突破。

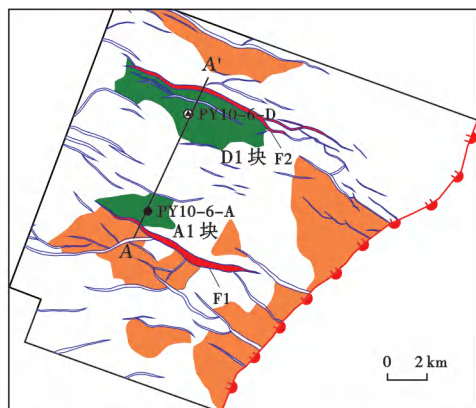
3 番禺10-6构造带古近系大一中型油田的勘探发现

3.1 钻井油气发现

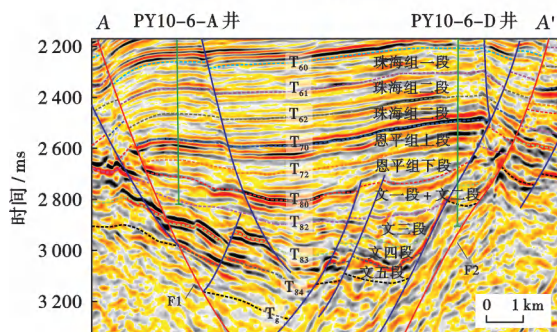
番禺10-6构造带位于番禺4洼西南部,紧邻南次注生烃中心,通源断层发育,其浅层已发现番禺4-2、番禺10-8、番禺10-5和番禺10-2等油田,烃源及油气运移条件优越。该构造带珠海组和恩平组内发育多个断块圈闭,其中,PY10-6-A井位于构造带的A1块[图3(a)],于2023年3月开钻,完钻井深为4212m,完钻层位为始新统文昌组,在珠海组、恩平组和文昌组中均见到油气显示,累计荧光显示厚度为341m(78层),测井综合解释的油层净厚度为85.9m(25层),在恩平组油层段(埋深约为3800m)进行钻杆测试(DST),获产油量为440t/d的高产工业油流。PY10-6-D井位于构造带北区的D1块[图3(a)],油气显示层段为珠海组、恩平组和文昌组,全井录井荧光显示的累计厚度为1058m(179层),油层段均位于珠海组和恩平组,测井综合解释的油层净厚度为77.8m(12层)。完钻井钻探结果表明,珠海组、恩平组油层在区域上呈稳定分布,整体三级储量规模超过 5000×10^4 t,这揭示了番禺4洼古近系珠海组、恩平组的勘探潜力,也表明珠江口盆地的富砂层系勘探取得了重大突破。

3.2 油藏基本特征

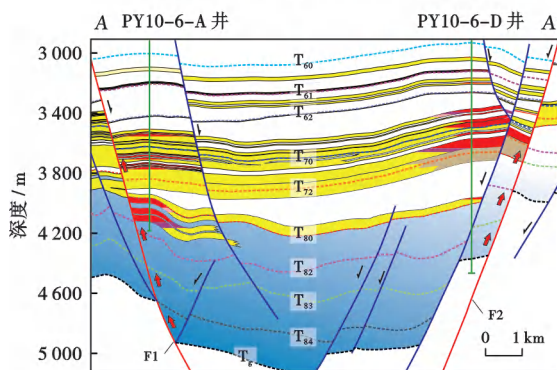
番禺10-6构造的主力油藏位于始新统恩平组和渐新统珠海组,纵向上,南区A1块可划分为8个油层组,北区D1块可划分为13个油层组,以边水油藏为主,均为断块圈闭油藏[图3(b)、图3(c)]。油藏整体为常温常压系统,在南区A1块和北区D1块,压力系数分别为0.995~1.015和0.990~1.000,地温梯度分别为3.27℃/hm和3.32℃/hm;主力油层的埋深为3000~3940m;流体(PVT样品)的物性分析结果表明,地面原油的密度为0.84~0.87g/cm³,属轻质油。



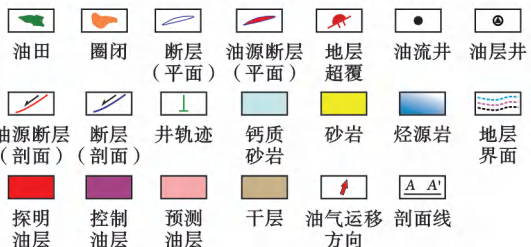
(a) 恩平组顶面(T₇₀)油田、圈闭与断层叠合



(b) 过PY10-6-A井、PY10-6-D井地震剖面



(c) 番禺10-6构造带油藏剖面



注: T₆₀—珠海组顶界面; T₆₁—珠海二段顶界面; T₆₂—珠海三段顶界面; T₇₀—恩平组顶界面; T₇₂—下恩平组顶界面; T₈₀—文昌组顶界面; T₈₂—文三段顶界面; T₈₄—文五段顶界面; T_g—基底顶界面。

图3 番禺10-6构造带恩平组顶面构造与含油气分布叠合、地震剖面及油藏剖面特征

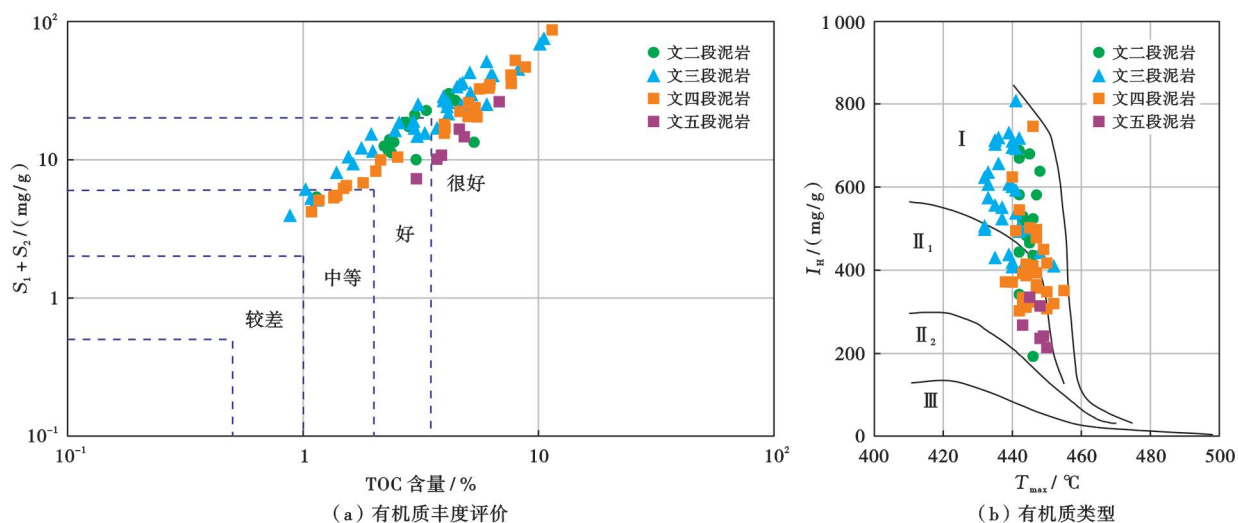
Fig. 3 Superimposition of oil-gas distribution zones with the top surface structure of Enping Formation, seismic profile and reservoir profile in Panyu10-6 structural belt

4 番禺 10-6 构造恩平组—珠海组的有利成藏条件

4.1 文昌组发育优质烃源岩

番禺 4 洼在 PY4-2-A 井、PY5-8-A 井等 7 口钻井中揭示了文昌组发育高丰度湖相烃源岩。泥岩岩石的热解分析结果表明,文昌组一段(文一段)+文昌组二段(文二段)烃源岩的总有机碳(TOC)含量分布在 1.1%~5.3%,平均为 3.1%,有机质丰度属于“好—很好”级别,有机质类型为 I—II₁ 型;文昌组三段(文三段)烃源岩的有机质丰度略高于文二段,

TOC 含量分布在 0.9%~10.5%,平均为 4.0%,有机质丰度属于“好—很好”级别,有机质类型为 I—II₁ 型;文昌组四段(文四段)烃源岩的有机质丰度最高,TOC 含量分布在 1.1%~11.5%,平均为 4.4%,有机质丰度主体为“好—很好”级别,有机质类型为 I—II₁ 型;文昌组五段(文五段)的烃源岩 TOC 含量分布在 3.0%~6.8%,平均为 4.4%,有机质丰度为“好—很好”级别,有机质类型主要为 II₁ 型(图 4)。综上所述,文三段、文四段为番禺 4 洼最优质烃源岩发育层段,这为深层油气的规模聚集提供了烃源基础(图 5)。



注: $S_1 + S_2$ —生烃潜力; TOC—总有机碳; I_H —氢指数; T_{max} —最高热解峰温。

图 4 番禺 4 洼烃源岩生烃潜力评价

Fig. 4 Hydrocarbon potential evaluation of source rocks in Panyu4 subsag

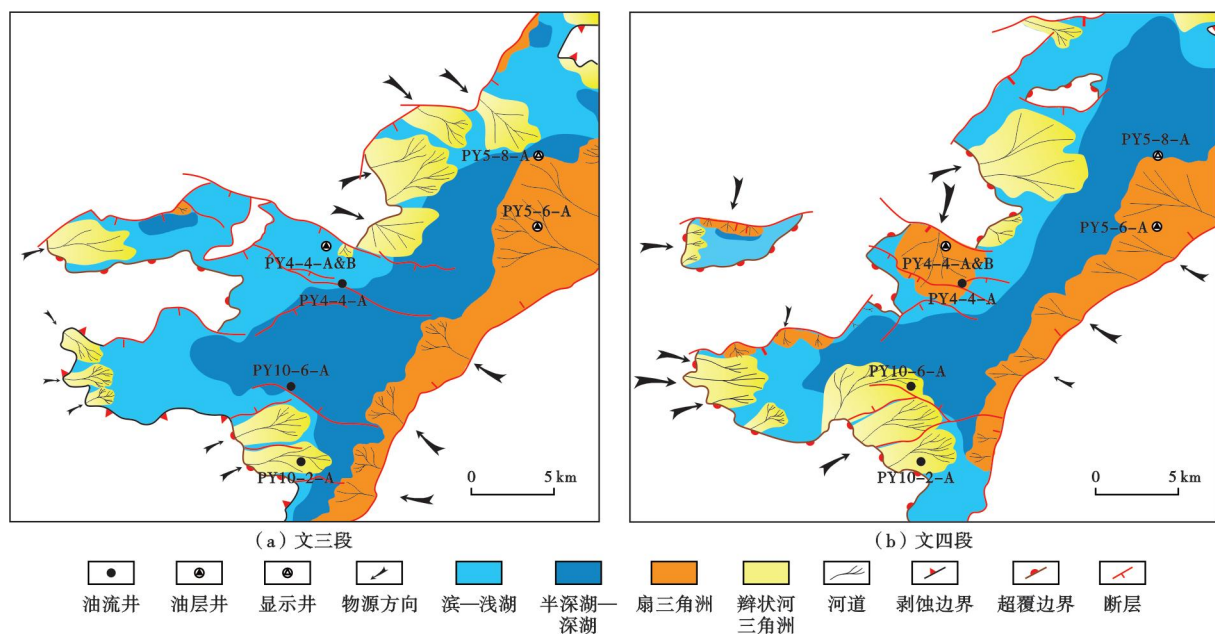


图 5 番禺 4 洼文昌组三段、文昌组四段沉积相

Fig. 5 Sedimentary facies of the Member 3 and 4 of Wenchang Formation in Panyu4 subsag

李守军^[17]对烃源岩生物标志化合物的研究表明,姥植比(Pr/Ph)可反映母源形成时的氧化-还原条件,深湖亚相中有机质的 Pr/Ph 通常小于 3。奥利烷和双杜松烷可指示陆源高等植物的输入,目前普遍认为,双杜松烷主要来源于高等植物的树脂化合物^[18-19]。在淡水湖泊中,C₃₀ 4-甲基甾烷主要来源于甲藻或沟鞭藻,高丰度的 C₃₀ 4-甲基甾烷通常指示优质烃源岩的发育^[20-25]。番禺 4 注文一段+文二段泥岩中的 Pr/Ph 为 1.3~2.5,具有较高丰度的奥

利烷、双杜松烷和 C₃₀ 重排霍烷,规则甾烷分布呈“V”字形,C₃₀ 4-甲基甾烷较丰富(图 6),这表明有机质主要来源于还原水体环境的水生生物,但存在陆源高等植物的贡献,为浅湖—半深湖亚相烃源岩。文三段、文四段和文五段泥岩中的 Pr/Ph 为 1.2~3.1,奥利烷和双杜松烷丰度较低,规则甾烷呈“V”字形分布,C₃₀ 4-甲基甾烷较丰富(图 6),表明其有机质主要来源于还原环境中的水生藻类,为半深湖—深湖亚相烃源岩。

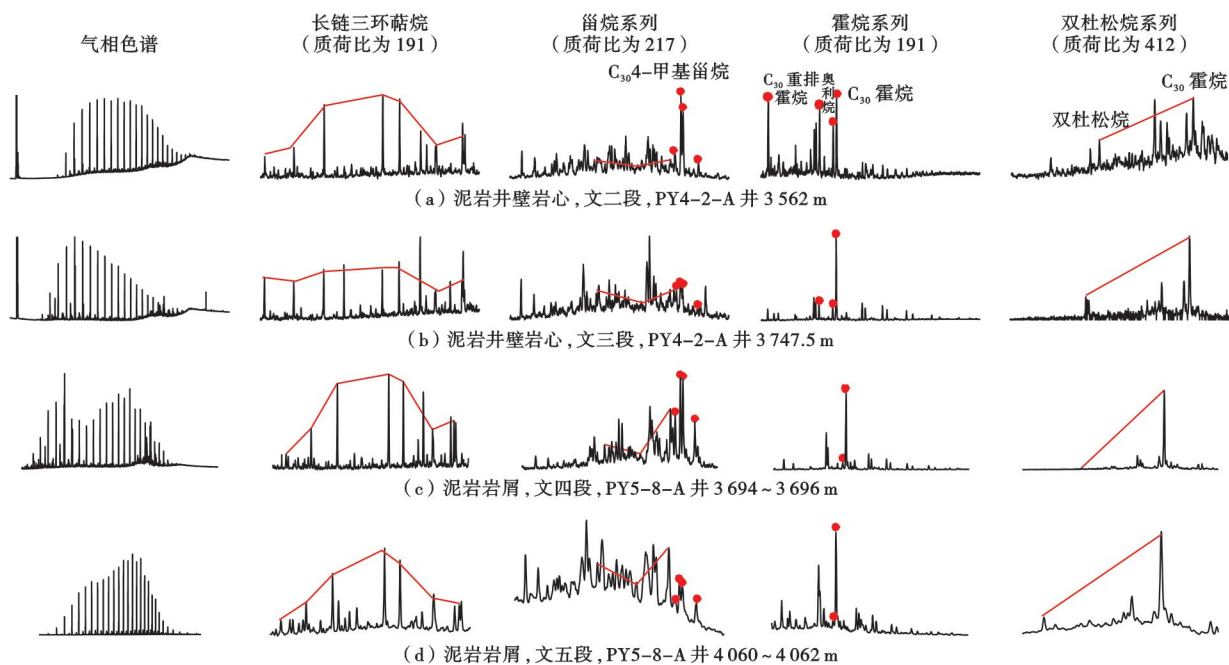


图 6 番禺 4 注典型井文昌组烃源岩生物标志化合物特征

Fig. 6 Biomarker characteristics of Wenchang Formation source rocks in typical well of Panyu4 subsag

目前,番禺 4 注揭示文昌组烃源岩的钻井(PY4-2-A 井、PY10-6-A 井、PY10-2-A 井、PY4-4-A 井和 PY4-4-B 井)均位于南次洼的边缘(图 5),这意味着在南次洼的沉积中心,文昌组半深湖—深湖亚相优质烃源岩将更为发育。结合文昌组沉积相及地震反射特征^[23-25]分析表明,文一段—文五段均发育半深湖—深湖亚相沉积,其中,以文三段—文四段半深湖—深湖亚相的分布范围最广(图 5),有机质丰度最高(图 4),最大面积为 272 km²,为主力烃源岩层位,是番禺 4 注成为“小而肥”富生烃洼陷的物质基础。

4.2 辫状河三角洲砂岩分别与湖(海)泛泥岩、钙质砂岩构成 2 类优质储-盖组合

番禺 4 注在恩平组沉积晚期—珠海组沉积期为断-坳转换阶段,沉积环境经历了“先陆后海”的演化过程^[26],地层含砂率高,储-盖组合条件是制约勘探的核心问题之一。

4.2.1 恩平组湖相辫状河三角洲与湖泛泥岩、钙质砂岩的储-盖组合

恩平组沉积早期,番禺 4 注继承了文昌组沉积晚

期的断裂分布特征,断裂活动强度逐渐减弱,沉积中心与文昌组沉积晚期基本一致,恩平组下段局限分布于南次洼西南部和西北次洼。恩平组沉积晚期,断裂活动进一步减弱,盆地逐步向坳陷阶段过渡,湖盆范围逐渐扩大,整体呈“广水浅盆”的沉积格局,恩平组上段在番禺 4 注均有分布,但其地层厚度由沉积中心向外缘逐渐减薄。恩平组沉积期的物源主要来自东沙隆起下白垩统花岗岩和遭受抬升剥蚀的文昌组沉积岩,顺物源方向自东向西可依次识别出辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘和滨—浅湖亚相(图 7),其中,番禺 10-6 构造带以辫状河三角洲平原—辫状河三角洲前缘亚相沉积为主。

钻井揭示,番禺 4 注恩平组下段的厚度为 131~280 m,含砂率为 89.6%~98.4%,岩性以厚层(含砾)中砂—粗砂岩为主,见钙质粉砂岩和薄层泥岩;恩平组上段的厚度为 211~213 m,含砂率为 78.1%~86.8%,岩性以中砂—细砂岩、钙质砂岩和泥岩为主,辫状河三角洲平原或辫状河三角洲前缘亚相砂岩分别与湖泛泥岩、钙质砂岩构成了 2 类优质储-盖组合。

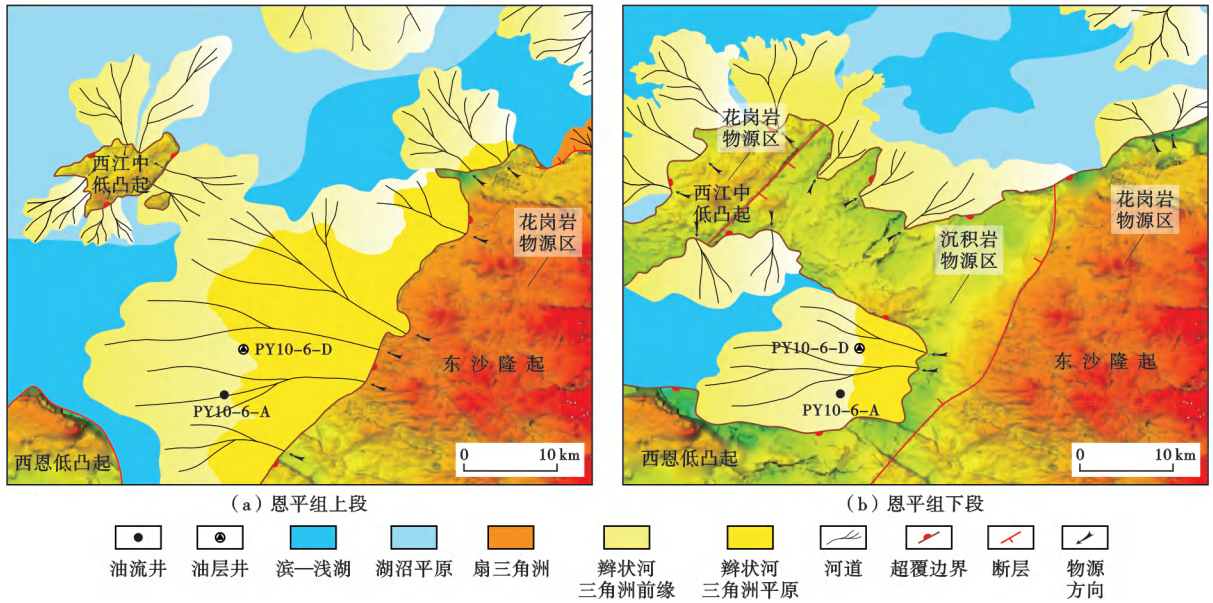
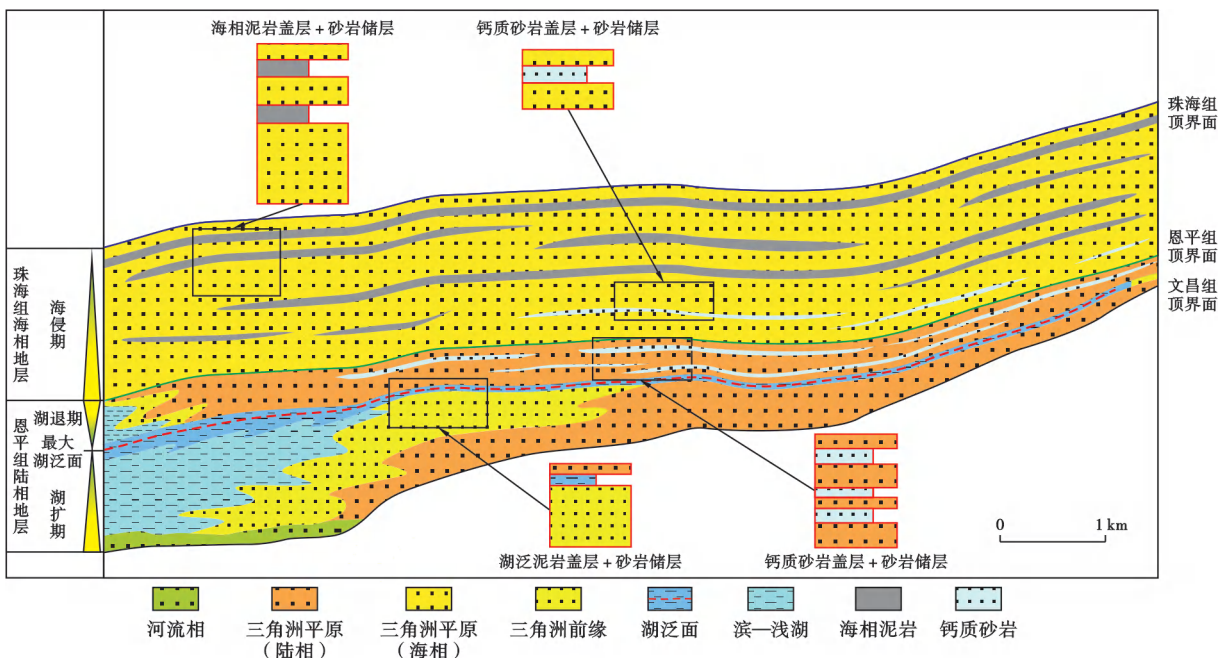


图 7 番禺 4 洼恩平组沉积相

Fig. 7 Sedimentary facies of Enping Formation in Panyu4 subsag

恩平组沉积晚期,研究区湖盆迅速扩张,湖盆范围达到最大,形成最大湖泛面(MFS)(图 7、图 8),发育一套厚度为 28 m 的区域泥岩(夹总厚度为 9 m、4 层单层厚度为 1~3 m 的薄层砂岩),是最重要的区域性盖层;在湖盆萎缩期,受间歇性海侵影响(岩石薄片见棘皮生物碎屑和海绿石)[图 9(a)、图 9(b)],湖水局部咸化,水深逐渐变浅,蒸发作用变强,蒸发泵作用^[27-28]有利于钙质砂岩与正常砂岩形成间互沉积。PY10-6-A 井揭示钙质砂岩共 15 m/7 层,

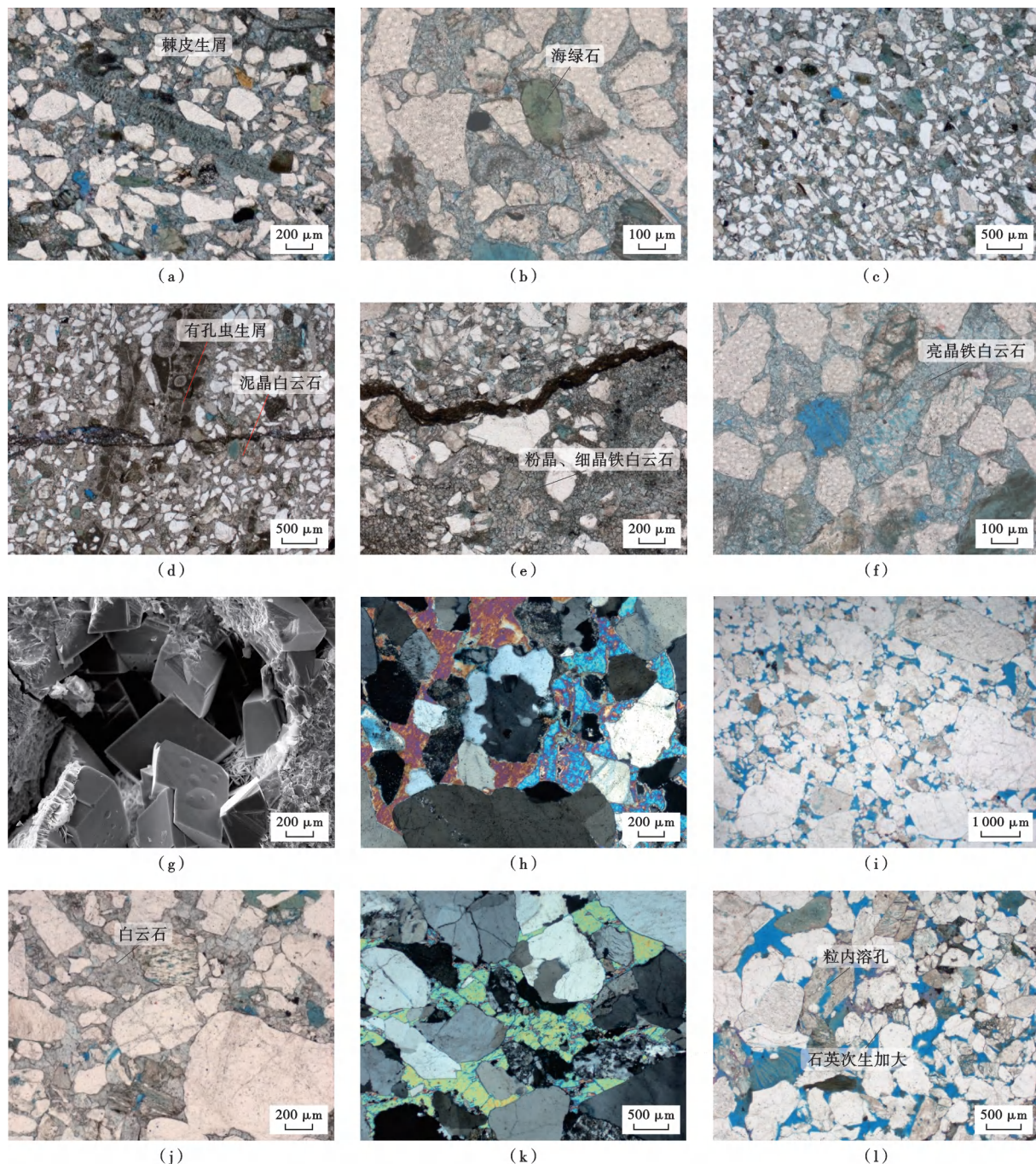
单层厚度为 1~3 m,岩性为白云质中粒—细粒岩屑长石砂岩,其中,铁白云石普遍充填于粒间、含量为 27.5%;岩层的整体孔隙发育极差,实测孔隙度为 4.4%~9.5%、渗透率 0.02~0.19 mD,钻井已证实其为有效盖层[图 9(c)]。白云石主要有泥晶白云石[图 9(d)],粉晶、细晶白云石[图 9(e)]和亮晶铁白云石[图 9(f)],菱面体铁白云石在扫描电镜下常呈连晶状或嵌晶状分布于粒间[图 9(g)]。局部发育硬石膏胶结[图 9(h)]。



注: T_{60} —珠海组顶界面; T_{70} —恩平组顶界面; T_{80} —文昌组顶界面。

图 8 番禺 4 洼恩平组、珠海组储-盖组合发育模式

Fig. 8 Development mode of reservoir-cap assemblages of Enping and Zhuhai Formation in Panyu4 subsag



(a)少量棘皮生物碎屑且被铁白云石交代,恩平组上段,PY10-6-A井3686.0m,蓝色为铸体,单偏光;(b)浅水海侵指相矿物海绿石,恩平组上段,PY10-6-A井3690.9m,蓝色为铸体,单偏光;(c)白云质中粒—细粒岩屑长石砂岩,铁白云石强烈胶结,含量为27.5%,整体孔隙发育极差,恩平组上段,PY10-6-A井3686.0m,蓝色为铸体,单偏光;(d)少量有孔虫生物碎屑产出,少量白云石充填粒间,少量泥晶呈集合体状产出,大量以细晶状并胶结颗粒产出,恩平组上段,PY10-6-A井3703.5m,蓝色为铸体,单偏光;(e)白云石普遍发育,呈粉晶状、细晶状或胶结颗粒产出,恩平组上段,PY10-6-A井3767.0m,蓝色为铸体,单偏光;(f)亮晶铁白云石普遍充填粒间,恩平组上段,PY10-6-A井3686.0m,蓝色为铸体,单偏光;(g)菱面体状铁白云石呈粒间嵌晶状分布,恩平组下段,PY10-6-A井3731.8m,扫描电镜;(h)硬石膏充填粒间,并呈连晶型胶结颗粒产出,恩平组下段,PY10-6-D井3775.3m,正交偏光;(i)辫状河三角洲前缘含砾中粒—粗粒岩屑长石砂岩,填隙物含量为2%,孔隙度为15.2%,渗透率为919mD,恩平组上段,PY10-6-A井3792.1m,蓝色为铸体,单偏光;(j)白云石普遍充填粒间,并胶结颗粒产出,珠海组三段,PY10-6-A井3518.0m,单偏光;(k)硬石膏普遍发育,呈连晶状充填粒间并胶结颗粒产出,珠海组三段,PY10-6-A井3557.9m,正交偏光;(l)部分石英次生加大,加大边完整程度不一,部分颗粒发生溶解形成次生溶孔,珠海组三段,PY10-6-A井3591.9m,单偏光。

图9 番禺4洼珠海组、恩平组钙质砂岩及储层微观特征

Fig. 9 Microscopic characteristics of calcareous sandstones and reservoirs of Zhuhai and Enping formations in Panyu4 subsag

常规井壁的取心分析和岩石薄片观察表明,恩平组储层的岩石类型以岩屑长石砂岩为主,石英、长石和岩屑含量分别为 71.6%、14.5%和 13.9%,岩屑类型以花岗岩岩屑和火山岩岩屑为主。碎屑颗粒以中粒、粗粒为主,部分含砾,颗粒磨圆度为次棱状—次圆状,分选中等,颗粒之间呈点—线接触。填隙物含量为 0.5%~16.0%、平均为 4.0%,其中,泥质含量低、平均为 1.7%,胶结物多为硅质胶结和碳酸盐胶结。砂岩储集空间类型以原生粒间孔为主,见少量粒间溶孔和粒内溶孔[图 9(i)],孔隙度为 4.3%~19.4%,渗透率为 0.1~919.0 mD,整体属于低—中孔、低—中渗储层。

4.2.2 珠海组海相辫状河三角洲与海泛泥岩的储-盖组合

珠海组沉积期,番禺 4 洼开始大规模海侵,发育大规模海相三角洲沉积,珠海组以海相三角洲平原分流河道砂岩储层和泥岩盖层作为主要储-盖组合,砂岩储层和钙质砂岩盖层作为次要储-盖组合(图 8)。钻井揭示珠海组厚度为 429~639 m,含砂率为 65%~78%,砂岩以厚层含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩和细砂岩为主,间有薄层钙质中砂—细砂岩。泥岩发育层数较多,单层厚度较薄,分布在 1~12 m,多数在 5 m 以下,钻井证实可作为有效盖层。

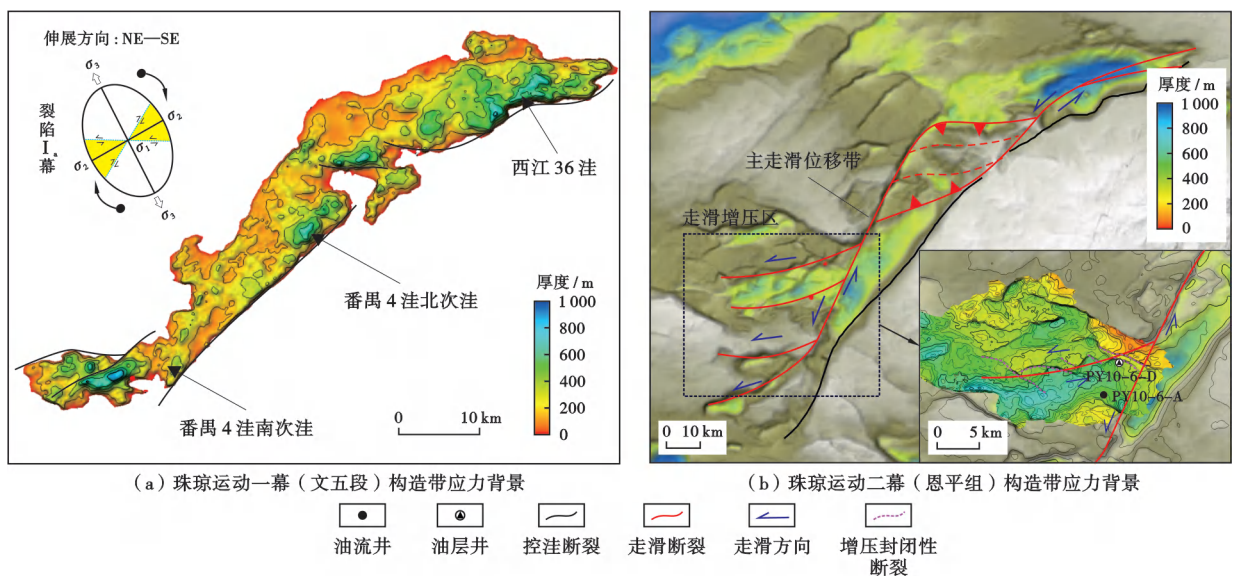
珠海组储层的岩石类型以岩屑长石砂岩为主,石英、长石和岩屑含量分别为 71.3%、14.5%和 14.2%。岩屑类型以花岗岩岩屑和火山岩岩屑为主。碎屑颗粒以中粒—粗粒为主,部分含砾,颗粒磨圆度为次棱状—次圆状,分选为中等—差,颗粒之间呈点—线接触。填隙物含量为 1%~31%、平均为 12%,其中,泥质含量低、平均为 1.4%,胶结物多为硅质胶结和碳酸盐胶结,局部发育强烈

的白云石胶结[图 9(j)]或硬石膏胶结[图 9(k)]。砂岩储集空间类型以原生粒间孔为主,其次为粒间溶孔,见少量粒内溶孔[图 9(l)],孔隙度为 6.5%~15.3%,渗透率为 0.5~945.0 mD,整体属于低孔、中—高渗储层。

4.3 张扭断裂增压区和断裂带上盘的钙质胶结作用

番禺 10-6 构造带钻井揭示,珠海组—恩平组含砂率为 78%~95%,岩性对接和泥岩涂抹均难以满足断块圈闭的侧向封堵,但钻井揭示该含油构造中断块圈闭油藏的储量占比达 91%,最大烃柱高度为 158 m。区域断裂分析和成岩作用初步研究认为,张扭断裂增压区和断裂带上盘的钙质胶结作用对富砂层段断块圈闭的侧向封堵有着重要的贡献。

晚白垩世,珠江口盆地 NEE 向和 EW—NWW 向 2 组先存断裂体系的差异性活化控制了洼陷形态和演化特征^[29-30]。在珠琼运动一幕 NW—SE 向伸展应力机制下,NE—NEE 向断裂开始活化,文昌组沉积期的古地貌呈现“多隆多洼”的构造格局,发育多个沉积中心,其中,南次洼的发育主要受控于 NE 向和 EW 向 2 组断裂活动[图 10(a)]。珠琼运动二幕,区域伸展构造应力方向由 NWW 向转变为近 SN 向^[31],NWW 向、近 EW 向断裂的活动性明显增强^[12],促使恩平组—珠海组沉积早期发育的断裂在继承性构造背景下多具有伸展—走滑的特征。恩平组沉积早期,番禺 4 洼北次洼抬升成为剥蚀区,而西北次洼和南次洼接受沉积,沉积体系以周边短源为主;恩平组沉积晚期,番禺 4 洼进入断—拗转换期,洼陷区重新沉降,NE 向的边界断裂控制了南部沉积边界,珠—坳陷内各洼陷连通,呈现出广、浅的湖盆特征;珠海组沉积期,番禺 4 洼处于



注:σ₁—最大主应力;σ₂—中间主应力;σ₃—最小主应力。

图 10 番禺 4 洼构造应力背景
Fig. 10 Tectonic stress background of Panyu4 subsag

断-拗转换晚期向裂后沉降转变阶段,断裂活动相对较弱^[12],地层呈近等厚状稳定分布,洼陷区沉积了海相三角洲平原亚相。恩平组—珠海组沉积早期伸展-走滑作用形成的张扭性断裂在平面上发育众多转换带^[32],番禺4注在左行右阶断裂带上发育多个增压区,其中,番禺10-6构造带的主体构造就位于增压区影响范围内[图10(b)、图10(c)]。实钻的压力监测结果表明,恩平组内部的压力系数可达1.22。根据渤海海域的勘探经验^[32],增压区断裂带内的糜棱岩化碎裂岩涂抹可形成侧向封闭;此外,研究区西部阳江东凹的勘探结果也证实张扭性断裂的侧向封堵能力较好,有利于油气富集^[33]。由此推测在番禺10-6构造带,张扭性控圈断裂对侧向封堵具有重要贡献。

钻井揭示,珠海组—恩平组砂岩中多处可见硬石膏,并表现为粒间充填、基底式胶结的特点[图9(h)],实测砂岩的渗透率小于1.0 mD。硬石膏的形成多受控于埋藏期高温导致的石膏脱水作用。结合番禺10-6构造带控圈断裂长期表现为继承性活动且切割基底深度大的特征[图3(b)、图3(c)]推测,在断裂带内,钙质胶

结和硬石膏充填等成岩作用也是造成富砂层系断块圈闭侧向封堵的重要原因之一。

4.4 构造带邻近与主成藏期匹配的主通源断裂

番禺10-6构造带在浅层已发现番禺4-2、番禺10-8、番禺10-2和番禺10-5等多个油田,通源断裂的活动期与主成藏期匹配是油气高效汇聚的重要因素。盆地模拟和油层流体包裹体均一温度分析结果表明,番禺4注文昌组烃源岩在珠江组沉积晚期(距今约16 Ma)达到成熟,开始大规模排烃,现今洼陷内的烃源岩总体处于中等成熟阶段。番禺10-6构造带共存在2期原油充注,即粤海组沉积期(距今13.0~4.2 Ma)和万山组—第四系沉积期(距今3.7~0 Ma)^[7]。

番禺4注南部断裂非常发育。番禺10-6构造带紧邻2条主通源断层,即F1和F2断层。断层的剖面形态表现为高角度铲式断层[图3(b)、图3(c)],走向均为NW—SE向,且大面积横切文昌组烃源岩;断裂在主成藏期的持续活动可有效沟通烃源岩和储集层[图3(c)、图11],是油气垂向运移的优势通道,造成油气在番禺10-6构造带的深层恩平组、珠海组以及浅

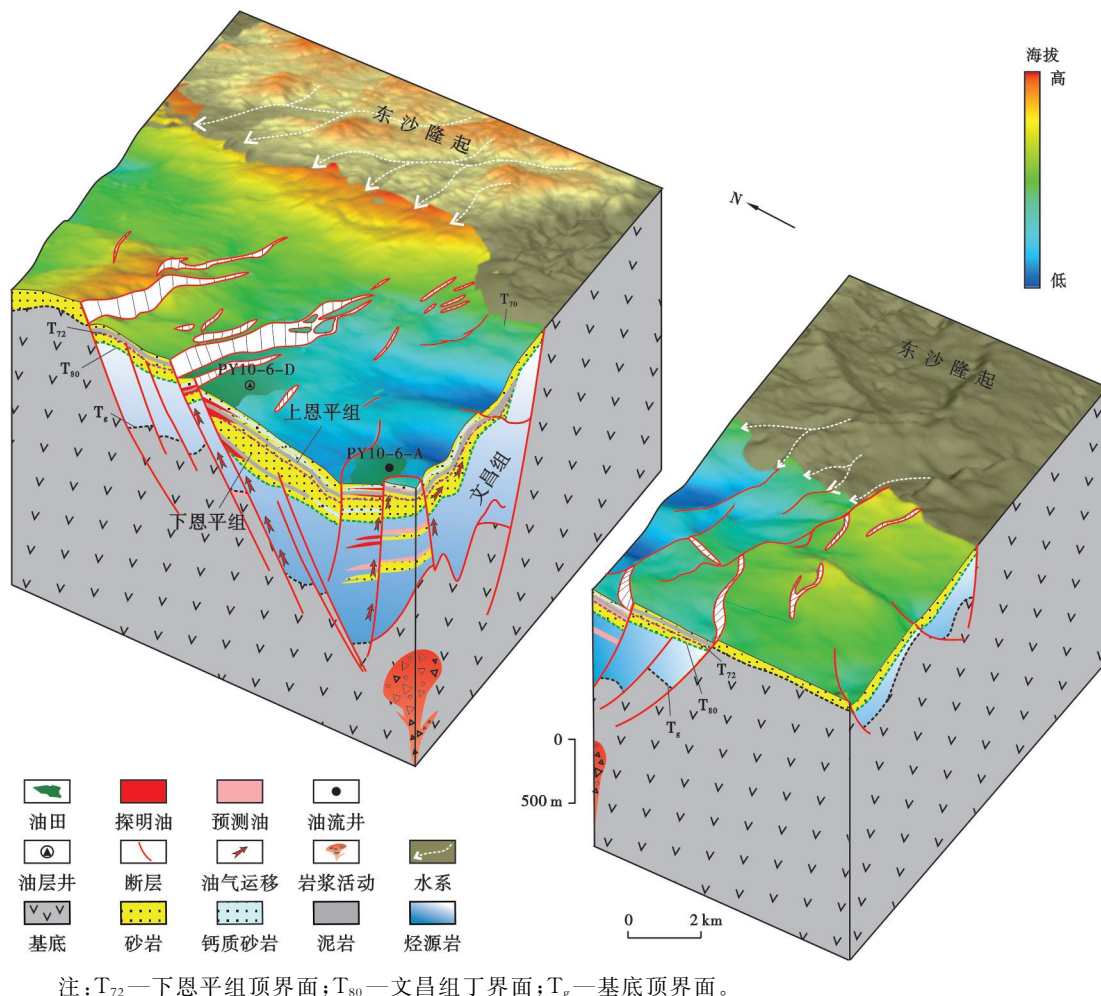


图11 番禺4注PY10-6构造带立体成藏模式
 Fig. 11 Three dimensional hydrocarbon accumulation mode of PY10-6 structural belt in Panyu4 subsag

层珠江组大规模、连续成藏。因此,构造带邻近主通源断裂决定了油气的近距离高效优势汇聚成藏。

番禺10-6构造带的油藏表现为“断裂高效输导、近源优势成藏”的成藏模式。长期活动的控圈断裂大面积沟通南次洼的优质烃源岩,油气沿断裂向恩平组、珠海组的辫状河三角洲砂岩储层运移,在湖泛泥岩、钙质砂岩的有效封盖下最终汇聚于侧向封堵能力较好的断块圈闭中。油藏具有大规模高效充注和多层系成藏的特征(图11、图12)。

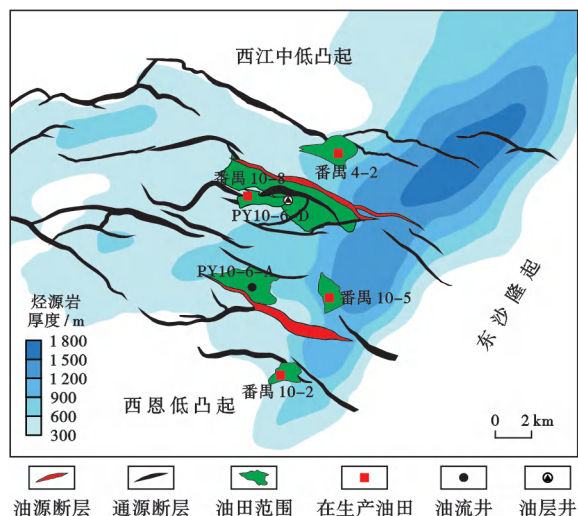


图12 番禺4洼烃源岩、油源断裂与油田分布

Fig. 12 Distribution of source rock, faults and oilfields in Panyu4 subsag

5 番禺4洼古近系勘探重大发现的意义及前景

番禺10-6构造带大一中型中质油田的发现,实现了番禺4洼在古近系珠海组、恩平组高含砂率地层取得油气勘探突破,有望在番禺4洼老油区建成首个古近系油田,打破了高含砂率地层难以大规模成藏的传统认识,拓展了富生烃洼陷的勘探层系,展示出富生烃洼陷的古近系具有广阔的勘探前景。

目前,番禺4洼古近系整体仍处于勘探初期,勘探程度低,珠海组、恩平组剩余待钻探的圈闭多,其中,已落实圈闭17个,圈闭内的原油资源量近 1.6×10^8 t,具有较大的勘探潜力。此外,在研究区前古近系潜山的已钻井中也见到丰富的油气显示,剩余待钻的大型构造圈闭(以断块圈闭为主)众多,但尚未发现商业油藏,是未来勘探的重要突破方向。

珠江口盆地(东部)已证实富生烃洼陷8个,剩余地质资源量为 36×10^8 t,勘探程度均表现为浅层高、深层整体低,勘探领域亟待向深层进军。富生烃洼陷的

古近系是珠江口盆地(东部)深层油气勘探的重要方向,其中,珠海组和恩平组等高含砂率地层早期由于受制于盖层条件和断层封堵条件,未作为主要的勘探目标层系,研究及勘探程度较低。番禺10-6构造带的突破对其他高勘探程度富生烃洼陷将勘探目的层系向古近系转变具有重要的参考意义,也更加坚定了石油地质工作者对珠江口盆地(东部)古近系勘探的信心。

6 结论

(1) 番禺10-6构造带古近系大一中型中质油田的发现实现了番禺4洼新层系的勘探突破,整体原油的三级储量规模超过 5000×10^4 t,对珠江口盆地富生烃洼陷古近系高含砂率地层的勘探具有重要参考意义。

(2) 番禺4洼古近系高含砂率地层的成藏条件优越。文昌组广泛发育“好—很好”的半深湖—深湖亚相优质烃源岩;恩平组和珠海组均发育辫状河三角洲砂岩,其分别与湖(海)泛泥岩、白云质砂岩构成了2类优质储-盖组合;伸展-走滑作用控制下的张扭增压区与断裂带上盘的钙质胶结作用有利于富砂层段断层的侧向封堵;与构造带相邻的主通源断裂决定了油气的近距离高效优势汇聚。

(3) 番禺4洼的古近系目前仍处于勘探初期。前古近系潜山、始新统恩平组、渐新统珠海组的剩余待钻圈闭众多,勘探潜力较大。围绕富生烃洼陷开展立体多层系勘探是珠江口盆地(东部)未来的重要勘探方向。

参考文献

- [1] 米立军. 认识创新推动南海东部海域油气勘探不断取得突破——南海东部海域近年主要勘探进展回顾[J]. 中国海上油气, 2018, 30(1): 1-10.
MI Lijun. Continuous breakthroughs on petroleum exploration of the eastern South China Sea with innovative understanding: review of recent exploration progress[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(1): 1-10.
- [2] 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.
HE Min, ZHU Weilin, WU Zhe, et al. Neotectonic movement characteristics and hydrocarbon accumulation of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(5): 9-20.
- [3] 高阳东, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷深水古近系勘探重大发现及其意义[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1029-1040.
GAO Yangdong, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. Breakthrough and significance of deep-water Paleogene exploration in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2023, 44(7): 1029-1040.
- [4] 陈长民, 黄丽芬, 李昭伟. 番禺4-2油藏的形成条件及勘探意义[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(3): 3-9.
CHEN Changmin, HUANG Lifan, LI Zhaowei. Accumulation

- conditions of PY4-2 oil pool and implication for exploration[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1999, 13(3): 3-9.
- [5] 刘从印, 周平兵, 曾驿, 等. 番禺4洼地区新近系油气成藏主控因素分析[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(2): 91-94.
LIU Congyin, ZHOU Pingbing, ZENG Yi, et al. An analysis of the main controls on Neogene hydrocarbon accumulation in Panyu 4 sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(2): 91-94.
- [6] 施和生, 舒誉, 杜家元, 等. 珠江口盆地古近系石油地质[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
SHI Hesheng, SHU Yu, DU Jiayuan, et al. *Petroleum geology of Paleogene in Pearl River mouth Basin*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [7] 李振升, 彭光荣, 吴静, 等. 珠江口盆地番禺4洼新近系油气成藏条件及成藏模式[J]. *世界地质*, 2022, 41(2): 315-324.
LI Zhensheng, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Accumulation conditions and modes of Neogene hydrocarbons in Panyu 4 sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *World Geology*, 2022, 41(2): 315-324.
- [8] 张丽, 吴静, 蔡国富, 等. 珠江口盆地番禺4洼文昌组储层特征及主控因素[J]. *矿物岩石*, 2022, 42(4): 116-127.
ZHANG Li, WU Jing, CAI Guofu, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of Wenchang Formation in Panyu-4 depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2022, 42(4): 116-127.
- [9] 彭光荣, 张丽丽, 许新明, 等. 珠江口盆地西江主洼烃源岩属性、原油分类及成藏主控因素[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2361-2375.
PENG Guangrong, ZHANG Lili, XU Xinming, et al. Source rock attribute, oil classification and hydrocarbon accumulation main control factors of Xijiang main sag in Pearl River mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2361-2375.
- [10] 张功成. 南海渐进式边缘海构造旋回控制深水油气成藏理论[J]. *石油学报*, 2023, 44(4): 569-582.
ZHANG Gongcheng. Theory of deepwater hydrocarbon accumulation controlled by progressive tectonic cycles of marginal sea in the South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(4): 569-582.
- [11] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. The late cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: an overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 186-204.
- [12] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shice, et al. Tertiary hydrocarbon accumulation condition in Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J]. *地质评论*, 2007, 53(2): 145-151.
PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun Movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications[J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 145-151.
- [14] 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 447-461.
SHI Hesheng, DU Jiayuan, MEI Lianfu, et al. Huizhou movement and its significance in Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 447-461.
- [15] 吴智平, 胡阳, 钟志洪. 珠一坳陷番禺4洼新生代断裂特征及其区域动力背景[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(4): 1-9.
WU Zhiping, HU Yang, ZHONG Zhihong. Cenozoic faults characteristics and regional dynamic background of Panyu 4 sub-sag, Zhu I depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(4): 1-9.
- [16] 彭光荣, 温华华, 刘从印, 等. 珠江口盆地珠一坳陷浅层油气勘探实践及潜力探讨——以番禺4洼为例[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(3): 22-28.
PENG Guangrong, WEN Huahua, LIU Congyin, et al. Practice of shallow oil and gas exploration in Zhu I depression of the Pearl River Mouth Basin: a case from Panyu 4 sag[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(3): 22-28.
- [17] 李守军. 正烷烃、姥鲨烷与植烷对沉积环境的指示意义——以山东济阳坳陷下第三系为例[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1999, 23(5): 14-16.
LI Shoujun. Sedimentary environmental significance of normal alkane and the ratio of pristane to phytane[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1999, 23(5): 14-16.
- [18] 卢晓林, 石宁, 李美俊, 等. 珠江口盆地白云凹陷原油双柱松烷分布特征及地球化学意义[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 560-568.
LU Xiaolin, SHI Ning, LI Meijun, et al. Distribution patterns and geochemical implication of bicadinanes in crude oils from Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 560-568.
- [19] 杨海长, 曾清波, 纪沫, 等. 珠江口盆地深水开平凹陷拆离型裂陷石油形成条件与勘探方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(6): 933-947.
YANG Haizhang, ZENG Qingbo, JI Mo, et al. Accumulation conditions and exploration direction of crude oil in detachment rift of Kaiping sag in deep water area of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(6): 933-947.
- [20] 黄第藩, 张大江, 李晋超. 论4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. *石油勘探与开发*, 1989, 16(3): 8-15.
HUANG Difan, ZHANG Dajiang, LI Jinchao. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, 16(3): 8-15.
- [21] 傅宁. 论4-甲基C₃₀甾烷丰度与烃源岩质量的关系——基于北部湾盆地勘探实践[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(5): 11-20.
FU Ning. On relationship between abundance of 4-methyl-C₃₀ sterane and source rock quality: a case study of exploration practices in Beibuyan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(5): 11-20.
- [22] 吉利明, 郑建京, 孟仟祥, 等. 沉积有机质中甾烷、4-甲基甾烷植物花粉来源的直接证据[J]. *地球化学*, 2000, 29(2): 175-179.
JI Liming, ZHENG Jianjing, MENG Qianxiang, et al. Direct evidence of sterane and 4-methyl-sterane originating from plant pollens in organic deposit[J]. *Geochimica*, 2000, 29(2): 175-179.
- [23] 江宁, 全志臻, 彭光荣, 等. 基于地震沉积学方法的沉积相研究——以珠江口盆地番禺4洼古近系为例[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(4): 102-111.
JIANG Ning, QUAN Zhizhen, PENG Guangrong, et al. Research on sedimentary facies based on seismic sedimentology: a case study of Paleogene strata of Panyu 4 sag in the Pearl River Mouth Basin[J].

- Journal of Tropical Oceanography, 2016, 35(4): 102-111.
- [24] 吴宇翔,舒誉,丁琳,等.珠江口盆地番禺4洼文昌组基于层序地层格架约束下的优质烃源岩预测[J].海洋地质前沿,2021,37(3): 41-49.
WU Yuxiang, SHU Yu, DING Lin, et al. Prediction of high quality source rocks based on sequence stratigraphic framework of Wenchang Formation, Panyu 4 depression, the Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(3): 41-49.
- [25] 张卫卫,刘军,刘力辉,等.珠江口盆地番禺4洼古近系文昌组岩性预测技术及应用[J].岩性油气藏,2022,34(6): 118-125.
ZHANG Weiwei, LIU Jun, LIU Lihui, et al. Lithology prediction technology and its application of Paleogene Wenchang Formation in Panyu 4 depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(6): 118-125.
- [26] 钟志洪,施和生,朱明,等.珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J].中国海上油气,2014,26(5): 20-29.
ZHONG Zhihong, SHI Hesheng, ZHU Ming, et al. A discussion on the tectonic-stratigraphic framework and its origin mechanism in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 20-29.
- [27] FRIEDMAN G M, SANDERS J E. Origin and occurrence of dolostones[J]. Developments in Sedimentology, 1967, 9: 267-348.
- [28] 姜洪福,王梓媛,师永民,等.东河塘滨岸砂体蒸发泵吸作用与钙质隔夹层形成[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(5): 857-862.
JIANG Hongfu, WANG Ziyuan, SHI Yongmin, et al. Evaporative pumping effect and calcareous interbed formation of Donghetang near-shore sandstone[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(5): 857-862.
- [29] 邓棚.南海北部陆缘古近纪多幕裂陷作用属性及转换——以珠江口盆地珠一坳陷为例[D].武汉:中国地质大学,2018.
DENG Peng. The nature and tectonic transition of the multi-phase rifting in the northern margin of the South China Sea: based on the study of the Zhu I depression in Pearl River Mouth Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [30] 高阳东,林鹤鸣,汪旭东,等.幕式裂陷控洼背景下的烃源岩分布及岩浆改造——以珠一坳陷番禺4洼为例[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(3): 151-160.
GAO Yangdong, LIN Heming, WANG Xudong, et al. Source rock distribution pattern in an episodic rifting sag and later stage magmatic reformation: a case from Panyu 4 sag, Zhu I depression[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(3): 151-160.
- [31] 王家豪,刘丽华,陈胜红,等.珠江口盆地恩平凹陷珠琼运动二幕的构造-沉积响应及区域构造意义[J].石油学报,2011,32(4): 588-595.
WANG Jiahao, LIU Lihua, CHEN Shenghong, et al. Tectonic-sedimentary responses to the second episode of the Zhu-Qiong movement in the Enping depression, Pearl River Mouth Basin and its regional tectonic significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 588-595.
- [32] 徐长贵.渤海海域大型伸展-走滑复合断裂特征与控藏作用[J].中国海上油气,2022,34(6): 1-13.
XU Changgui. Characteristics and reservoir controlling of large-scale extension-strike slip composite faults in Bohai Sea area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 1-13.
- [33] 杜晓东,彭光荣,吴静,等.珠江口盆地阳江东凹断层特征及其对油气成藏的影响[J].新疆石油地质,2020,41(4): 414-421.
DU Xiaodong, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Faults and its impacts on petroleum accumulation in eastern Yangjiang sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4): 414-421.

(收稿日期 2023-12-29 改回日期 2024-01-10 编辑 雷永良)