

文章编号: 0253-2697(2024)09-1336-13 DOI:10.7623/syxb202409003

珠江口盆地顺德凹陷深水古近系石油勘探突破及其意义

吴克强 尤丽 龚宇 庾雷 高梦天 窦婧瑛 向远高 李珊珊 郑飞

(中海石油(中国)有限公司海南分公司 海南海口 570312)

摘要:珠江口盆地是南海北部油气勘探的主战场之一。顺德凹陷位于珠二坳陷西侧,早期勘探程度低、凹陷内无钻井。基于顺德凹陷新采集的三维地震及周边钻井资料,开展了区域石油地质研究。通过系统分析顺德凹陷的构造演化与断裂特征,研究了构造作用对烃源岩、储-盖组合、圈闭特征和运聚条件的控制并建立了成藏模式,提出了油气的优势运聚方向。研究结果表明:①顺德北凹断陷期的强烈伸展作用控制了凹陷结构和半深湖亚相烃源岩沿凹陷带—斜坡带分布,发育东、西2个主力烃源灶;②断坳期的伸展-走滑作用控制了沿断裂带分布的大型扇三角洲—辫状河三角洲储集体及断鼻-断块圈闭群;③伸展-走滑作用形成的正向构造与长期活动断裂,共同控制了油气运移与聚集;④建立了伸展-走滑作用控藏模式,提出顺德北凹的近凹鼻状构造带、南斜坡带、凹中地垒带是油气的优势运聚方向。顺德北凹的凹中地垒带钻探的W36a井揭示厚度超过45m的油层,测试获得产油量超过100 m³/d的高产工业油流,实现了南海北部深水新凹陷、新领域石油勘探的重大突破,证实顺德北凹在强断陷期发育优质厚层半深湖亚相烃源岩,对顺德凹陷乃至南海北部石油勘探具有重要指导和借鉴意义,展现顺德凹陷及其边缘凹陷具有发育亿吨级油田群的勘探前景。

关键词:南海北部;深水;新凹陷;石油领域突破;顺德凹陷;伸展-走滑作用

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Petroleum exploration breakthrough of Paleogene deep-water strata in Shunde sag of Pearl River Mouth Basin and its significance

Wu Keqiang You Li Gong Yu Tuo Lei Gao Mengtian Dou Jingying Xiang Yuangao Li Shanshan Zheng Fei

(Hainan Branch, CNOOC China Limited, Hainan Haikou 570312, China)

Abstract: Pearl River Mouth Basin is one of the main fields of oil-gas exploration in the north of the South China Sea. There is a low degree of early exploration and no drilling in Shunde sag, which is located in the west of Zhu II depression. Based on the newly acquired 3D seismic data in Shunde sag and the drilling data in the surrounding area, the regional petroleum geology research has been carried out. Through analyzing the tectonic evolution and fracture characteristics of Shunde sag, the paper investigates its controlling on source rocks, reservoir-cap assemblages, trap characteristics, migration and accumulation conditions, establishes hydrocarbon accumulation models, and proposes favorable oil-gas migration directions. The results indicate that strong extension of the northern Shunde sag in the faulting period played a role in controlling the sag structure and the distribution of semi-deep lacustrine source rocks along the sag and slope, with two main hydrocarbon kitchens developed in the east and west. Moreover, the superposed effect of both extension and strike-slip in depression period controlled the large-scale fan delta, braided river delta, and a series of fault-plunging structure or fault block trap groups distributed along the fault zone. Additionally, the hydrocarbon migration and accumulation was controlled by the long-term active faults and a series of positive structures formed by extension and strike-slip action. Finally, the accumulation model controlled by extension and strike slip actions has been established; the nose-shaped structural belt near the sag, the southern slope zone, and the horst belt in the sag are predicted as the dominant hydrocarbon migration and accumulation directions in the northern Shunde sag. The Well W36a was drilled in the horst zone of the northern Shunde sag, from which oil layers with the thickness of over 45 m were discovered, and high production of industrial oil over 100 m³/d was obtained, thus realizing a significant breakthrough in the new deep-water sags and new fields of petroleum exploration in the northern South China Sea, and confirming the development of high-quality thick layered semi-deep lacustrine source rocks during the strong faulting period in the northern Shunde sag. This has important guidance and reference significance for oil exploration in Shunde sag and even the northern South China Sea and demonstrates the exploration prospects for the oilfield groups of billion tons in Shunde sag and other marginal sags.

Key words: northern South China Sea; deep water area; new sag; breakthrough in petroleum fields; Shunde sag; extensional-strike slip effect

引用: 吴克强, 尤丽, 龚宇, 庾雷, 高梦天, 窦婧瑛, 向远高, 李珊珊, 郑飞. 珠江口盆地顺德凹陷深水古近系石油勘探突破及其意义[J]. 石油学报, 2024, 45(9): 1336-1348.

Cite: WU Keqiang, YOU Li, GONG Yu, TUO Lei, GAO Mengtian, DOU Jingying, XIANG Yuangao, LI Shanshan, ZHENG Fei. Petroleum exploration breakthrough of Paleogene deep-water strata in Shunde sag of Pearl River Mouth Basin and its significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(9): 1336-1348.

基金项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目“南海大中型天然气田形成条件、勘探潜力与突破方向”(KJZH-2021-0003-00)资助。

第一作者: 吴克强, 男, 1970年8月生, 1995年获中国地质大学(武汉)硕士学位, 现为中海石油(中国)有限公司海南分公司副总经理兼总地质师、教授级高级工程师, 主要从事石油地质综合研究。Email: wukq@cnooc.com.cn

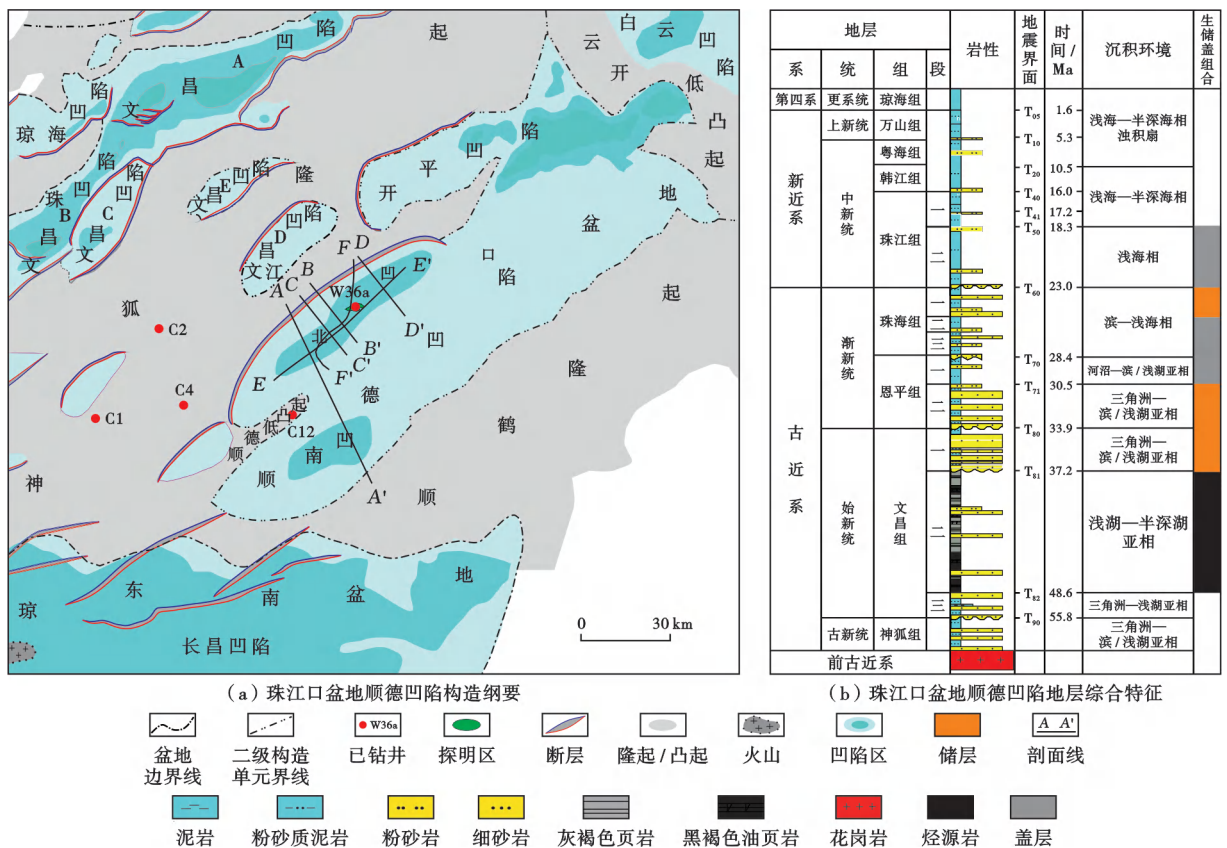
通信作者: 尤丽, 女, 1983年10月生, 2018年获吉林大学博士学位, 现为中海石油(中国)有限公司海南分公司首席工程师(勘探地质)、高级工程师, 主要从事油气勘探地质研究。Email: youli1@cnooc.com.cn

顺德凹陷为珠江口盆地珠二坳陷西部边缘凹陷^[1-3],整体勘探程度较低,早期凹陷内仅有二维地震资料,无钻井^[4-5],仅在其周边的隆起和凸起区相继钻探了 4 口井,但均失利。这令科研人员一度对顺德凹陷的生烃能力产生怀疑,而油公司也未对其进行进一步勘探。顺德凹陷的烃源条件与生烃潜力到底如何?有利成藏组合与勘探方向在哪里?是制约勘探的 2 个关键问题。近年来,随着珠江口盆地开平凹陷在其南部斜坡近凹带古近系中获得勘探突破^[6-9],证实近源/源内古近系恩平组—文昌组成藏组合,珠江口盆地边缘凹陷的石油勘探再次引起油公司重视。本次结合顺德凹陷新采集的三维地震资料,类比周边凹陷^[1-3],开展区域石油地质研究,建立了顺德凹陷伸展-走滑叠加控藏模式^[5]。始新世断陷期,顺德凹陷受 NW 向伸展作用影响,形成了 NE 向边界断裂,断裂强烈的伸展作用及其差异活动性控制了凹陷结构,主力生烃灶与优势烃源岩沿凹陷带—南斜坡分布;渐新世断坳期,区域应力场为 SN 向伸展,由于应力场的顺时针旋转导致斜向伸展,产生一定走滑作用,伸展作用与走滑作用的

叠加控制了沿断裂带分布大型储集体及断鼻-断块圈闭群。断陷期—断坳转换期—坳陷期多期应力叠加形成的长期活动断裂与系列正向构造共同控制了顺德凹陷的油气运移与聚集。油公司提出顺德北凹古近系恩平组—文昌组近凹鼻状构造带、凹中地垒带、南斜坡带为优势运聚区,优选凹中地垒带钻探了探井 W36a 井,发现油层厚度超过 45 m,测试结果为高产工业油流,实现了南海北部深水新凹陷、新领域石油勘探的重大突破,证实顺德北凹在强断陷期发育优质厚层半深湖亚相烃源岩^[5]。这一研究成果对顺德凹陷乃至南海北部边缘凹陷的石油领域勘探具有重要指导与借鉴意义。

1 油气勘探历程

顺德凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷西部,北邻神狐隆起、南靠顺鹤隆起、东北接开平凹陷、西南与琼东南盆地长昌凹陷相邻^[1-3][图 1(a)],水深为 300~1 100 m。对于顺德凹陷的勘探资料,早期仅有 20 世纪 90 年代到 21 世纪初多批次采集的总长度约为 3×10^4 km 的



注: T₀₅—万山组顶界面; T₁₀—粤海组顶界面; T₂₀—韩江组顶界面; T₄₀—珠江组一段顶界面; T₄₁—珠江组一段下亚段顶界面; T₅₀—珠江组二段顶界面; T₆₀—珠海组顶界面; T₇₀—恩平组一段顶界面; T₇₁—恩平组二段顶界面; T₈₀—文昌组一段顶界面; T₈₁—文昌组二段顶界面; T₈₂—文昌组三段顶界面; T₉₀—神狐组顶界面。

图 1 珠江口盆地顺德凹陷构造纲要及地层综合特征

Fig. 1 Structural outline and comprehensive stratigraphic characteristics of Shunde sag in Pearl River Mouth Basin

二维地震资料,以及在其周边神狐隆起、顺德低凸起钻探的4口井。2000年初,油公司在顺德凹陷周边的神狐隆起钻探了C1井、C2井和C4井,揭示了上新统珠江组、韩江组的多套储-盖组合和中生界基底[图1(b)],但均无油气显示;分析认为,3口井失利的主要原因在于距离南、北、东侧生烃凹陷较远,最近的直线距离均超过30 km。后期,通过对外合作,在顺德低凸起钻探了C12井,揭示了珠江组、珠海组一段砂泥互层组合与中生界变质岩基底,但也未见油气显示;分析认为,这主要是由于沟通有效源岩的断层停止活动的时间早,砂岩侧向输导能力差。2021年底至2022年,油公司基于顺德北凹新采集的三维地震与前期二维地震资料、周边已钻井资料,开展了首轮系统石油地质研究,系统分析了构造演化与断裂体系,建立了伸展-走滑作用叠加的控藏模式,在顺德北凹落实系列潜力,优选凹中地垒带文昌36a构造进行钻探,在W36a井获得深水新凹陷、新领域石油勘探重大突破^[5],证实了顺德北凹发育半深湖亚相优质烃源岩,展现了广阔的石油勘探前景。

2 区域构造演化与断裂体系特征

2.1 构造演化与地层充填

新生代以来,珠江口盆地受印支地块、华南地块和太平洋板块相互作用,区域伸展应力场方向发生顺时针旋转^[10-13],呈现“三拗四隆”的构造格局^[1-2]。顺德凹陷与开平凹陷、白云凹陷同处于珠江口盆地中部拗陷带,位于中部拗陷带珠二拗陷的最西端。

顺德凹陷在新生代经历了断陷、断拗、拗陷3期构造演化^[13](图2):①古近纪始新世为强烈断陷期,此时受NW—SE向伸展作用影响,控凹边界断裂(顺北断裂和顺南断裂)发生强烈活动,控制了始新统厚层文昌组沉积。受边界断裂上盘地层翘倾掀斜和深部岩浆活动影响,顺德凹陷中部地区不断隆升并遭受剥蚀,在 T_{82} 、 T_{81} 、 T_{80} 等界面可见明显的削蚀特征,形成由中部顺德低凸起分隔的顺德北凹和顺德南凹[图3(a)]。顺德北凹进一步分为由顺北断裂、FN1断裂夹持的北部断阶带和FN1断裂下降盘的凹陷带,且由于顺北断裂和FN1断裂的差异活动,凹陷带进一步细分为东洼和西洼[图3(b)]。②渐新世,伸展应力场转变为近SN向,受其影响,控凹边界断裂(顺北断裂和顺南断裂)的活动性减弱,在凹陷内部形成近EW向断裂。顺德凹陷开始进入断拗转换期,中部顺德低凸起在恩平组沉积末期全部没于水下,在顺德南凹、顺德北凹形成2个沉积中心,沉积了渐新统恩平组和珠海组。顺德北凹和顺德南凹地层分别呈“北厚南薄”和“南厚北薄”的特征,渐新统恩平组与珠海组厚度总体比始新统

文昌组薄。③新近纪以后,顺德凹陷进入拗陷期,构造活动较弱,凹陷内沉积了广泛稳定分布的中新统珠江组、韩江组与更新统粤海组、琼海组一万山组,并在珠江组沉积末期由于区域海侵,开始整体向南倾斜。

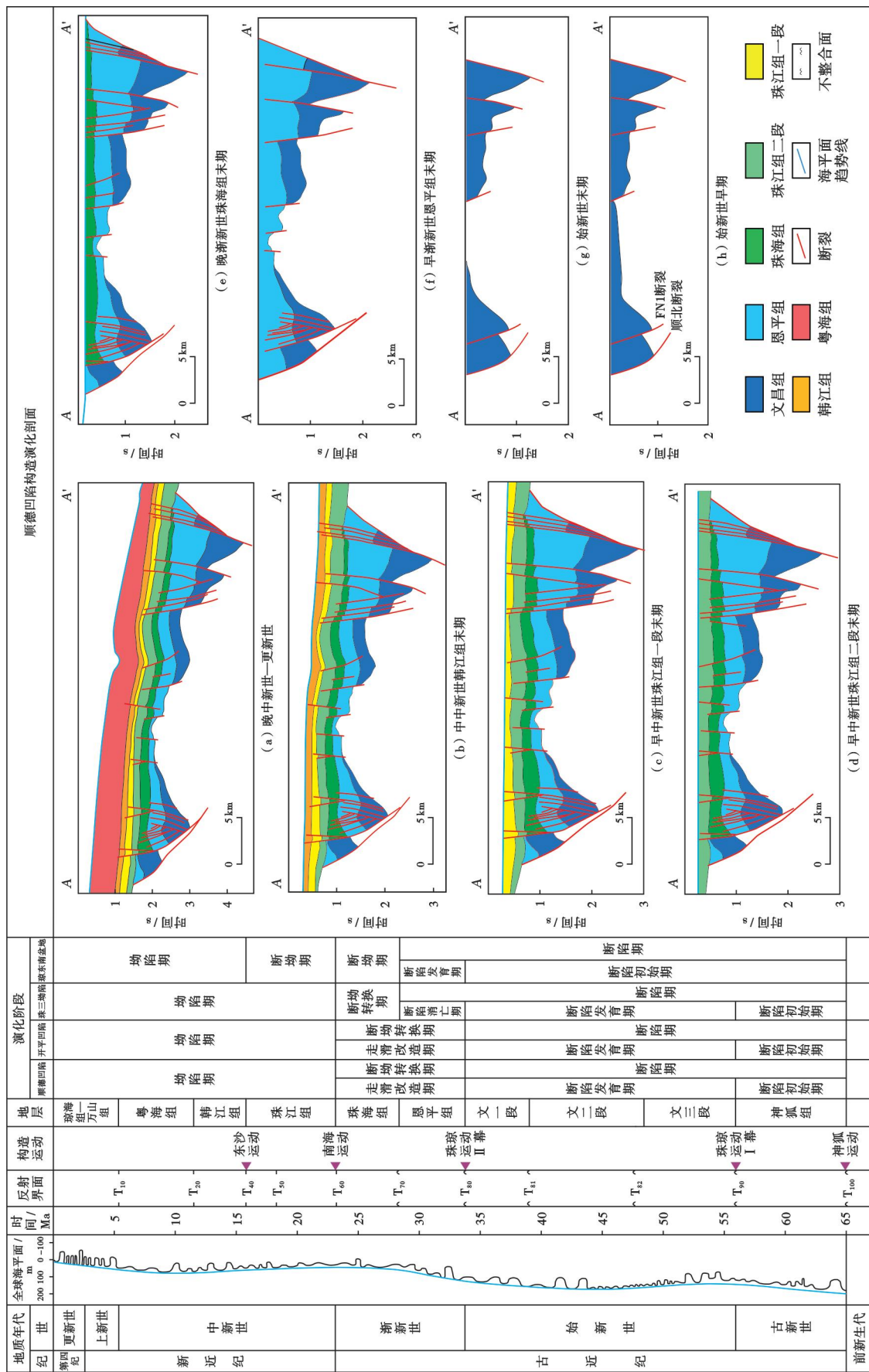
2.2 断裂体系特征

新生代顺德凹陷的伸展应力场经历了从NW—SE向依次转变为NNW—SSE向、近SN向和NE—SW向的顺时针旋转^[10-13],形成了4组不同走向的断裂体系,包括断陷早期形成的NE向断裂体系、断陷晚期形成的NEE向断裂体系、断拗转换期形成的近EW向断裂体系和拗陷期形成的NWW向断裂体系(图4)。

断陷早期(T_{100} — T_{81} 沉积期),由于NW—SE向的强烈伸展作用,顺北断裂、FN1断裂等NE走向断裂开始发育(图4)。此类断裂主要分布于顺德凹陷边缘,规模大、延伸长,对凹陷结构有明显的控制作用[图3(b)]。断裂在断陷期活动性较强,其下降盘沉积了较厚的文昌组,控制了烃源岩和生烃灶的发育;进入断拗转换期后,断裂活动有所减弱,控制了隆起区物源向凹陷的推进,形成大型储集体。

断陷晚期(T_{81} — T_{80} 沉积期),伸展应力场转变为近NNW—SSE向,顺德凹陷内部开始发育NEE向断裂体系。此类断裂较早期发育的NE向断裂规模小,主要分布于凹陷带。断裂在剖面上常组合成“Y”字形(图4),平面上呈雁列式展布;断裂下降盘从 T_{81} — T_{60} 界面持续发育反转构造,说明该组断裂在斜向伸展背景下发育一定走滑作用,控制了系列正向构造带和大型储集体向凹陷推进及始新统圈闭群的形成,且该组断裂总体持续活动至渐新世末期,部分在中新世也有一定活动或活化。该阶段断陷早期形成的NE向顺北断裂的活动性减弱,控制了隆起区物源注入与断裂下降盘圈闭群的形成;而FN1断裂的活动性增强,控制了大型储集体向凹陷推进,特别是在西洼,处于断裂下降盘的文昌组一段(文一段)厚度明显增大。

断拗转换期(T_{80} — T_{60} 沉积期),伸展应力场转变为近SN向,凹陷内发育近EW向的断裂体系。该组断裂为断陷晚期形成的NEE向断裂的次级断裂,其规模不大、延伸较短,但分布范围较广,主要分布于凹陷带。断裂在平面上呈雁列式展布,在剖面上与断陷晚期形成的NEE向断裂组合呈负花状构造,使得早期始新统圈闭复杂化,从而形成渐新统断块-断鼻圈闭群。该组断裂总体持续活动至渐新世末期,部分持续活动至中中新世。该阶段断陷早期形成的NE向断裂的活动性明显减弱,隆起区物源持续稳定注入。在凹陷带,断陷在晚期形成的NEE向断裂和断拗转换期形成的近EW向断裂的共同控制下,沉积物的搬运距离较远,形成了大型储集体。



注: T₁₀—粤海组顶界面; T₂₀—韩江组顶界面; T₄₀—珠江组一段顶界面; T₆₀—珠江组二段顶界面; T₇₀—恩平组顶界面; T₈₀—文昌组一段顶界面; T₈₁—文昌组二段顶界面; T₈₂—文昌组三段顶界面; T₉₀—神狐组顶界面; T₁₀₀—基底顶界面。

图2 珠江口盆地顺德凹陷构造演化 (剖面位置见图1)

Fig. 2 Structural evolution of Shunde sag in Pearl River Mouth Basin

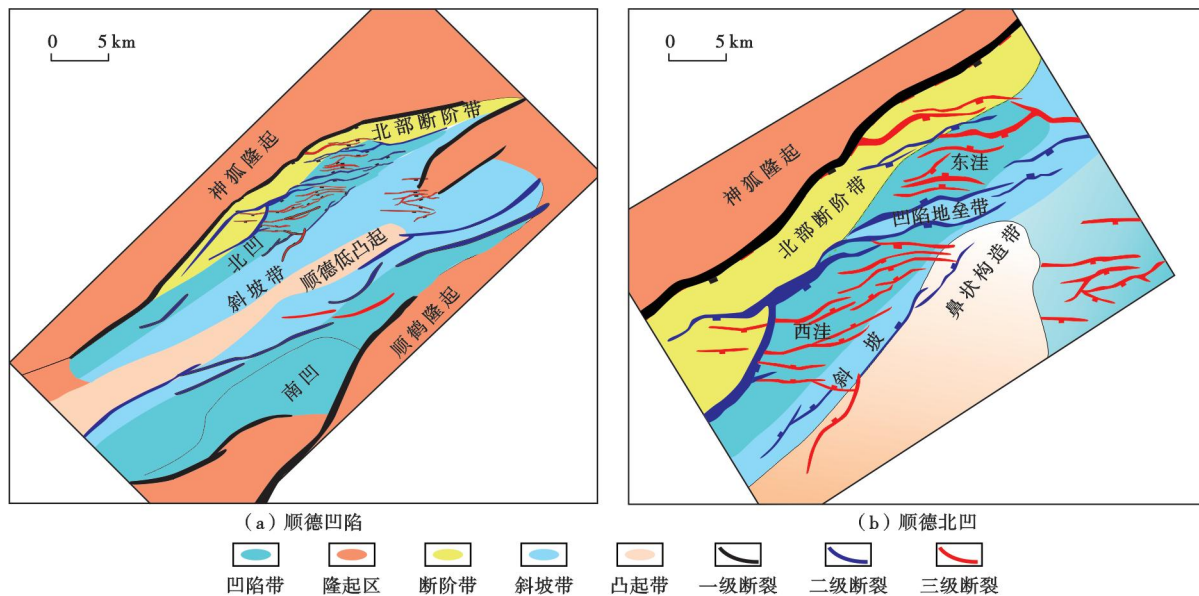
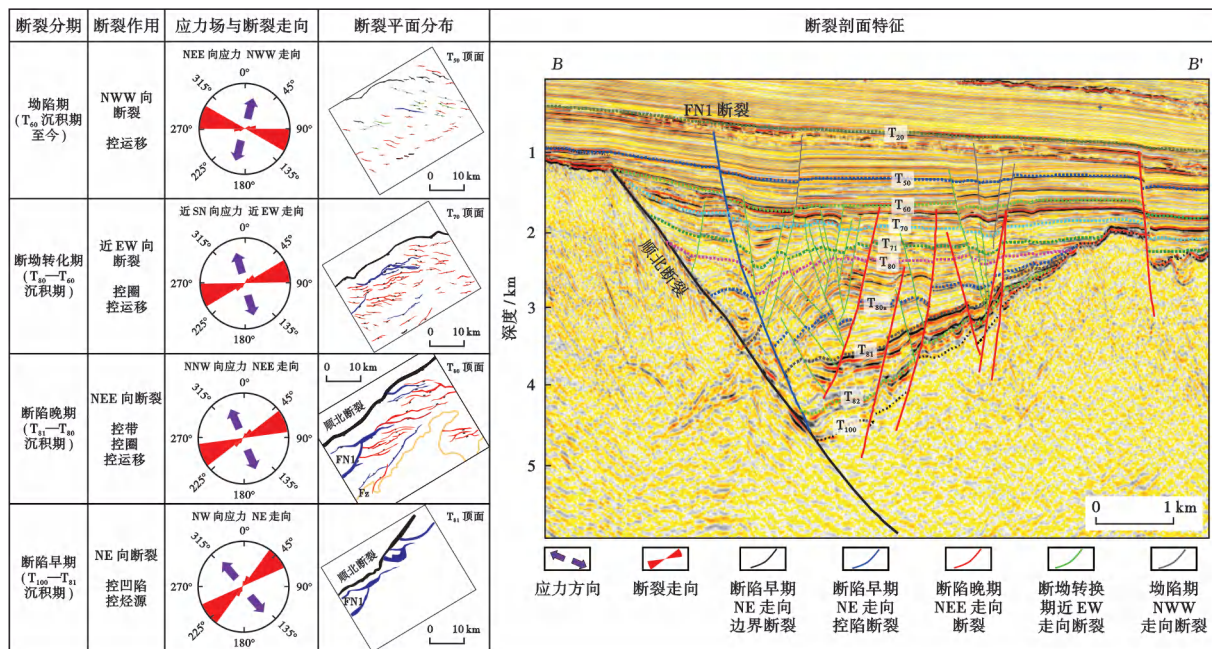


图3 珠江口盆地顺德凹陷与顺德北凹构造区划分

Fig. 3 Structural division of the northern Shunde sag and Shunde sag in Pearl River Mouth Basin



注: T_{20} —韩江组顶界面; T_{50} —珠江组二段顶界面; T_{60} —珠海组顶界面; T_{70} —恩平组一段顶界面; T_{71} —恩平组二段顶界面; T_{80} —文昌组一段顶界面; T_{80a} —文昌组一段下亚段顶界面; T_{81} —文昌组二段顶界面; T_{82} —文昌组三段顶界面; T_{100} —基底顶界面。

图4 珠江口盆地顺德北凹断裂分级分期与发育模式(剖面位置见图1)

Fig. 4 Classification, stages and development mode of faults in the northern Shunde sag of Pearl River Mouth Basin

坳陷期(T_{60} 沉积期至今),在 NE—SW 向伸展应力场作用下,顺德凹陷内发育 NWW 向断裂。此类断裂规模较小,分布范围有限,主要为在断陷晚期和断坳转换期分别形成的 NEE 向、近 EW 向断裂的活化或伴生断裂,其与早期 NE 向、NEE 向和近 EW 向断裂共同控制了油气运移。

3 伸展-走滑作用对油气成藏的控制

3.1 强烈伸展作用控制半深湖亚相的烃源岩与主力烃源灶分布

受顺北断裂和 FN1 断裂控制,顺德北凹整体呈北断、南超的构造格局。FN1 断裂发育于始新世,为

1组NE向分段式断裂,在顺德北凹的西侧和东侧均有分布,并与顺北断裂一起控制顺德北凹呈现复杂半地堑结构[图5(a)]。顺北断裂和FN1断裂夹持了北部断阶带及FN1断裂下降盘的凹陷带,凹陷带内进一步发育东、西洼。

顺北断裂和FN1断裂在始新世的差异活动控制了烃源岩发育层系与主力生烃灶的分布[图5(b)、图5(c)]。纵向上,在文昌组二段(文二段)沉积期,顺北断裂和FN1断裂的活动速率最大,水体快速加深,可形成相对封闭环境,有利于水生有机质繁殖,形成半深湖亚相烃源岩^[14-17];在文昌组三段(文三段)和文一段沉积期,顺北断裂和FN1断裂的活动速率相对小,水体较浅,陆源有机质增多、水生有机质减少,主要发育滨—浅湖亚相烃源岩。横向上,顺德北凹东段和西段的活动速率最大,控制其北部神狐隆起粗碎屑物质快速沉积并在文二段沉积期形成多个沉降中心。西侧在断阶带和凹陷带形成多个次级沉降中心,其中,顺北断裂和FN1断裂夹持的断阶带沉降中心具有“沉砂池”作用,将粗碎屑截留^[15],致使粗碎屑对FN1断裂下降盘控制的西洼影响弱,形成优质烃源岩;东侧,测线1841位置附近为隆起区碎屑物质的主注入口,由于顺北断裂的活动性相对较弱、FN1断裂在东侧主体区延伸有限,粗碎屑物质在断阶带有一定卸载,这对凹陷带东洼的烃源岩分布有一定影响,应该是造成凹陷带东洼和西洼烃源岩地震相特征差异的主要原因。西洼文二段的震相呈现低频连续强反射、低速的特征,推测泥岩

更纯,发育油页岩;而东洼则表现为相对高频连续弱反射、无明显低速的特征,推测以湖相泥岩为主,存在局部含砂的可能(图6)。

综合周边开平凹陷和文昌B凹陷已钻井资料证实的半深湖亚相与滨—浅湖亚相烃源岩及其地震相特征^[14,18],识别出顺德北凹烃源岩集中分布于凹陷带—南斜坡带[图6(a)、图6(b)],落实文二段半深湖亚相烃源岩的面积达600 km²,平均厚度超过550 m。其中,东洼烃源岩的最大厚度达630 m,最大埋深约为5 000 m;西洼烃源岩的最大厚度达610 m,最大埋深约为4 100 m[图6(c)]。参照文昌凹陷钻井揭示的地温梯度(3.2~4.7 °C/hm)^[19]以及珠江口盆地地温梯度由浅水区到深水区逐渐增加分布特点^[20],综合预测顺德凹陷的地温梯度约为4.5 °C/hm。在此基础上进行盆地模拟,结果显示,顺德北凹的文二段和文三段烃源岩已达到成熟—高成熟阶段,其中,文二段底面主力烃源岩现今的成熟度为0.6%~1.5%^[21],在东洼最高达1.5%,而在西洼最高达1.2%,文二段成熟烃源岩的面积接近550 km²,且文一段烃源岩主体处于成熟阶段,预测石油资源量接近3×10⁸ t,预测文昌组烃源岩的主生、排烃期为珠江组沉积期至今。

凹陷带钻探的W36a井在文二段钻遇厚层油页岩、页岩、泥岩夹薄层砂岩岩性组合^[21]。地球化学分析揭示恩平组二段(恩二段)油层中的原油与文二段烃源岩均表现为不含树脂化合物“T”,含微量奥利烷以及丰富的C₃₀ 4-甲基甾烷,综合指示其来自丰富的低

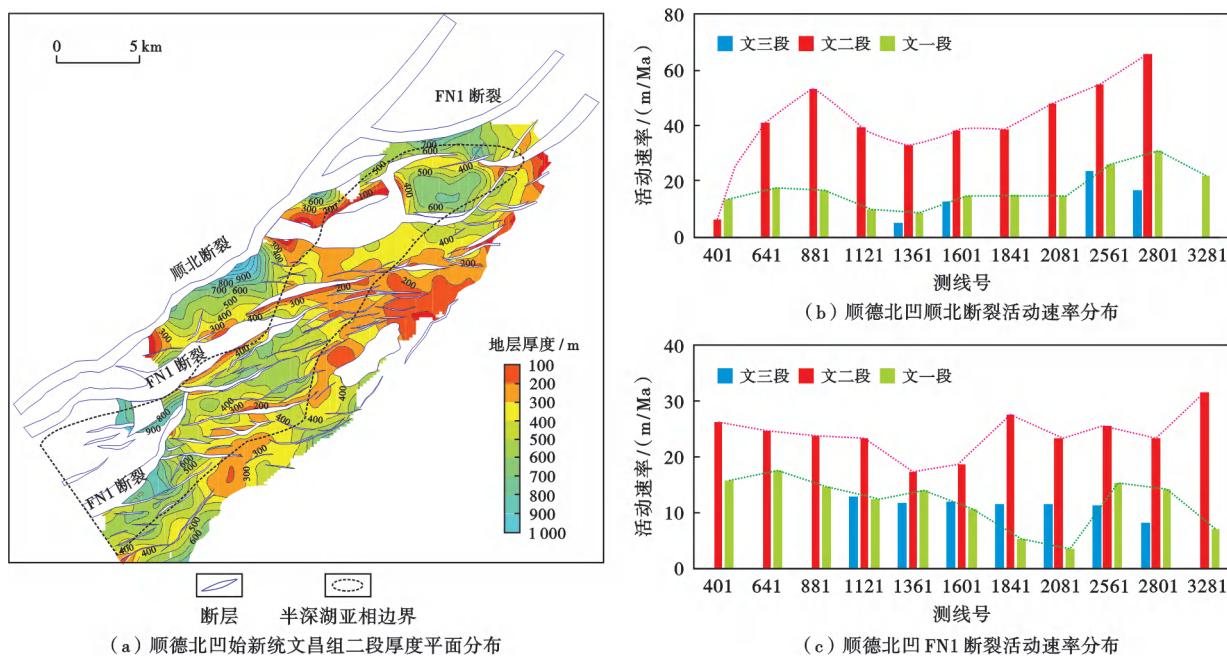
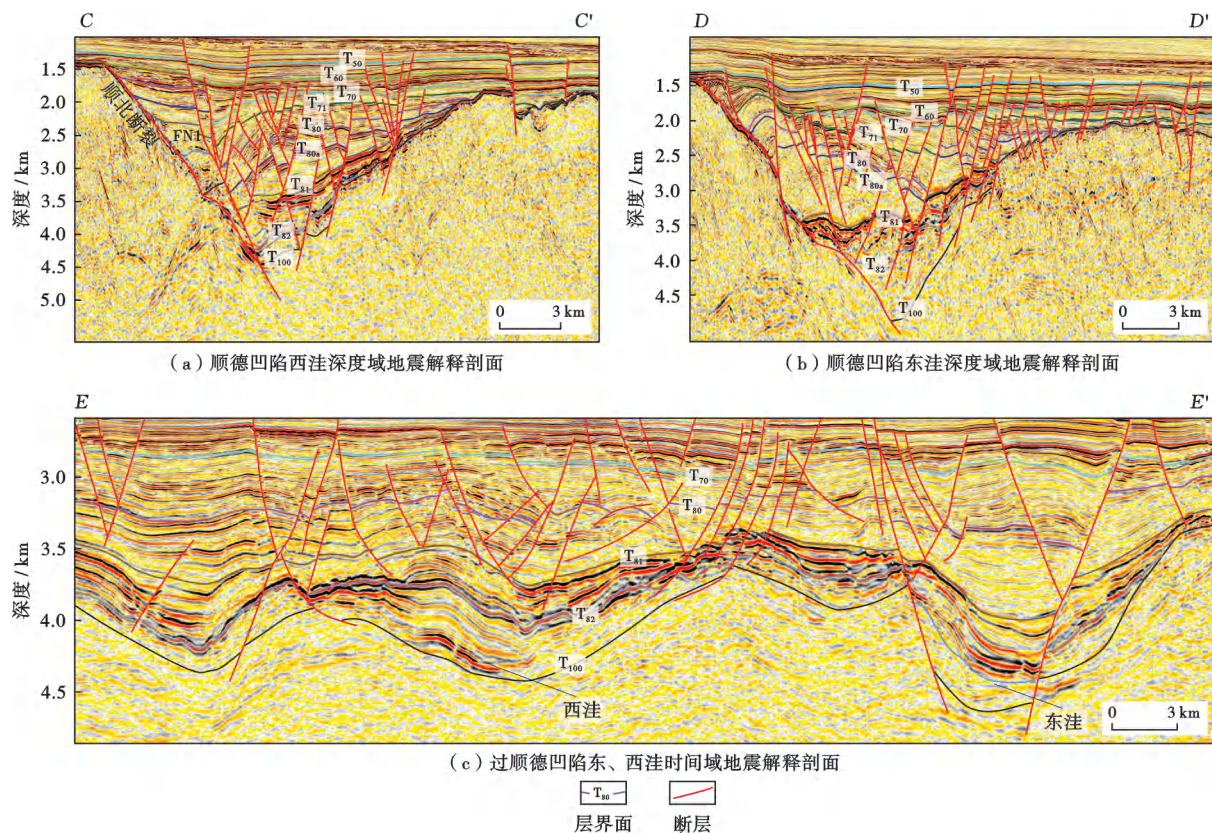


图5 顺德北凹始新统文昌组二段厚度与始新世边界断裂活动性

Fig. 5 Thickness of the Member 2 of Eocene Wenchang Formation and the Eocene boundary fault activities in the northern Shunde sag



注: T_{50} —珠江组二段顶界面; T_{60} —珠海组顶界面; T_{70} —恩平组一段顶界面; T_{71} —恩平组二段顶界面; T_{80} —文昌组一段顶界面; T_{80a} —文昌组一段下亚段顶界面; T_{81} —文昌组二段顶界面; T_{82} —文昌组三段顶界面; T_{100} —基底顶界面。

图6 顺德北凹半深湖烃源岩典型地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 6 Typical seismic profile of semi-deep lacustrine source rocks in the northern Shunde sag

等水生生物藻类的贡献^[21-23],证实了文二段半深湖亚相烃源岩是研究区主力生油烃源岩。W36a井恩二段油层段的包裹体均一温度主要分布在68~88℃,结合地层埋藏史-热演化史确定,充注时间为12.2 Ma至今^[21]。

3.2 伸展-走滑作用控制了古近系发育多套储-盖组合

受珠琼运动一幕和二幕影响^[1-3],神狐隆起和顺德低凸起长期处于暴露剥蚀环境,顺德北凹在NE向顺北断裂、FN1断裂与凹陷带内具有一定走滑性质的NEE向、近EW向断裂共同控制下,在古近纪断陷期文昌组与断拗转换早期恩平组中发育大型扇三角洲以及辫状河三角洲—湖泊沉积体系,在断拗转换晚期的珠海组中发育滨海—大型辫状河三角洲沉积体系^[24]。顺德北凹相应发育4套主要储-盖组合(图7)。

(1) 断陷早期文三段扇三角洲砂岩与中期文二段半深湖亚相泥岩的储-盖组合。断陷早期(文三段沉积期)[图7(a)],顺北断裂在中段和东段具有一定活动性,西段基本不活动[图5(b)],这控制了神狐隆起物源注入。在顺德凹陷北部中段和东段发育由神狐隆起供源的扇三角洲沉积,南部发育由顺德低凸起供源的小型扇三角洲沉积,相较北部的扇三角洲沉积,其面积

较大、粒度较粗。断陷中期(文昌组二段沉积期),顺北断裂活动速率最大[图5(b)],湖平面快速上升,隆起区碎屑物质快速沉积,在北部断阶带主要形成扇三角洲,且集中分布于断裂活动相对较弱的最西侧与中部断阶带区域,在凹陷带以发育广泛分布的半深湖亚相泥岩为主,可作为良好的区域盖层。

(2) 断陷晚期文一段大型扇三角洲和辫状河三角洲砂岩与上覆滨—浅湖亚相泥岩的储-盖组合。断陷晚期(文一段沉积期)[图7(b)],边界断裂(顺北断裂、FN1断裂)与顺德凹陷内具有一定走滑性质的NEE向断裂共同控制了盆地的沉积充填与沉积体分布。来自北部神狐隆起物源的沉积沿顺北断裂活动较弱的转换带(地震测线1121—1361以及地震测线1841—2081附近)集中注入[图5(b)],之后,受FN1断裂影响进入凹陷,并沿凹陷内由NEE向断裂控制形成的断槽迁移、搬运并堆积,形成大型扇三角洲沉积。由于该阶段FN1断裂在凹陷西侧和中部的活动性总体强于顺北断裂[图5(b)、图5(c)],顺德凹陷西侧和中部形成的扇三角洲的沉积规模总体大于东侧;而南部缓坡带发育受来自顺德低凸起物源影响的辫状河三角洲

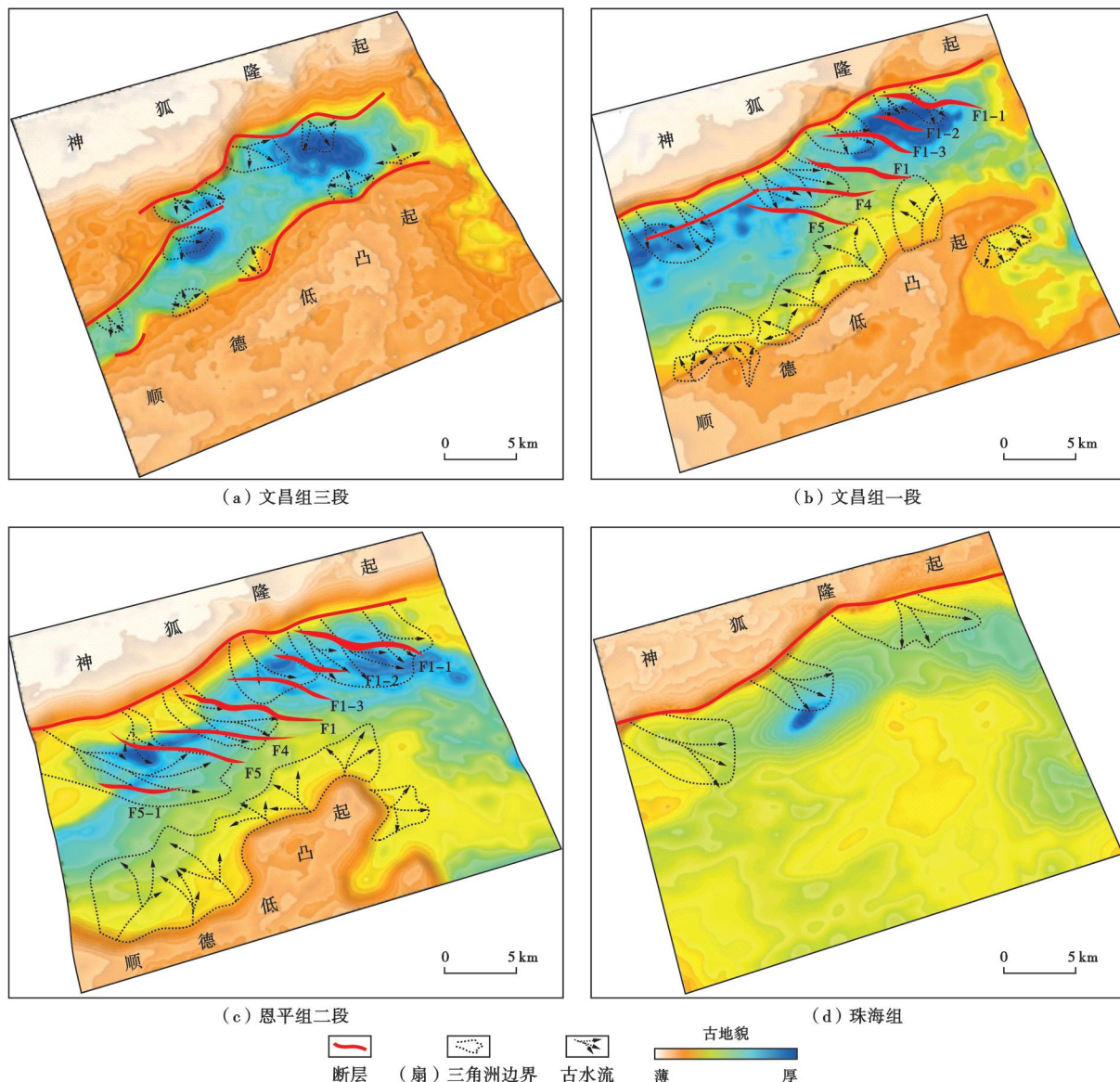


图7 顺德北凹重点层位的沉积相、古地貌及主干断裂平面分布

Fig. 7 Distribution of the sedimentary facies, palaeo-geomorphology and main faults in the northern Shunde sag

沉积。恩二段沉积早期处于欠补偿环境,沉积以浅湖亚相泥岩为主,可作为直接盖层。

(3) 断拗转换早期恩二段大型辫状河三角洲砂岩与恩平组一段(恩一段)滨—浅湖泥岩的储-盖组合。断拗转换早期(恩二段中—晚期)[图7(c)],顺北断裂和FN1断裂活动性明显减弱,此时水体相对较浅,隆起区物源沿顺北断裂活动性相对较弱的5个转换带持续稳定注入,之后,沿顺德凹陷内受近EW向与NEE向断裂控制形成的系列断槽进行稳定的长距离搬运,在凹陷北部发育5个大型辫状河三角洲沉积体。在凹陷西侧、中部以及东侧的中段,由于凹陷内NEE向断裂延伸大,断裂控制下的辫状河三角洲向凹陷推进更远、规模更大;南侧由顺德低凸起物源供给,形成的辫状河三角洲呈现出连片分布的特征。恩一段沉积期发

生大范围湖侵,形成了稳定分布的滨—浅湖亚相富泥地层,是研究区的主要区域盖层。

(4) 断拗转换晚期珠海组滨海—三角洲砂岩与坳陷期珠江组浅海相泥岩的储-盖组合。断拗转换晚期(珠海组沉积期)[图7(d)],断裂对沉积基本无控制作用,此时顺德低凸起淹没于水下,发育被神狐隆起物源影响的滨海—三角洲相砂岩,与坳陷期珠江组浅海相泥岩构成了有利的储-盖组合。同时,珠海组沉积期广泛发育的滨海相泥岩也可作为区域盖层。

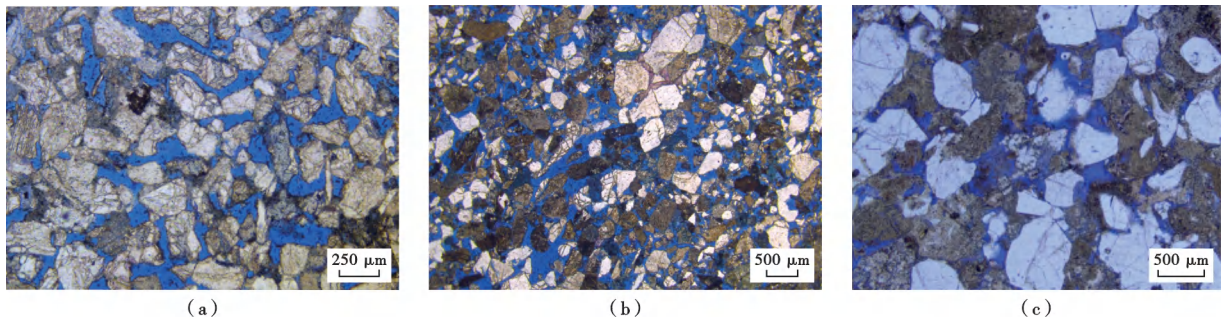
综上所述,顺德北凹储-盖组合具有以下发育特征:①北部断阶带发育文昌组扇三角洲—恩平组大型辫状河三角洲砂岩与滨—浅湖、半深湖亚相泥岩储-盖组合;②凹陷带与南斜坡带发育上述完整的4套储-盖组合,储-盖组合条件更优;③南部低凸起带以发育文

一段辫状河三角洲砂岩与恩二段下部滨—浅湖泥岩、恩二段辫状河三角洲砂岩与恩一段滨—浅湖泥岩以及珠海组三角洲—滨海相砂岩与珠江组浅海泥岩3套储-盖组合为主,储-盖组合条件中等。凹陷带钻探的W36a井证实储层为恩平组大型辫状河三角洲和文昌组扇三角洲砂岩(图8)。恩平组辫状河三角洲储层的分选性较好,以细砂—中砂岩为主,由于其埋深较浅,碎屑颗粒以点接触为主,发育粒间孔,储层连通性好;文昌组扇三角洲储集砂岩的粒度明显较恩平组粗、分选性偏差,表现为极粗砂—粗砂岩,其中,埋深相对较浅的文一段砂岩的碎屑颗粒呈点接触,发育粒间孔,储

层连通性较好,而埋深较深的文二段砂岩的颗粒呈线接触,具有粒间孔与粒内溶孔组合,储层的连通性相对较差。

3.3 伸展-走滑作用控制大型构造背景下复合圈闭群的形成

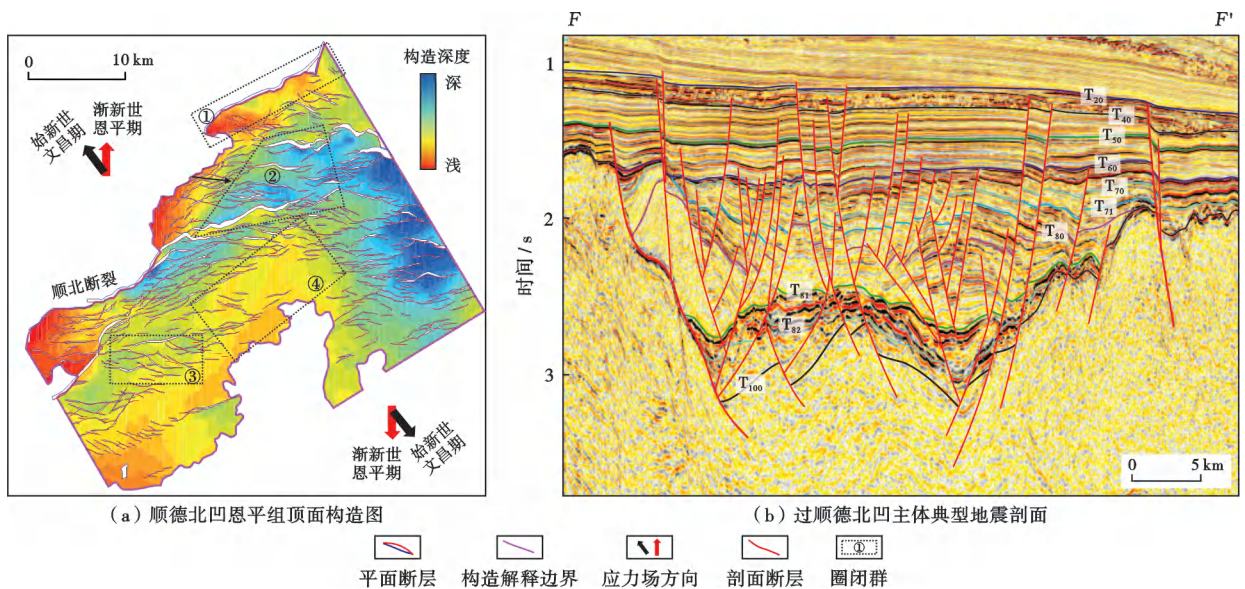
受多期伸展应力场叠加以及应力场持续顺时针旋转影响^[25],顺德北凹发育4大构造带及其对应的圈闭群[图9(a)]:①在NE向顺北断裂和FN1断裂夹持的北部断阶带,断陷早期形成的NE向断裂受伸展应力场的顺时针旋转作用影响,在断裂下降盘增压区形成断鼻圈闭群,此类圈闭的保存条件较好;②在凹陷带,



(a)细砂—中砂岩,孔隙度为30.6%,渗透率为921 mD,粒间孔为主,连通性好,点接触,压实弱,恩平组二段,W36a井2032.2 m,单偏光;(b)粗砂—极粗砂岩,孔隙度为21.1%,渗透率为667 mD,粒间孔为主,连通性好,点接触,压实作用弱,文昌组一段,W36a井2486.0 m,单偏光;(c)粗砂—极粗砂岩,孔隙度为10.4%,渗透率为0.86 mD,粒间孔与粒内溶孔为主,连通性较差,线接触,压实作用较强,文昌组二段,W36a井3176.3 m,单偏光。

图8 顺德北凹W36a井古近系恩平组与文昌组储层岩石特征

Fig. 8 Characteristics of reservoir rocks from the Palaeogene Enping Formation and Wenchang Formation in Well W36a of northern Shunde sag



(a) 顺德北凹恩平组顶面构造图

(b) 过顺德北凹主体典型地震剖面

平面断层 构造解释边界 应力场方向 剖面断层 圈闭群

注:①—北部断阶带圈闭群;②—凹陷带圈闭群;③—南部斜坡带圈闭群;④—低凸起区圈闭群;T₂₀—韩江组顶界面;T₄₀—珠江组一段顶界面;T₅₀—珠江组二段顶界面;T₆₀—珠海组顶界面;T₇₀—恩平组一段顶界面;T₇₁—恩平组二段顶界面;T₈₀—文昌组一段顶界面;T₈₁—文昌组二段顶界面;T₈₂—文昌组三段顶界面;T₁₀₀—基底顶界面。

图9 顺德北凹渐新统恩平组顶面构造与典型剖面(剖面位置见图1)

Fig. 9 Top structure and typical seismic profile of the Oligocene Enping Formation in northern Shunde sag

受渐新世近 SN 向伸展应力场影响,始新世晚期形成的 NEE 向断裂背向下降,在断裂上升盘形成凹中地垒构造带,同时在下降盘局部增压弯曲区形成始新统文昌组—渐新统恩平组继承性断鼻圈闭群,该类圈闭的保存条件也较好;③在南部斜坡带,始新世晚期形成的 NEE 向断裂与渐新世形成的近 EW 向断裂发生叠加和相互切割,在断裂下降盘增压和释压区分别形成成群、成带分布的断鼻和断块圈闭群;④在顺德北凹和顺德南凹之间的低凸起近凹鼻状构造带,受顺北断裂上盘持续旋转掀斜作用影响,区内具有一定走滑性质的 NEE 向断裂发生差异活动,在局部增压区形成与走滑方向斜交的背斜型圈闭,后被晚期近 EW 向断裂

破坏和改造,圈闭变得更为复杂[图 9(b)]。

3.4 伸展-走滑作用控制下的正向构造以及长期活动断裂控制了优势运聚区的分布

顺德北凹在多期伸展应力叠加及应力场持续作用产生的顺时针旋转作用下^[25],在凹陷东洼和西洼形成系列大型正向构造脊[图 10(a)],以及由 NEE 向、近 EW 向、NW 向多期断裂组合而成的长期活动断裂体系,其共同控制了油气的运移和聚集。东洼的 3 条正向构造脊主要受 2 条 NEE 向伸展断裂控制,断裂下降盘地层背向下降,上升盘形成凹中地垒式构造脊[图 10(b)];西洼的 2 条构造脊主要受一系列雁列或近平行的 NEE 向和近 EW 向断裂反向翘倾作用而形成[图 10(c)]。

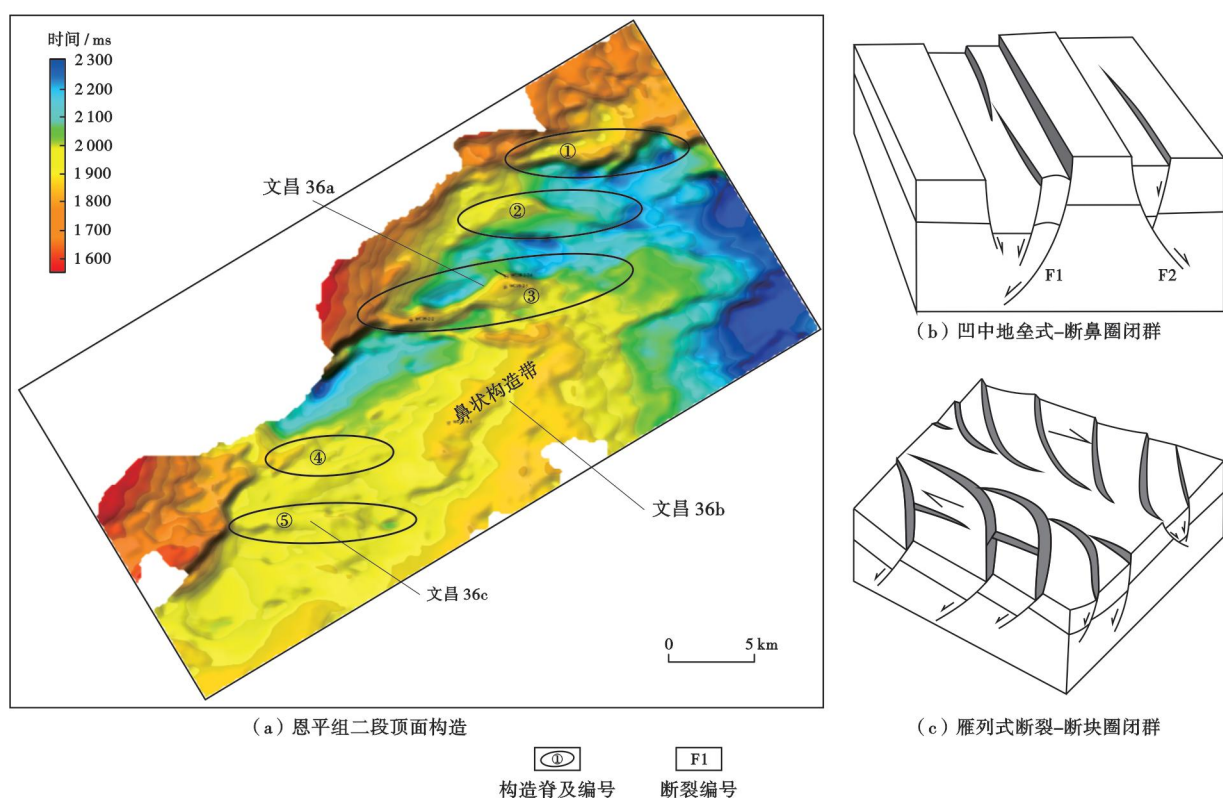


图 10 顺德北凹恩平组二段顶面构造与构造成因模型

Fig. 10 Top structure of the Member 2 of Enping Formation and Structural genetic model in northern Shunde sag

通过成熟烃源岩、断裂分布与断裂生长指数分析[图 11(a)、图 11(b)]发现,控制各构造脊的主干断裂与文二段有效烃源岩沟通,且大多数断裂持续活动至珠江组一段沉积期,部分断裂持续活动至韩江组沉积期,与文昌组烃源岩的主生、排烃期相匹配。文二段半深湖亚相主力烃源岩生成的成熟原油通过通源断裂向上运移至有利储-盖组合层系(如恩二段),再以大型正向构造脊侧向汇聚,形成优势汇聚区。以东洼的凹中地垒式构造脊——文昌 36a 区块为例[图 11(a)],其北侧和南侧的主控构造脊断裂 F1、F2 与文二段成熟烃源岩沟通,由此使得构造脊可接受顺德北凹东洼、

西洼的供烃[图 12(a)、图 12(b)]。F1、F2 断裂从文昌组沉积期开始一直持续活动至韩江组沉积期[图 11(b)],东、西洼的主生、排烃时间为珠江组沉积期至今,通源断裂-构造脊-断鼻圈闭相耦合,为油气的优势汇聚区。

3.5 成藏期及成藏模式

基于上述分析认为,顺德北凹近源的凹中地垒带、南斜坡带、近凹鼻状构造带为有利勘探方向[图 12(a)],古近系恩二段与文一段为有利成藏组合。其中,近凹鼻状构造带具有源岩与断裂顺向接触的特征,其成藏模式为油气通过砂体短距离侧向运移至断背斜-断鼻圈闭后汇聚成藏,成藏关键为通源断裂与砂体的有效配

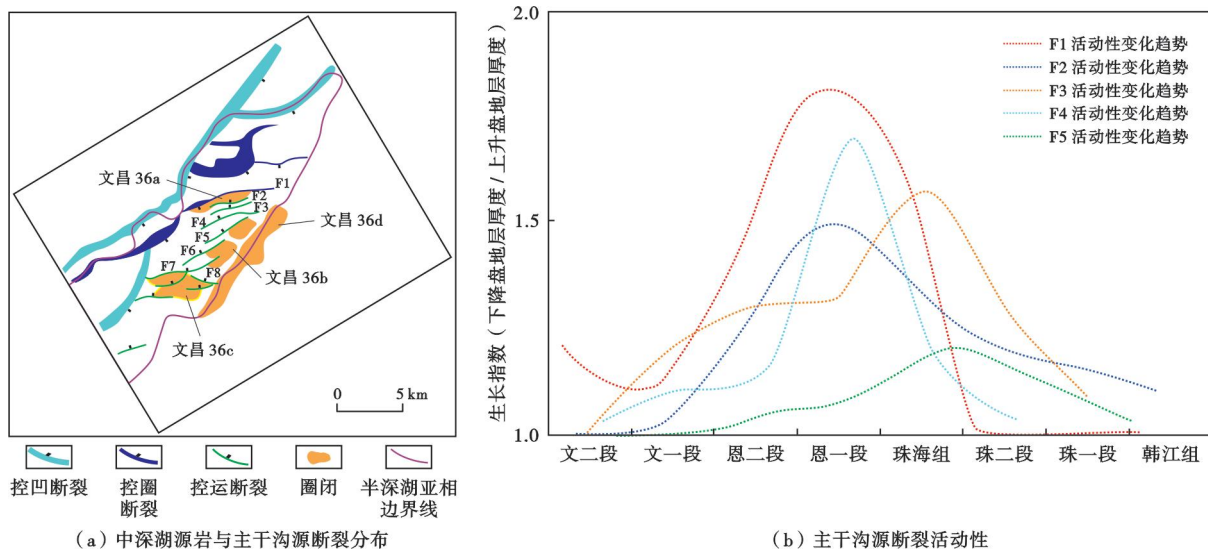
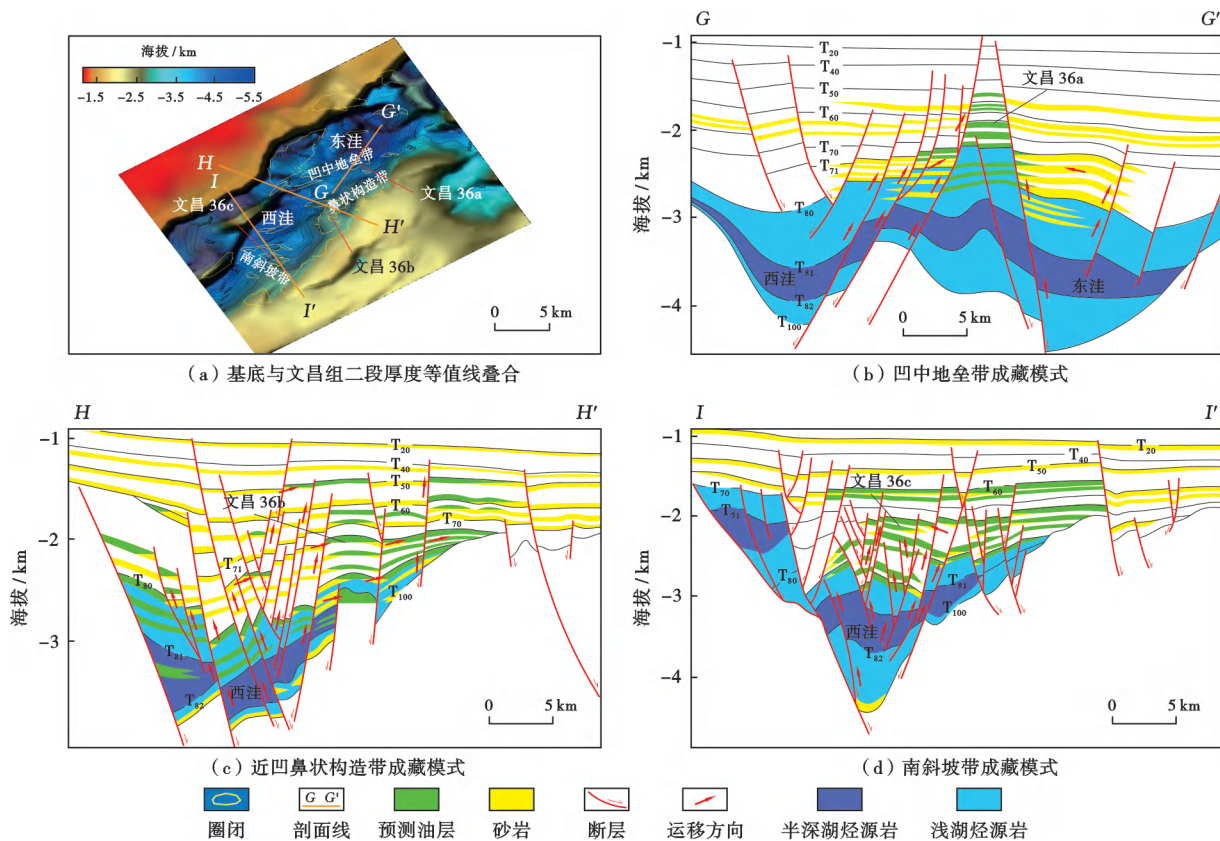


图 11 顺德北凹主干断裂分布与活动性

Fig. 11 Distribution and activity of main faults in northern Shunde sag



注: T₂₀—韩江组地顶界面; T₄₀—珠江组一段顶界面; T₅₀—珠江组二段顶界面; T₆₀—珠海组顶界面; T₇₀—恩平组一段顶界面; T₇₁—恩平组二段顶界面; T₈₀—文昌组一段顶界面; T₈₁—文昌组二段顶界面; T₈₂—文昌组三段顶界面; T₁₀₀—基底顶界面。

图 12 顺德北凹成藏模式

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation mode of northern Shunde sag

置, 优选文昌 36b 构造为有利勘探区[图 12(c)]; 凹中地垒带具有油气沿大型构造脊汇聚的特征, 其成藏模式为油气通过通源断裂垂向运移, 在断鼻构造聚集成

藏, 成藏关键为圈闭的有效性, 优选文昌 36a 构造为有利勘探区[图 12(b)]; 南斜坡带具有油气在成熟源岩正上方和构造脊汇聚的特征, 其成藏模式为油气沿通

源断裂顺向运移,在断鼻-断块圈闭聚集成藏,成藏关键为圈闭的有效性,优选文昌36c构造为勘探有利区[图12(d)]。相比较而言,凹中地垒带的文昌36a构造具有“东西双洼供烃、大型辫状河三角洲控储、断裂-构造脊-砂体耦合控运”的成藏优势,可作为首选突破目标区[图12(a)、图12(b)]。

4 勘探突破与勘探启示及意义

4.1 凹中地垒带W36a井的突破与基本地质特征

凹中地垒带文昌36a构造上部署钻探的首口探井W36a井在古近系恩二段钻遇的油层厚度超过45m,揭示了近百米的油页岩,测试产油量超过100m³/d,实现了南海北部深水新凹陷、新领域石油勘探的重大突破。W36a井揭示:始新统文二段以黑色油页岩和黑灰色页岩为主,总有机碳含量为2.8%~8.9%,平均为5.4%;生烃潜量分布在16.4~58.4mg/g,平均为32.5mg/g;氢指数分布在304~650mg/g,平均为555mg/g;干酪根类型主要为II₁-I型,为好一优质烃源岩;恩二段大型辫状河厚层砂岩与恩平组一段泥岩为区域储-盖组合,文一段扇三角洲砂岩与恩二段底部泥岩为局部储-盖组合,二者砂岩的孔隙度分别为16.6%~33.0%和16.3%~23.9%,渗透率分别为169~3236mD和26.5~729.0mD,为中等—特高孔、中等—特高渗储层;恩二段油层的原油密度为0.940~0.952g/cm³,为中质—重质油藏。

4.2 顺德北凹石油勘探潜力

顺德北凹首口探井W36a井揭示:凹陷发育始新统文二段半深湖亚相优质烃源岩,整体已进入成熟阶段,石油资源量大;恩二段和文一段为大型辫状河三角洲、扇三角洲前缘水下分流河道沉积,含砂率较高、储层物性好,与上覆浅湖亚相泥岩形成优质储-盖组合;凹陷带内油气运移活跃,证实正向构造匹配上长期活动的通源断裂,由此而发育的鼻状构造带和凹中地垒带是油气的优势运聚区。W36a井新增石油探明地质储量超过700×10⁴t,在周边大型正向构造中已落实断背斜(文昌36b构造)、断鼻(文昌36a构造)、断块(文昌36c构造)圈闭群(图12),资源潜力超过1×10⁸t,勘探潜力大。下一步将聚焦顺德凹陷凹中地垒带(含反转构造带)和鼻状构造带的油气优势运聚区,逐步拓展勘探,并积极探索顺德凹陷周缘的石油勘探领域,力争顺德凹陷等边缘凹陷在石油勘探领域实现亿吨级油田群的发现。

5 结论

(1) 顺德凹陷经历了断陷期、断坳转换期、坳陷期

3期构造演化,发育4组断裂体系。断陷期早期形成以伸展作用为主的边界控凹、控源的NE向断裂;在断陷晚期和渐新世断坳转换期,受应力场顺时针旋转作用影响,断裂具有一定走滑性质,控制了大型储集体与圈闭的形成;中新世坳陷期,凹陷以沉降作用为主,局部地区断裂活化。

(2) 顺德北凹在断陷期的强烈伸展作用控制了始新统文二段发育半深湖亚相烃源岩与东、西侧2个主力烃源灶;断坳转换期,伸展-走滑作用控制古近系恩二段大型辫状河三角洲砂岩与恩平组一段滨—浅湖亚相泥岩形成区域优质储-盖组合,并沿不同构造带分布断鼻-断块-断背斜圈闭群;伸展-走滑作用下,正向构造与长期活动断裂共同控制了油气的运移和聚集。

(3) W36a井揭示了恩二段发育厚层油层,获得了深水新凹陷、新领域石油勘探重大突破,证实了顺德凹陷发育半深湖亚相优质烃源岩以及“烃源岩-断裂-构造脊-砂体”配置的凹中地垒带,具备优越的成藏条件,是油气规模富集的有利区带。大型构造背景下的断鼻-断块圈闭群的资源潜力大,具有良好的勘探前景。

参 考 文 献

- [1] 张功成. 南海北部陆坡深水构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
ZHANG Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 528-533.
- [2] 马兵山. 南海北部珠江口盆地新生代构造特征及其演化[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
MA Bingshan. The Cenozoic structural characteristics and tectonic evolution of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [3] 吕彩丽, 张功成, 杨东升. 珠江口盆地珠二坳陷文昌组构造差异性与动力学成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 333-341.
LÜ Caili, ZHANG Gongcheng, YANG Dongsheng. Differential structure and dynamic mechanism of Wenchang Formation in the Zhu II depression of the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 333-341.
- [4] 徐长贵. 中国近海油气勘探新进展与勘探突破方向[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 9-16.
XU Changgui. New progress and breakthrough directions of oil and gas exploration in China offshore area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 9-16.
- [5] 徐长贵, 赖维成, 张新涛, 等. 中国海油气勘探新进展与未来勘探思考[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 1-12.
XU Changgui, LAI Weicheng, ZHANG Xintao, et al. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 1-12.
- [6] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地开平南大型深水深层油田发现与认识创新[J]. 中国海上油气, 2024, 36(1): 1-13.
XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Discovery of large deep-water and deep-formation oilfield in South Kaiping sag of Pearl River Mouth Basin and new geological understandings[J].

- China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(1): 1-13.
- [7] 杨海长, 曾清波, 纪沫, 等. 珠江口盆地深水区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.
- [8] 高阳东, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷油气地质新认识与勘探突破[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 1-13.
GAO Yangdong, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. New understanding and exploration breakthrough of petroleum geology in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 1-13.
- [9] 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 Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1029-1040.
- [10] 王嘉, 栾锡武, 何兵寿, 等. 珠江口盆地开平凹陷断裂构造特征与动力学机制探讨[J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 41-53.
WANG Jia, LUAN Xiwu, HE Bingshou, et al. Study on the structural characteristics and dynamic mechanism of faults in the Kaiping sag of Zhujiang River Mouth Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(8): 41-53.
- [11] 刘雨晴, 吴智平, 程燕君, 等. 南海北缘古近纪裂陷结构时空差异及控制因素——以珠江口盆地为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 367-376.
LIU Yuqing, WU Zhiping, CHENG Yanjun, et al. Spatial and temporal difference of Paleogene rift structure and its controlling factors in the northern South China Sea: a case study of Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(2): 367-376.
- [12] 蔡嵩, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 106-118.
CAI Song, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. Paleogene tectonic evolution of Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 106-118.
- [13] 聂国权, 何登发, 李小盼, 等. 珠江口盆地开平凹陷构造—地层层序与盆地演化[J]. 地质科学, 2020, 55(1): 122-144.
NIE Guoquan, HE Dengfa, LI Xiaopan, et al. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of Kaiping sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(1): 122-144.
- [14] 张功成, 刘震, 米立军, 等. 珠江口盆地—琼东南盆地深水区古近系沉积演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 632-641.
ZHANG Gongcheng, LIU Zhen, MI Lijun, et al. Sedimentary evolution of Paleogene series in deep water area of Zhujiangkou and Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 632-641.
- [15] 米立军, 张功成, 刘志峰, 等. 中国近海富油凹陷湖相优质烃源岩发育机制[J]. 石油学报, 2023, 44(3): 405-419.
MI Lijun, ZHANG Gongcheng, LIU Zhifeng, et al. Discussion on the development mechanism of lacustrine high-quality source rocks in oil-rich sags in offshore China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 405-419.
- [16] 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.
- [17] 赵贤正, 金凤鸣, 周立宏, 等. 渤海湾盆地风险探井歧页1H井沙河街组一段页岩油勘探突破及其意义[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1369-1382.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, ZHOU Lihong, et al. Breakthrough and significance of shale oil exploration in Member 1 of Shahejie Formation of Well Qiye1H, a risk exploratory well in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1369-1382.
- [18] 熊连桥. 开平凹陷文昌组沉积特征及半深湖空间分布[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 51-61.
XIONG Lianqiao. Sedimentary characteristics and semi-deep lacustrine facies spatial distribution of Wenchang Formation in Kaiping sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 51-61.
- [19] 龙祖烈, 陈聪, 马宁, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷油气成因来源与成藏特征[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 36-45.
LONG Zulie, CHEN Cong, MA Ning, et al. Geneses and accumulation characteristics of hydrocarbons in Baiyun sag, deep water area of Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 36-45.
- [20] 胡杰, 龙祖烈, 黄玉平, 等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造-热演化模拟[J]. 地球物理学报, 2021, 64(5): 1654-1665.
HU Jie, LONG Zulie, HUANG Yuping, et al. Tectono-thermal modelling of Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin, since Cenozoic[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(5): 1654-1665.
- [21] 庾雷, 胡林, 周杰, 等. 珠江口盆地顺德凹陷稠油特征及成因分析[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 14-23.
TUO Lei, HU Lin, ZHOU Jie, et al. Characteristics and genesis of Paleogene heavy oil in Shunde sag of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 14-23.
- [22] 朱俊章, 施洋, 熊万林, 等. 开平凹陷古近系稠油和砂岩储层沥青质成因分析[J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 34-43.
ZHU Junzhang, SHI Yang, XIONG Wanlin, et al. Genesis analysis of Paleogene heavy oil and asphaltene in sandstone reservoir in Kaiping sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 34-43.
- [23] 彭光荣, 郭婧, 姜福杰, 等. 珠江口盆地开平凹陷烃源岩地球化学特征与油源对比[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1624-1636.
PENG Guangrong, GUO Jing, JIANG Fujie, et al. Geochemical characteristics of source rocks and oil-source correlation in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1624-1636.
- [24] 刘军, 彭光荣, 郑金云, 等. 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂-拆离作用下沉积转换及源-汇响应[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 600-612.
LIU Jun, PENG Guangrong, ZHENG Jinyun, et al. Sedimentary transformation and source-to-sink response to the Eocene rifting-detachment in the western Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 600-612.
- [25] 陆蕾蕾, 姜素华, 索艳慧, 等. 南海珠江口盆地走滑构造与油气成藏机制[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 108-122.
LU Leilei, JIANG Suhua, SUO Yanhui, et al. Relationship between strike-slip structure and hydrocarbon accumulation in the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 108-122.

(收稿日期 2024-05-20 改回日期 2024-07-22 编辑 雷永良)