

珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示

施和生¹,高阳东²,刘军²,朱俊章²,龙祖烈²,史玉玲²

[1. 中海石油(中国)有限公司 勘探部,北京 100010; 2. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 深圳 518054]

摘要:珠江口盆地发现的油气资源主要集中在拗陷期沉积的中新统-渐新统,在断陷期沉积的始新统中找到的油气仅占已发现油气资源的8%,而在中生代古潜山领域尚未获得商业性油气发现。富烃洼陷是否有大量的油气仍保存在中-深层的断陷层系内,古近系和中生代古潜山(“双古”)地层油气运-汇通道是否有效发育,成藏动力的强弱,以及圈闭和储-盖组合是否发育等是古近系和中生代古潜山领域勘探面临的主要问题。基于“源-汇-聚”评价思想,通过对珠江口盆地惠州26洼的源(烃源岩类型与质量、热成熟演化史与生排烃史、油气资源类型与规模)、汇(运-汇单元、运-汇方向、输导通道、汇聚强度)、聚(二级构造带与圈闭、储-盖组合、充注强度、保存条件)等静态和动态成藏要素相结合进行深入研究,揭示了惠州26洼古近系和中生代古潜山领域的源-汇-聚特征,提出了“油型烃源岩晚期加快熟化、先油后气、断-压双控、源-储对接强势供烃、立体运聚”动态成藏模式,推动了惠州26-6构造古近系和中生代古潜山新领域勘探获得重大突破。

关键词:动态成藏;源-汇-聚评价;中生代古潜山;古近系;惠州26-6油气田;惠州26洼;珠江口盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 Sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin

Shi Hesheng¹, Gao Yangdong², Liu Jun², Zhu Junzhang², Long Zulie², Shi Yuling²

(1. Exploration Department, CNOOC, Beijing 100010, China; 2. Shenzhen Branch, CNOOC, Shenzhen, Guangzhou 518054, China)

Abstract: In the Pearl River Mouth Basin, a majority of hydrocarbons were discovered in the Miocene-Oligocene reservoir rocks deposited during the depression stage, while only 8 % of the discovered hydrocarbons were found in the Eocene reservoir rocks formed during the rifting stage, and no commercial discoveries have been made in the Mesozoic buried hills. The main problems in exploration for the Paleogene reservoir rocks and Mesozoic buried hills include whether there are a quantity of hydrocarbons still preserved in the middle-to-deep downfaulted reservoir rocks of hydrocarbon-rich sags, whether the hydrocarbon migration pathways are effectively developed in the Paleogene reservoir rocks and Mesozoic buried hills, as well as whether the hydrocarbon accumulation dynamics, traps and reservoir-seal assemblages are well developed. In line with the assessment theory of “source-migration-accumulation”, the study discusses the static and dynamic elements of the hydrocarbon accumulation system in Huizhou 26 Sag, Pearl River Mouth Basin, including the hydrocarbon source in terms of types and quality of source rocks, thermal evolution and hydrocarbon generation-expulsion history, and types and scale of hydrocarbon resources, the hydrocarbon migration in terms of migration unit and direction, migration pathway, confluence intensity, as well as the hydrocarbon accumulation in terms of secondary structural belt and trap, reservoir-seal assemblage, charging intensity and preservation condition. In conclusion, the study reveals the characteristics of source-migration-accumulation for the Paleogene reservoir rocks and Mesozoic buried hills in Huizhou 26 Sag, sets up a dynamic accumulation model featuring “accelerated maturation of oil-prone source rocks at later stages, generation of oil at first followed by gas, joint control of fault and overpressure,

收稿日期:2022-01-24;修订日期:2022-05-15。

第一作者简介:施和生(1962—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探。E-mail: shihsh@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024)。

strong hydrocarbon supply by source-reservoir juxtaposition, and 3D migration and accumulation". Major breakthrough has been made thereby in the exploration for the Paleogene reservoirs and Mesozoic buried hills in Huizhou 26-6 structure.

Key words: dynamic accumulation, source-migration-accumulation assessment, Mesozoic buried hill, Paleogene, Huizhou 26-6 oil/gas field, Huizhou 26 Sag, Pearl River Mouth Basin

引用格式:施和生,高阳东,刘军,等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 777-791. DOI:10. 11743/ogg20220404.

Shi Hesheng, Gao Yangdong, Liu Jun, et al. Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 Sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 777-791. DOI:10. 11743/ogg20220404.

珠江口盆地是先断后拗的新生代盆地,珠一坳陷位于珠江口盆地中部,是盆地的主要产油区。珠一坳陷始新统文昌组半深湖-深湖亚相油型烃源岩为主力烃源岩,已发现油气主要集中分布在惠州26洼、西江30洼和西江24洼等富生烃洼陷区中-浅层的中新统-渐新统(图1a,b),具有下生上储、高孔、高渗特征,先后建成了惠州和西江两大油气田生产群,是珠江口盆地已证实的最富油气分布区之一^[1-6]。但受地质认识较浅和深层勘探程度较低的影响,在古近系始新统-中生代古潜山领域很少有油气发现。“十三五”油气资源评价认为,富生烃洼陷古近系和中生代古潜山(“双古”)领域蕴藏大量油气资源,尤其是天然气资源^[7]。随着新近系未钻圈闭越来越少,加强“双古”领域勘探研究成为必然^[8-10]。

在惠州26洼含油气系统内,为什么中-浅层的珠江组-珠海组发现了大量下生上储的油气藏,而作为主力烃源岩层的文昌组和下伏的中生代古潜山却没有多少油气发现?古近系和古潜山是否能形成大规模的油气藏?突破方向在哪?这需要进一步详细剖析惠州26-6构造古近系、古潜山领域油气生成、运移和聚集规律。

珠江口盆地油气资源分布不均,少数富生烃洼陷控制了绝大多数已发现的油气藏^[6],这些已发现的油气主要集中在中-浅层(拗陷期沉积的)珠江组-珠海组,占已发现油气的92%。珠一坳陷中部的惠州凹陷油气地质资源量和已发现储量非常丰富,其中惠州26洼是惠州凹陷油气资源最为丰富的洼陷,开展惠州26洼源-汇-聚评价和油气成藏规律研究可以指导珠江口盆地裂陷期“双古”地层的油气勘探突破。富油区的惠州26洼是否有大量的油气仍保存在中-深层的断陷层系内,“双古”地层油气运-汇通道是否有效发育,成藏动力的强弱,以及圈闭和储-盖组合是否发育等是该区油气能否规模成藏的主要控制因素^[11-12]。

对惠州凹陷断陷层系油气勘探而言,影响勘探成功率最关键的因素可以归纳为源、汇和聚3个方面。

本文对惠州26-6构造成藏的关键控制因素进一步聚焦研究,深入剖析这3个关键方面起到的作用。文中提及的“源”是指烃源岩类型与质量、热成熟演化与生排烃史及油气资源类型与规模;“汇”是油气运移和汇聚的载体、范围和体量;“聚”是油气汇聚的场所。通过采用源-汇-聚评价思想^[13-17],对惠州26洼源、汇、聚静态和动态成藏要素的系统解剖,围绕深层“双古”甜点储层及汇-聚等成藏主控因素,揭示惠州26-6构造源-汇-聚特征,以期指导珠江口盆地富生烃洼陷古近系、中生代古潜山新领域油气勘探部署。

1 区域地质背景

珠江口盆地为新生代大陆边缘裂陷型盆地,盆地的形成、演化与印度-澳大利亚板块和欧亚板块碰撞、古太平洋板块和菲律宾板块俯冲挤压及南海扩张有关。珠江口盆地由北向南可划分为北部隆起带、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个构造单元,各个构造带又可分若干个凹陷和低隆起^[13](图1a)。

珠江口盆地古潜山的成山背景受控于南海北部中生代到新生代早期的构造演化过程:受特提斯和西太平洋两大构造域相继作用,经历印支运动和燕山运动两期重大构造事件,经过有限造山、造山高峰、区域剥蚀和晚期裂陷4个构造演化阶段。南海北部中生代活动大陆边缘“海沟-岩浆弧-板内伸展”模式受古太平洋板块俯冲作用控制,珠江口盆地珠一坳陷主体位于陆缘岩浆弧位置,受多期岩浆活动影响,具有独特的成山背景^[13, 18-20]。

惠州凹陷位于珠一坳陷中部(图1b),面积约7 000 km²。据已有的地震及钻井资料揭示,惠州凹陷自下而上发育的地层有:中生界(古潜山的岩体),始新统文昌组、恩平组,渐新统珠海组,下中新统珠江组、中新统韩江组、上中新统粤海组,上新统万山组,以及

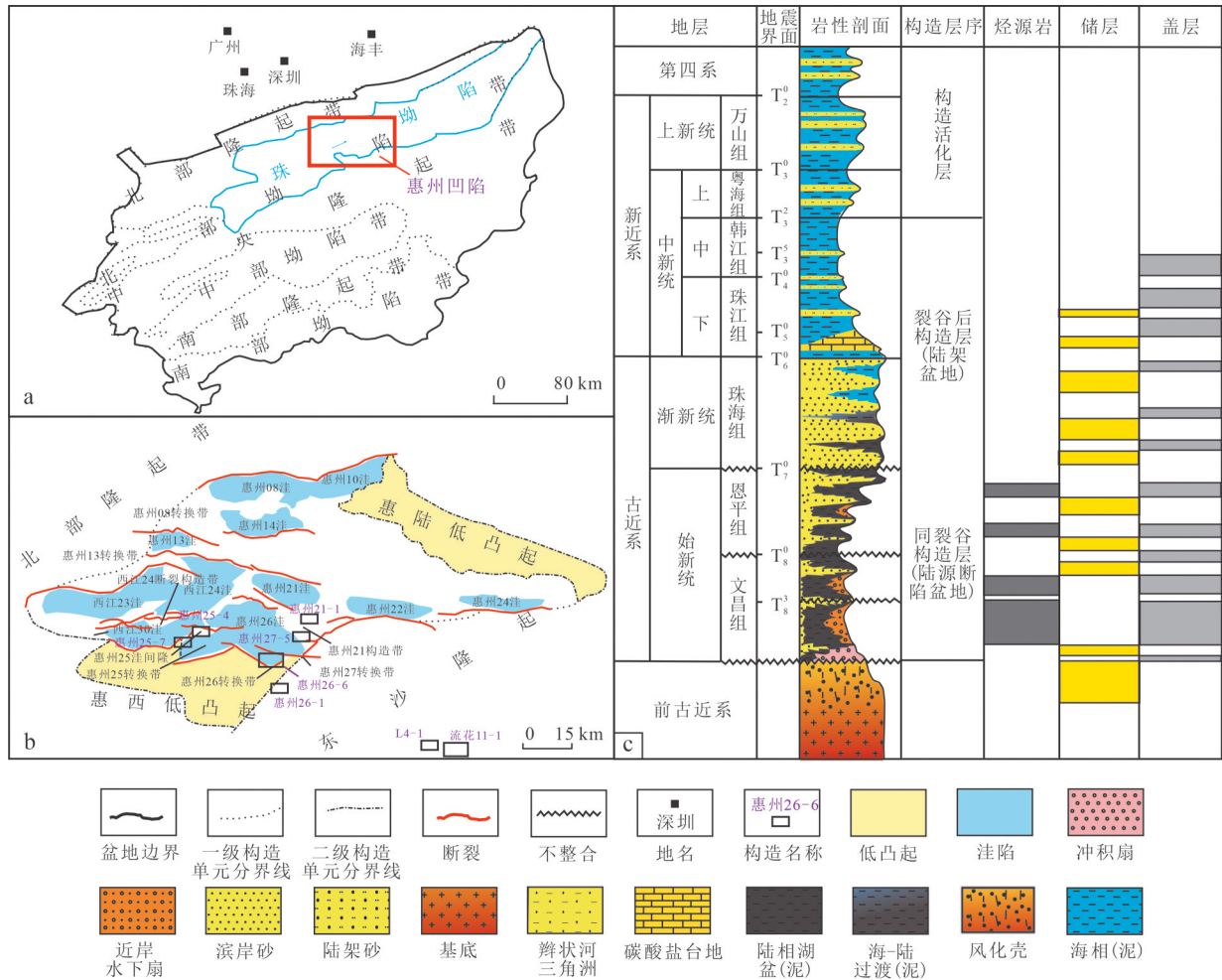


图1 珠江口盆地惠州凹陷构造位置(a)、构造单元特征(b)及地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Structural location (a), structural unit characteristics (b) and composite stratigraphic column (c) of

Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin

第四系(图1c)^[18]。文昌组是裂陷一幕的沉积地层,大部分地区文昌组直接超覆不整合于前古近纪基岩上,顶面为 T_8^0 反射层,具有全区不整合特征,对应珠江二幕构造运动。文昌期(文昌组沉积期)为强裂陷期,具有多个沉积和沉降中心。洼陷沉积中心多为半深湖-深湖亚相,边缘为滨浅湖亚相,沉积厚度最大可达2 600 m,最大埋深超8 000 m。恩平组属于盆地裂陷二幕沉积地层,介于 T_8^0 — T_7^0 地震标志层,沉积厚度最大可达2 800 m,最大埋深6 100 m,平均埋深4 200 m。恩平组与下伏地层为平行不整合或角度不整合接触。在局部基底隆升较高的地区或者邻近边缘隆起区,恩平组直接超覆于基底之上。恩平组为一套含煤层系,属三角洲-河湖沼泽相沉积,自下而上正旋回特征明显,下部为大套砂岩夹泥岩,上部为黑灰色泥岩与灰色砂岩不等厚间互夹煤层。文昌组是惠州凹陷主要烃源岩,成藏贡献大于99%,恩平组是次要烃源岩,成藏贡献小于1%。

平面上,依据基底断裂和古近系沉积厚度分布,惠州凹陷可进一步划分为惠州26洼、西江30洼和西江24洼等11个洼陷(图1)。古近系主要发育近NEE和NNW走向的两组断裂,这两组断裂将盆地基底错断、切割,同时控制了古近纪不同时期的洼陷结构和沉积充填特征。受不同走向断裂差异活动影响,凹陷边缘具有典型的转换断裂强烈活动特征,发育惠州26、惠州25和西江30等多个构造转换带,这些转换带是古近系沉积砂体的有利发育部位。同时,在洼陷之间以及凹陷边缘转换带位置,基底地层构造变形强烈,往往形成基底潜山。惠州凹陷富烃洼陷边缘构造转换带易形成“自生自储”古近系油气藏和“上生下储、新生古储”潜山油气藏,为惠州凹陷深层油气勘探奠定了坚实的地质基础。

惠州26-6构造位于惠州26洼南部陡坡带,发育在南部边界断层二台阶上,是由2条NNW向和1条NE向控洼断裂共同控制的断块构造。为探索惠州

26-6构造的含油气性,落实古近系及古潜山储层的分布规律和构造形态,对本区1996年和2015年采集的三维地震资料进行了针对中-深层目标的精细重处理,进一步落实了惠州26-6构造古近系、古潜山圈闭,并在此基础上展开对该区的勘探评价。2019年11月,在惠州26-6构造的高部位钻探了B6-1井,该井钻遇古近系恩平组、文昌组及中生代古潜山油气层390.7 m,为落实各油气层产能,在古潜山和文昌组、恩平组进行了4次DST测试(钻杆测试),DST1在古潜山上部风化裂缝带获得日产油约321 m³、日产气约43 × 10⁴ m³的高产油气流,测试结论为凝析气层;DST2在古潜山下部内幕裂缝带获得日产油约36 m³、日产气2.26 × 10⁴ m³的油气流,测试结论为油层;DST3在文昌组砂砾岩获得日产油约132 m³、日产气约22 × 10⁴ m³的油气流,测试结论为凝析气层;DST4在恩平组砂岩获得日产油4.63 m³的油流。B6-1井的成功钻探揭示了古近系砂岩、砂砾岩储层和中生代岩浆岩古潜山良好的含油气性,证实该区为复式油气聚集区,标志着惠州26-6大油气田的发现。

惠州26-6油气田垂向上成藏层段从下往上可分为中生代古潜山、文昌组和恩平组3个构造单元。恩平组和文昌组具有“上部轻质油藏、下部凝析气藏”的特征,中生代古潜山具有“上部凝析气藏、下部挥发油藏”的特征^[11-12]。

2 惠州26洼油型烃源岩特征

本文中的“源”指的是油气生成的地方,是源-汇-聚评价体系的源头。“源”的分析一方面主要探讨陆陷内烃源岩有机质丰度和类型、热演化、生排烃机理和生排烃史,另一方面需要探讨烃源岩的时空分布及其贫富不均状态,系统评价惠州26洼排烃机理及过程,落实其赋存状态,找出主要富生烃区域的位置。

2.1 烃源岩发育分布

惠州26洼面积约588 km²,16口井揭示文昌组和恩平组两类烃源岩,其中文昌组浅湖、半深湖和深湖相泥岩为主力烃源岩,成藏贡献大,恩平组为次要烃源岩,成藏贡献小。文昌组最大厚度达2 676 m,平均值约1 034 m;文昌组底面(T_g)最大埋深7 394 m,最小埋深约3 066 m,平均埋深5 464 m。文昌期,惠州26洼发育滨浅湖、半深湖-深湖亚相烃源岩,具备丰富生烃物质基础。惠州运动将文昌组分为上、下文昌组,根据三级层序划分依据,文昌组又可以划分出6个三级层序

(上、下文昌组各3个),对应地自上而下分别命名为文一段-文六段。下文昌组是惠州26洼主力烃源岩,文六段、文五段发育半深湖-深湖亚相烃源岩,至文四段沉积期湖盆达到最大,半深湖-深湖亚相发育规模最大;上文昌组沉积时期湖盆收缩,文三段小范围发育半深湖-深湖亚相烃源岩,文二段和文一段(保存比较局限)半深湖-深湖亚相烃源岩则不发育,局部范围发育浅湖亚相烃源岩(图2)。通过单井岩性统计,结合区域沉积相和地震相分布,预测了惠州26洼文昌组暗色泥岩厚度最大达1 800 m,平均约600 m。

2.2 有机质丰度和类型

烃源岩有机质丰度是衡量源岩优劣的直接标志,烃源岩有机质丰度与沉积环境、母源输入及生源构成密切相关。珠江口盆地(东部)在成盆过程中,受各裂陷期和拗陷期构造活动强度以及不同时期古气候条件差异性的影响,导致不同时期沉积和沉降中心迁移、物源体系转换、湖盆水系营养水平和烃源岩母质类型等不同,烃源岩的品质存在较大的差异性。根据7口井文昌组泥岩样品岩石热解分析、沉积相、测井参数和地震属性等资料,惠州26洼文昌组浅湖、半深湖和深湖亚相油型烃源岩总有机碳含量(TOC)主体分布在2.0%~6.0%(图3a)。

烃源岩有机质类型是衡量有机质生烃演化属性的重要指标,岩石热解参数氢指数(HI)能很好地表征烃源岩有机质类型。HI-T_{max}(热解峰温)分类法表明,惠州26洼文昌组半深湖-深湖亚相油型优质烃源岩以I-II₁型为主,HI主体分布在300~600 mg/g(图3b);文昌组半深湖-深湖亚相烃源岩富含来源于藻类的4-甲基C₃₀甾烷系列;孢粉中富含浮游藻类和无定形有机质,指示该套烃源岩以水生生物贡献为主。

2.3 热演化史

通过对珠江口盆地构造热演化研究及基于岩石圈底界固定温度模型的热史模型求取惠州26洼烃源岩的热演化史^[19]。惠州26洼文昌组主力烃源岩(A井文五段底)在文昌期-珠江期熟化率为(0.01%~0.02%)/Ma,韩江期以来为(0.05%~0.06%)/Ma。惠州26洼文昌组主力烃源岩在16Ma成熟度(镜质体反射率R_o)处于0.6%~1.0%,为早-中期成熟阶段;10Ma成熟度为0.8%~1.3%,为中-晚期成熟阶段;现今成熟度为1.2%~1.8%,为高成熟阶段。惠州26洼文昌组主力烃源岩晚期加快熟化,有利油气大量生成和排出。

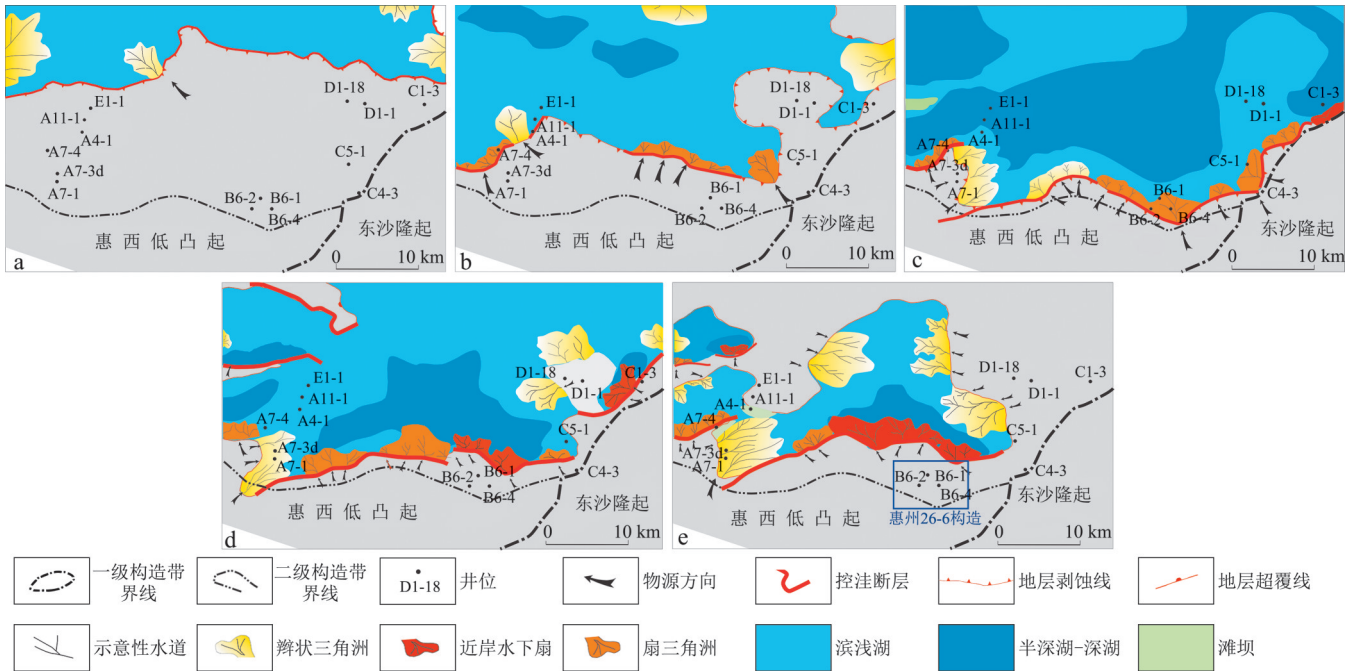


图2 惠州26洼文昌组沉积相

Fig. 2 Diagrams showing the sedimentary facies of the Wenchang Formation in the Huizhou 26 Sag

a. 文二段; b. 文三段; c. 文四段; d. 文五段; e. 文六段

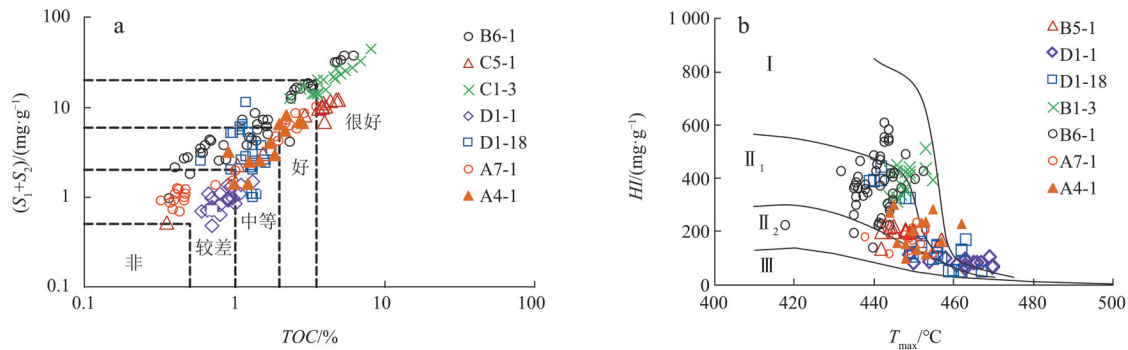


图3 惠州26洼钻遇文昌组烃源岩有机质丰度(a)及有机质类型分布(b)

Fig. 3 Organic matter abundance (a) and types of Wenchang Formation source rocks encountered by exploratory wells in Huizhou 26 Sag

2.4 生、排烃机理

本次研究分别对研究区发育的文昌组半深湖-深湖亚相烃源岩进行半封闭、半开放热压生烃模拟实验。实验温度设置: 250 ~ 550 °C 设置8个温度点, 从低成熟-成熟-高成熟-过成熟的生、排烃过程及原油裂解规律研究源岩; 介质条件: 地层水介质根据文昌组水分析资料进行配比(尽可能恢复地质原貌); 压力设置: 地层流体压力和上覆静岩压力的设置结合埋藏史及埋深, 地层流体压力设置为25 ~ 45 MPa 共8个压力点, 上覆静岩压力设置为60 ~ 108 MPa 共8个压力点, 同时阀门排烃压力设置为从室温、常压均匀增加至各温度点对应的地层流体压力。据有限空间温-压双控半

封闭、半开放体系烃源岩生、排烃物理模拟实验产烃率图版可见(图4), R_o 在0.7% ~ 1.2%时, 文昌组半深湖-深湖相烃源岩处于主要生油期; R_o 在1.1% ~ 2.2%时, 该套烃源岩处于主要生气期, 具有典型“先油后气、晚期大量排气”的特点。

根据地层压力演化模拟, 惠州26洼巨厚文昌组泥岩自恩平期末开始发育超压, 洼陷中心处压力系数约1.4; 由于珠海组和珠江组下段沉积速率较低, 且油源断裂活动性强, 恩平期-珠江组下段沉积期超压无明显增强; 自珠江上段沉积以来(15.97 Ma), 由于生烃作用超压发育范围明显扩大, 洼陷中心处压力系数渐增, 可达1.78, 洼陷边缘油源断裂活动部位泄压和油气运移比较明显。惠州26洼油源断裂活化与超压同期发

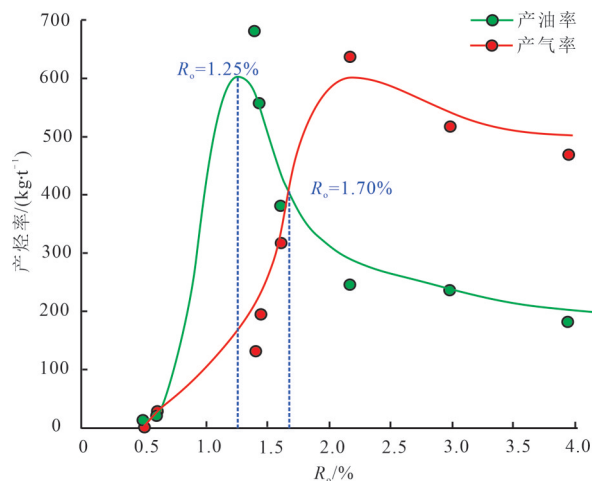


图4 有限空间温-压双控半封闭、半开放体系文昌组
烃源岩生、排烃物理模拟实验

Fig. 4 Physical simulation experiment of hydrocarbon generation and expulsion from the Wenchang Formation source rocks in a semi-closed system under joint control of temperature and pressure in a limited space

育,断层与超压作用共同控制油气大量排出。惠州26洼文昌组湖相油型烃源岩具有晚期高熟、快速生烃和超压排烃能力,且排烃强度大,为惠州26-6构造古潜山和古近系油气成藏提供了充足的物质基础和成藏动力条件。

2.5 生、排烃史

本文在前人资源评价方法的基础上^[7,20-29],基于16口实钻井不同层位不同相带烃源岩厚度、有机质丰度、有机质类型和生烃潜力建立了研究区文昌组不同类型烃源岩的有机相,采用三角概率分布模型;根据实际钻井地质剖面统计结果,半深湖-深湖亚相烃源岩吸附系数取100 mg/g,三角洲-滨浅湖亚相烃源岩吸附系数取50 mg/g;通过对珠江口盆地构造热演化研究及基于岩石圈底界固定温度模型的热史模型推演研究区烃源岩的热演化史。在研究区实测31口井DST、MDT温度和成熟度数据约束下,采用Easy- R_o 动力学模型和不同类型烃源岩生烃动力学方程(活化能频率分布),利用Trinity盆地模拟软件模拟计算惠州26洼排油气量概率分布,重构生、排烃史。惠州26洼在大于23 Ma, 23~16 Ma, 16~10 Ma和10~0 Ma排油量分别为 13.52×10^8 t, 15.94×10^8 t, 26.50×10^8 t和 6.26×10^8 t,排气量分别为 0.08×10^8 t, 0.80×10^8 t, 11.01×10^8 t和 23.37×10^8 t,累计排烃约 97.48×10^8 t。惠州26洼面积排烃强度大,约 21.3×10^6 t/km²;体积排烃强度大,约 20.8×10^6 t/km³。主排油期为23~10 Ma,排油量约

42.44×10^8 t, 占总排油量的68%;主排气期为10~0 Ma,排气量约 23.37×10^8 t, 占总排气量的66%。具有典型“先油后气、晚期大量排气”的特点。这类油型烃源岩具有晚期高熟快速生气能力,且排烃强度大,为惠州26-6构造潜山和古近系油气成藏提供了充足的物质基础。

3 惠州26洼运-汇特征

“汇”是油气运移和汇聚的载体、范围和体量,是源-汇-聚评价体系的纽带。油气的运-汇分“运”和“汇”两个方面,前者是指油气的运移通道,后者是指油气的汇聚特征(包括汇聚的形式、方向和强度等)。运-汇研究主要包括运-汇单元的划分,各运-汇单元的生、排烃量及资源量,主力的运移方向及其汇聚强度、输导通道等方面。建立在油气运移分割槽(分割流体势场的最低洼处)、流体势线和油气运-汇终点基础上的运-汇单元划分是正确开展运-汇单元研究的基础。

3.1 运-汇单元划分

惠州26洼文昌组是主力烃源岩,根据成藏关键时刻惠州26洼文昌组烃源岩运-汇单元划分原则、分割槽与 T_g 反射面运移流线叠合图(图5),可以将惠州26洼古近系、古潜山层系的油气运-汇划分为3个运-汇单元,即南部、东部和西部运-汇单元。各运-汇单元间的油气资源在运聚方面具有相对的独立性,每个运-汇单元内生成的油气只为本单元内的圈闭提供油气充注。

3.2 运移通道与汇聚特征

本区的油气运移通道主要包括不整合面、断层和砂体,油气向鼻状倾末端、断面脊和构造脊汇聚至有效圈闭内成藏^[13,16]。惠州26洼的油气主要向南部、东部和西部运移,向北部运移量少,主要是因为南断北超的惠州26洼文昌组烃源岩地层在文昌组沉积末期—恩平组沉积时期经历了构造反转,造成文昌组主力烃源岩地层向南抬升,导致油气更容易向南运移;16~0 Ma排出的油气大规模向南部运移,其次向东部和西部运移。南部、东部和西部运-汇单元中,南部运-汇单元油气资源(当)量为 6.14×10^8 t(其中油 4.83×10^8 t,气 1.648×10^8 m³);东部运-汇单元油气资源(当)量为 2.40×10^8 t(其中油 1.60×10^8 t,气 1.004×10^8 m³);西部运-汇单元油气资源(当)量为 1.47×10^8 t(其中油

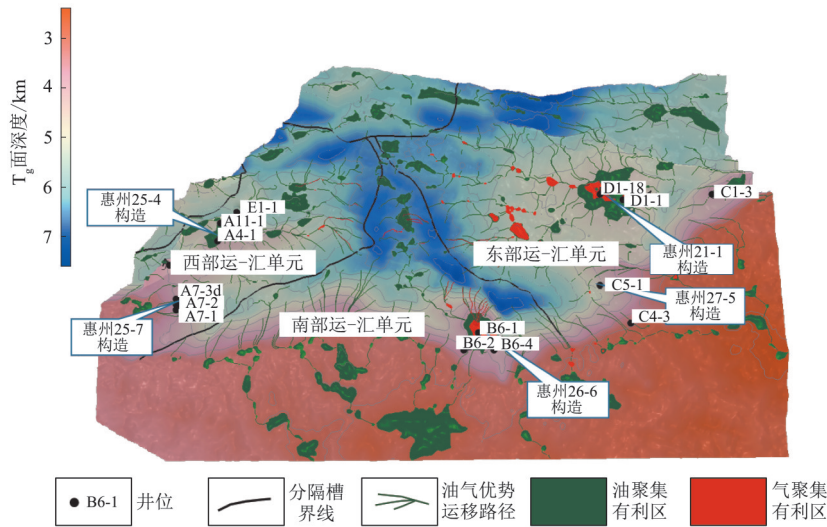


图5 惠州26洼文昌组烃源岩运-汇单元划分与 T_g 面运移流线叠合图

Fig. 5 Hydrocarbon migration unit division map of the Wenchang Formation source rocks in Huizhou 26 Sag with T_g surface migration streamline overlaid

1.08 × 10⁸ t, 气 487 × 10⁸ m³)。南部运-汇单元已发现惠州和流花油田群,是油气聚集的最有利单元;东部运-汇单元已发现惠州21-1油气田,是油气有利的运-汇单元;西部运-汇单元已发现惠州25-4油气田和惠州25-7含油构造,是油气有利的聚集场所。油气资源评价从凹陷、洼陷级细化到运-汇单元级,更有利于找准勘探重点靶区,落实油气勘探方向,这对油气资源分布极其不均的珠江口盆地而言,具有十分重要的指导意义^[14]。

惠州26-6构造古潜山历经燕山期—喜马拉雅期多次构造运动,形成了一系列的断裂和裂缝(地震剖面见网状断裂,岩心和薄片见网状裂缝),多期构造活动,造成基岩古潜山内部断裂持续发育、内幕裂缝规模逐步增大、裂缝开度逐渐增加,使得古潜山内幕形成裂缝间沟通性较强的网状裂缝体系^[11-12]。这种古潜山内幕网状裂缝体系既可作为储层,也可为油气从古潜山低部向高部位运移提供输导通道(16 Ma)。惠州26断裂转换带处于应力集中释放区,既有利于潜山裂缝型储层的改造,又可以作为古近系扇三角洲砂体进入湖盆的通道,同时也有利于惠州26洼生成的油气向惠州26-6构造运聚。断层能垂向输导油气的关键在于其具有一定的活动性,即便是短暂的活化,也能为油气沿着断层大规模垂向运移提供足够的动力,珠江口盆地有利于油气垂向运移的断层活动速率下限为5.6 m/Ma。

惠州26洼发育两条NNW向长期活动的控洼断裂 F_1 和 F_2 (图6)。惠州26-6构造位于 F_1 断裂下降盘和 F_2

断裂上升盘,其中 F_1 断裂以控圈作用为主,表现为上陡下缓的铲式正断层,该断层在中-晚始新世为控洼断层,早中新世早期(T_6^0 — T_3^0)基本不活动,从早中新世晚期(T_5^0)开始重新活动,活动速率均值约4.0 m/Ma,中新世(T_4^0)之后断层活动增强,活动速率均值为9.0~12.0 m/Ma。北侧的 F_2 断裂是与 F_1 同向倾斜的正断层,直接沟通惠州26洼深层—超深层文昌组高成熟烃源岩,活动强度大,持续时间长,自47.8 Ma至今均有不同程度的发育生长,且切割烃源岩厚度大,供烃窗口垂向约3 km,宽约10 km,断层倾向与烃源岩地层倾向一致,与烃源岩时空匹配良好,具有强通源能力,是惠州26洼生成的油气垂向运移的主要通道。惠州26洼文昌组湖相烃源生成的油气可沿着 F_2 断裂垂向运移至惠州26-6构造(图6)。该区油源断裂 F_2 在整个油气成藏期始终以中段(B6-3井至B6-7井)为优势运移通道,而西段(B6-5井至B6-3井)和东段(B6-7井至B6-4井)活动性相对较弱(图7)。总的看来,惠州26-6构造汇聚单元内烃源灶供烃窗大,面积约43 km²,运移量大,汇聚方向集中,与之接触地层内的古近系、古潜山层圈闭多,汇聚形成惠州26-6构造古近系、古潜山满带含油格局。

3.3 运-汇单元特征

在惠州26洼的3个运-汇单元中,南部运-汇单元排烃强度最大,排油强度为(5~55) × 10⁶ t/km²,排气强度为(3~35) × 10⁶ t/km²(图8);其次为东部和西部运-汇单元。这3个运-汇单元油气运移均以汇聚流为

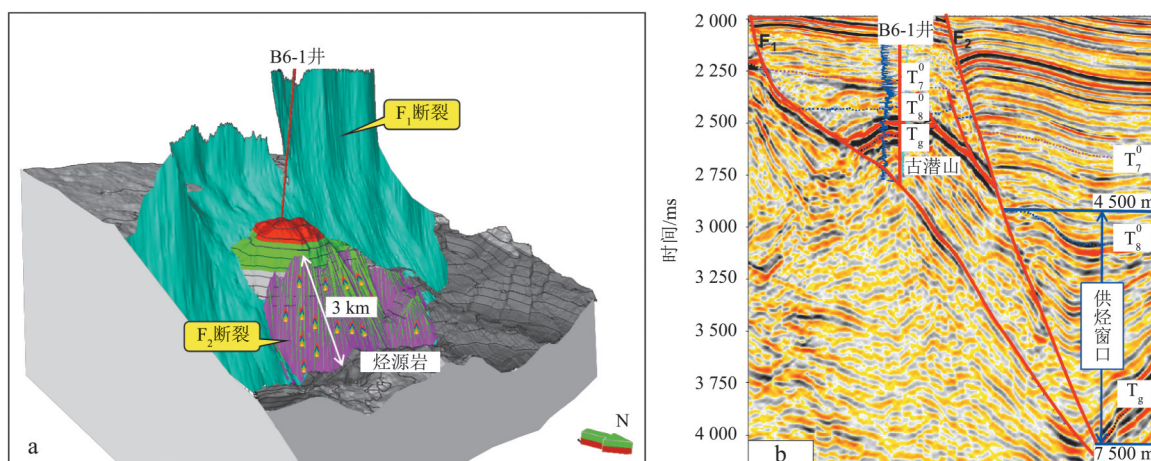


图6 惠州26-6构造古潜山油气输导体系示意图(a)和典型剖面(b)

Fig. 6 Schematic diagram (a) and typical cross section (b) of hydrocarbon carrier system in the buried hills of Huizhou 26-6 structure

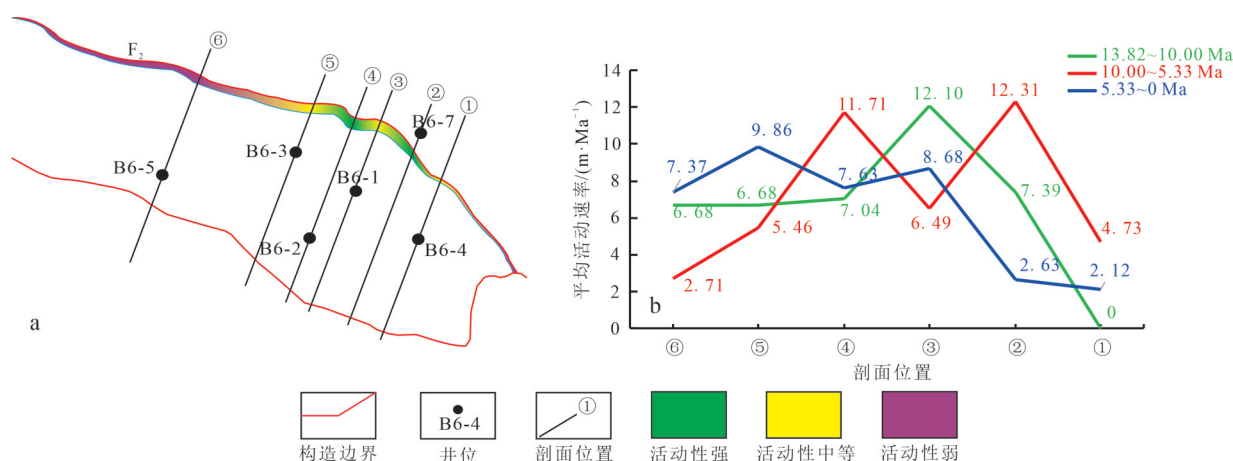


图7 油气成藏期F₂油源断裂活动性特征

Fig. 7 Characteristics of F₂ source rock-rooted faulting activity during hydrocarbon accumulation

a. 10.00 ~ 5.33 Ma 活动性强弱平面图; b. 不同时期活动性强弱对比

主,少部分为平行流,油气运移集中,有利于油气运移和成藏。从流体势线的汇聚特征上看,每个运-汇单元可以有多个运-汇方向,从生烃灶向凸起带运移聚集;从汇聚量上看,通常只有1~2个主运-汇方向。如南部运-汇单元至少可以识别出5个运-汇方向,但只有2个主运-汇方向,惠州26-6油气田位于东部主运-汇方向上(图5,图8)。

4 惠州26-6构造油气聚集特征

聚是油气汇聚的场所,是源-汇-聚评价体系的终极目的地。“聚”的研究包括二级构造带与圈闭、储层与储-盖组合、充注强度和保存条件等方面。通过对珠一坳陷不同二级构造带圈闭的含油性统计研究认为,运-汇单元油气资源量、二级构造带的位置^[15]、充注强度及圈闭条件共同决定了二级构造带及圈闭的油气富

集程度,位于富烃洼陷主运移方向上的二级构造带中的有效圈闭会形成满带含油格局^[30-31]。

4.1 油气藏分布特征

陆缘岛弧背景下中生代以来多期挤压-伸展构造作用下的断裂差异活化造就了惠州26-6古近系物源发育背景及古潜山成山、成储过程^[11,31-33]。惠州26-6构造古潜山岩性以中生代蚀变闪长岩为主,古潜山储层可划分为上部风化裂缝带和下部内幕裂缝带,成像测井和地震资料揭示其共同构成立体网状裂缝体系。风化裂缝带储集空间以裂缝和溶蚀孔洞为主,在B6-1井岩心上可见大量与裂缝伴生的溶蚀孔洞^[11],孔隙度在3.3%~7.1%。内幕裂缝带储集空间以裂缝为主,裂缝密集处可达50条/m,孔隙度在3.3%~5.0%,统计表明裂缝走向以NEE及NWW方向为主,与先存断裂走向基本一致。新生代先存断裂体系及其在新生代

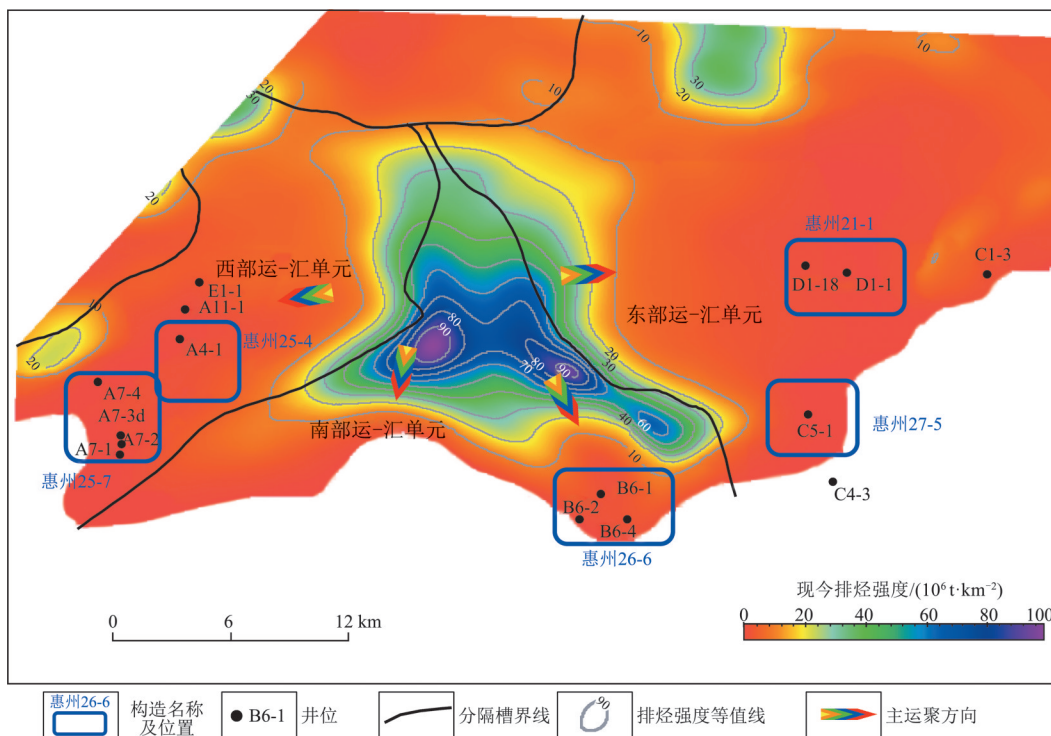


图8 惠州26洼运-汇单元与烃源岩现今排烃强度

Fig. 8 Migration unit and current hydrocarbon expulsion intensity of source rocks in Huizhou 26 Sag

成盆期持续活化,为古潜山储层裂缝的发育提供了基础;岩石薄片鉴定表明长期风化淋滤以及多期次热液流体的改造,为溶蚀孔-洞的形成创造了条件,对潜山裂缝型储层具有改善作用。惠州古潜山储层的主控因素是构造活动和风化淋滤,特色在于其构造活动。自晚中生代以来,经历的陆缘岩浆弧—挤压隆升转换—伸展掩埋定型3个阶段,奠定了惠州26-6构造成山背景。古地貌背景下的差异风化、构造位置及裂缝发育程度控制了风化裂缝带优质储层的发育。

惠州26-6构造古近系储层为受NEE和NNW向断裂形成的转换带控制下发育的扇三角洲沉积。文昌组在NEE和NNW向断层演化的控制下,转换带断裂持续活动,并在岩浆底侵影响下,断块发生差异旋转,形成水下古隆起,其周边水动力作用强,扇三角洲砂砾岩沉积体系接受淘洗改造,储层物性普遍较好。矿物成分成熟度和结构成熟度高的块状、厚层、粗粒、干净砂岩是深部保存良好物性的有利条件,尤以石英砂岩为佳。文昌组以含砾粗砂岩和砂砾岩为主,优势微相为扇三角洲前缘水下分流河道,主要为中-低孔、中渗型储层,储层平均孔隙度为16.1%,平均渗透率为 $17.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对于恩平组而言,整个惠州西南部地区断陷作用减弱,恩平组湖盆扩大、但水体较浅,三角洲平原化作用明显,大部分储层缺乏湖浪的改造,储层

物性相对欠佳。恩平组以砂砾岩、含砾粗砂岩及中砂岩为主,优势相为扇三角洲前缘水下分流河道。主要为低孔、低渗储层,储层平均孔隙度为10.6%,平均渗透率为 $4.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

不同类型油气藏对泥岩盖层的要求不同,同样的泥岩盖层对于不同类型的油气藏来说,封闭的烃柱高度也不同。中生代古潜山、文昌组、恩平组在B6-7井区属于背斜-断背斜类型,实钻结果表明,厚度10~20 m的纯泥岩可以封闭较大的烃柱高度,油气藏为厚层块状或层状;恩平组属于岩性-构造复合类型,泥岩盖层封闭的烃柱高度较小,油气藏多为层状,厚度也较小。物性不同的油气藏,对泥岩盖层的要求也不同。储层物性越好,连通性越好,烃柱高度越大,油气产生的浮力越大,对盖层的要求越高。根据钻井对比资料提出的“浅层薄泥岩叠置封盖、深层多岩性联合封堵”的古近系、古潜山油气藏封闭机制,突破了以厚层泥岩为盖层的传统观点。惠州26-6油气田盖层(泥岩)的特点是致密质纯,含砂量低,处于中成岩阶段中-晚期,垂向上多层薄泥岩可叠置联合封盖,惠州26-6构造文昌组泥岩突破压力试验表明,薄层泥岩具较大的排驱压力,最大可达167 MPa,具有较好的封盖能力。

惠州26-6油气田具有明显的垂向分带性:恩平组为层状油藏与凝析气藏,储层横向变化大,含油气饱和

度较低。文昌组为层状油藏与凝析气藏,储层分布相对稳定,物性好,储量丰度高,产能高。古潜山垂向上可进一步分为风化裂缝带(产能高)和内幕裂缝带(产能偏低),上部为厚层块状高烃柱凝析气藏,下部为挥发性油藏。惠州26-6油气田平面上具有分块性(图9)。恩平组油气层分布在B-1井区、B-5井区和B-7井区,B-1井区为岩性-断块控制,油气藏含油气高度在10.6~232.0 m,且与B-5井区不连通,相对独立;文昌组油气藏受控于砂体分布,主要分布在B-1井区(B-1井钻遇构造高部位),含油气高度在181.3~495.7 m,为岩性-构造油气藏;潜山油气受储层物性影响较大,B-1井和B-3井钻遇古潜山储层段未见水,B-4井钻遇干层。

惠州26-6油气田天然气具有低含 CO_2 和 H_2S 气体、富含烃气的特点,属于高饱和、高含凝析油的凝析气藏,气田地面凝析油具有低密度、低粘度、低含硫、低含蜡和低凝固点的特点。惠州26-6油气田原油为中-轻质常规原油,具有低密度、低粘度、低含硫、高含蜡和高凝固点的特征,除B6-1井区恩平组为常规原油外,其他油藏原油均有原油收缩率高、溶解气油比高的特点,属于挥发性油藏。惠州26-6油气田压力系数接近1,属于正常的温度和压力系统。

4.2 油气动态成藏特征

分子地球化学和储层流体包裹体研究表明,惠州26-6构造古近系、古潜山油气均来自文昌组湖相烃源岩,具有2期油和1期凝析油气充注过程^[11]。第二期生成的成熟石油对第一期生成的低成熟石油具有驱替作用,第三期生成的较高成熟凝析油气对第二期生成的成熟石油具有选择性的驱替和气侵脱沥青作用。

惠州26-6构造古近系、古潜山储层致密化程度制约了第三期凝析油气的充注。古近系、古潜山储层均存在不同类型原油和天然气的多期充注,孔、渗条件较好的储层段(面孔率约>8%),天然气包裹体含量显著增高,指示储层致密程度控制了晚期天然气充注强度。惠州26-6构造古近系储层中油层现今孔隙平均半径(0.28~1.03 μm)明显低于气层(0.77~4.21 μm)和水层(0.40~13.54 μm),晚期天然气充注阻力的差异是造成油气差异分布的重要原因。

本文采用侵入渗滤法,考虑浮力和毛细管力的作用,针对惠州26-6成藏体系展开油气运聚模拟,孔隙度为30%的砂体为油气运聚输导层,渗透率在 $0.97 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的砂岩输导体中油气运移以浮力运移为

主。通过油气运移模拟分析,15.97 Ma之前,惠州26洼生成的油气主体满足自身泥岩吸附的同时,油气以中、深层运聚为主;13.80 Ma左右,惠州26洼烃源岩大量排油,生成的原油沿着长期活动断裂运移至浅层新近系惠州26-6及26-3构造;10.00 Ma左右,惠州26洼部分烃源岩进入高成熟阶段,生成大量湿气,运移至潜山、文昌组和恩平组形成差异聚集成藏;现今惠州26洼烃源岩已大规模生、排烃,生成的油气运移至珠海组-下珠江组,遇到区域海泛泥岩稳定盖层后,以侧向运移为主。

根据上述研究成果,可以将惠州26-6构造古近系、古潜山油气田成藏的关键要素归纳为“油型烃源岩晚期加快熟化、先油后气、断-压双控、源-储对接强势供烃、立体汇聚”动态成藏模式(图10)。惠州26-6油气田是珠江口盆地历经40多年勘探而久攻未破的断陷期古近系-中生代古潜山领域的重大突破,该油气发现为珠江口盆地富烃洼陷下一步的古近系、古潜山新领域油气勘探提供了重要的借鉴。

5 勘探启示

对油气勘探成功率而言,影响因素众多,但影响勘探成功率最关键的因素可以梳理归纳为源、汇和聚3个要素,在每个运-汇单元中,油气从烃“源”运出,顺着运-汇单元内的输导通道和构造脊,直达有利构造“聚”集成藏,是源-汇-聚研究体系的主线,开展顺藤摸瓜式的油气源-汇-聚整体解剖和精细研究对找准勘探脉络,理清勘探思路十分有效。尤其是油气资源贫富十分不均的珠江口盆地,其源-汇-聚决定了盆地的主要勘探方向,影响了勘探的商业成功率。抓住这3个要素对帮助勘探家理清思路和提升勘探成效,早日取得新区、新领域的战略突破具有重要意义。

古潜山已成为中国海域油气勘探的一个重要领域,并且向大于3500 m的深埋古潜山拓展。渤海湾盆地渤中19-6大型凝析气田的勘探实践表明,多期立体网状裂缝及其与供烃窗口的连通性是古潜山成储-成藏的关键,与断裂伴生的“短轴状不连续反射”可以作为太古宇古潜山优质储层的识别标志;三面环洼的超压宽窗供烃-多元联合输导驱动了双层结构古潜山成藏,网状连通的孔-缝体系为油气在古潜山内部的运移聚集提供了有效空间^[34-37]。环惠州26洼区古潜山储层以裂缝-孔洞型及裂缝型的蚀变闪长岩、蚀变花岗岩为主,其次是安山岩;中生代以来,多期挤压伸展构造作用下的断裂差异性活化塑造了巨厚泛

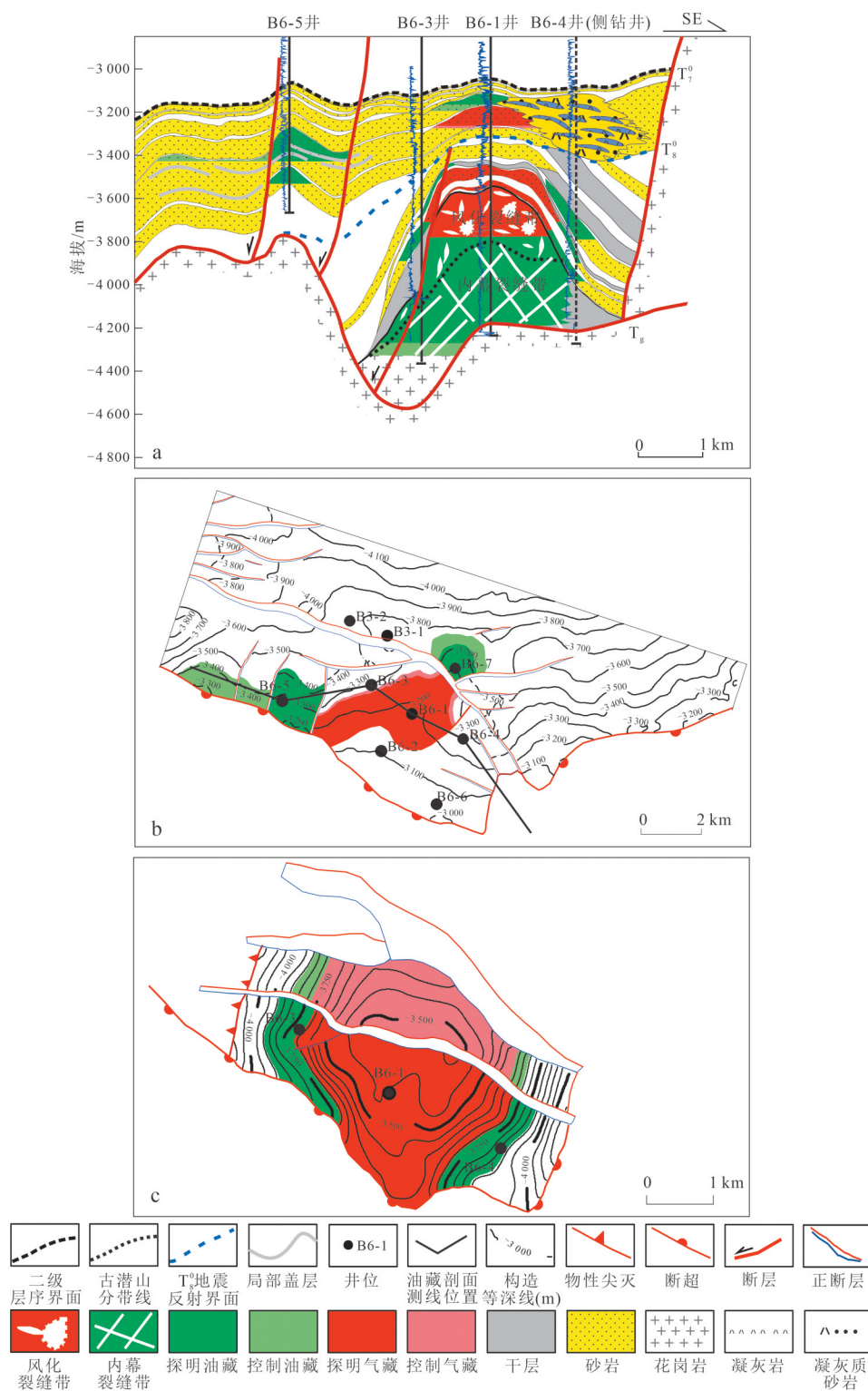


图9 惠州26-6构造油气藏剖面(a)及恩平组EP231层(b)、文昌组WC427层油气层平面图(c)

Fig. 9 Reservoir cross section (a), EP231 reservoir map of the Enping Formation (b) and WC427 reservoir map of the Wenchang Formation (c), Huizhou 26-6 structure

潜山裂缝型储集体;持续活动的断裂沟通了高熟烃源灶和泛潜山(从中国近海已发现古潜山油气藏的特征看,大部分都是古潜山及上覆古近系共同构成的复合油气藏。这类具有同一构造演化背景的古潜山及其

上覆地层共同构成的复合圈闭称为“泛潜山”圈闭,这类油气藏称为“泛潜山”油气藏^[11]。珠江口盆地古潜山与渤海湾盆地古潜山在“成岩、成山、成储、成藏”方面具有较大的差异性,研究惠州26-6构造古

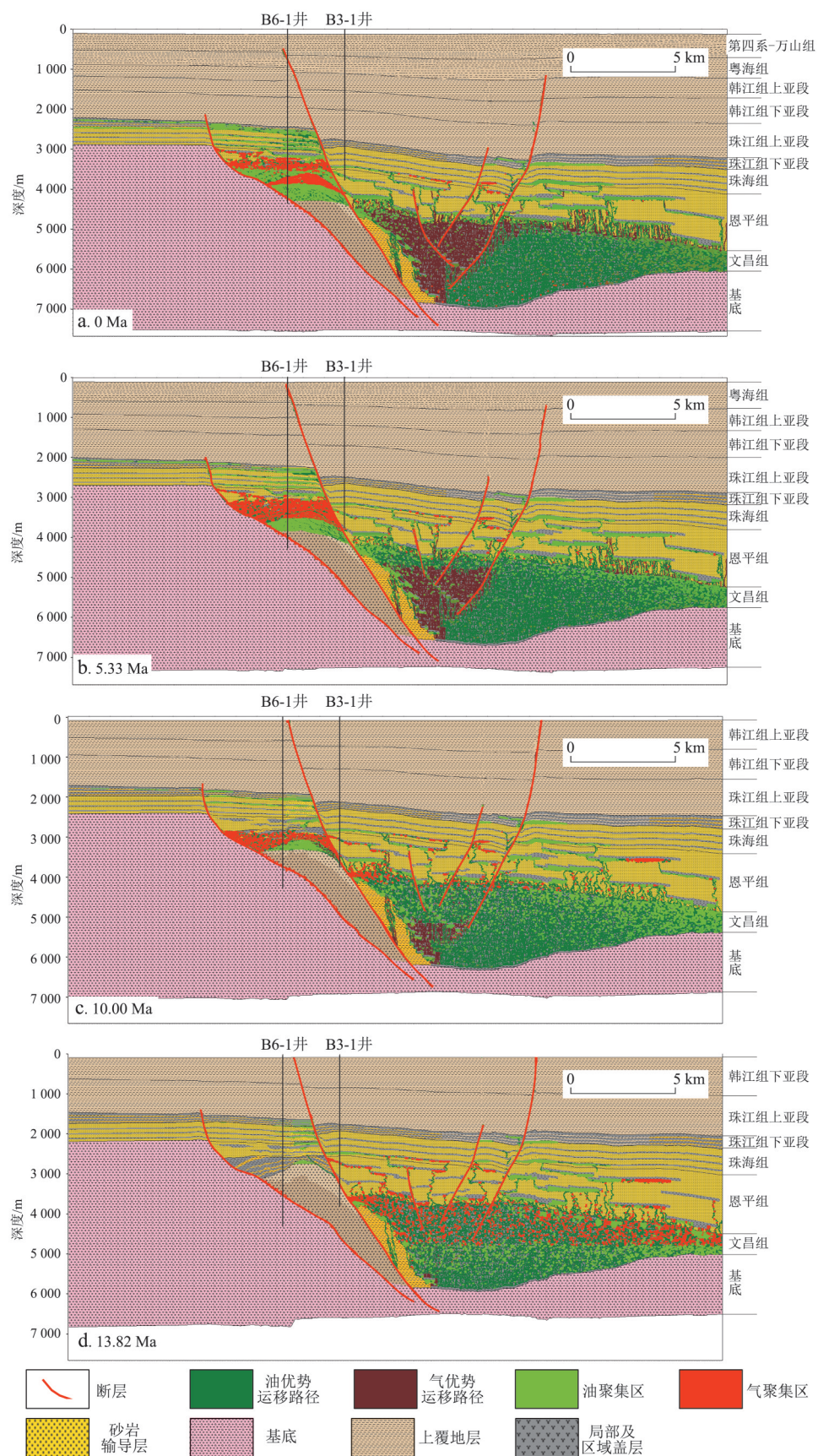


图10 惠州26-6构造油气动态成藏模式

Fig. 10 Diagrams showing the dynamic hydrocarbon accumulation model of the Huizhou 26-6 structure

近系、古潜山成藏规律对指导该类型的古近系、古潜山勘探具有重要意义。

惠州26洼已探明石油地质储量近 4×10^8 t,石油探明率约54%,天然气探明率不到10%,还有大量油气资源待探明,且主要分布在古近系、古潜山领域。根据惠州26-6构造古近系、古潜山油气田源-汇-聚特征及动态成藏模式,提出环惠州26洼周边古近系、古潜山领域具有较大勘探潜力。

惠州26洼主要有3个运-汇单元,南部运-汇单元排烃强度最大,油气资源量为 6.14×10^8 t,是勘探的主战场;其次为东部运-汇单元惠州25-4—惠州25-7构造带和西部运-汇单元惠州21-1—惠州27-5构造带。

1) 惠州25-4—惠州25-7构造带

惠州25-4构造带三面环洼,惠州26洼、西江24洼均可向该构造提供丰富油气,文昌组储层为滩坝相沉积,物性好,产能高,为珠江口盆地首个投入商业开发的文昌组油田。惠州25-7构造带在文昌组钻遇厚层油气藏,DST测试获得自喷产能,展示了该区带良好的勘探前景。该构造带在文昌组发育大型岩性-地层圈闭,是文昌组和古潜山勘探的有利构造带(图1b,图6)。

2) 惠州21-1—惠州27-5构造带

惠州21-1—惠州27-5构造带古潜山紧邻惠州26洼(图1b,图6),为长期发育的继承性隆起,背斜圈闭面积大,构造形态好,D1-1/18井在文昌组-古潜山见到丰富的油斑和油气显示,C5-1井在古潜山也见到较好的油气显示,充分展示了文昌组-古潜山在该地区具有良好的勘探前景。该区带的勘探关键是如何在文昌组-古潜山储层中寻找高孔、渗带和“甜点”段及“甜点”区。

另外,珠江口盆地其他凹陷也存在类似的构造条件和烃源条件,发育良好的古近系、古潜山圈闭,如恩平凹陷南斜坡和陆丰凹陷南部地区等,是近期勘探值得重点关注的地区。

6 结论

1) 惠州26洼发育文昌组湖相油型烃源岩,烃源岩体积大、有机质丰度高、有机质类型好,现今主体处于成熟-高成熟演化阶段,具有典型“先油后气、晚期大量排气”的特点,为惠州26-6构造古潜山和古近系油气成藏提供了坚实的物质基础。

2) 惠州26洼主要有3个运-汇单元,南部运-汇单元排烃强度最大,油气资源量为 6.14×10^8 t,是勘探的

主战场;其次为东部运-汇单元和西部运-汇单元,如惠州25-4—惠州25-7构造带和惠州21-1—惠州27-5构造带的古近系、古潜山领域的勘探潜力较大。

3) 烃源岩生烃作用产生的超压与控洼断裂同时控制着深层油气的初次运移和二次运移。惠州26-6墙角式断裂转换带处于应力集中释放区,既有利于古潜山裂缝型储层的改造,又有利于古近系粗粒沉积砂体发育,同时也有利于惠州26洼生成的油气向惠州26-6构造运聚。

4) 惠州26-6构造古近系、古潜山油气田具有“油型烃源岩晚期加快熟化、先油后气、断-压双控、源-储对接强势供烃、立体运聚”动态成藏模式。

5) “源-汇-聚”评价体系在珠江口盆地油气勘探实践中发挥了重要作用,对类似的断陷盆地油气勘探具有推广价值,对下生上储的拗陷层油气勘探也具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 施和生,朱俊章,姜正龙,等. 珠江口盆地珠一坳陷油气资源再评价[J]. 中国海上油气,2009,1(1): 9-14.
Shi Hesheng, Zhu Junzhang, Jiang Zhenglong, et al. Hydrocarbon resources reassessment in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009,21(1): 9-14.
- [2] 彭光荣,张向涛,许新明,等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J]. 中国石油勘探,2019,24(3):267-279.
Peng Guangrong, Zhang Xiangtao, Xu Xinming, et al. Important discoveries and understandings of oil and gas exploration in Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(3):267-279.
- [3] 张强,吕福亮,贺晓苏,等. 南海近5年油气勘探进展与启示[J]. 中国石油勘探,2018,23(1):54-61.
Zhang Qiang, Lyu Fuliang, He Xiaosu, et al. Progress and enlightenment of oil and gas exploration in the South China Sea in recent five years[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 54-61.
- [4] 张为彪,易浩,钟辉,等. 珠江口盆地东部地区预探井失利原因分析及启示[J]. 中国石油勘探,2018,23(3):18-27.
Zhang Weibiao, Yi Hao, Zhong Hui, et al. Analysis on the causes of failed wildcat wells in the eastern Pearl River Mouth Basin and its enlightenment[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(3):18-27.
- [5] 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.
- [6] 施和生,代一丁,刘丽华,等. 珠江口盆地珠一坳陷油气藏地质特征与分布发育基本模式[J]. 石油学报,2015,36(2):120-132.
- Shi Hesheng, Dai Yiding, Liu Lihua, et al. Geological characteristics and distribution model of oil and gas reservoirs in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(2):120-132.
- [7] 朱明,张向涛,黄玉平,等. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力[J]. 石油学报,2019,40(S1):53-68.
- Zhu Ming, Zhang Xiangtao, Huang Yuping, et al. Source rock characteristic and resource potential in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(S1):53-68.
- [8] 朱明,代一丁,朱俊章,等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系油藏地质特征及成藏机理[J]. 中国海上油气,2017,29(1):1-11.
- Zhu Ming, Dai Yiding, Zhu Junzhang, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of Paleocene reservoir in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017,29(1):1-11.
- [9] 施和生,于水明,梅廉夫,等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征[J]. 天然气工业,2009,29(1):1-5.
- Shi Hesheng, Yu Shuiming, Mei Lianfu, et al. Features of Paleogene episodic rifting in Huizhou fault Depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009,29(1):1-5.
- [10] 杜家元,丁琳,张向涛,等. 珠江口盆地惠州凹陷西南部新近系岩性油气藏勘探思路与关键技术[J]. 石油地质实验,2017,39(6):858-863.
- Du Jiayuan, Ding Lin, Zhang Xiangtao, et al. Exploration approach and techniques for the Neogene lithological reservoirs in the southwestern Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017,39(6):858-863.
- [11] 田立新,刘杰,张向涛,等. 珠江口盆地惠州26-6大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J]. 中国海上油气,2020,32(4):1-11.
- Tian Lixin, Liu Jie, Zhang Xiangtao, et al. Discovery and accumulation pattern of HZ26-6 large-medium sized pan-buried hill and gas field in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020,32(4):1-11.
- [12] 田立新,施和生,刘杰,等. 珠江口盆地惠州凹陷新领域勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探,2020,25(4):22-30.
- Tian Lixin, Shi Hesheng, Liu Jie, et al. Significant discovery and significance of new frontier exploration in Huizhou Depression of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(4):22-30.
- [13] 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.
- [14] 施和生. 论油气资源不均匀分布与分带差异富集:以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. 中国海上油气,2013,25(5):1-8.
- Shi Hesheng. On heterogeneous distribution and differential enrichment by zones of hydrocarbon resources: A case in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013,25(5):1-8.
- [15] 施和生. 油气勘探“源-汇-聚”评价体系及其应用——以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. 中国海上油气,2015,27(5):1-12.
- Shi Hesheng. “Source-migration-accumulation” evaluation system and its application in hydrocarbon exploration: A case study of Zhu I Depression in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015,27(5):1-12.
- [16] 舒誉,施和生,杜家元,等. 珠一坳陷古近系油气成藏特征及勘探方向[J]. 中国海上油气,2014,26(3):37-42.
- Shu Yu, Shi Hesheng, Du Jiayuan, et al. Paleogene characteristics in hydrocarbon accumulation and exploration direction in Zhu I Depression[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014,26(3):37-42.
- [17] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业,2005,25(10):25-27.
- Hu Chaoyuan. Research on the appliance extent of “source control theory” by semi-quantitative statistics characteristic of oil and gas migration distance[J]. Natural Gas Industry, 2005,25(10):25-27.
- [18] 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.
- [19] 胡圣标,龙祖烈,朱俊章,等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. 石油学报,2019,5(S1):178-187.
- Hu Shengbiao, Long Zulie, Zhu Junzhang, et al. Characteristics of the present-day temperature field and the Cenozoic thermal history in the Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,5(S1):178-187.
- [20] 米石云. 盆地模拟技术研究现状及发展方向[J]. 中国石油勘探,2009,14(2):55-58,65.
- Mi Shiyun. Basin modeling technology development situation and

- its main trends[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(2): 55-58, 65.
- [21] 石广仁. 油气运聚定量模拟技术现状、问题及设想[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 1-9.
- Shi Guangren, Status, problems and proposals of the quantitative modeling techniques for hydrocarbon migration and accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 1-9.
- [22] Barker R A, Gehman H M, James W R. Geologic field number and size assessments of oil and gas plays[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(4): 426-432.
- [23] Charles M. USGS petroleum resource assessment procedures[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(3): 452-453.
- [24] Charpentier R R, Klett T R. Guiding principles of USUS methodology for assessment of undiscovered conventional oil and gas resource[J]. Natural Resources Research, 2005, 14(3): 175-186.
- [25] Hackley P C, Ewing T E. Assessment of undiscovered conventional oil and gas resource, onshore Claiborne Group, United States part of the northern Gulf of Mexico Basin[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(10): 1607-1615.
- [26] Magoon L B. The petroleum system——A classification scheme for research, resource assessment and exploration[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 587.
- [27] Wu Tao, Li Lie, Li Wentuo, et al. A quantitative study on source rocks in the western Leidong Depression, northern South China Sea [J]. Energy Geoscience, 2021, 2(1): 73-82.
- [28] 张功成, 陈莹, 李增学, 等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 553-565.
- Zhang Gongcheng, Chen Ying, Li Zengxue, et al. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 553-565.
- [29] 白国平, 邱海华, 邓舟舟, 等. 美国页岩油资源分布特征与主控因素研究[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 524-532.
- Bai Guoping, Qiu Haihua, Deng Zhouzhou, et al. Distribution and main controls for shale oil resources in USA [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 524-532.
- [30] Shi Hesheng, Dai Yiding, Liu Lihua, et al. Genetic pattern of belt-wide petroliferous phenomenon in the eastern Pearl River Mouth Basin and its practical application[J]. Petroleum Science, 2014, 11(3): 1-13.
- [31] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.
- Shi Hesheng, Wang Qingbin, Wangjun, et al. Discover and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [32] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 43-53.
- Hu Wenge. Paleokarst fractured-cavity types and their reconstruction in buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43-53.
- [33] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44.
- Hou Mingcai, Cao Haiyang, Li Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, in Bohai Sea[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.
- [34] 施和生, 牛成明, 侯明才, 等. 渤中13-2双层结构太古宇潜山成藏条件分析与勘探发现[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 12-20.
- Shi Hesheng, Niu Chengmin, Hou Mingcai, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions of double-layered Archeozoic buried hill and major discovery of Bozhong 13-2 oil and gas-field, Bohai Sea area[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 12-20.
- [35] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68.
- Huang Cheng, Yun Lu, Cao Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68.
- [36] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891-902.
- Xue Yong'an, Wang Qi, Niu Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891-902.
- [37] 徐长贵, 杜晓峰, 刘晓健, 等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 235-247.
- Xu Changgui, Du Xiaofeng, Liu Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 235-247.