

文章编号: 0253-2697(2023)07-1029-12 DOI:10.7623/syxb202307001

珠江口盆地开平凹陷深水古近系勘探重大发现及意义

高阳东¹ 彭光荣² 陈兆明² 姜大朋² 马宁² 李潇² 吕华星² 高中亮²

(1. 中海石油(中国)有限公司勘探开发部 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:珠江口盆地开平凹陷经过近40年的勘探,近期在深水开平11-4构造的古近系中获得了大—中型轻质油油田的重大发现。为进一步指导开平凹陷的油气勘探,对开平11-4构造内的烃源、储层、圈闭、保存和运移等石油地质条件开展了深入研究,总结了油气成藏模式。研究表明:开平凹陷的地质结构为一个北断南超的拆离型复式半地堑;其文昌组发育优质半深湖—深湖亚相烃源岩,生烃潜力大;恩平组的浅水辫状河三角洲前缘沉积发育有利储-盖组合;早期的构造活动形成了断块、断背斜、断鼻等多种圈闭类型,而晚期构造活动弱,有利于油气保存;继承性的通源断裂为油气提供了垂向运移通道,油气通过“源-断-储”体系输导成藏;油藏自17 Ma以来经历了多期持续充注,具有“湖相优质烃源供烃、近源断层强充注、多期多层成藏”的成藏模式。开平11-4构造内大—中型轻质油油田的发现实现了开平凹陷新区勘探的突破,同时也是南海东部海域深水古近系原油勘探的突破,展示出珠江口盆地深水油气勘探前景广阔,对南海北部深水区的含油气盆地勘探具有重要借鉴意义。

关键词:珠江口盆地;开平凹陷;轻质油;湖相烃源;源-断-储;成藏模式

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Breakthrough and significance of deep-water Paleogene exploration in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin

Gao Yangdong¹ Peng Guangrong² Chen Zhaoming² Jiang Dapeng² Ma Ning²
Li Xiao² Lü Huaxing² Gao Zhongliang²

(1. Exploration and Development Department of CNOOC China Limited, Beijing 100010, China;
2. Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Guangdong Shenzhen 518054, China)

Abstract: After nearly 40 years of exploration in Kaiping sag of Pearl River Mouth Basin, a medium to large light oil field has been discovered in deep-water Paleogene strata of Kaiping11-4 structure. To further guide oil-gas exploration in Kaiping sag, the paper deeply investigates the petroleum geological conditions such as hydrocarbon sources, reservoirs, traps, preservation and migration conditions in Kaiping11-4 structure, and summarizes the oil and gas accumulation mode. The geological structure of Kaiping sag is a detachment-type compound half-graben with faults in the north and overlaps in the south. In Kaiping sag, Wenchang Formation develops high quality semi-deep to deep lacustrine source rocks with great hydrocarbon generation potential, and the shallow-water braided delta front deposits of Enping Formation develop a favorable reservoir-cap assemblage. The traps formed under the early tectonic activities are various, including faulted block, faulted anticline and plunging anticline, while the weak tectonic activity in the late period is conducive to oil and gas preservation. The inheritance faults that cut through the source rocks provide vertical migration channels so that oil and gas can be transported through the “source-fault-reservoir” system. The reservoirs in Kaiping11-4 structure have undergone multi-phase continuous charging since 17 Ma, presenting a hydrocarbon accumulation mode with the characteristics of “hydrocarbon supplying from high-quality lacustrine sources, strongly charging through near-source faults, and enriching in multiple stages and levels”. The discovery of medium to large light oil field in Kaiping11-4 structure is not only a breakthrough of the new area exploration in Kaiping sag, but also a breakthrough of the Paleogene crude oil exploration in the eastern deep-water area of the South China Sea. It shows that the deep-water area of Pearl River Mouth Basin has a broad prospect for oil and gas exploration, and is of great significance to the exploration of petroliferous basins in the northern deep-water area of the South China Sea.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Kaiping sag; light oil; lacustrine source; source-fault-reservoir; accumulation mode

引用:高阳东,彭光荣,陈兆明,姜大朋,马宁,李潇,吕华星,高中亮.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.

Cite:GAO Yangdong, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, JIANG Dapeng, MA Ning, LI Xiao, LÜ Huaxing, GAO Zhongliang. Breakthrough and significance of deep-water Paleogene exploration in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1029-1040.

基金项目:中海石油(中国)有限公司“十四五”科技攻关项目“南海深水区中深层规模有效碎屑岩储集体识别及预测技术”(KJGG2022-0102)资助。

第一作者:高阳东,男,1975年10月生,1997年获同济大学海洋地质专业学士学位,现为中海石油(中国)有限公司勘探开发部副总经理、教授级高级工程师,主要从事中国海域油气勘探与开发研究工作。Email:gaoyd@cnooc.com.cn

通信作者:陈兆明,男,1981年10月生,2007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高级工程师,主要从事油气勘探研究工作。Email:chenzhm@cnooc.com.cn

中国近海是全球海上勘探最活跃的地区之一，其中，珠江口盆地的探井数在全球排名第3，是中国重要的石油天然气生产基地和勘探区^[1-2]。珠江口盆地已探明的油气储量以新近系为主(占比为83%)，主要的石油产区位于浅水区珠一坳陷^[3-5]。近年来，随着勘探程度提高，珠江口盆地的勘探难度增大，常规勘探目标规模变小、勘探成效降低^[6-7]，因此勘探对象走向新区、深水、深层成为必由之路。

开平凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷，水深为200~500 m。由于面临地质条件复杂、油质稠密、水深较大等困难条件，开平凹陷在2021年以前并没有取得规模油气发现。“十四五”(2021—2025年)规划以来，中海石油(中国)有限公司在深入总结以往勘探成果、经验和教训的基础上，通过强化对“生、储、盖、圈、运、保”成藏要素的再研究，

明确了凹陷的油气勘探潜力和勘探方向，并一举在开平11-4构造内发现了大—中型轻质油田，打开了开平凹陷沉寂近40年的勘探局面，同时开辟了珠江口盆地向深水区古近系找油的新战场，其勘探认识对于其他具有类似地质特征的凹陷具有一定借鉴意义。

1 区域地质背景

开平凹陷位于南海北部珠江口盆地珠二坳陷西部，东侧以云开低凸起与白云凹陷分隔，北邻神狐暗沙隆起和番禺低隆起，西连顺德凹陷，南接顺鹤隆起带，面积约为5000 km²，现今水深为200~500 m。凹陷总体呈NEE走向，内部发育多个隆起，可将凹陷分隔为西洼、西南洼、主洼、北洼和东洼共计5个次洼(图1)，其中，主洼的面积最大、埋深最深^[8-9]。

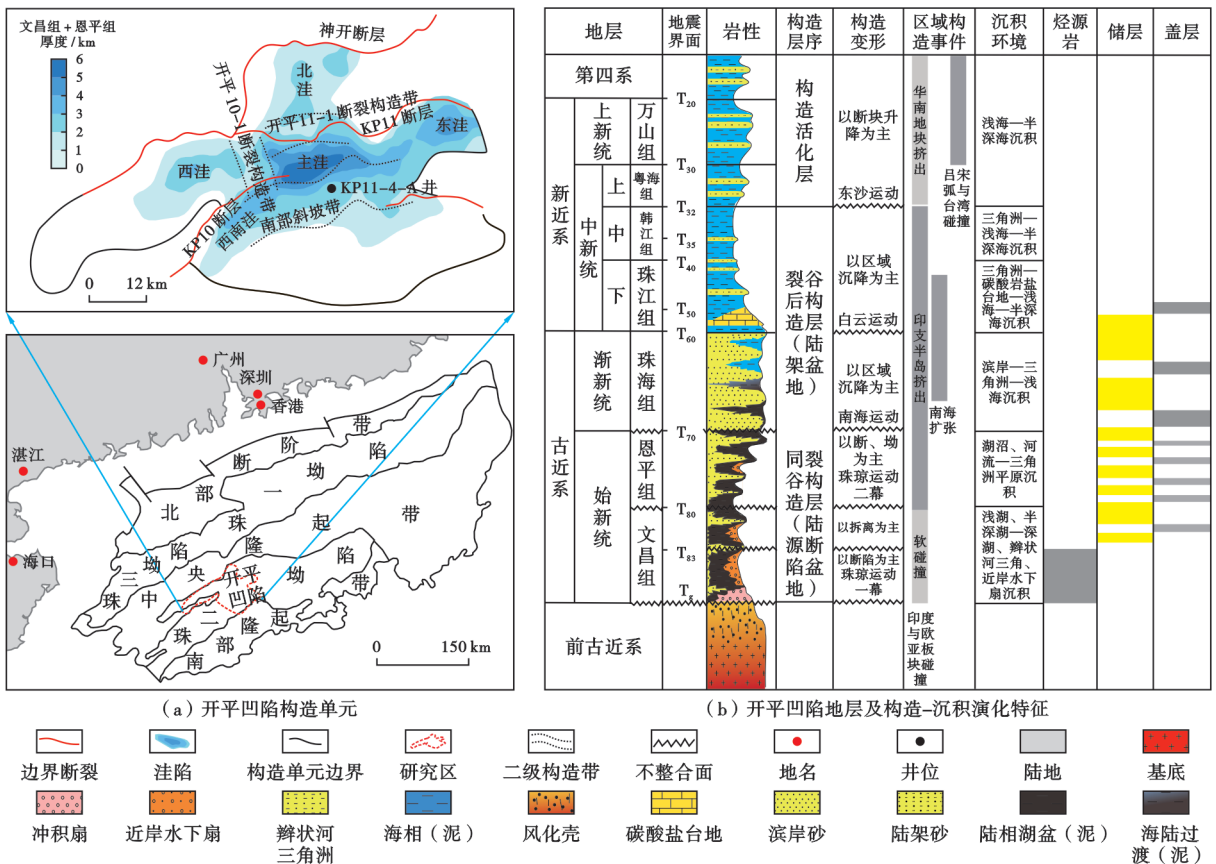


图1 珠江口盆地开平凹陷构造纲要及综合地层演化特征

Fig. 1 Tectonic outline and comprehensive stratigraphic evolution of Kaiping sag in Pearl River Mouth Basin

开平凹陷的基底岩性以前古近纪花岗岩、碎屑熔岩和浅变质岩为主，凹陷自始新世以来经历了裂陷期、坳陷期和块断升降期3个演化阶段。凹陷的形成主要受控于北缘大型伸展拆离断层——神开断层，同时主洼与北洼之间发育核杂岩，其强烈隆升使得拆离断面向上弯曲而呈“勺状”，核杂岩的发育对洼陷结构具有强烈的改造作用^[10-11]。开平凹陷的沉积地层具有

“下陆上海(下部陆相、上部海相)”的特征，依次发育古近系文昌组、恩平组和珠海组，新近系珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系，其中，文昌组和恩平组主要为陆相沉积，珠海组—第四系为海相沉积。

2 勘探历程

开平凹陷的勘探始于20世纪80年代，勘探历程一

波三折,先后经历了对外合作(1979—1995年)、自营初期(2012—2019年)、自营突破(2019至今)3个阶段。

2.1 早期对外合作阶段(1979—1995年)

开平凹陷的初期勘探以对外合作为主,先后完成了1442 km的二维地震普查,测网密度在凹陷主要部位达到1.0 km×1.5 km,在凹陷南部斜坡带为1.5 km×6.0 km,共发现构造20多个。开平凹陷的钻探历史可追溯到1987年,期间国外石油公司对云开低凸起上的白云7-1构造进行了钻探,但仅在新近系珠江组发现3 m厚的气层;1992年,BP石油公司对位于开平凹陷北缘的大型披覆背斜构造(开平9-1构造)进行了钻探,但未见到明显油气显示;1995年,马拉松石油公司(Marathon Oil)对洼陷内部的披覆背斜构造(开平6-1构造)进行了钻探,但钻井仅见少量油气显示,未解释出油气层,宣告钻探失利^[12-13]。3个大型优质构造的钻探失利,让国外石油公司对开平凹陷的生烃潜力失去信心,从而相继退出。开平凹陷的勘探陷入停滞,长期没有钻井工作量。

2.2 自营初期阶段(2012—2019年)

2012年,在开平凹陷钻探区块回归自营后,中海石油(中国)有限公司深圳分公司采集了约1500 km²的三维地震资料。在此基础上,初步构建了层序地层格架,并借鉴珠一坳陷半地堑的勘探经验,形成研究区具有“南断北超洼陷结构、上下文昌组各发育一套烃源层系”的地质认识,并根据烃源岩的倾向,优选开平凹陷北带为有利勘探方向。先后在开平11-1构造和开平10-1构造两个潜山断裂构造带钻探4口井,均见到较丰富的油气显示,其中,KP11-1-A井测试的原油产量达23 t/d,但储量较小,未达商业规模。地球化学分析显示,KP11-1-A井的原油来自中—深湖亚相烃源岩,这证实开平凹陷蕴含较大生烃能力,开平凹陷的勘探初露曙光。

2.3 自营突破阶段(2019年至今)

2019年,中海石油(中国)有限公司深圳分公司南海东部石油研究院成立了开平凹陷攻关小组,并在开平凹陷东部地区采集三维地震资料约800 km²,实现了开平凹陷主体三维地震资料的全覆盖。在此基础上,通过古近系内部层序精细解释、构造解析、沉积体系分析等详细研究,明确了地质认识和勘探方向:①在洼陷结构上,确定了开平凹陷的地质结构具有在核杂岩背景下受低角度拆离断层控制的北断南超特征,且在裂陷期经历了“断陷—拆离—断坳”3幕演化阶段;②在烃源岩方面,通过明晰古近系的层序格架,明确了开平凹陷的烃源岩主要发育在文昌组四段(文四段)和文昌组三段(文三段);③在勘探方向上,明确了开平凹陷主洼的油气运移受烃源岩倾向控制,具有南、北双向

运移的特点,并指出开平凹陷南部斜坡带为有利勘探方向。通过认识的转变,以“源-断-储”三元耦合控藏、“近源勘探”为指导,优选开平11-4构造上钻,在古近系恩平组、文昌组获得了厚度达上百米的轻质油层发现,实现了开平凹陷的勘探突破。

3 开平11-4构造大—中型古近系轻质油油田的勘探发现

3.1 钻井油气发现

开平11-4构造位于开平凹陷主洼的南部斜坡带上,紧邻油源断裂,处于有利的油气运移路径上。该构造包括多个块体,总体水深为340~360 m,首口探井KP11-4-A并于2021年7月完钻,为A块的初探井,完钻井深为4288 m。KP11-4-A井在恩平组砂体中见油气显示,共计459 m/68层,测井解释油层164.3 m/33层,其中,恩平组二段(恩二段)的油层净厚为20.2 m/7层,恩平组三段(恩三段)、恩平组四段(恩四段)的油层净厚为144.1 m/26层,主力油层钻杆测试(DST)2层,均获得高产油流,平均产油量超过130 t/d。KP11-4-A井为开平凹陷新区勘探首次取得的重大突破,揭示开平凹陷主洼富烃和开平11-4构造具有勘探潜力。随后,该构造又先后钻探多口探井及评价井,其中,B块上的KP11-4-B井在恩三段、恩四段和文昌组钻遇油气显示572 m/78层、油层净厚为118.4 m/40层,C块上的KP11-4-C井在文昌组钻遇油气显示350 m/51层、油层净厚为25.2 m/13层。钻井结果表明,开平11-4构造的古近系恩平组、文昌组油藏具有连续、厚层、高充满度的特点(图2),储量规模超3000×10⁴ t。这不仅揭示开平凹陷主洼南部斜坡带的勘探潜力巨大,也代表着珠江口盆地在深水区古近系勘探中取得了重大突破。

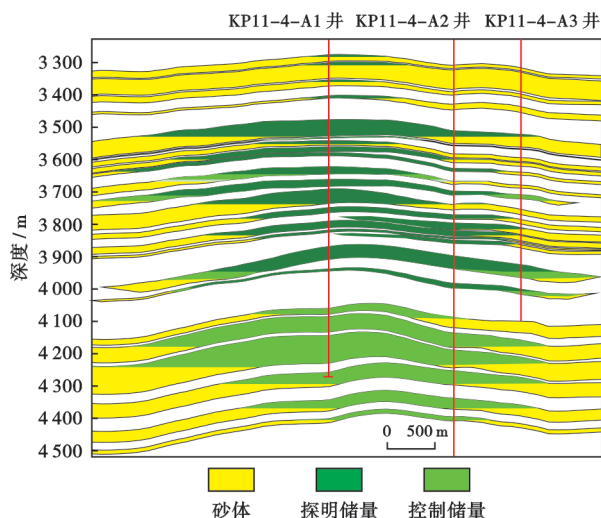


图2 开平11-4A井区油藏剖面

Fig. 2 Reservoir profile of Kaiping11-4A well area

3.2 油藏基本特征

开平 11-4 构造的主力油藏位于古近系恩平组,其在纵向上可划分出 23 个油层,以边水油藏为主,各油层在不同井区具有独立油水系统。A 块井区发育岩性-构造油藏,B 块井区发育构造油藏。油藏整体上为常温常压系统,压力系数为 1.009~1.014,地温梯度为 3.79 °C/hm;油藏埋藏较深,主力油层恩平组的埋深在 3 276.0~4 214.6 m;地面原油密度在 0.803~0.899 t/m³,凝固点为 14~38 °C,含蜡量为 15.8%~33.6%,含硫量为 0.03%~0.24%,属于低含硫、高含蜡、以轻质油为主的常规油。

4 油气成藏条件

4.1 文昌组发育优质半深湖—深湖亚相烃源岩

优质烃源岩的发育是形成大—中型油气田的物质基础。研究表明,古湖泊的生产力及保存条件、沉积环境、有机质类型、控凹断层的活动速率等多种因素控制了湖相优质烃源岩的发育^[14-17]。基于构造控烃、沉积演化和地震资料反射特征,结合区域已钻井的情

况分析认为,开平凹陷文四段、文三段发育半深湖—深湖亚相沉积,其中,文四段为主力烃源岩层系,主要分布在开平凹陷主洼、西洼和东洼,最大厚度达 2 260 m,总面积为 1 151 km²,而文三段为次要烃源岩层系,主要分布在开平凹陷的主洼和东洼(图 3)。KP11-4-G 井的地球化学录井资料及样品的岩石热解分析表明:文三段泥岩为中等—好级别烃源岩,文四段泥岩为中等—很好级别烃源岩,干酪根类型以 II₁—II₂ 型为主;文昌组一段(文一段)和文昌组五段(文五段)烃源岩的有机质丰度整体为中等级别,干酪根类型以 II₁—II₂ 型为主。KP11-4-G 井文三段—文四段烃源岩的有机质丰度整体上高于北部地区已钻井中文三段、文四段烃源岩(图 4)。

前人的研究表明,来源于沟鞭藻类的 C₃₀ 4-甲基甾烷和指示陆源高等植物输入的双杜松烷化合物是珠江—坳陷内区分文昌组、恩平组不同相带烃源岩的典型生物标志化合物^[6,18-19]。开平凹陷已钻井泥岩的生物标志化合物分析表明,文三段、文四段发育一套半深湖—深湖亚相烃源岩,其 C₃₀ 4-甲基甾烷丰度较高、长

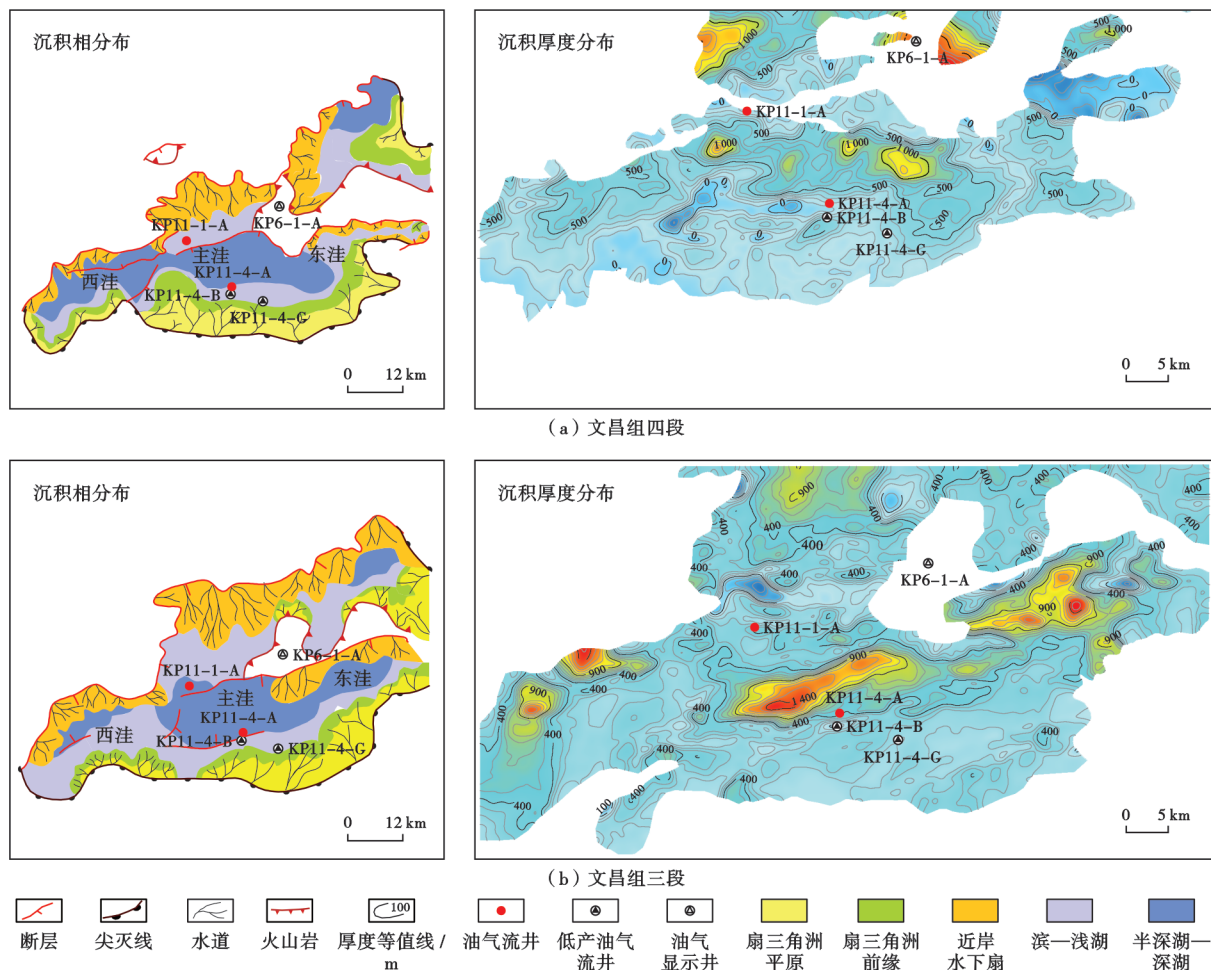
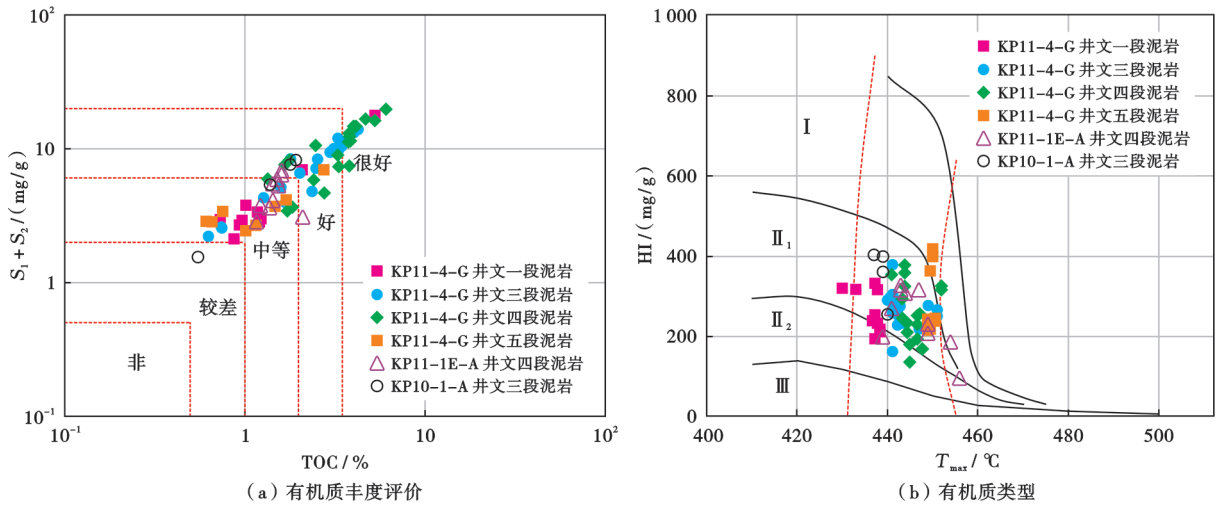


图 3 开平凹陷文昌组四段、三段沉积相及沉积厚度

Fig. 3 Sedimentary facies and thickness of the Member 4 and 3 of Wenchang Formation in Kaiping sag



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

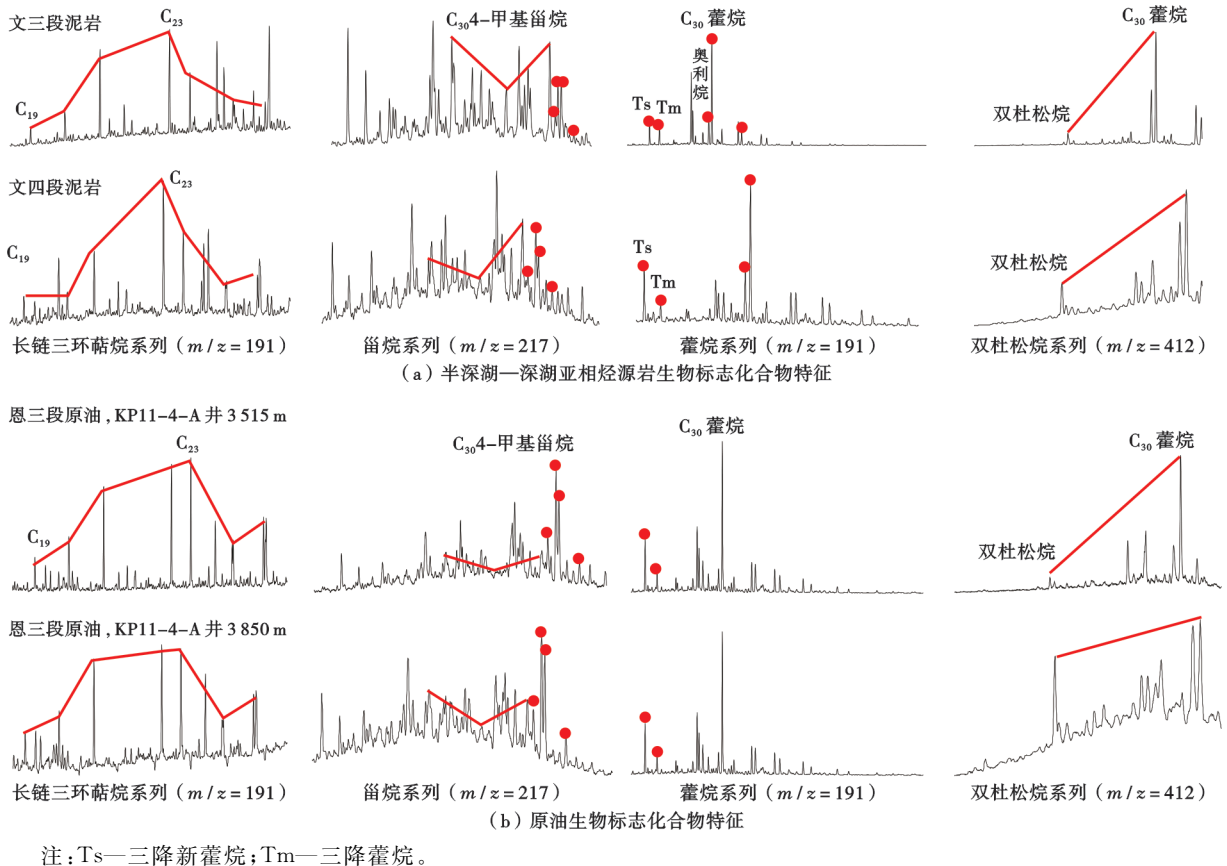
图 4 开平凹陷文昌组烃源岩的地球化学指标分析

Fig. 4 Analyses of geochemical indexes of Wenchang Formation source rocks in Kaiping sag

链三环萜烷系列以 C_{23} 为主峰、双杜松烷化合物丰度较低, 指示输入的母源有机质以水生生物为主[图 5(a)]。目前, 由于这些钻井均位于洼陷边缘, 其所揭示的文三段和文四段泥岩在开平凹陷内的代表性较为有限, 因此, 这些泥岩样品的分析结果并不能全面反映开平凹陷相应层位烃源岩的总体特征, 预测在洼陷中心可能

发育更优质的烃源岩。

开平凹陷已发现原油的生物标志化合物特征较一致。在开平 11-4 构造上, 原油的生物标志化合物中 C_{30} 4-甲基甾烷丰度高 [图 5(b)], 分析认为这类原油主要来自于开平凹陷主洼内文昌组的半深湖—深湖亚相烃源岩。 C_{30} 4-甲基甾烷的生源主要为藻类, 其丰度



注: Ts—三降新藿烷; Tm—三降藿烷。

图 5 开平凹陷烃源岩和原油的生物标志化合物特征

Fig. 5 Biomarker characteristics of source rocks and crude oils in Kaiping sag

与藻类含量和优质烃源岩存在明显的正相关性。开平凹陷原油中高丰度的 C_{30} 4-甲基甾烷可进一步证实凹陷内发育高生产力的湖相优质烃源岩。

在开平凹陷主洼,文昌组主力烃源岩现今整体处于成熟—高成熟阶段,洼陷中心处于高成熟阶段(其等效镜质体反射率 $R_o > 1.3\%$)。根据成因法计算,开平凹陷主洼的油气总地质资源量约为 $5 \times 10^8 t$ 。优质的烃源岩条件是形成开平 11-4 构造发育大油田的物质基础。

4.2 恩平组发育浅水辫状河三角洲前缘优质储-盖组合

开平凹陷古近纪的沉积环境经历了文昌组沉积早期的高角度断陷湖盆、文昌组沉积晚期受拆离断层控制的宽缓湖盆以及恩平组沉积期的广阔浅水湖盆 3 个

演化阶段^[8,10-11]。恩平组沉积期的湖水广阔且水浅,是大型浅水碎屑岩体系广泛发育的有利时期。该时期,随着凹陷的持续沉降和断裂的持续活动,来自开平凹陷北部神狐暗沙隆起、东南部云开低凸起和西南部顺鹤隆起的碎屑物质沿断陷槽和凹槽持续向开平凹陷的主洼输入,形成了“强供源、远搬运、广分布”的大型浅水辫状河三角洲沉积体系[图 6(a)]。南、北两大物源体系在开平凹陷的洼陷中心交汇,其中,开平 11-4 构造区主要接受来自西南部顺鹤隆起的物源,辫状河三角洲前缘水下分流河道和河口坝砂体与分流间湾泥岩构成了恩平组良好的储-盖组合[图 6(b)、图 6(c)]。钻井揭示,研究区恩三段+恩四段的厚度一般在 527~1085 m,以砂、泥互层为主,含砂率适中,为 48%~59%;

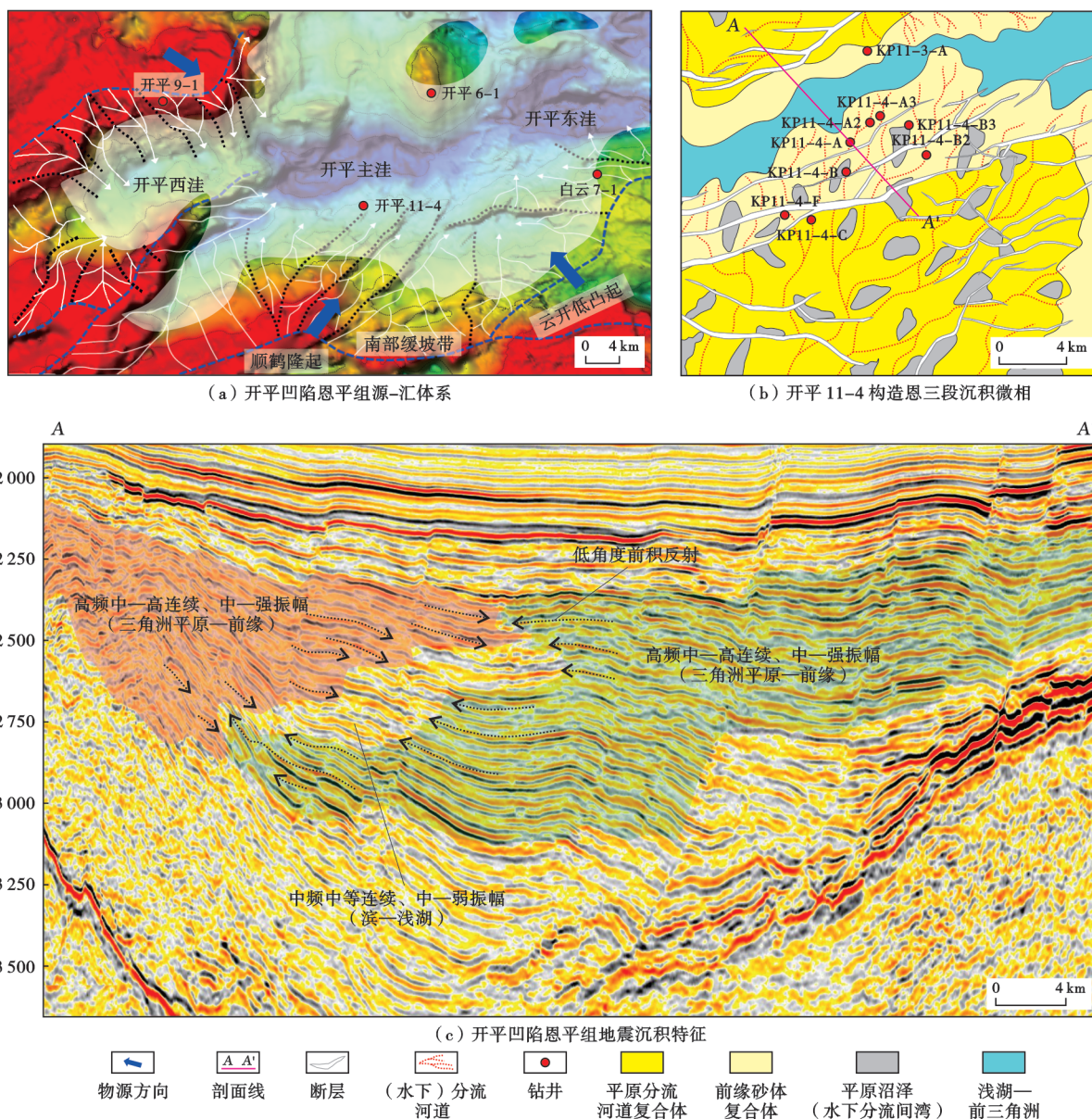


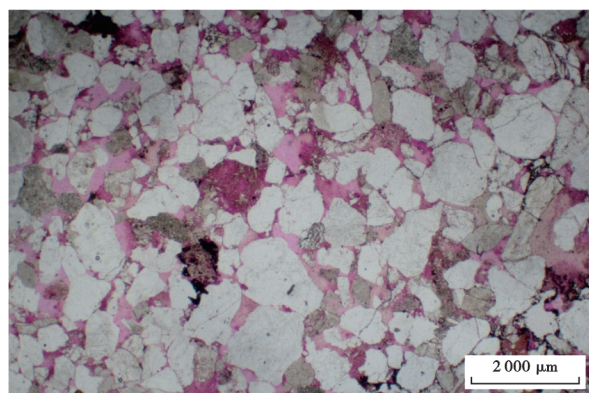
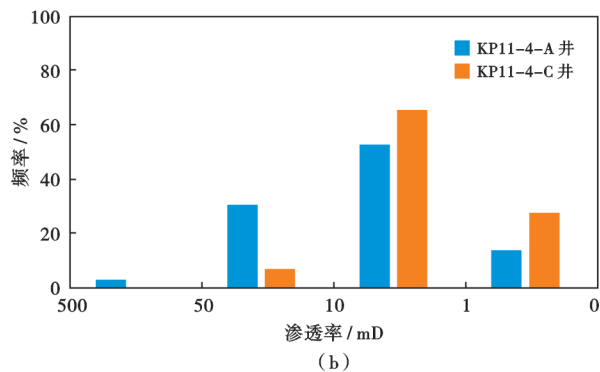
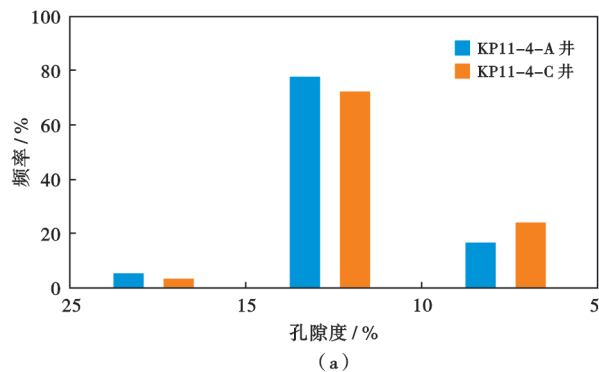
图 6 开平凹陷恩平组的源-汇体系及沉积相

Fig. 6 Source-sink system and sedimentary facies of Enping Formation in Kaiping sag

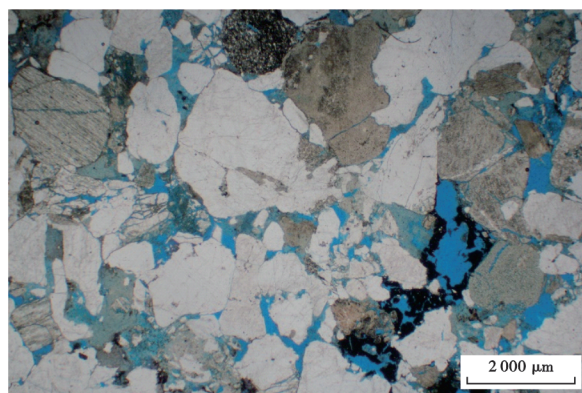
砂层较为发育,储集层厚度为 255~325 m,单砂层的厚度一般在 2~18 m,最大单层厚度达 31 m。恩三段、恩四段发育多套泥岩盖层,泥岩厚度一般为 2~22 m,泥岩最大单层厚度可达 25 m。

笔者对开平凹陷多口井进行了常规岩心实验分析和显微结构观察,结果表明:恩三段储层由极粗粒—粗粒长石岩屑砂岩和岩屑砂岩组成,岩石颗粒之间主要

为线接触、凹凸接触—线接触,磨圆度为次棱角状—次圆状;储集空间以原生粒间孔为主,混有粒内溶孔、晶间孔、粒间溶孔等次生孔隙;孔隙度为 7.7%~16.8%,平均为 11.8%;渗透率为 0.1~51.3 mD,平均为 7.5 mD;整体属于低孔、特低渗储层(图 7)。恩三段储层在局部地区物性较差,这是由于储层中含有含量较高的粒度较细或凝灰质等填隙物。



(c) 辫状河三角洲前缘水下分流河道极粗粒—粗粒砂岩,填隙物含量为 8.5%,渗透率为 51.3 mD,孔隙度为 16.8%,恩平组三段, KP11-4-A 井 3 525.5 m,红色为铸体,单偏光



(d) 辫状河三角洲前缘水下分流河道砂砾岩,填隙物含量为 9%,可见早期油气充注,渗透率为 16.6 mD,孔隙度为 13.9%,恩平组三段, KP11-4-A 井 3 716.0 m,蓝色为铸体,单偏光

图 7 开平 11-4 构造恩平组三段的储层物性

Fig. 7 Reservoir physical properties of the Member 3 of Enping Formation in Kaiping11-4 structure

总体来看,尽管开平凹陷恩三段埋藏较深,但在其大型辫状河三角洲沉积内仍可发育一定规模的优质储层,且具有粗粒砂岩原生粒间孔发育、储集物性较好的特点,即“优相控优储”的特征十分明显。此外,在开平 11-4 构造的油藏中可见早期油气充注现象,对原生孔隙有保护作用[图 7(d)],有利于优质储层发育。

4.3 有利的圈闭及保存条件

开平凹陷在裂陷期构造活动强烈,总体以发育张性、张扭性伸展构造为主,发育 NE 向、NEE 向和近 EW 向多组断裂。在开平凹陷北部,开平 10 构造带和开平 11 构造带因受核杂岩强烈隆升影响,构造活动尤其强烈,发育多个花状断裂带,断裂的切割造成圈闭较破碎。进入坳陷期,开平凹陷的构造运动逐渐减弱,断层活动逐渐停止。新近纪以来,开平凹陷的构造活动

总体较平静,仅发育 NW 向张扭性断层。多期的断裂活动使得开平凹陷内构造圈闭非常发育,圈闭类型以断块、断背斜和断鼻为主。

开平 11-4 构造主要位于开平凹陷主洼的南部斜坡带上,其中,南带比北带的构造活动弱,因此南带的圈闭形态较完整且总体规模较大。在开平 11-4 构造的 A 块,断层下降盘发育断背斜圈闭,圈闭面积约为 6 km²;在 B 块和 C 块,断层上升盘发育翘倾断鼻、断块圈闭(图 8)。各块体内圈闭的继承性优,从文昌组到恩平组,圈闭的叠合性非常好,有利于油气连续充注。

开平 11-4 构造总体的油气保存条件较好。其主要原因在于:①开平凹陷晚期构造活动较弱,大部分控圈断层都终止于地震波反射界面 T₀(珠海组顶界面)之下;②断背斜和因断层反向遮挡而形成的断层圈闭

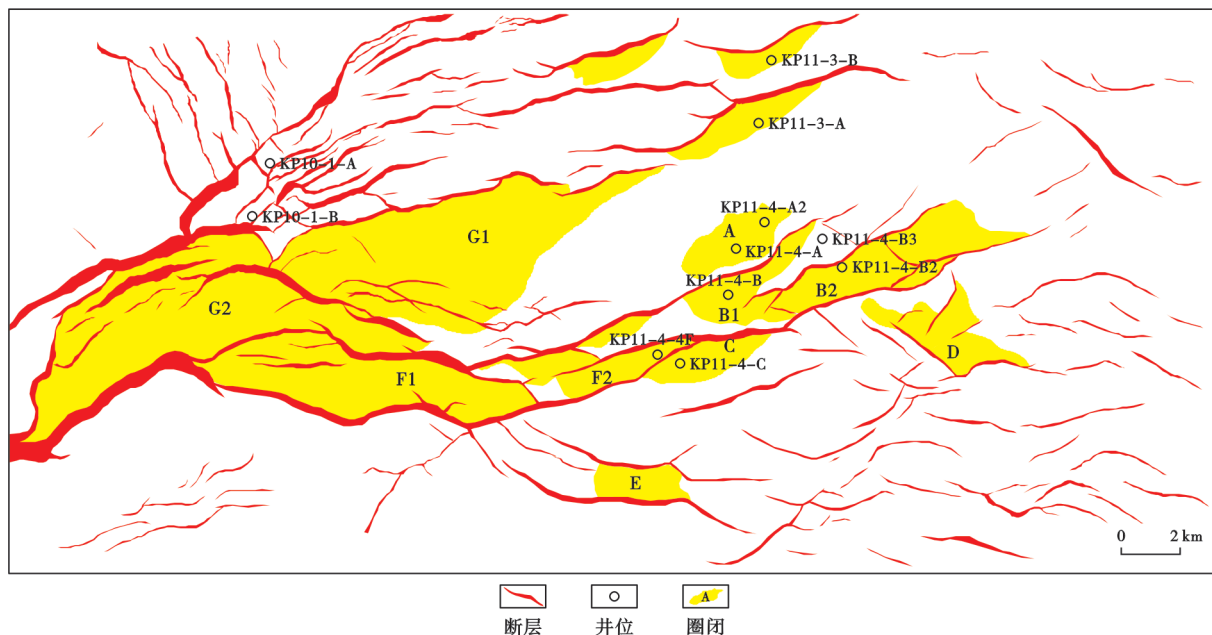


图8 开平 11-4 构造的断裂及圈闭分布

Fig. 8 Distribution of faults and traps in Kaiping11-4 structure

是有利于油气保存的圈闭类型；③研究区的目的层段主要发育辫状河三角洲前缘沉积，含砂率适中，有利于形成断层涂抹封闭。油层的钻遇结果显示，主力油层的油柱高度约为 60 m，最高可达 100 m，这表明开平 11-4 构造的油气富集程度较高。

5 油气运移及成藏模式

5.1 油气输导体系特征

开平凹陷内断裂十分发育。钻井的油气分布特征揭示断裂是油气垂向输导的主要通道。基于断裂控藏特征，根据断裂切割烃源的情况、源-断接触关系、断裂活动强度、晚期构造活动性可将断裂分为 4 类，即一级、二级、三级油源断裂和调节断裂(图 9)。一级油源断裂为顺向通源且晚期活动的断裂，其垂向输导性最优；二级油源断裂为顺向通源但晚期不活动的断裂，其具有一定输导性；三级油源断裂为反向通源断裂，其垂向输导性较弱；调节断裂为不沟通烃源，但晚期活动性较强的断裂，其在油气运移过程中主要起到再调节作用。

开平 11-4 构造发育 3 条一级油源断裂，其走向为 NEE 向，剖面形态以铲式为主(图 10)，在平面上呈平行展布(图 9)。一级油源断裂的活动强度较大、活动时间长，为油气的垂向输导提供了通道。断裂与文昌组烃源岩顺向接触，汇油面积大，油气通过烃源岩、断层、砂体向恩平组圈闭中充注，从而在开平 11-4 构造

内形成连续油层(图 10)。

5.2 油气的多期多幕充注过程

流体包裹体相对定年法在油气成藏期的分析中已有广泛应用，其分析精度主要取决于流体包裹体均一化温度的可靠性以及埋藏史和热演化史的准确性^[20-22]。基于储层中流体包裹体均一温度分析，结合单井埋藏史和热演化史的模拟结果，笔者对开平 11-4 构造的油气充注期次和充注时间进行了分析。结果表明，开平 11-4 构造内的油藏共存在 3 期原油充注(图 11)，分别为：17~13 Ma、13~5 Ma、5 Ma 至现今，其中 13~5 Ma 为原油的主要充注期。在开平凹陷主洼内，由半深湖—深湖亚相烃源岩生成的成熟原油(其 R_o 约为 0.8%~1.1%)从 17 Ma 至今持续充注，充注层位主要集中在恩平组—文昌组。

5.3 油气成藏模式

开平 11-4 构造的油藏具有“湖相优质烃源供烃、近源断层强输导、多期多层成藏”的成藏模式(图 12)。开平凹陷主洼内文昌组的半深湖—深湖亚相烃源岩为开平 11-4 构造提供了充足的油气来源，恩平组的辫状河三角洲前缘沉积内发育优质储-盖组合，多地层叠合形成的自遮挡圈闭以及反向断层圈闭是优质的油气聚集空间，长期继承性活动的通源断层是油气垂向运移的主要通道，最终，17 Ma 以来的 3 期油气充注在开平 11-4 构造形成了连续多层油气藏。

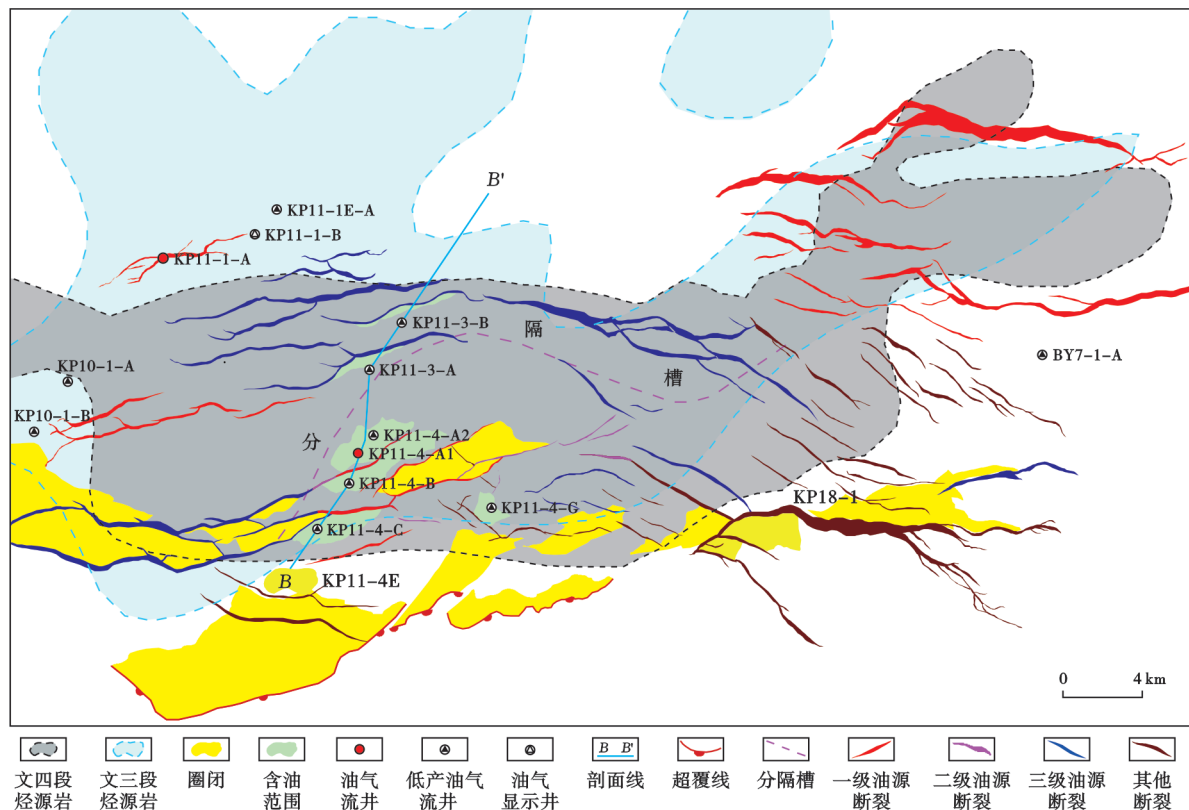
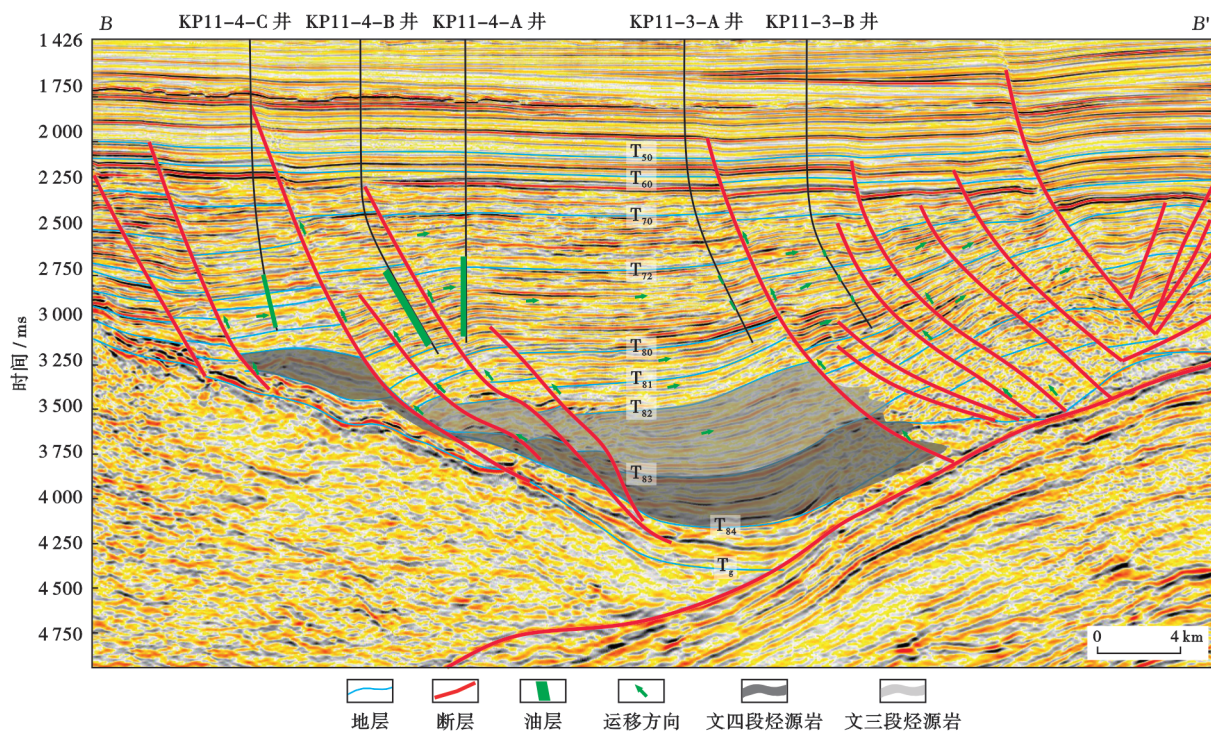


图 9 开平凹陷油源断裂与烃源岩分布

Fig. 9 Distribution of faults and source rocks in Kaiping area



注: T_{50} —下珠江组顶界面; T_{60} —珠海组顶界面; T_{70} —恩平组顶界面; T_{72} —恩平三段顶界面; T_{80} —文昌组顶界面; T_{81} —文二段顶界面; T_{82} —文三段顶界面; T_{83} —文四段顶界面; T_{84} —文五段顶界面; T_R —基底顶界面。

图 10 开平 11-4 构造源-断-储输导体系(剖面位置见图 9)

Fig. 10 Transport system of source-fault-reservoir in Kaiping11-4 structure

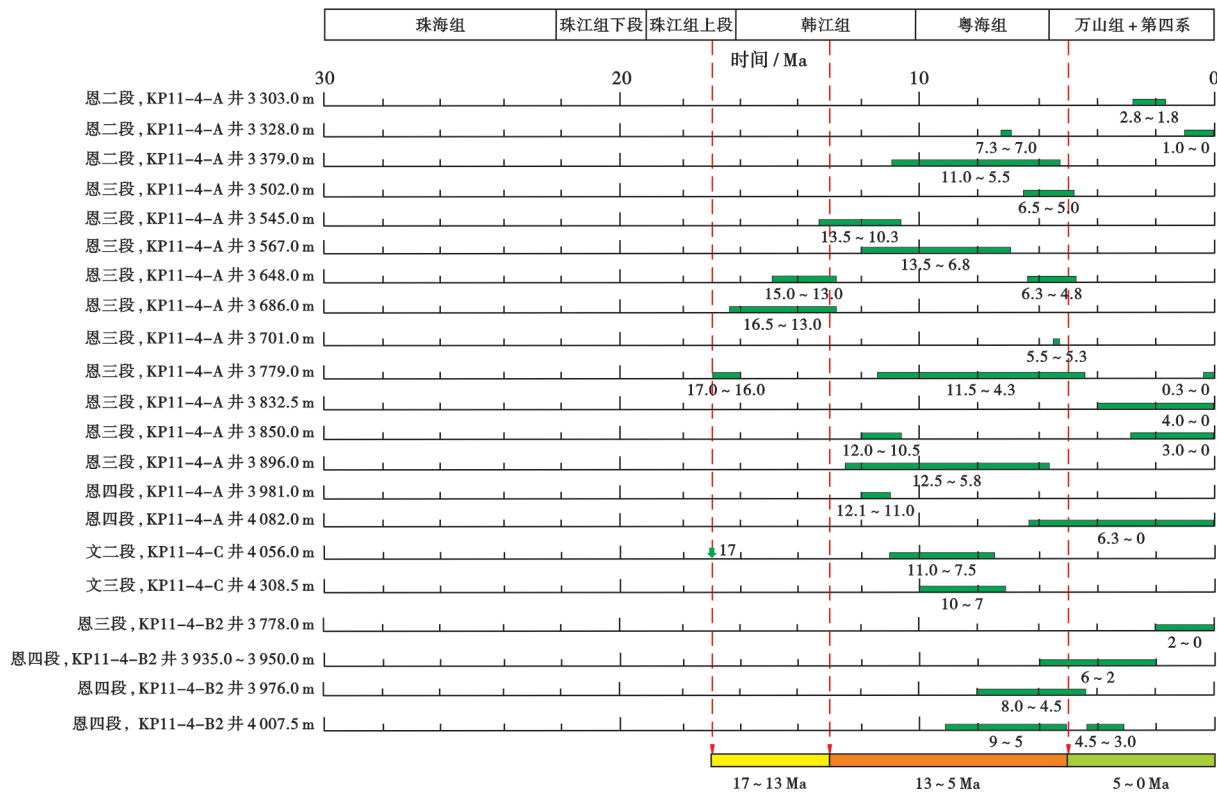
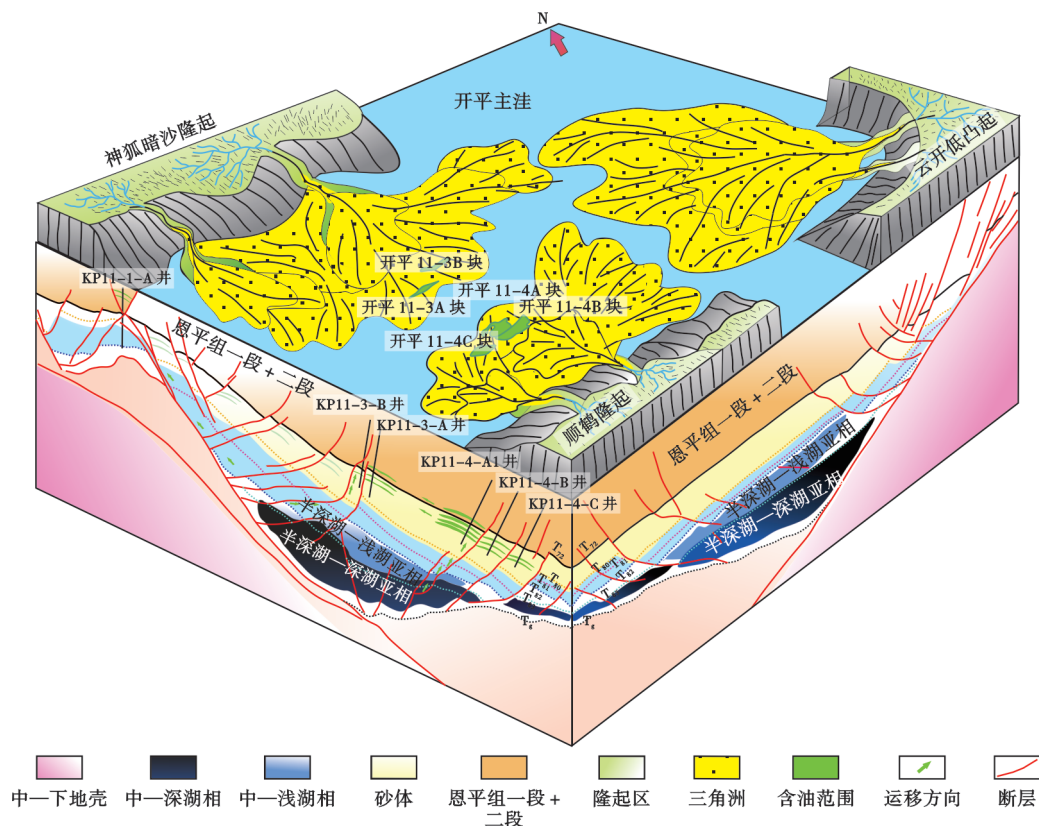


图 11 开平 11-4 构造油藏的原油充注期

Fig. 11 Crude oil charging periods of reservoirs in Kaiping11-4 structure



注: T_{72} —恩三段顶界面; T_{80} —文昌组顶界面; T_{81} —文二段顶界面; T_{82} —文三段顶界面; T_{83} —文四段顶界面; T_{84} —文五段顶界面; T_g —基底顶界面。

图 12 开平 11-4 构造油气成藏模式

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation mode of Kaiping11-4 structure

6 勘探启示及意义

开平 11-4 构造内大一中型轻质油油田的发现实现了开平凹陷新区勘探的突破,这同时也是南海东部海域深水区古近系原油勘探的突破,打破了国外石油公司关于开平凹陷生烃条件的怀疑论,拓展了新区新领域,展示出珠江口盆地深水区的勘探前景广阔。

南海东部海域的原油勘探主要集中在珠江口盆地珠一坳陷浅水区^[23-25],开平凹陷的勘探突破开辟了了在深水区古近系找油的新领域。目前,开平凹陷仍处于勘探初期,凹陷内及周缘尚有多大型构造圈闭没有钻探,油气总地质资源量超过 6×10^8 t,未来勘探潜力巨大。开平凹陷的地质认识和勘探经验有望为深水区具有相似洼陷结构的顺德凹陷、荔湾凹陷等提供借鉴。

珠江口盆地内洼陷众多^[26],目前还有很多洼陷没有取得突破。已证实的富烃洼陷有 8 个、潜在的富烃洼陷有 7 个、新投入工作的洼陷有 48 个,预测油气总地质资源量约为 39.26×10^8 t,新区、新洼的勘探潜力非常大。近 10 年,珠江口盆地(东部)勘探新区以 31% 的钻井数获得了区内 54% 的油气储量发现,为中海石油(中国)有限公司深圳分公司贡献了 70% 的可动用储量^[18]。新区勘探已然成为珠江口盆地(东部)油气勘探的重点领域,开平凹陷的勘探突破更加坚定了油公司向新区进军信心。

7 结论

(1) 开平 11-4 构造内大一中型轻质油油田的发现一方面实现了开平凹陷新区勘探的突破,另一方面也展示出南海北部深水区油气勘探潜力巨大,拓展了油气勘探领域。

(2) 开平 11-4 构造内规模储量的发现证实了拆离型凹陷在断陷期发育半深湖—深湖亚相烃源岩,在断坳期发育辫状河三角洲沉积的有利储-盖组合,加之有继承性活动断裂沟通烃源与储层,为油气运移提供通道,形成了“源-断-储”输导体系。

(3) 开平 11-4 构造内油气的成藏模式具有“湖相优质烃源供烃、近源断层强输导、多期多层成藏”的特点,这一模式的勘探突破可为深水含油气盆地勘探提供借鉴。

参 考 文 献

[1] 谢玉洪. 中国海油近海油气勘探实践与思考[J]. 中国海上油气, 2020,32(2):1-13.
XIE Yuhong. Practices and thoughts of CNOOC offshore oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020,32(2):1-13.

[2] 徐长贵,范彩伟. 南海西部近海大中型油气田勘探新进展与思考

[J]. 中国海上油气, 2021,33(2):13-25.

XU Changgui, FAN Caiwei. New exploration progress and thinking of offshore large-medium-sized oil and gas fields in the western South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021,33(2):13-25.

- [3] 柳广弟,牛子斌,陈哲龙,等. 珠江口盆地陆丰凹陷在洼陷迁移控制下的油气成藏规律[J]. 石油学报, 2019,40(增刊1):26-40.
LIU Guangdi, NIU Zicheng, CHEN Zhelong, et al. Hydrocarbon accumulation patterns controlled by the migrated subsags in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(S1):26-40.
- [4] 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(增刊1):53-68.
ZHU Ming, ZHANG Xiangtao, HUANG Yuping, et al. Source rock characteristics and resource potential in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(S1):53-68.
- [5] 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(增刊2):120-133.
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(S2):120-133.
- [6] 田立新,张向涛,彭光荣,等. 珠江口盆地阳江凹陷石油地质特征及成藏主控因素[J]. 中国海上油气, 2020,32(1):13-22.
TIAN Lixin, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Petroleum geological characteristics and main controlling factors of the Yangjiang sag in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020,32(1):13-22.
- [7] 高阳东,张向涛,彭光荣,等. 珠江口盆地成盆-成烃-成藏:代序[J]. 大地构造与成矿学, 2021,45(1):1-5.
GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Basin formation, hydrocarbon maturation and oil accumulation of the Pearl River Mouth Basin: preface[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021,45(1):1-5.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] YE Qing, MEI Lianfu, JIANG Dapeng, et al. 3-D structure and development of a metamorphic core complex in the northern South China Sea rifted margin[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022,127(2):e2021JB022595.
- [11] 聂国权,何登发,李小盼,等. 珠江口盆地开平凹陷构造沉降史及其主控因素[J]. 海相油气地质, 2021,26(3):253-262.
NIE Guoquan, HE Dengfa, LI Xiaopan, et al. Tectonic subsidence and its main controlling factors of Kaiping sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021,26(3):

- 253-262.
- [12] 戴一丁, 庞雄, 李平鲁. 珠江口盆地开平凹陷油气聚集条件分析[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(1): 12-18.
DAI Yiding, PANG Xiong, LI Pinglu. Study on hydrocarbon accumulation in Kaiping sag of Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1998, 12(1): 12-18.
- [13] 庞雄, 陈隽, 戴一丁, 等. 珠江口盆地白云西-开平凹陷油气聚集及勘探目标研究[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(4): 237-245.
PANG Xiong, CHEN Jun, DAI Yiding, et al. Study on hydrocarbon accumulation and exploration targets in west Baiyun-Kaiping sag of Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(4): 237-245.
- [14] 张林晔. 湖相烃源岩研究进展[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 591-595.
ZHANG Linye. The progress on the study of lacustrine source rocks[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30(6): 591-595.
- [15] 姜雪, 刘丽芳, 孙和风, 等. 气候与构造控制下湖相优质烃源岩的差异分布——以渤中凹陷为例[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 165-175.
JIANG Xue, LIU Lifang, SUN Hefeng, et al. Differential distribution of high-quality lacustrine source rocks controlled by climate and tectonics: a case study from Bozhong sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 165-175.
- [16] 李友川. 中国近海湖相优质烃源岩形成的主要控制因素[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 1-9.
LI Youchuan. Main controlling factors for the development of high quality lacustrine hydrocarbon source rocks in offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 1-9.
- [17] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 19-23.
JIN Qiang, ZHU Guangyou, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(4): 19-23.
- [18] 彭光荣, 朱定伟, 吴静, 等. 珠江口盆地阳江凹陷油气重大发现与成藏启示[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 179-187.
PENG Guangrong, ZHU Dingwei, WU Jing, et al. Discoveries of hydrocarbon accumulation in the Yangjiang sag of the Pearl River Mouth Basin and implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 179-187.
- [19] 张向涛, 朱俊章, 熊万林, 等. 番禺 4 洼文昌组烃源岩生物标志化合物特征与油源判识[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 12-23.
ZHANG Xiangtao, ZHU Junzhang, XIONG Wanlin, et al. Biomarker characteristics and oil-source discrimination of source rocks in Wenchang Formation of Panyu 4 sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 12-23.
- [20] 张芷晴, 刘华, 马立驰, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷潜山油气藏成藏期次和过程——来自储层流体包裹体的证据[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 129-138.
ZHANG Zhiqing, LIU Hua, MA Lichi, et al. Characteristics of reservoir fluid inclusions and hydrocarbon charging process in the Dawangzhuang buried hill zone of Jiyang depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(1): 129-138.
- [21] 王飞宇, 冯伟平, 关晶, 等. 含油气盆地流体包裹体分析的关键问题和意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(3): 441-450.
WANG Feiyu, FENG Weiping, GUAN Jing, et al. Key questions of the fluid inclusion analysis in petroliferous basins and their significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(3): 441-450.
- [22] 刘可禹, BOURDET J, 张宝收, 等. 应用流体包裹体研究油气成藏——以塔中奥陶系储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 171-180.
LIU Keyu, BOURDET J, ZHANG Baoshou, et al. Hydrocarbon charge history of the Tazhong Ordovician reservoirs, Tarim Basin as revealed from an integrated fluid inclusion study[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 171-180.
- [23] 张丽丽, 舒誉, 蔡国富, 等. 珠江口盆地东部始新世—渐新世沉积环境演变及对烃源条件的影响[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊 1): 153-165.
ZHANG Lili, SHU Yu, CAI Guofu, et al. Eocene-Oligocene sedimentary environment evolution and its impact on hydrocarbon source conditions in eastern Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 153-165.
- [24] 张向涛, 李小平, 玄昌姬, 等. 南海东部浅水区非烃源岩层系岩性油藏勘探实践与方向[J]. 石油学报, 2021, 42(6): 695-707.
ZHANG Xiangtao, LI Xiaoping, XUAN Changji, et al. Exploration practice and direction of lithologic reservoirs in non-source rock strata in shallow water areas of the eastern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(6): 695-707.
- [25] 米立军, 张向涛, 庞雄, 等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊 1): 1-10.
MI Lijun, ZHANG Xiangtao, PANG Xiong, et al. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 1-10.
- [26] 张向涛, 李军, 向绪洪, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷超压成因机制及其勘探意义[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 41-57.
ZHANG Xiangtao, LI Jun, XIANG Xuhong, et al. Genetic mechanism of overpressure and its significance on petroleum exploration in Baiyun sag in the deep water zone of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 41-57.

(收稿日期 2023-03-08 改回日期 2023-04-28 编辑 雷永良)