https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.090



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

彭光荣1,张丽丽1,许新明1*,邱欣卫1,何金海1,刘昭茜2

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司,深圳 518000

2. 中国地质大学构造与油气教育部重点实验室,湖北武汉 430074

摘 要:位于珠一坳陷西江凹陷北部的西江主挂具有古地温梯度低、恩平组泥岩厚度大、岩浆作用多等特殊地质特征,导致其 主力烃源岩潜力、原油类型和来源、油气聚集规律和成藏主控因素等复杂性.基于烃源岩有机地球化学特征和分布、原油分类、 来源及分布规律、原油聚集与岩浆和断裂关系等分析,开展烃源岩分布及潜力、原油成藏规律及主控因素研究.明确了西江主 洼发育文昌组下段的文4段和文昌组上段的文3段两种属性差异的中深湖相烃源岩,且改造作用强、供烃能力有差异.成藏原 油可分为两种类型,其来源和空间分布存在差异,类型1原油来自于文4段烃源岩,裂陷层和拗陷层均有成藏,横向运移距离 远.类型2原油来自于文3段烃源岩,裂陷层成藏,近洼聚集.成藏主控因素为烃源岩和断裂,文昌组烃源岩属性差异、体量控 制了原油类型、成藏级别和运移距离.NE向断层因延走向的分段、分时活动速率变化控制烃源岩发育和展布;NWW-近EW向 断裂控制文3段烃源岩,且为近洼处裂陷层成藏断层,为远洼处西江中低凸起拗陷层成藏断层.成藏模式可总结为:烃源控聚、 断裂控层、岩浆控富.

关键词: 烃源岩; 原油分类及来源; 成藏主控因素; 西江主洼; 珠江口盆地; 石油地质. 中图分类号: P618 文章编号: 1000-2383(2023)06-2361-15 收稿日期: 2023-02-24

Source Rock Attribute, Oil Classification and Hydrocarbon Accumulation Main Control Factors of Xijiang Main Sag in Pearl River Mouth Basin

Peng Guangrong¹, Zhang Lili¹, Xu Xinming^{1*}, Qiu Xinwei¹, He Jinhai¹, Liu Zhaoqian²

Abstract: Xijiang main sag located in the north of Xijiang sag in Zhu I depression is characterized by relatively lower paleogeothermal gradient, thick mudstones in Enping Formation and more magmatism, which resulted in complexity of source rock potential, oil types and oil source, hydrocarbon accumulation and main control factors. Based on the analysis of the organic geochemical characteristics and distributions of the source rocks, oil classification, oil source and oil distribution, the relationships between oil accumulation, magmatism and faults, distribution and potential of the source rocks, the rule of oil accumulation and

^{1.} Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen 518000, China

^{2.} Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

基金项目:中海油深圳分公司重大生产科研项目(No.SCKY-2020-SZ-21).

作者简介:彭光荣(1978-),男,高级工程师,从事油气地质研究.ORCID:0000-0003-2014-4653.E-mail:penggr@cnooc.com.cn

^{*}通讯作者:许新明,男,高级工程师,从事油气成藏研究.E-mail:xuxm3@cnooc.com.cn

引用格式:彭光荣,张丽丽,许新明,邱欣卫,何金海,刘昭茜,2023.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.地球科学, 48(6):2361-2375.

Citation: Peng Guangrong, Zhang Lili, Xu Xinming, Qiu Xinwei, He Jinhai, Liu Zhaoqian, 2023. Source Rock Attribute, Oil Classification and Hydrocarbon Accumulation Main Control Factors of Xijiang Main Sag in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 48(6):2361–2375.

the main controlling factors could be identified. There are two types of middle-deep lacustrine source rocks with different attributes: the Wenchang IV Formation and the Wenchang III Formation in the Xijiang main sag, which have been strongly transformed and have different hydrocarbon supply capabilities. Two different oil groups have been recognized in Xijiang main sag, which origined from different source rocks and their spatial distributions are different. Group I oil origin from the Wenchang IV Formation source rock, distributed in the rift sequence and depression sequence reservoirs, with long lateral migration distance. Group II oil origed in from the Wenchang III Formation, only distributed in the rift sequence and accumulated near the sag. Source rocks and faults are two main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Xijiang main sag. The difference in attribute and volume of the two type source rocks control the oils' organic geochemical characteristics, the level of hydrocarbon accumulation and the migration distance. The NE trending faults control the development and distribution of source rocks due to the change of segmentation and time-sharing activity rate. The NWW-EW trending faults control the development of the Wenchang III Formation source rock, and both control the hydrocarbon accumulation in the rift sequence near the sag and in the depression sequence in the Xijiang middle low uplift far from the sag. The hydrocarbon accumulation pattern could be expressed as source rocks control response on oil accumulation direction, faults control response on reservoir layers, magmatism control response on oil enrichment.

Key words: source rock; oil classification and oil origin; hydrocarbon accumulation main control factor; Xijiang main sag; Pearl River Mouth basin; petroleum geology.

0 引言

珠江口盆地位于中国南海北部华南大陆南缘, 是中国近海最大的含油气盆地之一,但受太平洋板 块、印度洋板块以及欧亚板块交汇作用影响,处于 复杂的大陆动力学背景下(郑金云等,2022),其石 油地质条件复杂且差异性大,导致了油气分布的贫 富不均和勘探难易程度的差异(施和生等,2009, 2015; Pang et al., 2021; 蔡国富等, 2022). 西江主洼 位于珠江口盆地珠一坳陷西侧,是珠江口盆地内一 个最早被证实具有油气勘探潜力的生烃洼陷(彭光 荣等,2013;程燕君等,2020;刘培等,2021),与番禺 4 洼、西江 36 洼共同构成西江凹陷. 西江主洼 1979 年已钻遇油层,前人长期的研究对其地质特征和自 身特色已形成一定认识.西江主洼主力烃源岩与番 禺4洼相同,均为文昌组中深湖相泥岩,恩平组泥岩 次之(曹爱武,1999;傅宁等,2007;丁亮等,2015; Bao et al., 2017); 烃源岩分布受裂陷期控洼断层控 制,在文昌期发生沉降中心迁移,其展布呈现"文昌 组四段东厚西薄、文昌组三段西厚东薄"特征(高阳 东等,2021;梁杰等,2022).

相对于珠一坳陷的其他洼陷,西江主洼具有古 地温梯度低、恩平组泥岩厚度大、岩浆作用多的特 殊地质特征,这种特殊性影响了西江主洼的洼陷结 构、烃源岩热演化、储层发育和油气分布等(杜家元 等,2008;何敏等,2016;刘培等,2018;米立军, 2018;热西提·亚力坤,2022;单玄龙等,2023).由于 西江主洼恩平组区域泥岩盖层厚且分布广泛,没有 大量晚期断裂破坏,封盖能力强,油气集中分布在 下构造层陆相地层中,以文昌组为主;上构造层珠 海组、珠江组可见少量油气显示,珠江组以上地层 基本没有油气发现,油气分布整体上具有深层多、 浅层少的特点(朱文奇等,2014;刘志峰等,2017;陈 玮常等,2020;刘培等,2021).但断陷期的岩浆活动 产物不同程度上占据沉积空间或可能破坏已形成 的烃源岩(热西提·亚力坤,2022).古地温梯度低是 西江主洼的显著特点.受到大地热流影响,我国低 地温盆地主要分布在中西部地区(彭金宁等,2018; 冯昌格等,2009;靳军等,2021;吴鲜等,2022),东部 地区盆地也存在局部地温异常带(姜建群等,2004; 孙占学等,2006;杜家元等,2008;何敏等,2016;孟 召平等,2023).低地温盆地具有其独特的成藏特点, 烃源岩热演化趋于缓慢,生排烃较晚且持续时间 长;成藏较晚,并对产物类型有一定影响(段毅等, 2005;孙占学等,2006;靳军等,2021);低地温背景 下的深层储层物性得到有效保护,有利于深层成藏 (高崇龙等,2017;马安来等,2020;章顺利,2020;杨 学文等,2021;吴鲜等,2022);低地温梯度导致成藏 动力较弱,具有近源成藏的特点(何敏等,2016).西 江主洼古地温梯度相对低,文昌组烃源岩具有早期 演化、晚期成熟的特点,现今仍处于大量生烃阶段 (杜家元等,2008;刘培等,2018);油气成藏时间比 周边有成因联系的洼陷相对较晚,大规模生烃及成 藏时间仍在现今;低古地温条件使深埋储层抗压溶 作用增强,成岩作用滞后,储层物性较好,源储条件 优越,勘探潜力巨大(杜家元等,2008;米立军,

2018;曹勤明,2021).

由于三维地震近年来才陆续覆盖,且西江主洼 地质条件特殊,现阶段其勘探程度仍相对较低(刘 从印,2009),特别是与同属于西江凹陷、位于其南部 的番禺4洼相比,两个洼陷均受控于早文昌期NEE 向先存断层活化(Ye et al., 2018a, 2018b;邓棚等, 2020), 番禹 4 洼面积虽然仅 700 km², 但在珠江口盆 地属于"小而肥"的富生烃洼陷,勘探成效显著,已 发现两个大型油田和多个中小型油田(李振升等, 2022).西江主洼的面积和作为烃源岩层的文昌组厚 度均大于番禺4洼,但由于地质条件的特殊性导致 其主力烃源岩潜力、原油类型和来源、油气聚集规 律和成藏主控因素等复杂性(廖宗宝,2013:朱文奇 等,2014;米立军,2018;陈玮常等,2020;梁杰, 2020;刘培等,2021;热西提·亚力坤,2022),虽也有 商业性油气藏的发现(米立军,2018),但至今尚未 获得重大勘探突破,烃源潜力未完全证实.因此,对 西江主洼开展烃源岩特征和分布、原油类型及来 源、原油分布规律的研究,明确其烃源岩分布及潜力、原油成藏规律、模式和主控因素,可为西江凹陷 古近系深层油气勘探提供支撑.

1 地质背景

珠江口盆地是新生代南海北部被动大陆边缘 发育演化背景下形成的伸展盆地.珠一坳陷位于珠 江口盆地北部,包括5个负向构造单元,自西向东为 恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷和韩江凹 陷,其间被一系列的NWW向低凸起分隔.西江凹 陷整体为南北双断的地堑结构,呈NEE走向.南北 边界主要受控于NEE向先存断层的活化,内部由一 系列EW-NWW走向的断层所切割,形成一系列次 洼与断阶.北部洼陷包括西江主洼和番禺1洼,南部 洼陷包括番禺4洼和西江36洼(刘培等,2018).中部 成为南北断陷的共同缓坡区,呈地貌隆起,并同时 被一系列NEE走向与EW-NWW走向断层所切割 (叶青,2019;Ye et al., 2020).西江主洼内部又可划



图 1 西江凹陷构造位置及构造单元划分 Fig.1 Tectonic locations and units of the Xijiang depression

分为西江33西次洼、西江33东次洼和西江28洼(图 1).其中,西江凹陷NEE走向断裂发育时间早,控制 早文昌期沉积中心的发育;EW-NWW向断裂发育 时间晚,普遍为晚文昌时间开始活动,恩平期活动 加强(Ye *et al.*, 2018a;Hao *et al.*, 2021).切割西江 主洼的EW向断裂即为晚文昌期开始活动,一定程 度上控制了文昌组上段沉积.

西江主洼面积约1090 km²,最大埋深约 7 600 m(丁亮, 2015: Ma et al., 2022), 表现为"北断 南超,下断上坳"的半地堑结构(朱文奇等,2014; Ma et al., 2022),靠近北部边界断裂一侧地层厚,向 南部隆起超覆减薄,洼陷地层发生较为强烈的旋转 掀斜.西江主洼经历了断陷期、断拗转换期以及拗 陷期3个构造演化阶段,断陷期断层活动性强,断距 较大,整体处于欠补偿状态,利于半深湖-深湖相 烃源岩发育(刘培等,2021),文3段时期开始断层活 动性差异性变化引起了沉降中心迁移,影响烃源岩 空间展布.拗陷期断裂活动相对减弱,断层发育较 少(邓棚等,2020). 沉积地层自下而上为文昌组、恩 平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组及万山组.西 江主洼主力烃源岩为文昌组(曹爱武,1999;丁亮 等,2015;米立军,2018),根据钻井、测井资料及地 震层序界面, 文昌组可划分为文5段、文4段、文3 段、文2段及文1段.西江主洼至西江中低凸起目前 已钻遇井19口(图1),文昌组、恩平组、珠海组、珠江 组为主要油气聚集或显示层段.

2 烃源岩特征

2.1 烃源岩有机地球化学特征

本文通过泥岩的有机碳含量(TOC)、生烃潜率 (S_1+S_2)、氢指数 HI 和最高热解峰温 T_{max} 对西江主 洼文昌组已钻遇泥岩的品质和生烃潜力进行评价; 并选取 C_{30} 4-甲基甾烷/(C_{30} 4-甲基甾烷+ C_{29} 甾烷)、 杜松烷/(杜松烷+藿烷)、重排甾烷/(重排甾烷+ 常规甾烷)和姥鲛烷/(姥鲛烷+植烷)4个典型生物 标志化合物参数对西江主洼文昌组与恩平组泥岩、 西江主洼文昌组泥岩与番禺4洼典型文昌组泥岩开 展差异性分析.

西江主洼5口井(XJ-3井、XJ-8井、XJ-9井、 XJ-10井和XJ-11井)钻遇文昌组共24个泥岩样品, 主要为文昌组上段的文1段(E_2w^1)、文2段(E_2w^2)泥 岩,少量文3段(E_2w^3)泥岩.但钻遇的文昌组泥岩样 品主要为三角洲沉积相和少量浅湖相,与番禺4洼 文 3 段(E_2w^3)、文 4 段(E_2w^4)和文 5 段(E_2w^5)典型的 中深湖相泥岩样品相比,西江主洼文昌组上段泥岩 样品有机质丰度整体上相对较差,有机质类型以 II 型为主,有机碳含量(TOC)为0.33%~5.04%之间, 平均值为0.92%,生烃潜量(S_1+S_2)为1.22~ 16.09 mg/g之间,平均值为3.1 mg/g,为差一好烃源 岩(图 2).

生物标志化合物的沉积环境参数显示(图 3b), 番禺4洼文5段和文4段泥岩、以及西江主洼和番禺 4洼文3段泥岩均落于第二区间,说明番禺4洼和西 江主洼在早文昌期和晚文昌期的文3段时期沉积环 境较为一致(图 3b).但到晚文昌期的文2段和文1 段时期,西江主洼和番禺4洼烃源岩的沉积环境和 母源输入相较于文昌组下段和文3段发生了较大的 变化,文1段、文2段泥岩样品数据在第一、二、三区 间均有分布(图 3b),体现了文1段、文2段沉积期西 江凹陷整体受晚文昌期构造分异影响,湖盆环境也 开始发生分异,西江主洼和番禺4洼沉积环境产生 差异,番禺4洼甚至在文2段还保留有中深湖环境, 但西江主洼的文2段和文1段时期则湖盆变浅.

沉积环境的变化导致了生烃母质来源的差异 (图 3a),西江凹陷文昌组下段泥岩以及番禺4洼文3 段泥岩具有 C₃₀ 4-甲基甾烷含量高,杜松烷含量低的 特征,表现为多藻类、低陆源输入特征,为中深湖湖 盆.晚文昌期湖盆环境开始分异,番禺4洼直至文2 段时期仍为继承性深湖,文3段和部分文2段泥岩 具有 C₃₀ 4-甲基甾烷含量较高,杜松烷含量低的特 征,属于多藻类、少陆源烃源岩(图 3a);西江主洼文 3段藻类含量也较高,但文2段和文1段时期湖盆变 浅,泥岩的 C₃₀ 4甲基甾烷含量均低于 0.3,藻类输入 较低,杜松烷含量高但变化大,介于 0.1~0.7,为低 藻类、高陆源输入特征(图 3a).

西江凹陷早文昌期湖盆沉积环境受先存构造 控制,湖盆环境较为统一,属于还原环境,有机质保 存条件与藻类繁盛的营养物质条件好.西江主洼仅 钻遇文昌组上段,但原油和油砂的生物标志化合物 特征显示西江主洼文昌组下段和番禺4洼一样发育 优质中深湖相烃源岩,属于藻类输入高,陆源输入 相对较低的类型,以文4段为主.晚文昌期各生烃洼 陷构造逐渐分异,湖盆环境开始分异,番禺4洼为继 承性深湖,文3段和文2段仍发育优质烃源岩,但西 江主洼文3段发育烃源岩,文2段和文1段则不具备 烃源岩条件.综上所述,西江主洼主力烃源岩为文4







Fig.3 Typical biomarker parameters of mudstone samples of Wenchang Formation in Xijiang main sag and Panyu 4 sag

段和文3段.

2.2 各次洼烃源岩发育差异

西江主洼洼陷形成由控洼断层走向变化和分段、分时活动速率变化控制,导致不同时期、不同次 洼烃源岩发育情况和空间展布的差异.早文昌期西 江主洼属于NW-SE向伸展背景,受NE-NEE向先 存断层优先活化制约,发育NE-NEE走向铲式边界 断裂(XJ33断裂)控制洼陷发育(图1),共形成西江 33 西次洼、西江 33 东次洼和西江 28 洼 3 个次级洼 子,控洼断裂活动性大,文昌期发育稳定的中深湖 湖盆.但其活动性存在分时、分段差异(图4),导致 次级洼子之间沉积环境的差异.XJ33断裂早文昌期 文5段时期开始活动,发育3个主要的强烈活动中 心,分别控制着西江33西次洼、西江33东次洼和西 江28洼,其中西江33东次洼活动最强烈,西江28洼 活动性最弱.晚文昌期断裂继承性活动,整体活动 相对早文昌期有所减弱,但仍然为3个主要活动段. 晚文昌期西江33东次洼受NE-NEE向XJ33断裂控 制的同时,也受一系列同向和反向EW向断裂控制 (图5),沉积中心由东向西迁移,西江33东次洼湖盆 继承性变差.到恩平期,边界断层仍继承性活动,断 裂平面形态没有差异性变化,但断裂活动性整体较 弱,且沿走向的活动强度差异性减弱,次洼之间差 异性也随之减弱(图4).





Fig.4 The fault displacement curve of XJ33 Boundary fault in Xijiang main sag



Fig.5 Sedimentary facies of Wenchang IV Formation and Wenchang III Formation in Xijiang main sag

因此,西江33 西次洼和东次洼在早文昌期文4 段时期和晚文昌期文3段时期均发育中深湖湖盆, 但西江33 东次洼因晚文昌期沉积中心迁移,其文3 段时期烃源岩品质可能比西江33 西次洼较次之;西 江28 洼因控洼断层活动性相对弱,在文昌期一直为 滨浅湖湖盆(图5).

3 原油类型和分布

本文选取了西江主洼7口钻井(XJ-6井、XJ-8 井、XJ-9井、XJ-10井、XJ-11井、XJ-13井、XJ-16井) 中的油层、差油层、含水油层等油气显示情况较高 层段的原油或油砂共计32个样品开展生物标志化 合物分析.C₃₀4-甲基甾烷/(C₃₀4-甲基甾烷+C₂₉甾 烷)、杜松烷/(杜松烷+藿烷)、重排甾烷/(重排甾 烷+常规甾烷)和姥鲛烷/(姥鲛烷+植烷)4个典型 生物标志化合物参数可以展示西江主洼原油的母 质来源以及母源沉积环境的差异,可以将西江主洼 成藏层段的烃类产物分为两种类型,其来源应有差 异.但因西江主洼未钻遇文昌组下段烃源岩,且其 钻遇的文昌组上段泥岩也较少,本文纳入了番禺4 洼12口井和陆丰凹陷5口井典型的中深湖相来源 原油或油砂样品进行协同对比,进而厘清两类原油 的来源、地球化学特征和空间分布规律.

3.1 原油来源及分类

西江主洼原油和油砂样品代表中深湖相藻类的 C_{30} 4-甲基甾烷/(C_{30} 4-甲基甾烷+ C_{20} 甾烷)和代表陆源输入的杜松烷/(杜松烷+ 藿烷)两个典型参数(Peters *et al.*, 2005)关系显示(图 6,图 7)存在两种类型的烃类产物,其差异体现在母源特征.类型1原油 C_{30} 4-甲基甾烷含量较高,为0.3~0.5之间,杜松烷含量低,小于0.3,具有多藻类、低陆源输入的特征(图 6a).类型2原油 C_{30} 4-甲基甾烷含量高,在





图 6 西江主洼、番禺 4 洼及陆丰凹陷原油和油砂样品 C₃₀ 4-甲基甾烷一杜松烷含量关系 Fig.6 Correlation diagrams of C₃₀ 4- methylsteranes/ (C₃₀ 4- methylsteranes+C₂₉ regular steranes) and cadinene/ (cadinene+

hopane) ratios of sand rock and oil samples in Xijiang main sag, Panyu 4 sag and Lufeng sag





Fig.7 Correlation diagrams of diasteranes/(diasteranes+regular steranes) and Pr/(Pr+Ph) ratios of sand rock and oil samples in Xijiang main sag, Panyu 4 sag and Lufeng sag

a.西江主洼砂岩、原油;b.陆丰凹陷原油;c.番禺4洼砂岩、原油

0.4~0.5之间,杜松烷含量高,大于0.5,具有多藻 类、中一高陆源输入的特征(图 6a).两种类型的产 物样品均有原油样品,说明两种类型烃类均达到了 成藏级别.少数游离在两类产物特征之间的数据为 混源.

第6期

(a)

最大值0.9

类型2原油

1.0 r

0.9

0.8

0.7

0.6

0.5

0.4

西江主洼文昌组上段的文3段两个泥岩样品显 示具有高含量的C₃₀4-甲基甾烷,且在沉积环境参数 处于代表中深湖相的第二区间,具有烃源岩特征 (图3).但没有钻遇文昌组下段泥岩,可用番禺4洼 和陆丰凹陷典型中深湖相来源原油与西江主洼两 类原油进行对比.番禺4洼和陆丰凹陷原油的藻类 含量均较高,C₃₀4-甲基甾烷参数分别介于0.40~ 0.62和0.35~0.50之间(图 6b 和 6c),与西江主洼两 类原油的藻类含量相当.但番禺4洼和陆丰凹陷原

油的陆源输入均较低,杜松烷参数均低于0.17,这一 特征与西江凹陷类型1原油特征相似,为多藻类,低 陆源输入特征.

虽然两类原油的陆源输入存在差异,但其来自 于中深湖相泥岩的藻类含量均较高,生物标志化合 物沉积环境参数也显示其烃源岩的沉积环境是相 似的,大多数数据均位于代表中深湖相的第二区间 (图7a).这一特征与番禺4洼和陆丰凹陷典型的中 深湖相来源原油特征是一致的(图7b和7c),西江主 洼少部分恩平组砂岩岩屑样品落在了第一区间,可 能受到恩平组泥岩的干扰影响.

番禺4洼和陆丰凹陷在早文昌期裂陷期均属于 高角度张裂,发育中深湖湖盆,到晚文昌期的早期 仍具有继承性脆性张裂特征,发育继承性中深湖湖



图8 西江主洼两类原油平面和纵向分布规律







盆,因此其文昌组下段和文昌组上段的文3段的烃 源岩稳定发育,其烃类产物有机地球化学特征稳 定,主要为多藻类,低陆源输入的原油类型.但西江 主洼在早文昌期裂陷期属于低角度张裂,发育中深 湖湖盆,到晚文昌期文3段时期控洼构造转化,受 NE-NEE向断裂和EW向断裂共同控制,湖盆迁移, 继承性减弱.因此文3段烃源岩有机地球化学特征 发生变化,西江33西次洼文3段中深湖相烃源岩仍 较好,西江33东次洼文3段中深湖湖盆相对继承性 减弱,陆源输入可能相对增高.综上所述,西江主洼 类型1原油来自于文昌组下段的文4段烃源岩,类型2原油主要来自于文昌组上段的文3段烃源岩.

3.2 原油的分布规律

西江主洼虽然钻遇古近系的钻井较少,但钻遇 的恩平组和文昌组普遍具有含油性,珠海组和珠江 组底部也见油气显示,再向浅层则基本无油气显示. 油气主要分布在西江33西次洼和中央隆起带,西江 33东次洼、西江28洼、主洼北部油气显示较差.整体 上目前钻探结果显示西江主洼南部缓坡及其远端 低凸起地区成藏效果好,北部陡坡略逊色,但钻井

2369

较少,仅有三口钻井,Z1井也钻遇油层.西江主洼近 洼处深层下组合成藏为主,较远的西江中低凸起则 为上组合下部的珠海组和珠江组底部成藏,韩江组 及以上层系均未见成藏原油(图8和图9).

按原油类型区分表达具有一定成藏级别的层段(油层/差油层、含水油层、油水同层等),并按原油类型表达其平面分布可见,两种类型原油的分布在平面上和纵向上均具有一定规律性(图8).类型1 原油纵向分布层位多(珠江组一文昌组),横向运移距离远,向南可达西江中低凸起 XJ-14 井和 PY-2 井,向北可达 Z1 井.类型 2 原油纵向分布层位少、深(恩平组、文昌组),横向运移距离近,油层主要围绕西江主洼分布在近洼的南坡,最远在 XJ-16 井有少量原油显示,主要近洼聚集(图8).

4 成藏规律及主控因素

4.1 两种属性烃源岩的供烃差异

烃源岩建造期,西江主洼共发育属性差异的两 套烃源岩,分别是具有多藻类、少陆源输入的文昌 组下段的文4段中深湖相泥质烃源岩和具有多藻 类、多陆源输入的文昌组上段文3段中深湖相泥质 烃源岩.西江主洼晚文昌期一恩平期岩浆活动多, 对文昌组下段烃源岩可能有一定改造作用.同时晚 文昌期一恩平期也是NWW-近EW向断层强烈活 动时期,对文昌组上段烃源岩的形成具有控制作用. 两套烃源岩的品质和体量存在差异,导致其烃类产 物的特征和聚集也存在差异. 西江主洼文昌组下段的文4段中深湖相烃源岩 为主力供烃的烃源岩层,其烃类产物向北部、南部 均有运移,供烃能力强,运移距离远.目前钻探结果 显示南部缓坡及其远端中低凸起地区成藏效果好 即为该套烃源岩的主要贡献.文3段烃源岩供烃能 力相对弱,原油难以远距离运移.南部缓坡的局部 构造为文昌组下段的文4段烃源岩和文昌组上段的 文3段烃源岩混合供烃,原油顺源层一构造脊一断 层输导,主要在裂陷层文昌组、恩平组成藏.洼陷远 端中低凸起的局部构造为文昌组下段的文4段烃源 岩单源供烃,油气通过源层一构造脊一输导层一断 层输导,在浅层拗陷层下部聚集成藏(图9).北部陡 坡以通源断层输导为主,文昌组下段的文4段烃源 岩单源供烃,也见油层分布,成藏效果较差(图9).

综上所述,西江主洼早文昌期受NE向先存断 裂控制,西江主洼文昌组下段和番禺4洼相似,发育 中深湖相湖盆,主要分布在西江33西次洼和东次 洼,母源输入以藻类为主,陆源输入较低,为主要供 烃的烃源岩层.油气以源层一构造脊一输导层一断 层输导向北部、南部运移,供烃能力强,运移距离 远,向南可达西江中低凸起(图10a).

晚文昌期发生构造分异,NWW-近EW向断裂 强烈活动并控制洼陷沉积,造成湖盆向西迁移,文3 段时期中深湖湖盆继承性受到影响,文3段烃源岩 属性发生变化,陆源输入明显增加,供烃能力减弱, 烃类运移距离近,主要向南部缓坡运移聚集(图 10b).



Fig.10 Hydrocarbon accumulation patterns of two type oil groups in Xijiang main sag a. 文昌组下段文4段来源油运聚,沉积相为文4段沉积相;b.文昌组上段文3段来源油运聚,沉积相为文3段沉积相

4.2 原油聚集与岩浆和断裂关系

西江主洼晚文昌期和恩平期岩浆作用较为发 育,五口钻井在文昌组和恩平组钻遇玄武岩和凝灰 岩.晚文昌期岩浆作用具有活动强度大,分布相对 集中的特点,底侵改造作用明显.恩平期岩浆活动 除发育有大量连片的岩浆岩侵入体外,还于恩平组 内部发育有溢流相玄武岩沉积;恩平期的火山喷出 岩浆与岩浆岩侵入体相比多呈席状展布且平面展 布范围更大,分布上较为集中分布于西江主洼西南 侧. 拗陷期岩浆活动与裂陷期相比较为平静, 火山 作用少且分布局限,主体上发育于南部缓坡带.整 体上裂陷期和拗陷期岩浆作用主要分布在西江主 洼的南部、东部,北部较少(图11).钻井揭示的原油 显示情况与岩浆作用空间分布关系可见,在岩浆作 用发育的构造位置,钻井多为干井,少数显示井,聚 集效果差;而油流井和油层井处于岩浆作用不发育 的区域(图11).岩浆作用可能对西江主洼原油聚集 具有一定负面影响.

西江凹陷除了控洼的NE-NEE向断裂之外,还 发育大量的NWW-近EW向断裂,这组断裂发育较 晚,在早文昌期少量活动,晚文昌期逐渐开始发育, 恩平期和拗陷期大量发育(图12).NWW-近EW向 断裂在各次洼发育情况存在差异,体现在3个方面, 一是断裂发育程度差异,二是不同时期断裂走向差 异,三是纵向切层情况差异.这些差异性对原油的 空间分布有一定影响作用.

番禺4洼NWW-近EW向断裂发育多,裂陷期 和拗陷期断裂走向基本相同且继承性强,纵向切层 多.其长期继承性活动的NWW-近EW向断裂可以 很好的沟通深层与浅层,是拗陷层原油的输导断层 和聚集断层.因此番禺4洼裂陷层和拗陷层均有成 藏,特别是拗陷层珠江组、韩江组原油成藏效应非 常好,番禺4洼原油分布为外扩型(图12).裂陷层特 别是文昌组因目前钻井揭示相对少,且储层深、非 均质性强,目前相对于拗陷层勘探发现较少,但裂 陷层古近系是勘探的有利方向.

西江主洼 NWW-近 EW 向断裂的发育情况与 番禺 4 洼有较大差异,整体发育程度比番禺 4 洼少. 裂陷层和拗陷层的 NWW-近 EW 向断裂继承性差, 裂陷层 NWW-近 EW 向断裂为 NWW 走向,分布在



图 11 西江主洼原油分布与岩浆发育平面关系

Fig.11 Relationship between the distributions of two type oil groups and magmatic rocks in Xijiang main sag



图 12 西江主洼不同层段原油分布与各时期断裂活动的平面关系

Fig.12 Relationship between the oil distributions in each sequence and the active faults of every period in Xijiang main sag

西江主洼洼陷范围,但拗陷层NWW-近EW向断裂 为近EW向,分布在西江主洼洼陷的周缘.两套构造 层的NWW-近EW向断裂继承性差,纵向上不连 续.目前钻探情况显示西江主洼洼陷及近洼的周缘 发育古近系的区域,已钻井在文昌组和恩平组大多 有油气显示,但拗陷层仅下部珠海组和珠江组下部 有原油聚集,拗陷层上部油气显示很少.西江主洼 具有裂陷层成藏好的特征,为内聚型.NWW-近EW 向断裂是洼陷及近洼周缘裂陷层原油的聚集断层 (图12).

4.3 成藏主控因素

西江主洼的储层、圈闭、保存条件均是具备且 良好的,综合前文对油气来源和聚集特点的分析, 以及西江主洼与番禺4洼对比可见,西江主洼的成 藏具有如下几个特点:一是具有两种属性烃源岩, 且改造作用强、供烃能力有差异;二是岩浆活动影 响原油富集空间分布;三是恩平组厚层泥岩和 NEE-近EW向断裂与裂陷层和拗陷层原油聚集差 异有关.

西江主洼第一成藏主控因素为烃源岩,文昌组 烃源岩的属性差异、体量控制了原油的类型、成藏 级别和运移距离,烃源岩的上倾方向控制了原油优 势运移方向.文昌组下段的文4段烃源岩在西江33 西次洼和东次洼均有发育,文4段最厚处可达数千 米,是主力供烃的烃源岩,供烃能力强,原油运移距 离远,成藏原油为类型1多藻类、少陆源输入属性的 原油.文3段时期因EW向构造扰动导致湖盆迁移, 中深湖湖盆继承性减弱,烃源岩面积减少,但文3段 厚度也较大,为次要烃源岩,供烃能力相对弱,原油 运移距离近,主要近洼聚集,成藏原油为类型2多藻 类、多陆源输入属性的原油(图9,图10).烃源岩的 空间位置变迁本质上是受构造因素控制.

第二主控因素为断层,NE向断裂和NWW-近 EW 向断裂对西江主洼成藏均有控制作用,但作用 方式存在差异.(1)NE向先存构造于早文昌期文5 段时期活化形成的NE向控挂断裂主要因延走向的 分段、分时活动速率变化控制各次洼烃源岩的发育 程度和空间展布差异,其次该断裂可作为北部原油 运移的通源断层.(2)NWW-近EW向断裂于早文昌 末期开始形成,在晚文昌期-恩平期活动较强,该 组晚期断裂首先对西江主洼造成构造扰动至使湖 盆迁移,影响了文昌组上段的文3段烃源岩的发育 程度和空间展布:其次NWW-近EW向对于成藏原 油具有控层作用,因其在近洼处主要发育于裂陷 层,恩平组富泥,断裂向上沟通少.拗陷期NWW-近 EW 向断裂发育少,切层少,且主要发育在洼陷周 缘,与裂陷层的同走向断裂不存在空间上的继承 性,导致西江主洼及近洼周缘原油主要在裂陷层聚 集, 拗陷层显示很少. 南部的西江中低凸起以源 层一构造脊为通道成为原油运移方向,再结合低凸 起拗陷层发育的NWW-近EW向断裂输导,得以在 拗陷层下部珠海组和珠江组底部成藏(图9和 图 12).

除了两个主控因素外,西江主洼在晚文昌期、

恩平期、拗陷期发育的岩浆作用也与原油的富集存 在一定关系(图11).西江主洼原油成藏模式可总结 为:烃源控聚、断裂控层、岩浆控富.

5 结论

(1)西江主洼发育两种属性的中深湖相烃源 岩,且改造作用强、供烃能力有差异.一是具有多藻 类、少陆源输入特征的文昌组下段的文4段中深湖 相泥质烃源岩,二是具有多藻类、多陆源输入特征 的文昌组上段的文3段中深湖相泥质烃源岩.晚文 昌期一恩平期岩浆活动对文昌组烃源岩有一定改 造作用;晚文昌期一恩平期NWW-近EW向断层活 动对文昌组上段的文3段烃源岩的形成具有控制 作用.

(2)西江主洼成藏原油可分为两种类型:类型1 原油来自于文昌组下段的文4段烃源岩,具有多藻 类、低陆源输入特征;纵向分布层位多(珠江组一文 昌组),横向运移距离远,洼陷南北均有聚集,向南 可达西江中低凸起.类型2原油主要来自于文昌组 上段的文3段烃源岩,具有多藻类、中一高陆源输入 特征;纵向分布层位少、深(恩平组、文昌组),横向 运移距离近,油层围绕西江33洼分布在近洼的南 坡,近洼聚集.

(3)西江主洼第一成藏主控因素为烃源岩,文 昌组烃源岩的属性差异、体量控制了原油的类型、 成藏级别和运移距离,烃源岩的上倾方向控制了原 油优势运移方向.第二主控因素为断层,NE向断层 因分段、分时活动速率变化控制烃源岩发育和展 布,且为北坡通源断层;NWW-近EW向断裂控制文 3段烃源岩,且为近洼处裂陷层成藏断层,为远洼处 西江中低凸起拗陷层成藏断层.西江主洼在晚文昌 期、恩平期、拗陷期发育的岩浆作用也与原油的富 集存在一定关系.西江主洼原油成藏模式可总结 为:烃源控聚、断裂控层、岩浆控富.

References

- Bao, X.H., Ji, Y.B., Hu, Y.E., et al., 2017.Geochemical Characteristics, Origins, and Model of Lacustrine Source Rocks in the Zhu 1 Depression, Eastern Pearl River Mouth Basin, South China Sea. AAPG Bulletin, 101(9): 1543-1564.https://doi.org/10.1306/11071614117
- Cai, G.F., Peng, G.R., Wu, J., et al., 2022. Sedimentary Filling Response to Detachment Structural Deformation in Shallow-Water Continental Shelf of Pearl River Mouth

Basin: A Case Study of Enping Sag. *Earth Science*, 47(7): 2391-2409(in Chinese with English abstract).

- Cao, A. W., 1999. The Analysis of Hydrocarbon Potential in Xijiang Main Sag. China Offshore Oil and Gas, 11(3): 196-199(in Chinese with English abstract).
- Cao, Q. M., 2021. Formation Mechanism of Middle-Deep Sandstone Reservoir of Eocene in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Chen, W.C., Zhang, H.Y., Quan, Z.Z., et al., 2020. Paleogene Fault Structure Characteristics and Hydrocarbon Accumulation of Xijiang Major Sag in Pearl River Mouth Basin. Journal of Northeast Petroleum University, 44(3): 57-69,8(in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y.J., Wu, Z.P., Zhang, J., et al., 2020. Early Cenozoic Evolution of Fault System in Xijiang Sag and Its Implication to Clockwise Rotation of Extension Stress in Northern Margin of South China Sea. *Earth Science*, 45(6): 2199-2209(in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Guo, G., Hao, J.R., et al., 2015. Characteristics of Paleogene Source Rocks of Wenchang Formation and Hydrocarbon Potential in Xijiang Sag, Zhu I Depression. *China Offshore Oil and Gas*, 27(5): 21-26(in Chinese with English abstract).
- Du, J.Y., Shi, H.S., Zhu, M., et al., 2008. An Analysis of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Potential under a Lower Geothermal Condition in Xijiang Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 20(5):287–292(in Chinese with English abstract).
- Deng, P., Mei, L.F., Du, J.Y., et al., 2020. Characteristics and Genetic Development of a Low-Angle Boundary Normal Fault in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin, China. Oil & Gas Geology, 41(3):606-616(in Chinese with English abstract).
- Duan, Y., Wu, B.X., Zheng, C.Y., et al., 2005. Study on Hydrocarbon Generation Kinetics of Coal in Qinshui Basin, Shanxi Province. *Chinese Science Bulletin*, 50(13):1405– 1411(in Chinese).
- Feng, C.G., Liu, S.W., Wang, L.S., et al., 2009. Present-Day Geothermal Regime in Tarim Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(11): 2752-2762(in Chinese with English abstract).
- Fu, N., Ding, F., He, S.B., et al., 2007. Source Rocks Evaluation and Reservoir Characteristics Analysis in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 19(5): 295-299, 305(in Chinese with English abstract).

- Gao, Y.D., Lin, H.M., Wang, X.D., et al., 2021. Source Rock Distribution Pattern in an Episodic Rifting Sag and Later Stage Magmatiic Reformation: A Case from Panyu 4 Sag, Zhu I Depression. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(3): 151-160(in Chinese with English abstract).
- Gao, C. L., Ji, Y. L., Jin, J., et al., 2017. Characteristics and Controlling Factors on Physical Properties of Deep Buried Favorable Reservoirs of the Qingshuihe Formation in Muosuowan Area, Junggar Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(4):990-1006(in Chinese with English abstract).
- He, M., Lei, Y.C., Yu, S.M., et al., 2016. Hydrocarbon Accumulation Features and Exploration Inspiration of Low Geothermal Rifted Basins in Shallow Water Area of Northern South China Sea. *China Petroleum Exploration*, 21(4):75-84(in Chinese with English abstract).
- Hao, S. H., Mei, L. F., Shi, H. S., et al., 2021. Rift Migration and Transition during Multiphase Rifting: Insights from the Proximal Domain, Northern South China Sea Rifted Margin. Marine and Petroleum Geology, 123: 104729. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104729
- Jiang, J.Q., Li, J., Shi, J.N., et al., 2004. Geothermal Characteristics of Damintun Sag and Its Significance for Petroleum Accumulation. Acta Sedimentologica Sinica, 22(3): 541-546(in Chinese with English abstract).
- Jin, J., Liu, M., Liu, Y.C., et al., 2021.Present-Day Temperature - Pressure Field and Its Controlling Factors of the Lower Composite Reservoir in the Southern Margin of Junggar Basin.Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 56(1):28-43(in Chinese with English abstract).
- Li,Z.S., Peng, G.R., Wu, J., et al., 2022. Accumulation Conditions and Modes of Neogene Hydrocarbons in Panyu 4 Sag, Pearl River Mouth Basin. World Geology, 41(2): 315-324(in Chinese with English abstract).
- Liang, J., 2020. Geological Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Paleogene Reservoir in Xijiang 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin. Sino -Global Energy, 25(4): 23-30(in Chinese with English abstract).
- Liang, J., Liu, P., Chen, W. T., et al., 2022. Technology of Identification for Hydrocarbon Source and Its Application in Reformed Sag:A Case Study of Xijiang Main Sag. *Marine Geology Frontiers*, 38(6): 78-87(in Chinese with English abstract).
- Liao, Z.B., 2013. Tectonic Evolution and Its Control on Hydrocarbon Accumulation Xijiang Main Sag, Zhu I De-

pression (Dissertation).China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

- Liu, C. Y., Zhou, P.B., Zeng, Y., et al., 2009. An Analysis of the Main Controls on Neogene Hydrocarbon Accumulation in Panyu 4 Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 21(2): 91-94(in Chinese with English abstract).
- Liu, P., Zhang, X.T., Du, J.Y., et al., 2018. Tectonic-Thermal Evolution Process and the Petroleum Geological Significance of Relatively Low Geothermal Gradient in a Rift Basin: an Example from Xijiang Main Sag in Pearl River Mouth Basin. *Geological Science and Technology Information*, 37(2): 149-156(in Chinese with English abstract).
- Liu, P., Zhang, X. T., Lin, H. M., et al., 2021. Distribution Mechanism of Oil and Gas in Xijiang Main Depression of Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(1): 52-64(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.F., Wu, K.Q., Ke, L., et al., 2017. Main Factors Controlling Hydrocarbon Accumulation in Northern Subsag Belt of the Zhu-1 Depression, Pearl River Mouth Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(3): 561-569(in Chinese with English abstract).
- Ma, B.S., Qi, J.F., Chen, W.C., et al., 2020. Fault Interaction and Evolution during Two-Phase Rifting in the Xijiang Sag, Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Geological Journal*, 55(2): 1128-1147. https://doi. org/10.1002/gj.3474
- Ma, B.S., Qi, J.F., Wu, G.H., et al., 2022. Structural Variability and Rifting Process of the Segmented Cenozoic Pearl River Mouth Basin, Northern Continental Margin of the South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 2074– 2092.https://doi.org/10.1111/1755-6724.14983
- Mi, L. J., 2018. Continuous Breakthroughs on Petroleum Exploration of the Eastern South China Sea with Innovative Understanding: Review of Recent Exploration Progress. *China Offshore Oil and Gas*, 30(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Meng, Z.P., Yu, Y.N., Li, G.F., et al., 2023.Geothermal Field Condition of Coal Reservoir and Its Genetic Mechanism of Low Geothermal Anomaly Area in the Qinshui Basin. *Journal of China Coal Society*, 48(1): 307-316(in Chinese with English abstract).
- Ma, A.L., Jin, Z.J., Li, H.L., et al., 2020. Secondary Alteration and Preservation of Ultra-Deep Ordovician Oil Reservoirs of North Shuntuoguole Area of Tarim Basin, NW China. *Earth Science*, 45(5): 1737-1753(in Chinese with English abstract).

- Pang, X., Zheng, J.Y., Mei, L.F., et al., 2021. Characteristics and Origin of Continental Marginal Fault Depressions under the Background of Preexisting Subduction Continental Margin, Northern South China Sea, China. Petroleum Exploration and Development, 48(5):1237-1250. https://doi.org/10.1016/s1876-3804(21)60106-4
- Peng, G. R., Wen, H.H., Liu, C. Y., et al., 2013. Practice of Shallow Oil and Gas Exploration in Zhu I Depression of the Pearl River Mouth Basin: A Case from Panyu 4 Sag. *Marine Geology Frontiers*, 29(3): 22-28(in Chinese with English abstract).
- Peng, J. N., Luo, K. P., Liu, G.X., et al., 2018. Causes of Abnormal Thermal Evolution and Characteristics of Thermal Evolution in Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(5):605-612(in Chinese with English abstract).
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. The Biomarker Guide, Secong Edition. II .Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. Cambridge University Press, London.
- Shan, X.L., Yalikun Rexiti, Liu, P., et al., 2023. Sedimentary Response and Tectonic Significance of Zhuqiong Movement in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*,53(2): 329-342(in Chinese with English abstract).
- Shi, H.S., Dai, Y.D., Liu, L.H., et al., 2015.Geological Characteristics and Distribution Model of Oil and Gas Reservoirs in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(Suppl. 2): 120–133, 155(in Chinese with English abstract).
- Shi, H.S., Zhu, J.Z., Jiang, Z.L., et al., 2009. Hydrocarbon Resources Reassessment in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 21(1):9–14 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z.X., Zhang, W., Hu, B.Q., et al., 2006. Features of Heat Flow and the Geothermal Field of the Qinshui Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 130-134(in Chinese with English abstract).
- Wu, X., Li, D., Zhu, X.X., et al., 2022. Influence of Geothermal Field on Ultra - Deep Ordovician Oil and Gas in Shunbei Field, Tarim Basin: A Case Study of Shunbei No. 5 Strike - Slip Fault. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3):402-412(in Chinese with English abstract).
- Yalikun Rexiti., 2022. Paleogene Sag Structure, Magmatic transformation, and Source Rock Distribution of Xijiang main Sag (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. W., Tian, J., Wang, Q. H., et al., 2021. Geological

Understanding and Favorable Exploration Fields of Ultra-Deep Formations in Tarim Basin. *China Petro-leum Exploration*, 26(4):17-28(in Chinese with English abstract).

- Ye, Q., 2019. The Late Mesozoic Structure Systems in the Northern South China Sea Margin: Geodynamics and Their Influence on the Cenozoic Structures in the Pearl River Mouth Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Mei, L.F., Shi, H.S., et al., 2018a. A Low-Angle Normal Fault and Basement Structures within the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: Insights into Late Mesozoic to Early Cenozoic Tectonic Evolution of the South China Sea Area. *Tectonophysics*, 731-732: 1-16.https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.03.003
- Ye, Q., Mei, L.F., Shi, H.S., et al., 2018b. The Late Cretaceous Tectonic Evolution of the South China Sea Area: An Overview, and New Perspectives from 3D Seismic Reflection Data. *Earth-Science Reviews*, 187:186-204. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.013
- Ye, Q., Mei, L.F., Shi, H.S., et al., 2020. The Influence of Pre-Existing Basement Faults on the Cenozoic Structure and Evolution of the Proximal Domain, Northern South China Sea Rifted Margin. *Tectonics*, 39(3): e2019TC005845. https://doi.org/10.1029/2019tc005845
- Zhu, W. Q., Liang, J. S., Guo, G., et al., 2014. Main Control Factors and Models of Hydrocarbon Migration-Accumulation in Xijiang Major Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 26(6): 14-20(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.L., 2020. Characteristics and Formation Mechanism of Porous Tight Sandstone Reservoir in the Second Member of Xujiahe Formation, Upper Triassic, Central and Western Sichuan Basin (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. Y., Gao, Y. D., Zhang, X. T., et al., 2022. Tectonic Evolution Cycles and Cenozoic Sedimentary Environment Changes in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2374-2390(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡国富,彭光荣,吴静,等,2022.珠江口盆地浅水陆架区拆离 断陷的构造变形与沉积充填响应:以恩平凹陷为例.地 球科学,47(7):2391-2409.
- 曹爱武,1999.西江主洼生油潜力分析.中国海上油气地质, 11(3):196-199.

- 曹勤明,2021.珠江口盆地珠一坳陷始新统中一深层砂岩储 层形成机理(博士学位论文).成都:成都理工大学.
- 陈玮常,张洪宇,全志臻,等,2020.珠江口盆地西江主洼古近 纪断裂构造与油气成藏.东北石油大学学报,44(3): 57-69,8.
- 程燕君,吴智平,张杰,等,2020.西江凹陷早新生代断裂演化 及其对南海北缘应力场顺时针旋转的响应.地球科学, 45(6):2199-2209.
- 丁亮,郭刚,郝建荣,等,2015.珠一坳陷西江主洼古近系文昌 组 烃 源 岩 特 征 及 生 烃 潜 力 . 中 国 海 上 油 气,27(5): 21-26.
- 杜家元,施和生,朱明,等,2008.西江主洼相对低地温条件下 油气成藏特征和勘探潜力分析.中国海上油气,20(5): 287-292.
- 邓棚,梅廉夫,杜家元,等,2020.珠江口盆地西江主洼低角度 边界正断层特征及成因演化.石油与天然气地质,41 (3):606-616.
- 段毅,吴保祥,郑朝阳,等,2005.山西沁水盆地煤生烃动力学 研究.科学通报,50(13):1405-1411.
- 冯昌格,刘绍文,王良书,等,2009.塔里木盆地现今地热特征.地球物理学报,52(11):2752-2762.
- 傅宁,丁放,何仕斌,等,2007.珠江口盆地恩平凹陷烃源岩评 价及油气成藏特征分析.中国海上油气,19(5):295-299,305.
- 高崇龙,纪友亮,靳军,等,2017.准噶尔盆地莫索湾地区清水 河组深层优质储层特征及其物性控制因素.吉林大学 学报(地球科学版),47(4):990-1006.
- 高阳东,林鹤鸣,汪旭东,等,2021.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.海洋 地质与第四纪地质,41(3):151-160.
- 何敏, 雷永昌, 于水明, 等, 2016. 南海北部浅水区低地温断陷 成藏特征及勘探启示. 中国石油勘探, 21(4):75-84.
- 姜建群,李军,史建南,等,2004.大民屯凹陷古今地温场特征 及其成藏意义.沉积学报,22(3):541-546.
- 靳军,刘明,刘雨晨,等,2021.准噶尔盆地南缘下组合现今温 压场特征及其控制因素.地质科学,56(1):28-43.
- 李振升,彭光荣,吴静,等,2022.珠江口盆地番禺4洼新近系 油气成藏条件及成藏模式.世界地质,41(2):315-324.
- 梁杰,2020.珠江口盆地西江33洼古近系油藏地质特征与成 藏解剖.中外能源,25(4):23-30.
- 梁杰,刘培,陈维涛,等,2022.适用于改造型洼陷的烃源规模 识别技术:以西江主洼为例.海洋地质前沿,38(6): 78-87.
- 刘从印,周平兵,曾驿,等,2009.番禺4洼地区新近系油气成 藏主控因素分析.中国海上油气,21(2):91-94.
- 刘培,张向涛,林鹤鸣,等,2021.珠江口盆地西江主洼油气差 异分布机制.吉林大学学报(地球科学版),51(1):52-64.
- 刘培,张向涛,杜家元,等,2018.低地温断陷构造一热演化过 程及其石油地质意义:以珠江口盆地西江主洼为例.地

质科技情报,37(2):149-156.

- 刘志峰,吴克强,柯岭,等,2017.珠江口盆地珠一坳陷北部洼 陷带油气成藏主控因素.石油与天然气地质,38(3): 561-569.
- 廖宗宝,2013.珠一坳陷西江主洼构造演化及对油气成藏的 控制作用(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 米立军,2018.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.中国海 上油气,30(1):1-10.
- 孟召平,禹艺娜,李国富,等,2023. 沁水盆地煤储层地温场条件及其低地温异常区形成机理. 煤炭学报,48(1): 307-316.
- 马安来,金之钧,李慧莉,等,2020.塔里木盆地顺北地区奥陶 系超深层油藏蚀变作用及保存.地球科学,45(5): 1737-1753.
- 彭光荣,温华华,刘从印,等,2013.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.海洋地质 前沿,29(3):22-28.
- 彭金宁,罗开平,刘光祥,等,2018.四川盆地热演化异常成因 及热场演化特征分析.石油实验地质,40(5):605-612.
- 热西提·亚力坤,2022.西江主洼古近系洼陷结构、岩浆改造 和烃源岩分布(硕士学位论文).长春:吉林大学
- 单玄龙,热西提·亚力坤,刘培,等,2023.珠江口盆地西江主 洼珠琼运动的沉积响应及构造意义.吉林大学学报(地 球科学版),53(2):329-342.
- 施和生,代一丁,刘丽华,等,2015.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.石油学报,36(增刊 2):120-133,155.
- 施和生,朱俊章,姜正龙,等,2009.珠江口盆地珠一坳陷油气 资源再评价.中国海上油气,21(1):9-14.
- 孙占学,张文,胡宝群,等,2006.沁水盆地大地热流与地温场 特征.地球物理学报,49(1):130-134.
- 吴鲜,李丹,朱秀香,等,2022.塔里木盆地顺北油气田地温场 对奧陶系超深层油气的影响:以顺北5号走滑断裂带为 例.石油实验地质,44(3):402-412.
- 杨学文,田军,王清华,等,2021.塔里木盆地超深层油气地质 认识与有利勘探领域.中国石油勘探,26(4):17-28.
- 叶青,2019.南海北部陆缘晚中生代构造体系:动力学以及对 珠江口盆地新生代构造的制约(博士学位论文).武汉:中 国地质大学.
- 朱文奇,梁建设,郭刚,等,2014.珠江口盆地西江主洼油气运 聚主控因素及运聚模式.中国海上油气,26(6):14-20.
- 章顺利,2020.四川盆地中西部上三叠统须家河组二段孔隙 型致密砂岩储层特征与形成机理(博士学位论文).成 都:成都理工大学.
- 郑金云,高阳东,张向涛,等,2022.珠江口盆地构造演化旋回 及其新生代沉积环境变迁.地球科学,47(7):2374-2390.