



断陷盆地边缘洼陷优质烃源岩形成机制——以珠江口盆地惠州26洼东北次洼为例

贾培蒙, 杜家元, 陈维涛, 杨兴业, 熊万林, 靳瑶瑶

Formation mechanism of high quality source rocks in the depression of faulted basin margin: A case study of Huizhou 26 northeast subsag, Pearl River Mouth Basin

JIA Peimeng, DU Jiayuan, CHEN Weitao, YANG Xingye, XIONG Wanlin, and JIN Yaoyao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine-continental transitional source rocks in the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

贾培蒙, 杜家元, 陈维涛, 等. 断陷盆地边缘洼陷优质烃源岩形成机制——以珠江口盆地惠州 26 洼东北次洼为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3): 140-148.

JIA Peimeng, DU Jiayuan, CHEN Weitao, et al. Formation mechanism of high quality source rocks in the depression of faulted basin margin: A case study of Huizhou 26 northeast subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(3): 140-148.

断陷盆地边缘洼陷优质烃源岩形成机制——以珠江口盆地惠州 26 洼东北次洼为例

贾培蒙, 杜家元, 陈维涛, 杨兴业, 熊万林, 靳瑶瑶

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

摘要: 珠江口盆地珠一坳陷惠州 26 洼为典型的断陷盆地, 是已证实的富生烃洼陷。以往对优质烃源岩的研究主要集中在其盆地内部, 而对湖盆边缘次洼的烃源岩特征及形成机制鲜有报道。为弥补以往研究的空白, 选择惠州 26 洼东北次洼作为研究区, 根据最新的地震、地化和元素分析等资料, 对该次洼的烃源岩地化特征和形成机制进行详细研究。结果表明, 该次洼文四段发育优质烃源岩, 有机质丰度高, 含量均值为 4.59%, 可达“好—很好”烃源岩标准, 有机质类型为 I—II₁ 型, 以生油为主。文四段沉积时期, 惠州 26 洼东北次洼强烈断陷, 形成“洼缘深盆”, 且陆源碎屑物质输入量少, 为烃源岩发育提供有利的沉积环境, 同期火山活动提供了丰富的无机营养物质, 形成咸水环境, 引起浮游生物勃发, 促进有机质的规模形成和保存。综合分析认为, 惠州 26 洼东北次洼文四段优质烃源岩的发现, 将优质烃源岩分布范围扩大至湖盆边缘, 为该洼陷未来勘探发现奠定生烃基础, 对其他地区断陷盆地边缘洼陷评价和勘探潜力分析具有重要的借鉴意义。

关键词: 断陷盆地; 烃源岩; 地球化学特征; 沉积成因; 惠州 26 洼东北次洼

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021701

Formation mechanism of high quality source rocks in the depression of faulted basin margin: A case study of Huizhou 26 northeast subsag, Pearl River Mouth Basin

JIA Peimeng, DU Jiayuan, CHEN Weitao, YANG Xingye, XIONG Wanlin, JIN Yaoyao

CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen 518054, China

Abstract: Huizhou 26 Sag, Zhuyi Depression, Pearl River Mouth Basin, is a typical faulted basin, which is proved to be rich in hydrocarbon generation. The research on high-quality source rocks is mainly concentrated in the interior of the basin, but there is little research on the characteristics and formation mechanism of source rocks in subsag at the margin of sag. Based on the latest data of earthquake, geochemistry and elements analysis, the geochemical characteristics and formation mechanism of source rocks in the Northeast subsag of Huizhou 26 sag are studied in detail. High quality source rocks were developed in WC4 Formation, with high abundance of organic matter, with an average content of 4.59%, which can reach the standard of “good-very good” source rocks, and organic matter type is I-II₁, mainly oil-type source rock. During the sedimentary period of the WC4 Formation, Huizhou 26 northeast subsag was strongly faulted, forming a “Deep basin in sag edge”, Less terrigenous debris input, which provided a favorable sedimentary environment for the development of source rocks. Volcanic activities in the same period provided rich inorganic nutrients, form a salt water environment, cause the plankton bloom, and promote the large-scale formation and preservation of organic matter. The comprehensive analysis shows that the discovery of high-quality source rocks in WC4 Formation, Huizhou 26 northeast subsag, expands the distribution of high-quality source rocks to the edge of the sag, which lays a hydrocarbon generation foundation for the future exploration and discovery of the sag, and has important reference significance for the evaluation and exploration potential analysis of subsag at the edge of fault basin in other areas.

Key words: faulted basin; hydrocarbon source rocks; geochemical characteristics; sedimentary genesis; Huizhou 26 northeast subsag

珠江口盆地珠一坳陷惠州凹陷惠州 26 洼文昌组沉积时期湖盆强烈断陷, 湖盆面积广阔, 沉积半

深湖-深湖相泥岩, 沉积厚度大, 分布面积广, 是惠州 26 洼主力烃源岩发育层系^[1-2]。惠州 26 洼为已证

资助项目: 南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究项目 (CN00C-KJ135ZDXM37SZ)

作者简介: 贾培蒙 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气勘探研究工作, E-mail: jiapm@cnooc.com.cn

收稿日期: 2022-02-17; 改回日期: 2022-03-23. 张现荣编辑

实的富生烃洼陷,洼陷周缘发现规模油气藏,是南海东部地区勘探程度最高的地区之一。然而,以往的研究认为优质烃源岩主要集中在洼陷中心地区^[3-5],其边缘洼陷受湖盆深度、物源输入等不利因素的影响,难以发育优质的烃源岩,目前尚无对惠州 26 洼边缘洼陷烃源岩特征及形成条件的研究成果。

本文以惠州 26 洼东北次洼为研究区,根据最新的钻井、分析化验、地震资料,对研究区文四段烃源岩特征进行详细的分析和研究,全面评价该区烃源岩质量,并探讨边缘洼陷优质烃源的发育条件,一方面,弥补惠州 26 洼边缘洼陷烃源岩研究空白,扩大该洼陷烃源岩分布范围,为该洼陷未来勘探研究奠定生烃基础;另一方面,为珠一坳陷及其他地区边缘洼陷烃源岩预测与评价提供参考。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于华南大陆南缘,南海北部大陆边缘,是该区域最大的中、新生带裂陷沉积盆地。盆地由北向南划分为北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、中部坳陷带、南部隆起带及南部坳陷带 6 个构造单元^[6-8]。珠一坳陷位于珠江口盆地北部坳陷,整体呈 NE 走向,是夹持在北部隆起带和中央隆起带之间的一个负向构造单元。

研究区惠州凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷中部(图 1),为珠江口盆地东部已证实的最富烃凹陷之一^[1,7,9-10],由 11 个洼陷组成,地层发育完整,由老到新为中生带基底,新生代裂陷期神狐组(E_1s)、文昌组(E_2w)、恩平组(E_2e),裂后期珠海组(E_3z)、珠江

组(N_{1z})、韩江组(N_{1h})、粤海组(N_{1y})、万山组(N_{2w})及第四系(Q)沉积地层。其中,惠州 26 洼位于惠州凹陷东南部,文昌组为其主要烃源岩发育层系,受构造抬升(惠州运动)影响,惠州 26 洼上文昌组地层(文一段、文二段、文三段)缺失,仅保留下文昌组文六段(WC6)、文五段(WC5)和文四段(WC4)地层,其中,文五段和文四段为最主要的烃源岩层发育段。

惠州 26 洼东北次洼位于惠州 26 洼东北部,西临惠州 21 潜山披覆构造带,东侧为东沙隆起(图 2),文昌组沉积文五段和文四段地层,但文五段地层较薄,文四段地层厚度大,为其主力烃源岩发育层系。

2 样品与分析

本次研究的样品来自惠州 26 洼东北次洼惠州 27-A 井。为系统分析惠州 26 洼东北次洼烃源岩、沉积环境,针对该井文昌组文四段,共采集 15 个泥岩岩屑样品和 3 颗井壁芯样品,进行岩石热解分析,对其中部分样品进行生物标志化合物、碳同位素等分析。另外,采集 56 个岩屑样品进行常量与微量元素分析。泥岩岩石热解实验采用法国万琪公司 ROCK-EVAL6 岩石热解仪,岩石抽提烃色谱-质谱实验采用安捷伦公司 Agilent 7890 A 气相色谱仪、6890 N 和 5973C 色谱-质谱仪,元素分析采用荷兰帕纳科公司 Axios MAX X 射线荧光光谱仪(偏差 < 0.05%)和 ELEMENT XR 等离子体质谱仪(偏差 < 0.1%)。样品分析测试工作均在长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室完成。

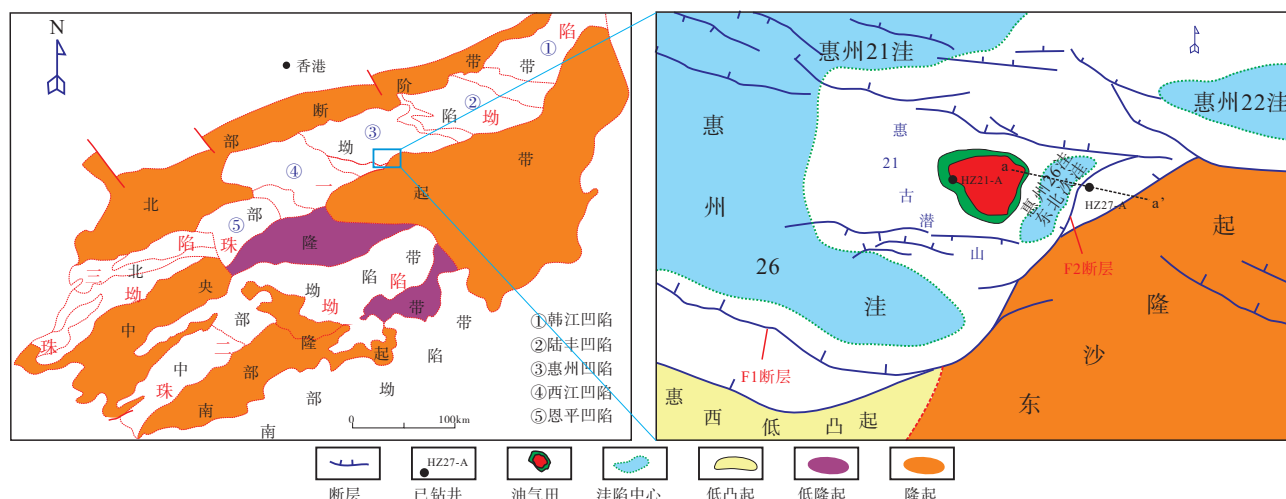


图 1 研究区构造位置图

Fig.1 The structure position of the study area

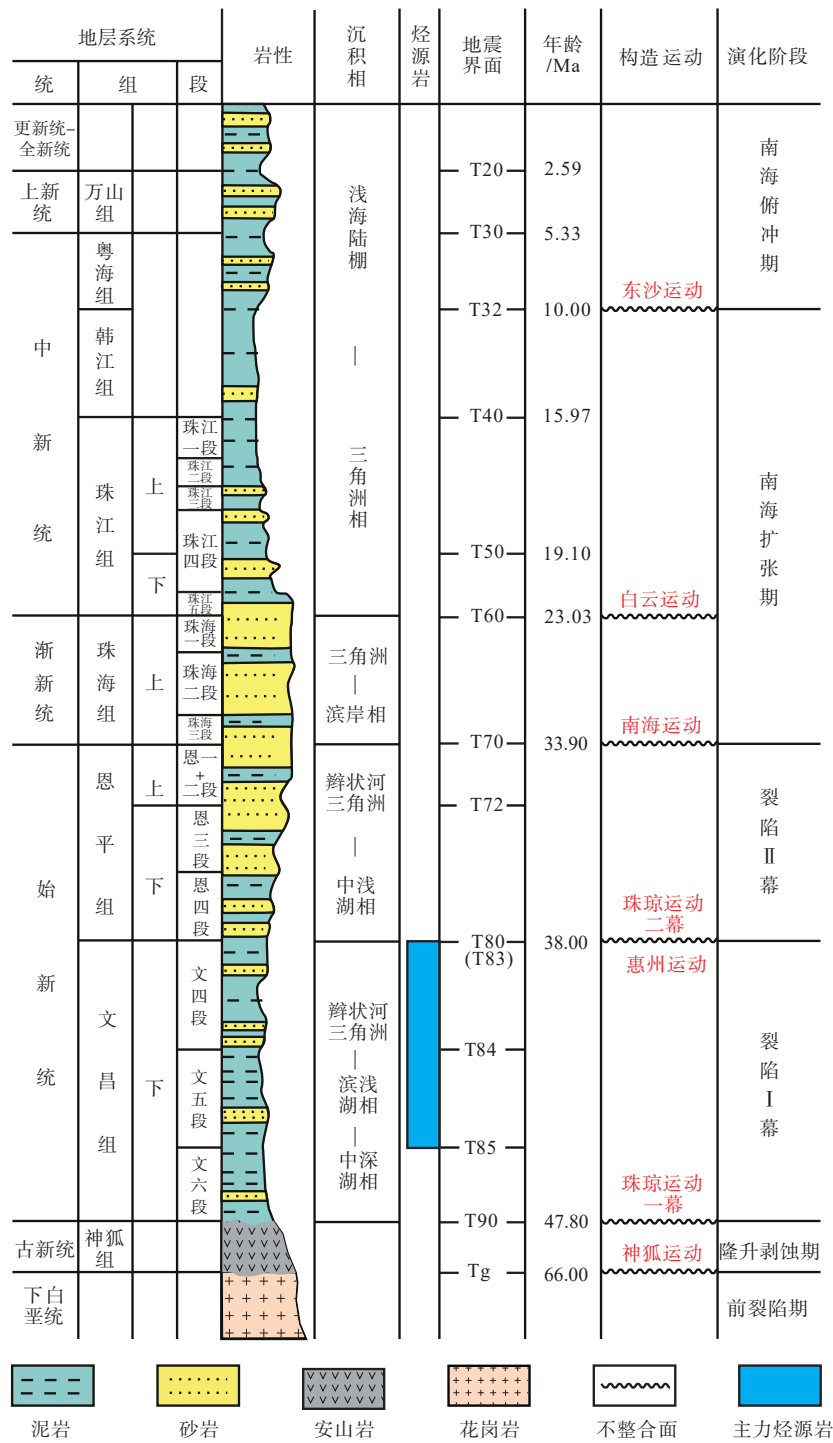


图2 研究区地层综合柱状图

Fig.2 The comprehensive stratigraphic column of the study area

3 烃源岩地化特征

3.1 有机质丰度

有机质丰度是评价烃源岩生烃能力的重要参数之一。热解分析结果表明,总有机碳含量(TOC)为2.34%~8.14%,平均值4.39%;生烃潜量(S₁+S₂)

为12.54~44.22 mg/g,平均为21.06 mg/g。根据烃源岩评价行业标准,对惠州26洼东北次洼文四段烃源岩进行评价(图3),结果表明,文四段烃源有机质丰度为“好—很好”,具有较好的生烃能力。

3.2 有机质类型

有机质类型是有机质重要的质量指标,对烃源

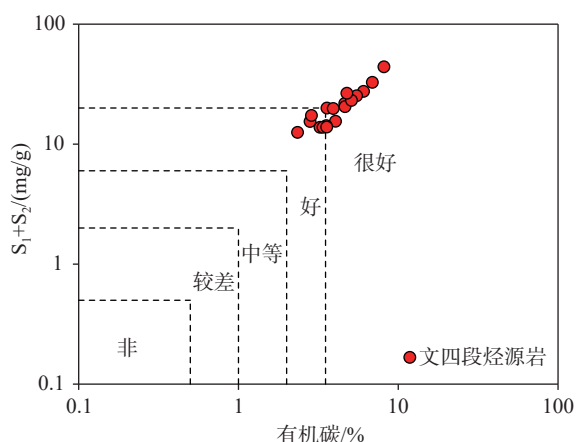


图 3 惠州 26 洼东北次洼文昌组文四段烃源岩有机质丰度判别

Fig.3 Discrimination of the organic matter abundance in WC4 source rocks of Huizhou 26 northeast subsag

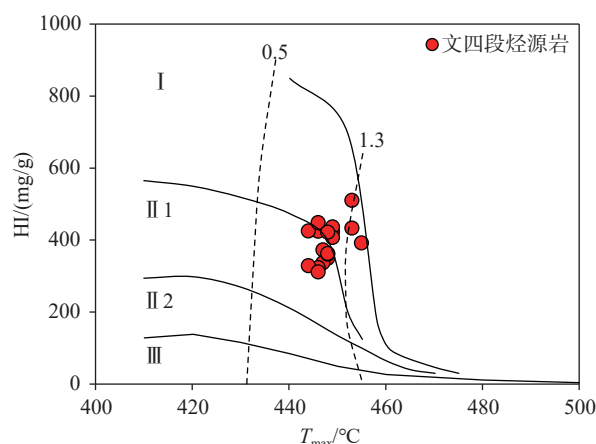


图 4 惠州 26 洼东北次洼文昌组文四段烃源岩 T_{max} 与氢指数有机质类型划分

Fig.4 The division of organic matter types by T_{max} and HI in WC4 source rocks of Huizhou 26 northeast subsag

岩生烃潜力评价起着重要作用。根据烃源岩热解参数、干酪根显微组分等分析结果, 综合分析惠州 26 洼东北次洼烃源岩主要类型为 I 和 II₁ 型。

热解分析结果显示, 烃源岩最高热解温度 T_{max} 为 444~455 °C, 氢指数 HI 为 312~511 mg/g, 平均值为 393 mg/g。以最高热解温度 T_{max} 为横坐标, 氢指数为纵坐标, 绘制有机质类型划分图(图 4), 结果显示, 文昌组文四段烃源岩有机质类型包含 I 和 II₁, 有机质类型较好, 以生油为主。从干酪根显微组分可以发现(表 1), 文四段烃源岩腐泥组和壳质组含量最高, 两者占比 93%~99%, 壳质组及惰质组含量低, 表明母质类型为低等水生生物, 同时有少量高等植物的贡献。通过计算有机质类型指数(TI)^[11], 判断文四段烃源岩干酪根类型主要为 I 和 II₁ 型。

3.3 生物标志化合物特征

前人研究认为, 烃源岩生物标志化合物特征可反映沉积环境、母质类型和有机质热演化程度等差异^[12-13]。惠州 26 洼东北次洼 HZ27-A 井饱和烃色谱呈现前峰型特征, 长侧链三环萜烷以 C₂₃ 三环萜烷为主峰呈正态分布, 奥利烷和双杜松烷含量较低,

甾烷系列中 C₃₀ 4-甲基甾烷含量丰富, 整体反应该类型烃源岩生源以低等水生藻类为主, 但存在少量高等植物贡献; 烃源岩姥植比为 2.27; Ts、重排藿烷、C₂₉ 新藿烷含量较高, 反应该类型烃源岩沉积时期水体为弱氧化—弱还原的环境。该类型烃源岩与周边 HZ21-A 井同层段滨浅湖相烃源特征存在明显差异(图 5), 代表研究区广泛揭示的文昌组中深湖相烃源岩特征。

4 断陷盆地边缘洼陷优质烃源岩成因探讨

4.1 文昌期强烈断陷形成“洼缘深盆”沉积环境

控洼断层活动性是控制湖盆发育主要因素之一。惠州 26 洼为“南断北超”的半地堑结构, 洼陷形成主要受控于其南部的控洼边界 F1 断层(图 2、图 6a), 该断层与惠州 26 洼东北次洼主控 F2 断层活动时间存在一定差异, 通过对断层活动性的分析发现, F1 断层在文昌组沉积时期持续强烈活动, 而 F2 断层文五段沉积时期开始微弱活动, 文四时期到达活动顶峰, 至恩平期断层活动性先减弱后又逐步增强。

表 1 惠州 26 洼东北次洼文昌组文四段烃源岩干酪根显微组分和类型指数

Table 1 Organic microscopic composition and kerogen types in WC4 source rocks of Huizhou 26 northeast subsag

井名	深度/m	层位	岩性	腐泥组/%	壳质组/%	镜质组/%	惰性组/%	类型指数	类型
	3 815~3 819			65	33	2	2	80	I
HZ27-A	3 860~3 868	文四段	泥岩	41	54	5	5	64	II ₁
	3 880~3 890			29	64	7	7	56	II ₁

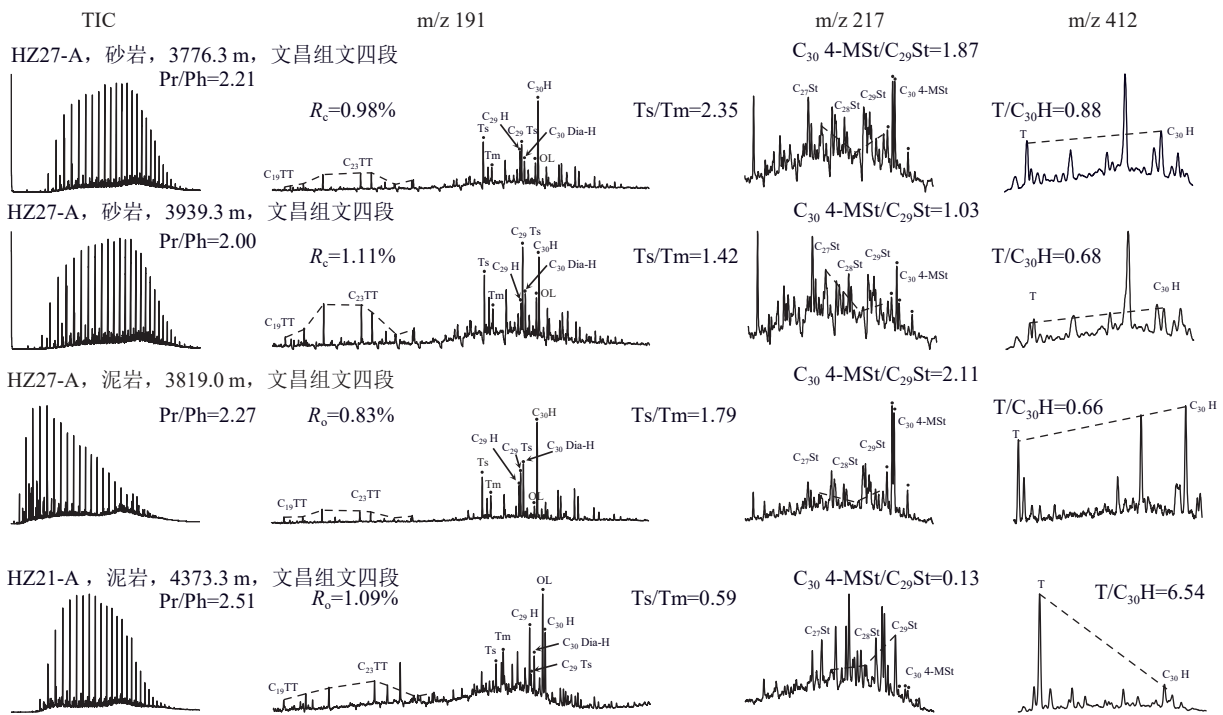


图5 HZ27-A井和HZ21-A典型砂岩及烃源岩生物标志化合物特征

C_{27} . 20R-5 α (H), 14 α (H), 17 α (H)-胆甾烷; C_{28} . 20R-24-甲基-5 α (H), 14 α (H), 17 α (H)-胆甾烷; C_{29} . 20R-24-乙基-5 α (H), 14 α (H), 17 α (H)-胆甾烷; Ts. 18 α (H)-22, 29, 30-三降藿烷; Tm. 17 α (H)-22, 29, 30-三降藿烷; C_{30} Dia-H. C_{30} -重排藿烷; OL. 奥利烷; C_{30} H. 17 α (H), 21 β (H)-藿烷; T. 树脂化合物 T。

Fig.5 Biomarker characteristics of sandstone and source rocks of HZ27-A and HZ21-A

C_{27} . 20R-5 α (H), 14 α (H), 17 α (H)-Cholestane; C_{28} . 20R-24-Methyl-5 α (H), 14 α (H), 17 α (H)-Cholestane; C_{29} . 20R-24-Ethyl-5 α (H), 14 α (H), 17 α (H)-Cholestane; Ts. 18 α (H)-22, 29, 30-Trisnorhopane; Tm. 17 α (H)-22, 29, 30-Trisnorhopane; C_{30} Dia-H. C_{30} -Rearrangement hopane; OL. Oleanane; C_{30} H. 17 α (H), 21 β (H)-Hopane; T. Resin compound T.

运用 2D Move 软件对洼陷边缘典型地震剖面进行平衡剖面(图 2)恢复, 建立惠州 26 洼东北次洼湖盆演化过程(图 6b)。在断陷、凹陷的共同作用下, 惠州 26 洼东北次洼文五段沉积时期开始缓慢发育, 文四段沉积时期湖盆快速裂陷, 形成“洼缘深盆”沉积环境, 沉积厚层的文四段地层, 最大厚度达约 800 m, 为优质烃源岩的发育奠定了沉积环境和物质基础。

4.2 源区碎屑物质输入少

位于惠州 26 洼东北次洼东、西两侧的东沙隆起与惠州 21 洼火山岩潜山, 是该次洼的主要物源区(图 7), 但两者向洼陷碎屑物质供给均较少。

东沙隆起主要为中生界白垩统酸性侵入岩, 侵入时间约为 116 Ma^[14], 岩性为花岗岩, 侵位后持续遭受剥蚀并逐步暴露地表, 至渐新统珠海组晚期才被沉积物覆盖, 可持续向洼陷供源。“源-汇”体系研究发现, 惠州 26 洼东北次洼临近的东沙隆起区供源面积较小, 仅约 20 km², 且剥蚀形成的碎屑物质主要向地势更低的东部残洼搬运, 同时沟谷体系

不明显, 仅发育浅小的沟谷, 碎屑物质向惠州 26 洼东北次洼方向输运能力非常有限。惠州 21 洼为古新统神狐组火山岩潜山, 喷发时间约为 56~60 Ma, 岩性主要为中性安山岩和粗安岩, 均为隐晶、微晶质结构, 抗风化能力弱, 且文四段沉积时期潜山大部分区域已被文五段富泥地层覆盖, 火山岩物源区面积较小, 仅约为 11 km², 且在文四段沉积早期即被水体淹没, 风化剥蚀时间短, 因此, 向惠州 26 洼东北次洼供应碎屑物质质量极少。

该洼陷惠州 27-A 井位于洼陷东部, 临近东沙隆起, 钻遇文昌组地层厚度约为 281 m, 整体表现为厚层泥岩夹薄层砂岩的特征, 泥地比约为 67.9%, 表明文四段沉积时期碎屑物质输入量少, 为烃源发育保留足够的可容纳空间。

4.3 火山喷发活动

前人研究认为, 有机质高产出是优质烃源岩形成的物质基础^[15], 而且优质烃源岩发育过程中普遍伴有岩浆活动^[16-21], 火山喷发作用形成的物质可阶段性改变湖盆生化环境, 促进有机质的生产和保存。

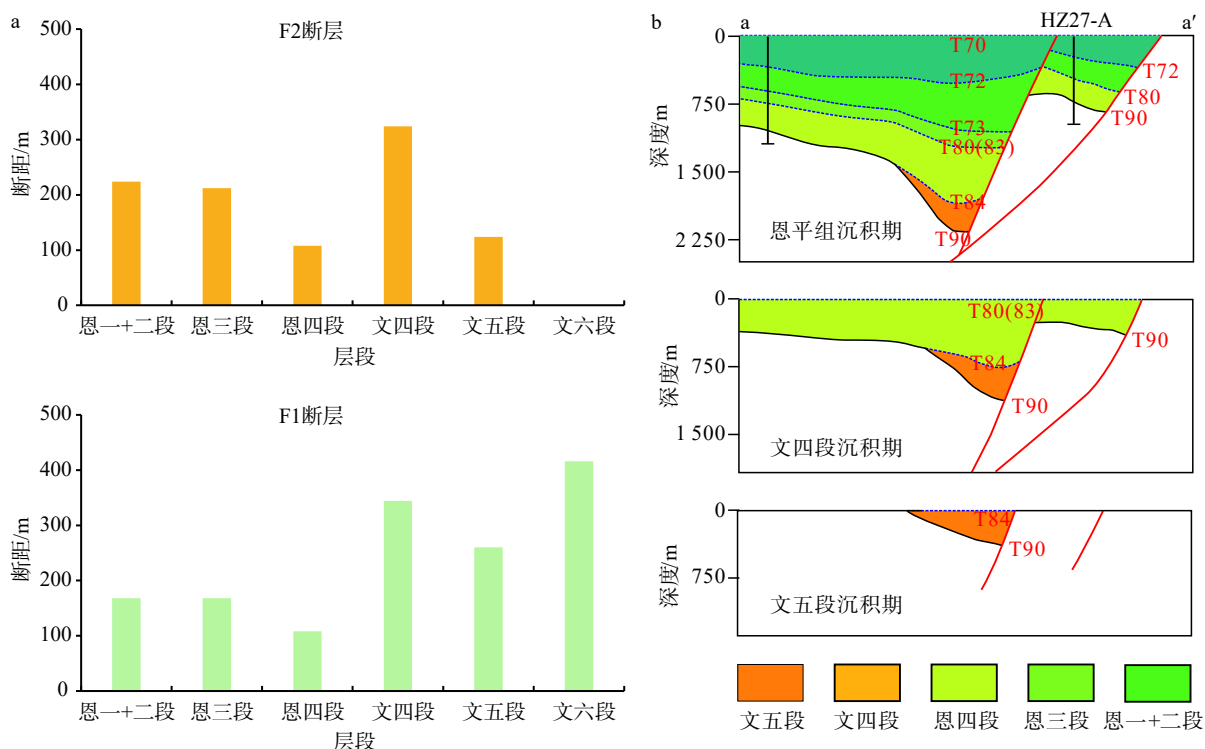


图 6 惠州 26 洼控洼边界断层活动性分析及惠州 26 洼东北次洼构造演化

a. 断层活动性分析, b. 惠州 26 洼东北次洼构造演化。

Fig.6 Boundary faults activity analysis of Huizhou 26 sag and Tectonic evolution of Huizhou 26 northeast subsag

a. Fault activity analysis, b. tectonic evolution of northeast sub-depression of Huizhou 26.

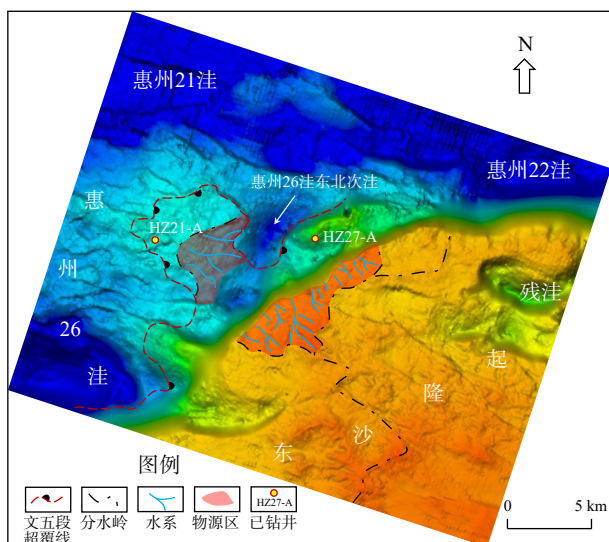


图 7 惠州 26 洼东北次洼周边地区基底地貌及源汇体系

Fig.7 Basement geomorphology map and source-sink system of the Huizhou 26 northeast subsag surrounding area

惠州 26 洼东北次洼文四段沉积时期伴有多期火山活动, HZ27-A 井壁碎屑岩薄片分析显示, 陆源碎屑颗粒间火山碎屑物质充填特征显著, 主要为火山灰和晶屑, 并可见塑形浆屑(图 8), 整体火山碎屑含量约 15%~20%, 表明文四段沉积时期伴有火山

活动。

火山喷发形成的火山物质降落或随水流进入湖盆, 有利于有机质的快速形成。火山物质含有丰富的生物生长所需要的元素^[22], 由于性质不稳定, 容易发生水解, 无机营养元素如磷、硫、铁、钙和微量元素如铁、辛、锰、镍等进入水体后, 水体逐步富营养, 形成“咸水”环境, 促进藻类等生物的勃发和初级生产力的提高^[15,23-25], 有机质的形成速度大幅提高。常量和微量元素分析结果显示, 文四段沉积时期的钙、磷、硫、铁、锰、镍等营养元素阶段性正异常特征显著, 特别是烃源岩主要发育层段 II, 表明该时期水体营养元素供应充足, 并随火山活动强弱波动变化。同时古盐度指标 Sr/Ba 值为 1.1~2.95, 平均值 1.91(图 9), 一般认为当 Sr/Ba>1 为咸水环境^[26], 说明该时期惠州 26 洼东北次洼水体为咸水环境。前人研究认为, 以陆源高等植物为主的烃源岩氯仿沥青“A”碳同位素与以水生藻类为主的一般营养性湖泊相比会偏重, 但若湖泊藻类勃发, 藻类与湖水碳交换导致碳同位素倒转偏重。目前, 珠一坳陷已钻遇以陆源高等植物贡献为主的浅湖相烃源岩、水生藻类正常发育的中深湖相烃源岩和藻类勃发的中深湖相 3 类烃源岩。惠州 26 东北次洼

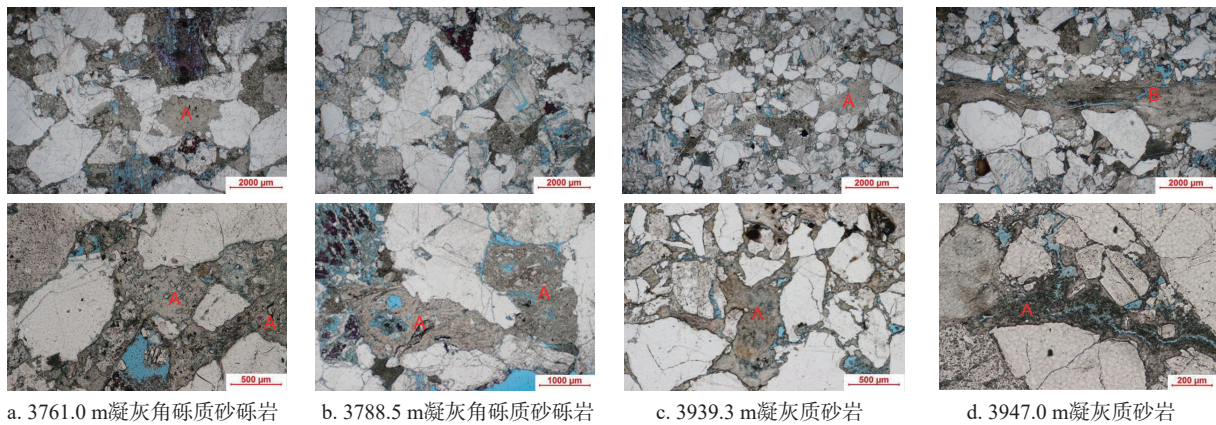


图8 惠州26洼东北次洼HZ27-A井井壁芯薄片鉴定结果

a. 主要由陆源碎屑颗粒、火山碎屑组成, 粒间主要充填火山灰和晶屑(A); b. 主要由陆源碎屑颗粒、火山碎屑组成, 粒间主要充填自生高岭石、火山灰(A); c. 主要由碎屑颗粒、火山碎屑组成, 粒间主要充填火山灰和少量晶屑(A); d. 主要由陆源碎屑颗粒、火山碎屑组成, 粒间主要充填火山灰(A), 见塑形岩浆屑(B)。

Fig.8 Thin section authentication results of HZ27-A sidewall cores, HZ26 northeast subsag

a. Consisting mainly of terrigenous clastic particles and pyroclastic particles, with intergranular filling of volcanic ash and crystal chips (A); b. Consisting mainly of terrigenous clastic particles and pyroclastic particles, with intergranular filling of authigenic kaolinite and volcanic ash (A); c. Consisting mainly of terrigenous clastic particles and pyroclastic particles, with intergranular filling of volcanic ash and a small amount of crystal chips (A); d. Consisting mainly of terrigenous clastic particles and pyroclastic particles, with intergranular filling of volcanic ash (A) and plastic magma fragment visible (B).

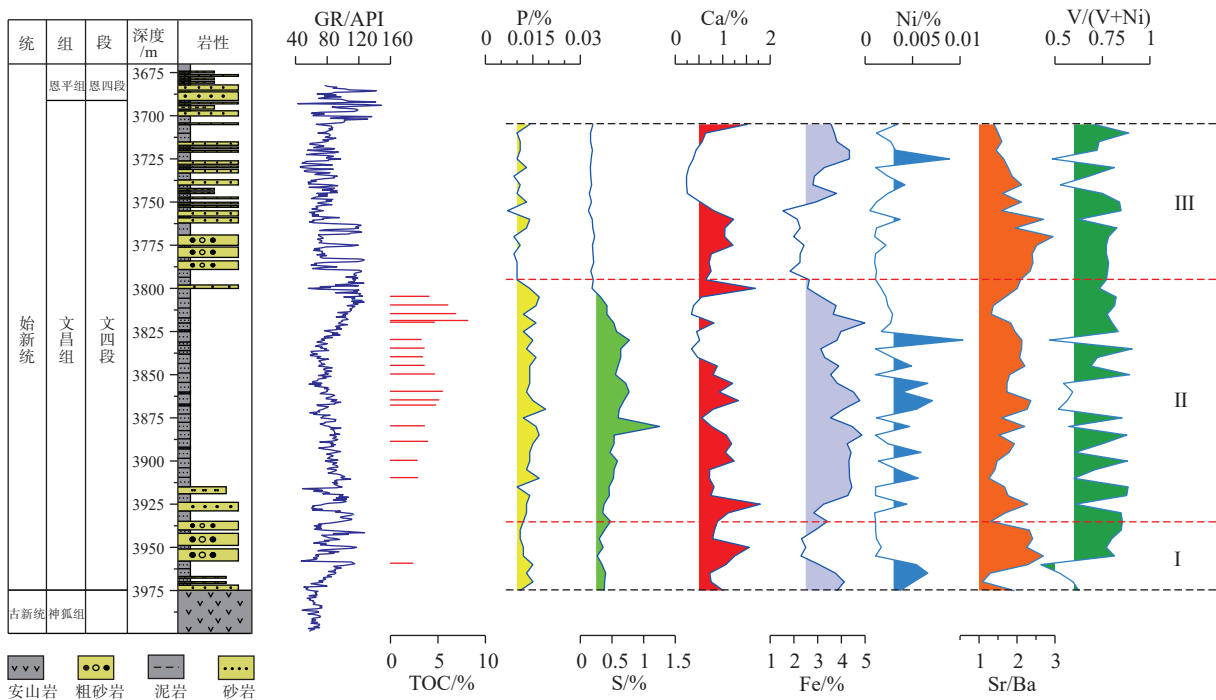


图9 HZ27-A井综合柱状图及沉积环境分析替代指标

Fig.9 Comprehensive histogram of well HZ27-A and substitution index of sedimentary environment analysis

烃源岩藻类含量高, 与浅湖相以及一般营养性中深湖相湖泊相比, 碳同位素发生明显倒转, 整体偏重, 表明本地区湖泊水体富营养, 导致藻类异常勃发(图10)。此外, 火山活动也释有害物质, 如铜、氯化氢等, 导致生物快速规模死亡, 甚至灭绝^[27], 有机质短期堆积富集。另外, 受幕式构造活动的影响,

火山喷发通常具有间歇性特征, 受此影响, 生物勃发与短期规模死亡交替出现, 为烃源岩的形成提供了充足的有机质基础。

良好的保存条件是优质烃源岩形成的重要条件, 还原环境有利于有机质保存。火山爆发释放还原性气体, 如 H₂S、SO₂ 等, 消耗水中的氧气, 并导致

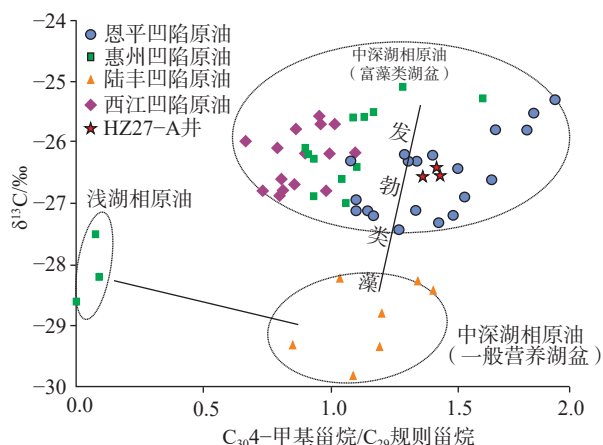


图 10 碳同位素-四甲基甾烷丰度散点图

Fig.10 Scatter plot of carbon isotope vs. tetramethylsterane abundance

水体发生重力分异, 在深层形成还原环境^[28]。微量元素 $V/(V+Ni)$ 值可用于指示水体的氧化还原环境, $V/(V+Ni) < 0.6$, 为氧化环境, $0.6 < V/(V+Ni) < 0.84$, 为氧化还原环境, $V/(V+Ni) > 0.84$, 为还原环境^[29], HZ27-A 井文四段 $V/(V+Ni)$ 值为 0.43~0.91, 均值为 0.73 (图 9), 表明水体环境为氧化还原-还原环境, 有利于烃源岩的保存。

5 结论

(1) 已钻井证实, 惠州 26 洼东北次洼发育文昌期文四段烃源岩, 有机质丰度高, 可以达到“好-很好”的烃源岩标准, 有机质类型为 I—II₁ 型, 为油型烃源岩。

(2) 强烈断陷在洼陷边缘形成深水环境, 构成烃源岩发育的有利沉积环境, 物源区碎屑物质输入少, 火山活动提供丰富的营养物质促进浮游生物的勃发, 并形成有利保存的还原环境, 从而在边缘洼陷形成“深湖盆、富营养”沉积环境, 发育优质烃源岩。

(3) 洼陷边缘优质烃源岩的发现表明, 文昌组沉积时期, 边缘洼陷同样具有发育优质中深湖相烃源岩的条件, 有效烃源的发现为研究区周边地区勘探提供充足的烃源基础, 东沙隆起临洼区可作为勘探重点区域。

参考文献 (References)

[1] 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. Great discovery and significance of new frontier exploration in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(4): 22-30.]

[2] 史玉玲, 刘杰, 温华华, 等. 珠江口盆地惠州26-6烃源岩热压模拟实验及生气潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(11): 53-59. [SHI Yuling, LIU Jie, WEN Huahua, et al. Thermo-compression simulation experiment and gas generation potential analysis of Huizhou 26-6 source rocks in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(11): 53-59.]

[3] 朱俊章, 施和生, 谢泰俊, 等. 惠州26-2油田油藏地球化学特征及其地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2007, 12(2): 34-40. [ZHU Junzhang, SHI Hesheng, XIE Taijun, et al. Geochemical features and geological significance of oil reservoir in Huizhou 26-2 oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 12(2): 34-40.]

[4] 李友川, 陶维祥, 孙玉梅, 等. 珠江口盆地惠州凹陷及其邻区原油分类和分布特征[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 830-834, 842. [LI Youchuan, TAO Weixiang, SUN Yumei, et al. Classification and distribution of oil in Huizhou Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 830-834, 842.]

[5] 李松峰, 徐思煌, 施和生, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2013, 38(1): 112-120. [LI Songfeng, XU Sihuang, SHI Hesheng, et al. Characteristics of paleogene source rocks and prediction of petroleum resources in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 2013, 38(1): 112-120.]

[6] 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.]

[7] 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.]

[8] 米立军, 张向涛, 陈维涛, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系油气富集规律及下一步勘探策略[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(6): 1-13. [MI Lijun, ZHANG Xiangtao, CHEN Weitao, et al. Hydrocarbon enrichment law of Paleogene Zhu1 depression and its next exploration strategy in Pearl River Mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(6): 1-13.]

[9] 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.]

[10] 杜家元, 施和生, 丁琳, 等. 惠州凹陷油气成藏期次划分及其勘探意义[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(4): 221-226. [DU Jiayuan, SHI Hesheng, DING Lin, et al. Division of hydrocarbon accumulation stages in Huizhou depression and their exploration significance [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(4): 221-226.]

[11] 陈建渝, 郝芳. 有机岩石学研究有机质类型和成熟度的改进[J]. *石油实验地质*, 1990, 12(4): 426-431. [CHEN Jianyu, HAO Fang. Improvement on study of organic types and maturation with organic pet-

- rology [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1990, 12(4): 426-431.]
- [12] 梅玲, 张枝焕, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(6): 40-46. [MEI Ling, ZHANG Zhihuan, WANG Xudong, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32(6): 40-46.]
- [13] 张参, 阳宏, 王飞龙, 等. 渤中凹陷南洼东营组烃源岩有机地球化学特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(11): 35-44. [ZHANG Can, YANG Hong, WANG Feilong, et al. Organic geochemistry of the source rocks in the Dongying formation of the South Bozhong subsag [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(11): 35-44.]
- [14] 贾培蒙, 张向涛, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州凹陷惠州21古潜山的形成演化及其对深层油气成藏的控制[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 27-37. [JIA Peimeng, ZHANG Xiangtao, CHEN Weitao, et al. Tectonic evolution of Huizhou 21 buried hill and its control over deep oil accumulations in the Huizhou sag of Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(12): 27-37.]
- [15] 刘池洋, 赵俊峰, 马艳萍, 等. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 75-88. [LIU Chiyang, ZHAO Junfeng, MA Yanping, et al. The advances and problems in the study of the characteristics and formation of hydrocarbon-rich sag [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 75-88.]
- [16] Su W B, He L Q, Wang Y B, et al. K-bentonite beds and high-resolution integrated stratigraphy of the uppermost Ordovician Wufeng and the lowest Silurian Longmaxi Formations in South China [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2003, 46(11): 1121-1133.
- [17] 高有峰, 王璞珺, 王成善, 等. 松科1井南孔选址、岩心剖面特征与特殊岩性层的分布[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 669-675. [GAO Youfeng, WANG Pujun, WANG Chengshan, et al. Well site selecting, core profile characteristics and distribution of the special lithology in CCSD-SK II [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(5): 669-675.]
- [18] 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 等. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1138-1146. [QIU Xinwei, LIU Chiyang, LI Yuanhao, et al. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1138-1146.]
- [19] 李光云. 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩油藏形成条件与主控因素[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2010 [LI Guangyun. The forming condition and the key controlling factor of the upper Carboniferous volcanic oil pool in Malang sag of Santanghu basin[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2010.]
- [20] 单玄龙, 李吉焱, 陈树民, 等. 陆相水下火山喷发作用及其对优质烃源岩形成的影响: 以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 56(11): 1926-1933. [SHAN Xuanlong, LI Jiyan, CHEN Shumin, et al. Subaquatic volcanic eruptions in continental facies and their influence on high quality source rocks shown by the volcanic rocks of a faulted depression in Northeast China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(11): 1926-1933.]
- [21] 杜景霞, 石文武, 周贺, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷火山岩锆石年代学及形成模式[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 742-748. [DU Jingxia, SHI Wenwu, ZHOU He, et al. Zircon U-Pb age and formation model of volcanic rocks from Nanpu Sag of Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 742-748.]
- [22] 金强, 翟庆龙. 裂谷盆地的火山热液活动和油气生成[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 342-349. [JIN Qiang, ZHAI Qinglong. Volcanic and thermal-water activities and hydrocarbon generations in the rift basins, eastern China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(3): 342-349.]
- [23] 张文正, 杨华, 彭平安, 等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J]. 地球化学, 2009, 38(6): 573-582. [ZHANG Wenzheng, YANG Hua, PENG Pingan, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 2009, 38(6): 573-582.]
- [24] 陈小霞, 吴振强, 梁世中. 藻类对微量元素的生物富集及其机理探讨[J]. 食品与发酵工业, 1999, 25(4): 56-60. [CHEN Xiaoxia, WU Zhenqiang, LIANG Shizhong. Bioenrichment of trace elements by algae and discussion on its mechanisms [J]. *Food and Fermentation Industries*, 1999, 25(4): 56-60.]
- [25] 谢世文, 王宇辰, 舒誉, 等. 珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 159-169. [XIE Shiwen, WANG Yuchen, SHU Yu, et al. Environmental reconstruction for the paleo-lake of Zhu I depression and the depositional model for high-quality source rocks [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 159-169.]
- [26] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25. [ZHENG Rongcai, LIU Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 20-25.]
- [27] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 53(1-2): 1-33.
- [28] Hartnett H E, Devol A H. Role of a strong oxygen-deficient zone in the preservation and degradation of organic matter: a carbon budget for the continental margins of northwest Mexico and Washington State [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(2): 247-264.
- [29] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1-4): 111-129.