

郑仰帝, 彭光荣, 朱俊章, 等. 珠江口盆地陆丰 15 披覆构造带油藏地球化学特征及油源对比[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 47-57.

ZHENG Yangdi, PENG Guangrong, ZHU Junzhang, et al. Geochemical characteristics and oil source correlation of reservoirs in Lufeng 15 drape structural belt, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(7): 47-57.

珠江口盆地陆丰 15 披覆构造带油藏地球化学特征及油源对比

郑仰帝^{1,2}, 彭光荣^{1,2}, 朱俊章^{1,2}, 肖张波^{1,2}, 龙祖烈^{1,2}, 杨兴业^{1,2}, 张小龙^{1,2}

(1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054; 2 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054)

摘要:珠江口盆地陆丰 15 披覆构造带南、北部分别与陆丰 22 洼、陆丰 15 洼毗邻, 常规的油源对比指标无法确定构造带上 S2-1 和 S5-1 油藏的油源, 2 个洼陷都有可能向其供烃。为揭示原油的成因来源, 对该地区原油及烃源岩开展了生物标志物、碳同位素及含氮化合物等特征的精细对比。在研究区原油及源岩中新检测出 4 个 C₂₄ 四环萜烷: 脱-A-奥利烷、脱-A-羽扇烷、新 C₂₄ 四环萜烷及 C₂₄ 17,21-开环藿烷。研究对比发现, S2-1 和 S5-1 油藏原油中 C₂₄ 四环萜烷分布特征与陆丰 22 洼文昌组烃源岩更加吻合, 具有更强的亲缘关系。此外, 全油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素指示 S2-1 和 S5-1 油藏明显区别于陆丰 15 洼生成的原油, 预示着其原油具有陆丰 22 洼烃源岩的贡献。含氮化合物示踪参数指示 S2-1 油藏具有近源充注特征, 进一步验证了陆丰 22 洼烃源岩对 S2-1 和 S5-1 油藏的重要贡献。

关键词:油源; C₂₄ 四环萜烷; 碳同位素; 含氮化合物; 陆丰 15 披覆构造带; 珠江口盆地

中图分类号:P744.4; P618.13

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.271

0 引言

珠江口盆地陆丰 15 披覆构造带南、北侧分别毗邻陆丰 22 洼和陆丰 15 洼, 20 世纪 80 年代勘探发现了 S2-1 和 S5-1 油藏, 一直未能确定其油源, 邻近的 2 个洼陷都有可能向其供烃。近年来, 陆丰 15 洼和陆丰 22 洼的油气勘探各自取得了一定成效, 并分别揭示了文昌组泥质烃源岩, 为解决 S2-1 和 S5-1 油藏的油源问题提供了可能。珠江口盆地古近系文昌组烃源岩生成的原油中富含特有的化合物, 特别是在四环萜烷系列中存在不常见的化合物, 但在以往的研究中没有被重视, 未开展深入研究。NYTOFT 等^[1] 和 SAMUEL 等^[2] 对具有类似成因的原油进行过精细的色谱-质谱分析, 鉴定出这类化

合物, 并明确了它们的成因和来源, 为该类化合物的应用提供了扎实的理论依据。C₂₄ 四环萜烷系列化合物在珠江口盆地的烃源岩和原油中普遍存在, 其中, 脱-A-奥利烷和脱-A-羽扇烷指示陆源有机质输入, C₂₄ 17, 21-开环藿烷与偏氧化的成岩环境中强烈的微生物活动有关, 而新 C₂₄ 四环萜烷与还原环境的微生物活动有关^[3]。朱扬明等^[4] 在珠江口盆地中深湖相原油中发现了一个未知结构的新 C₂₄ 四环萜烷, 经研究发现, 脱-A-奥利烷与其比值可以用来指征生源。笔者对陆丰 15 披覆构造带周边原油、油砂及烃源岩的饱和烃馏分进行分析, 检测出上述 4 个 C₂₄ 四环萜烷化合物, 同时结合碳同位素组成特征、中性含氮化合物示踪参数等指标, 为研究区的油源对比工作提供了必要的地球化学证据。

1 地质背景与样品分析

1.1 区域地质背景

珠江口盆地处于南海北部大陆南缘, 呈 NE—SW 向展布, 盆地面积约 26.68 万 km², 构造上共划

收稿日期: 2022-09-27

资助项目: 中海油科研项目“陆丰 13 洼陡坡带构造-沉积响应及油气成藏规律研究”(SCKY-2023-SZ-06)

作者简介: 郑仰帝(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气成藏地球化学方面的研究工作。E-mail: zhengyd3@cnooc.com.cn

分为北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起带、中央拗陷带、南部隆起带和南部拗陷带 6 个一级构造单元。盆地的形成演化分裂陷、拗陷和块断升降 3 个阶段^[5], 沉积地层从老到新依次为古近系(包括文昌组、恩平组和珠海组)、新近系(包括珠江组、韩江组、粤海组、万山组)及第四系, 沉积环境也从陆相逐渐过渡为海相, 其中, 文昌组和恩平组为断陷沉积地层, 珠海组、珠江组和韩江组为拗陷沉积地层。陆丰凹陷属于珠一拗陷东北部的次级构造单元

(图 1), 面积约 7760 km², 是一个已证实的富生烃凹陷, 研究区位于陆丰凹陷南部地区。陆丰凹陷文昌组发育暗色泥岩, 是主力烃源层系; 恩平组主要为滨浅湖、沼泽相沉积, 是次要的烃源岩层系, 限于热演化成熟和烃源岩品质, 生烃规模有限; 珠海组下部为河湖相沉积, 砂泥岩互层, 局部夹杂杂泥岩, 上部为海陆过渡相沉积, 岩性以大套灰—灰白色砂岩为主; 珠江组下部发育三角洲、滨岸相砂岩沉积, 中上部沉积厚层泥岩夹砂岩, 是新近系主要的储层段。

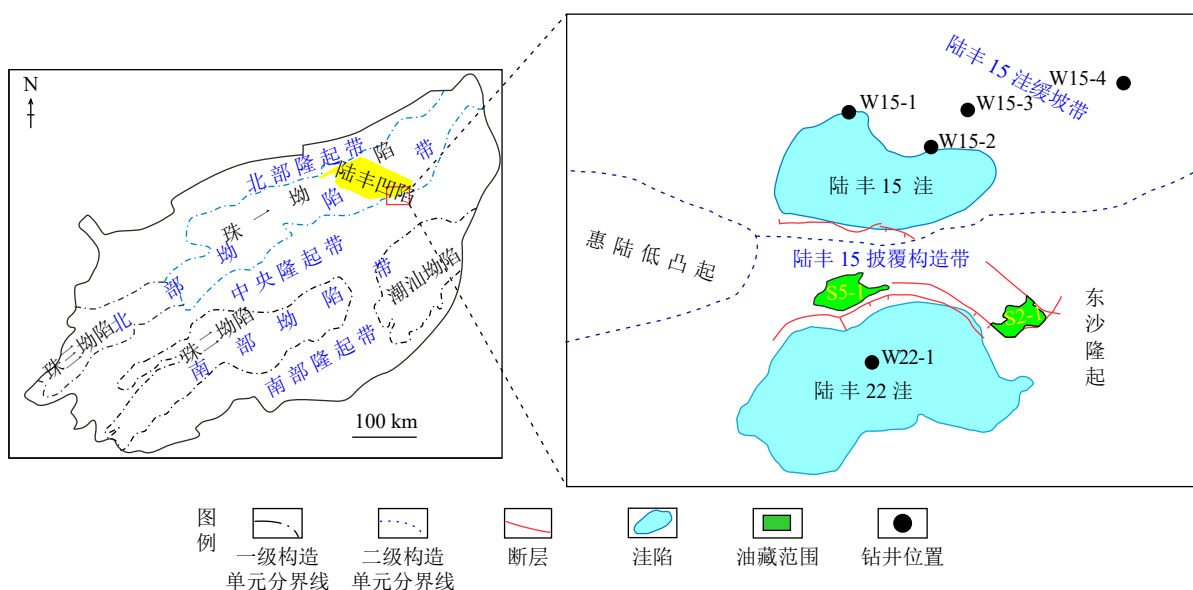


图 1 珠江口盆地构造单元及研究区位置

Fig.1 Tectonic units and location of the study area in the Pearl River Mouth Basin

陆丰凹陷古近系文昌组共划分为 6 段, 由底到顶分别为: 文六段、文五段、文四段、文三段、文二段和文一段(图 2)。文昌组早期受控于惠陆低凸起、陆丰中低凸起、陆丰东低凸起和东沙隆起多个物源, 同时叠加岩浆底辟作用, 广泛发育辫状河三角洲和扇三角洲相沉积体系; 文四段沉积时期断陷作用最强, 形成深水广盆, 浮游生物繁盛, 大面积发育半深湖—深湖相沉积; 随后断裂活动不断减弱, 湖盆逐渐萎缩, 半深湖—深湖相面积明显减小, 主要发育辫状河三角洲沉积^[6]。

1.2 样品和实验

本研究采集了陆丰凹陷南部地区的烃源岩、原油和油砂样品(表 1)。烃源岩样品采自陆丰 15 洼缓坡带的 W15-1、W15-2、W15-3 井以及陆丰 22 洼中隆的 W22-1 井, 岩石类型为灰—灰褐色泥岩, 均来自文昌组。考虑到恩平组泥岩热演化成熟度不高且在陆丰凹陷没有明确见到其成藏贡献, 故未

对恩平组泥岩进行分析。原油样品来自陆丰 15 披覆构造带的 S5-1、S2-1 油藏以及陆丰 15 洼缓坡带的 W15-2、W15-4 井; 油砂样品源自 W22-1 井。

将烃源岩及油砂样粉碎至 100 目, 用氯仿作为溶剂进行 72 h 索氏抽提。针对原油及抽提物, 用正己烷沉淀其中的沥青质, 采用硅胶/氧化铝(2:1 体积比)层析柱法将滤液分离, 提取出饱和烃、芳香烃和非烃馏分; 对饱和烃馏分进行 GC、GC-MS 测定; 再利用尿素络合的方法分离出正构烷烃, 对正构烷烃进行单体碳同位素测定。饱和烃气相色谱-质谱(GC-MS)分析使用 Thermo Trace GC 1300 ULTRA ISQ 气相色谱质谱联用仪完成, 采用 HP-5MS 色谱柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm), 以氦气为载气, 柱流速为 1 mL/min。升温程序为: 50 °C 恒定 15 min, 以 15 °C/min 的速度升至 100 °C, 再以 4 °C/min 的速度升至 300 °C, 保留 20 min。碳同位素测定采用 VG 公司生产的 ISOCHROM II 型色谱-同位素比值质谱, DB-5 弹性毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm),

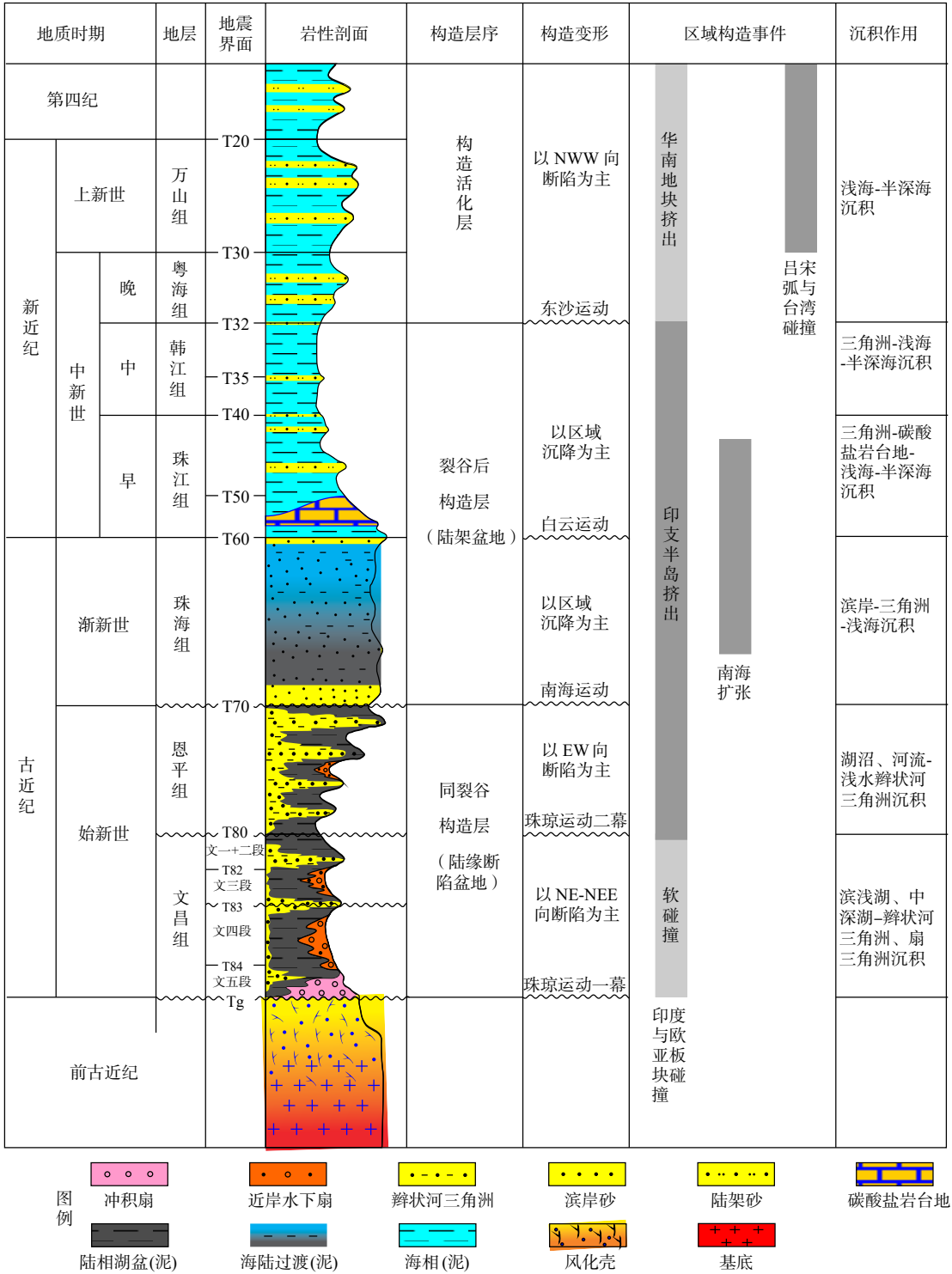


图 2 陆丰凹陷南部地区地层划分及沉积充填序列

Fig.2 Stratigraphic division and sedimentary sequence in the south of Lufeng Sag

氮气做载气,柱流速为 1 mL/min。升温程序为初始温度 80 ℃,恒温 1 min,再以 7 ℃/min 的速率升到 290 ℃,恒温 15 min。单体烃碳同位素标准物质采用 n-Alkanes reference materials of Indiana University,用来校验仪器的运行状况。中性含氮化合物 GC/MS 分析在 HP6890GC/5973MSD 仪器上进

行,使用 HP-5MS 弹性石英毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。升温程序为初始温度 35 ℃,恒温 5 min,以 2 ℃/min 速率升到 120 ℃,再以 4 ℃/min 升到 310 ℃,恒温 13 min。采用 He 载气、EI(70 eV)电子轰击源、MID 多离子方式检测,选用浓度为 0.105 μg/μL 的苯基唑啉标样进行绝对浓度定量分

表 1 样品信息表

Table 1 Information of the samples

样品类型	构造位置	井号	深度/m	岩性	层位	数量/个
烃源岩	陆丰15洼缓坡带	W15-1	3 489~3 501	灰色泥岩	文三段	1
			3 609~3 744	灰色泥岩	文四段	4
		W15-2	3 312~3 318	灰色泥岩	文三段	1
			3 414~3 579	灰褐色泥岩	文四段	10
		W15-3	3 227~3 239	灰色泥岩	文三段	1
			3 257~3 401	灰褐色泥岩	文四段	1
	陆丰22洼洼中隆	W22-1	3 306~3 370	灰褐色泥岩	文三段	3
			3 408~3 420	灰褐色泥岩	文四段	2
原油	陆丰15披覆构造带	S5-1	/	/	下珠江组	1
		S2-1	/	/	下珠江组	4
	陆丰15洼缓坡带	W15-2	/	/	文昌组	2
		W15-4	/	/	下珠江组	2
油砂	陆丰22洼洼中隆	W22-1	3 288~3 534	黄色细砂岩	文昌组	5

注：“/”代表无数据。

析。所有实验分析在中海油深圳实验中心完成,执行相关行业及国家分析标准。

2 烃源岩地球化学特征

陆丰凹陷南部半地堑古近系发育恩平组 and 文昌组 2 套泥质烃源岩。恩平组沉积时期属于断拗型湖盆, 沉积地层含砂率高, 泥岩厚度小, 且总体处于低成熟阶段, 生烃规模有限, 属于次要烃源岩。恩平组泥岩总有机碳(TOC)含量普遍<1%, 氢指数(HI)大多<400 mg/g, 生烃潜力差。目前已发现的原油均源自文昌组湖相烃源岩, 尚未发现恩平组烃源岩的贡献。文昌组沉积时期属于断陷湖盆, 发育半深湖—深湖相沉积, 沉积环境为强还原—弱氧化, 低等水生生物繁盛, 陆源有机质供应有限, 整体生烃能力较好^[7]。文昌组烃源岩是珠玑运动—幕构造活动之后断陷期沉积的产物, 裂陷 I 幕发育文三段和文四段半深湖—深湖相烃源岩, 裂陷 II 幕发育文一+文二段三角洲—滨浅湖相烃源岩^[8]。目前陆丰 15 洼及陆丰 22 洼周边已发现原油均为半深湖—深湖相类型, 不见滨浅湖相源岩的贡献, 因此, 本文只讨论文三段和文四段半深湖—深湖相烃源岩的地球化学特征和生烃潜力。

2.1 有机质丰度及类型

利用 TOC、热解产油潜量 $Pg(S_1+S_2)$ 、氯仿沥青“A”以及总烃含量来评价研究区泥质烃源岩的有机质丰度。陆丰 15 洼文昌组半深湖—深湖相烃

源岩 TOC 分布于 1.1%~4.06%, 平均值 2.52%; Pg 值介于 6.52~28.01 mg/g, 平均值为 15.93 mg/g; 氯仿沥青“A”及总烃含量均值分别为 0.6% 和 2516×10^{-6} , 具备良好的生烃潜力。陆丰 22 洼文昌组半深湖—深湖相烃源岩有机质丰度更高, TOC 分布于 2.02%~4.02%, 平均值为 2.71%; Pg 值介于 12.85~30.66 mg/g, 平均值为 19.15 mg/g; 氯仿沥青“A”及总烃含量均值分别高达 0.76% 和 3015×10^{-6} (表 2)。

有机质类型直接影响着烃源岩的生烃潜力和产物的类型, 利用 HI 和热解峰温 T_{max} 对 2 个洼陷文昌组烃源岩有机质类型进行判识(图 3)。陆丰 15 洼和陆丰 22 洼文昌组半深湖—深湖相泥岩有机质普遍富氢, HI 均值分别为 547 和 630 mg/g, 陆丰 22 洼相对陆丰 15 洼稍高, 生油母质类型均为 I (腐泥型) 和 II 1 型(腐殖-腐泥型), 均具备良好的生油潜能。文昌组烃源岩有机质的显微组分以腐泥组为主, 其中, 陆丰 15 洼干酪根腐泥组含量为 63%~97%, 平均值为 79%; 陆丰 22 洼干酪根腐泥组含量为 68%~81%, 平均值为 76%(表 3), 同样表明有机质类型好。

2.2 成熟度演化

陆丰 15 洼与陆丰 22 洼古地温背景相近, 从烃源岩生排烃史模拟结果来看, 文昌组烃源岩最早在距今 33.9 Ma 开始进入生烃门限, 距今 16~0 Ma 为主要排烃期^[9]。流体包裹体系统分析结合洼陷埋藏史-热演化史模拟结果来看, 陆丰 15 披覆构造带上 S2-1 及 S5-1 油藏的关键成藏期是距今 11.6~9.7 Ma

表 2 研究区文昌组烃源岩的有机质丰度指标

Table 2 Index of organic matter abundance in source rocks of Wenchang Formation in the study area								
洼陷	层位	沉积相	TOC/%	S_1 /(mg/g)	S_2 /(mg/g)	$Pg(S_1+S_2)$ /(mg/g)	氯仿沥青“A”/%	总烃/ 10^{-6}
陆丰15洼	文昌组	半深湖—深湖	1.1~4.06	0.67~3.59	5.85~25.9	6.52~28.01	0.11~0.94	344~4 265
			2.52	1.95	13.97	15.93	0.60	2 516
陆丰22洼	文昌组	半深湖—深湖	2.03~4.02	1.24~3.19	11.34~27.47	12.85~30.66	0.53~1.22	1 788~6 279
			2.71	1.92	17.24	19.15	0.76	3 015

注:表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

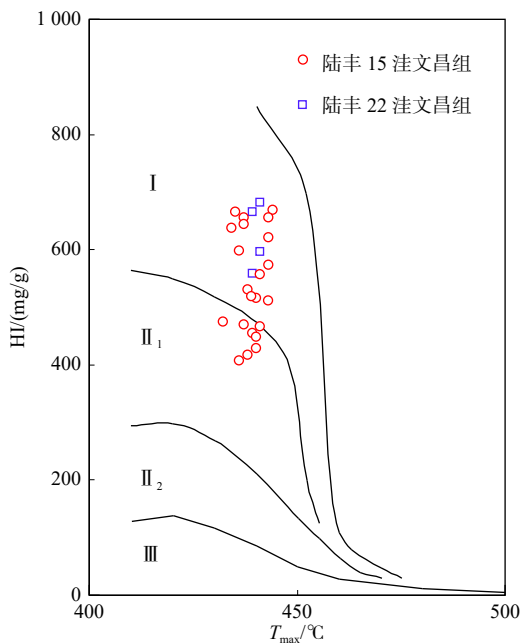


图 3 研究区文昌组烃源岩有机质类型划分

Fig.3 Classification in types organic substance in source rocks of Wenchang Formation in the study area

和距今 4.1~0 Ma 2 个阶段,与洼陷主排烃期匹配良好,晚期的断裂活动与油气主充注期的匹配关系控制了油气的富集成藏。

烃源岩排烃门限的提出为有效源岩的判识提供了理论基础^[10],镜质体反射率 $R_0=0.7\%$ 代表烃源岩进入成熟阶段,且研究区已发现原油利用甲基菲指数(MPI1)计算的成熟度均在 0.7% 以上,故用 $R_0=0.7\%$ 来界定陆丰凹陷文昌组烃源的排烃门限。根据泥岩样品实测镜质体反射率值来看(图 4),陆丰 15 洼泥岩 R_0 值在 3 500 m 深度处达到 0.7%,陆丰 22 洼泥岩 R_0 值则在 3 300 m 深度附近达到 0.7%。陆丰 15 洼文昌组最大埋深约 5 500 m,文昌组地层平均厚度约 700 m,陆丰 22 洼文昌组最大埋深约 4 900 m,文昌组地层平均厚度约 1 000 m,2 个洼陷的文昌组源岩现今均处于成熟—高成熟演化阶段,具有良好的生烃潜力。

表 3 研究区文昌组烃源岩干酪根显微组分

Table 3 Kerogen microscopic components in source rocks of Wenchang Formation in the study area

井名	深度/m	层位	干酪根显微组分/%			
			惰性组	镜质组	壳质组	腐泥组
W15-1	3 609~3 621	文昌组	0	3	22	75
	3 654~3 666	文昌组	0	3	29	68
	3 688~3 700	文昌组	0	2	26	72
	3 732~3 744	文昌组	0	5	29	66
	3 414~3 420	文昌组	0	22	0	78
	3 423~3 429	文昌组	0	6	0	94
W15-2	3 453~3 459	文昌组	0	4	0	96
	3 471~3 477	文昌组	0	13	0	88
	3 489~3 495	文昌组	0	36	0	64
	3 513~3 516	文昌组	0	11	3	86
	3 528~3 534	文昌组	0	6	0	94
	3 543~3 549	文昌组	0	8	0	92
W15-3	3 558~3 564	文昌组	0	3	0	97
	3 573~3 579	文昌组	0	7	0	93
	3 257~3 269	文昌组	0	3	34	63
	3 290~3 302	文昌组	0	2	29	69
	3 320~3 332	文昌组	0	3	25	72
	3 350~3 362	文昌组	0	2	23	75
W22-1	3 389~3 401	文昌组	0	3	26	71
	3 306~3 318	文昌组	0	8	25	68
	3 333~3 345	文昌组	0	3	23	74
	3 358~3 370	文昌组	0	2	18	80
	3 408~3 420	文昌组	0	2	17	81

2.3 分子地球化学特征

对比烃源岩的饱和烃色谱-质谱图(图 5)发现,陆丰 15 洼及陆丰 22 洼文三、文四段泥岩在分子地球化学特征上十分相近,均为半深湖—深湖相沉积。姥鲛烷与植烷比值(Pr/Ph)偏低,为 1.64~3.58,说明源岩均形成于相对还原的环境; $C_{30}4$ -甲基甾烷含量相对丰富,表明源岩具有大量低等水生生物的生源输入^[11];源自陆源高等植物的奥利烷(OL)和源自被子植物的 W、T 树脂化合物含量极低,说明陆

表 4 S2-1 和 S5-1 油藏原油的族组成

Table 4 The group compositions of crude oils in S2-1 and S5-1 reservoirs

油藏	原油编号	层位	族组成/%			
			饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
S5-1	S5-1-1	下珠江组	78.16	10.00	4.74	3.42
	S5-1-2	下珠江组	62.46	10.73	6.31	6.31
S2-1	S2-1-1	下珠江组	69.10	11.46	6.60	9.03
	S2-1-2	下珠江组	66.15	16.49	1.60	1.22
	S2-1-3	下珠江组	62.08	10.96	3.79	13.34
	S2-1-4	下珠江组	60.80	12.96	3.86	9.26

3.2 原油分子地球化学特征

甾烷、萜烷等生物标志化合物是分子级别的微观指标, 这些指标能够反映沉积有机质的生源构成以及热演化程度, 进而可以精细地区分不同来源的原油^[12]。陆丰 15 披覆构造带上 S2-1 和 S5-1 油藏下珠江组原油生物标志化合物特征基本一致(图 6), 属于半深湖—深湖类型的成熟原油, 具体特征表现为: Pr/Ph 低, 介于 2.21~2.55, 反映源岩的沉积水体环境偏还原^[13]; 伽马蜡烷指数介于 0.04~0.07, 说明源岩形成于盐度较低的水体; C₃₀4-甲基甾烷含量

丰富, C₃₀4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷为 0.64~0.72, 表明生烃母质以低等水生生物贡献为主; 奥利烷含量低, 奥利烷指数为 0.14~0.38, 且基本没有检测到 W、T 树脂化合物, 反映了母源先质中陆源高等植物的供给有限^[14-15]。S2-1 和 S5-1 油藏原油为正常成熟原油且成熟度相当, Ts/Tm 为 1.1~1.51, C₂₉ 规则甾烷 ββ/(αα+ββ) 为 0.46~0.61。综合对比原油及烃源岩分子地球化学特征来看, 陆丰 15 披覆构造带上原油与陆丰 15 洼和 22 洼文昌组源岩匹配性均较好, 不能有效地确定其油源, 据此无法判断原油究竟源自陆丰 15 洼还是 22 洼。

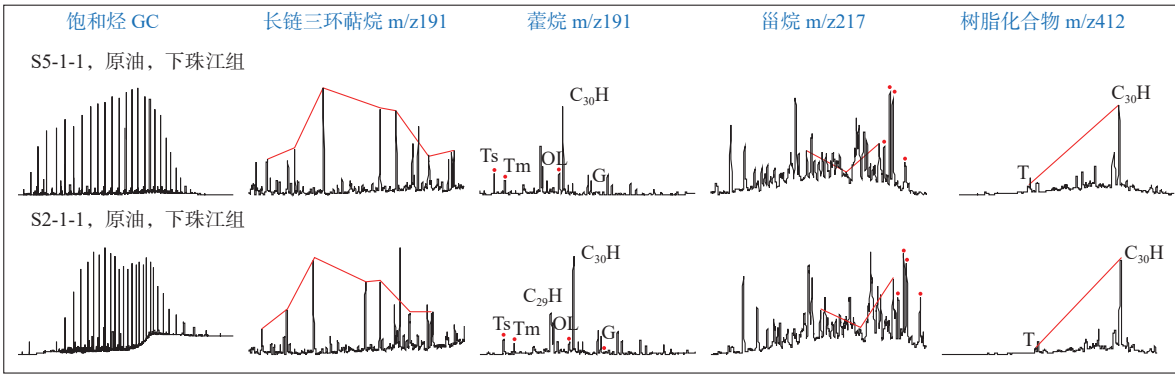


图 6 S2-1 和 S5-1 油藏原油饱和烃色谱-质谱图

Fig.6 Saturated hydrocarbon chromatogram-mass spectra of crude oil from S2-1 and S5-1 reservoirs

3.3 C₂₄ 四环萜烷的鉴定及其组成特征

根据化合物的质谱图及出峰时间和顺序, 在所分析原油的饱和烃馏分中检测出 4 个 C₂₄ 四环萜烷化合物, 分别标注为 a、a1、b 和 c(图 7), 其中, 化合物 a、a1 及 b 在 C₂₄ 和 C₂₅ 三环萜烷之间出峰, 化合物 c 的出峰位置在 C₂₆ 三环萜烷之前。化合物 a 经鉴定为脱-A-奥利烷, 脱-A-奥利烷和奥利烷具有相

似的生源意义^[2], 可指示陆源有机质的输入; 化合物 a1 鉴定为脱-A-羽扇烷, 也具有陆源有机质输入的指示意义; 化合物 b 为未知结构的新 C₂₄ 四环萜烷, 在湖相原油中该化合物的相对含量异常丰富, 其丰度与树脂 T 化合物之间呈显著的负相关, 而与 C₃₀ 藿烷正相关性良好, 认为化合物 b 在母源先质上与厌氧微生物活动关系密切; 化合物 c 是 C₂₄17, 21-开环藿烷, 多出现在三角洲-湖沼相烃源岩及所生成

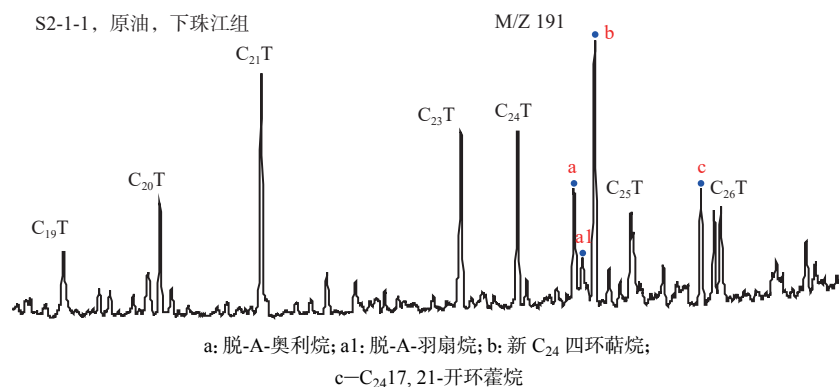
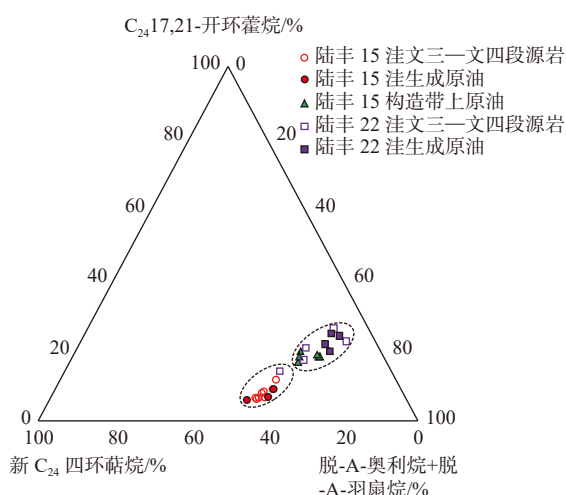


图 7 S2-1 油藏原油 m/z 191 部分质量色谱图

Fig.7 Part m/a 191 mass chromatogram in crude oil from S2-1 reservoir

原油中, 化合物 c 形成的重要原因是偏氧化的沉积水体中所发生的微生物活动^[3]。

C₂₄ 四环萜烷化合物的组成特征在陆丰 15 洼和陆丰 22 洼的烃源岩中呈现出明显差异, 其中, 陆丰 15 洼文三—文四段烃源岩新 C₂₄ 四环萜烷(化合物 b)占绝对优势, a/b<0.41, 表明其源岩中高等植物输入有限; 陆丰 22 洼仅文三段中部和文四段中部源岩的化合物 b 占绝对优势, 而其他深度段的 a、b 化合物呈现均衡分布特征, a/b 介于 0.55~1.55, 说明陆丰 22 洼文三—文四段源岩的低等水生生物输入水平总体不如陆丰 15 洼高; 而 S2-1 及 S5-1 油藏的下珠江组原油中 a/b 介于 0.51~0.82, 在 C₂₄ 四环萜烷组成特征上与陆丰 22 洼 a/b 比值稍高的那类烃源岩吻合, 具有更强的亲缘关系(图 8)。

图 8 C₂₄ 四环萜烷化合物分布特征Fig.8 Distribution characteristics of C₂₄ tetracyclic terpanes

3.4 碳同位素分布特征

原油碳同位素组成的影响因素比较复杂, 如源

岩的母质类型和热演化程度, 在后期改造(如降解、水洗等)过程中也会发生分馏作用, 因此在油源分析、成藏过程及原油次生变化的研究中具有重要的意义^[16]。如表 5、图 9 所示, W15-2、W15-4 井等发现的陆丰 15 洼生成原油的碳同位素整体偏轻, 集中分布于-29.8‰~-29.6‰; W22-1 井储层烃源自陆丰 22 洼烃源岩, 碳同位素相比偏重, 分布在-29‰~-27.9‰, 同时饱和烃碳同位素也重于陆丰 15 洼生成原油; 位于陆丰 15 披覆构造带上的 S5-1、S2-1 油藏原油碳同位素则一致偏重, 介于-28.6‰~-28.2‰, 这与陆丰 22 洼生成原油具有一定可比性。

利用菲及甲基菲系列化合物相对丰度折算原油成熟度, 发现陆丰 15 洼生成原油成熟度普遍偏低, 约 0.62‰~0.71‰, 而陆丰 22 洼生成原油为正常成熟原油, 约 0.73‰, 考虑到陆丰 15 洼及陆丰 22 洼文昌组源岩地球化学特征相近, 有机质类型基本一致, 且均未遭受明显后期改造作用, 认为是主充注期源岩成熟度的差异, 造成了不同洼陷生成的原油具有碳同位素轻重之分。

原油中正构烷烃单体烃碳同位素的组成特征能够反映源岩的母源构成和沉积环境, 受源岩热演化程度、原油生物降解、运移分馏等地质作用的影响较小, 分子系列的碳同位素信息与原油和族组成碳同位素相比, 具有一定的优越性, 其分布形式的研究也已经应用于油源判别中^[17]。低等水生生物与陆源高等植物形成的正构烷烃之间具有单体烃碳同位素的差异, 后者的碳同位素更重^[18]。因 W22-1 井无原油样品, 缺少正构烷烃单体烃碳同位素数据, 通过分析研究区已有数据发现, 陆丰 15 披覆构造带上 S5-1、S2-1 油藏原油的 C₂₃-C₃₁ 正构烷烃单体烃碳同位素明显重于陆丰 15 洼生成的原油(W15-2、W15-4 井等), 重约 1‰~2‰(图 10), 预

表 5 原油及族组成碳同位素数据

Table 5 Carbon isotope data of crude oil and group composition

构造位置	井名/油藏名	样品类型	层位	编号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$				
					原油	饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
陆丰15洼缓坡带	W15-2	原油	文昌组	W15-2-1	-29.6	-30.7	-29.7	-28.7	-28.8
	W15-4	原油	下珠江组	W15-4-1	-29.8	-30.4	-28.1	-27.6	-28.1
		原油	下珠江组	W15-4-2	-29.7	-30.5	-28.0	-27.7	-28.1
		S5-1	原油	下珠江组	S5-1-1	-28.5	/	/	/
	原油		下珠江组	S5-1-2	-28.4	/	/	/	/
陆丰15披覆构造带	S2-1	原油	下珠江组	S2-1-1	-28.6	/	/	/	/
		原油	下珠江组	S2-1-2	-28.2	-29.3	-27.7	-27.9	-27.8
		原油	下珠江组	S2-1-3	-28.3	-29.0	-28.2	-28.3	-28.5
		原油	下珠江组	S2-1-4	-28.5	-29.1	-27.9	-28.2	-28.5
	陆丰22洼洼中隆	W22-1	油砂	文昌组	W22-1-2	-29.0	-29.2	-28.6	-28.3
油砂			文昌组	W22-1-3	-28.6	-28.9	-28.1	-28.2	-28.3
油砂			文昌组	W22-1-4	-27.9	-28.5	-27.2	-27.1	-27.0
油砂			文昌组	W22-1-5	-27.9	-28.8	-27.1	-27.1	-26.9

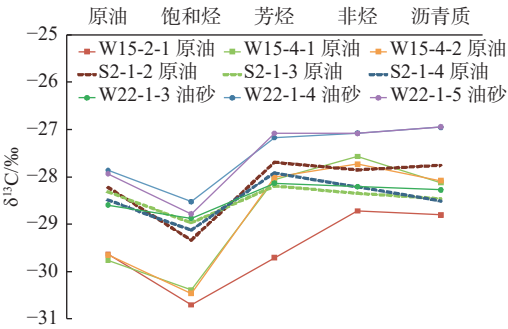


图 9 原油及族组成碳同位素分布特征

Fig.9 Distribution characteristics of carbon isotope of whole oil and group composition

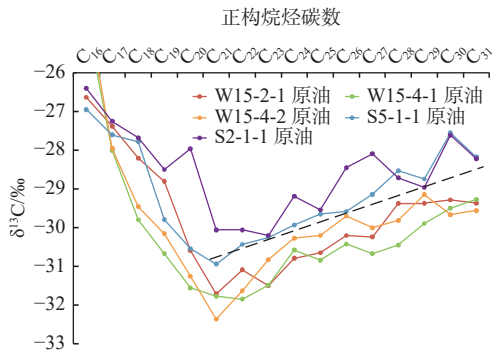


图 10 原油中正构烷烃单体烃碳同位素演化特征

Fig.10 The evolution of individual n-alkane carbon isotope

示着二者油源不一致,说明陆丰 15 洼文昌组半深湖—深湖相源岩不是陆丰 15 披覆构造带油藏的唯一油源。

3.5 含氮化合物示踪

杂环含氮化合物具有较强的极性,可通过氮原子上的孤对电子形成氢键,与围岩介质发生吸附作用,导致部分吡啶类分子化合物滞留在运移路径中,在油气运移过程中吡啶类化合物不断调整、再分配^[19-20]。据前人研究成果,随着油气运移距离不断增加,烷基吡啶相对于烷基苯并吡啶更加富集,屏蔽型异构体(如 1,8-二甲基吡啶)相对于暴露型异构体(如 2,7-二甲基吡啶)更加富集,苯并吡啶 [a]/([a]+[c])的比值不断增加^[21]。

研究区 S2-1 油藏的上述 3 种含氮化合物示踪参数一致,呈现出小于 S5-1 油藏的特征,指示 S2-1 油藏接受了近距离烃源岩贡献,而 S5-1 油藏中的原油历经了更长的运移距离,考虑到 S2-1 油藏距离陆丰 22 洼烃源灶更近,因此,只有陆丰 22 洼向其供烃才能解释这一特征,进一步验证了陆丰 15 披覆构造带上原油存在陆丰 22 洼烃源较大贡献的推测(图 11)。

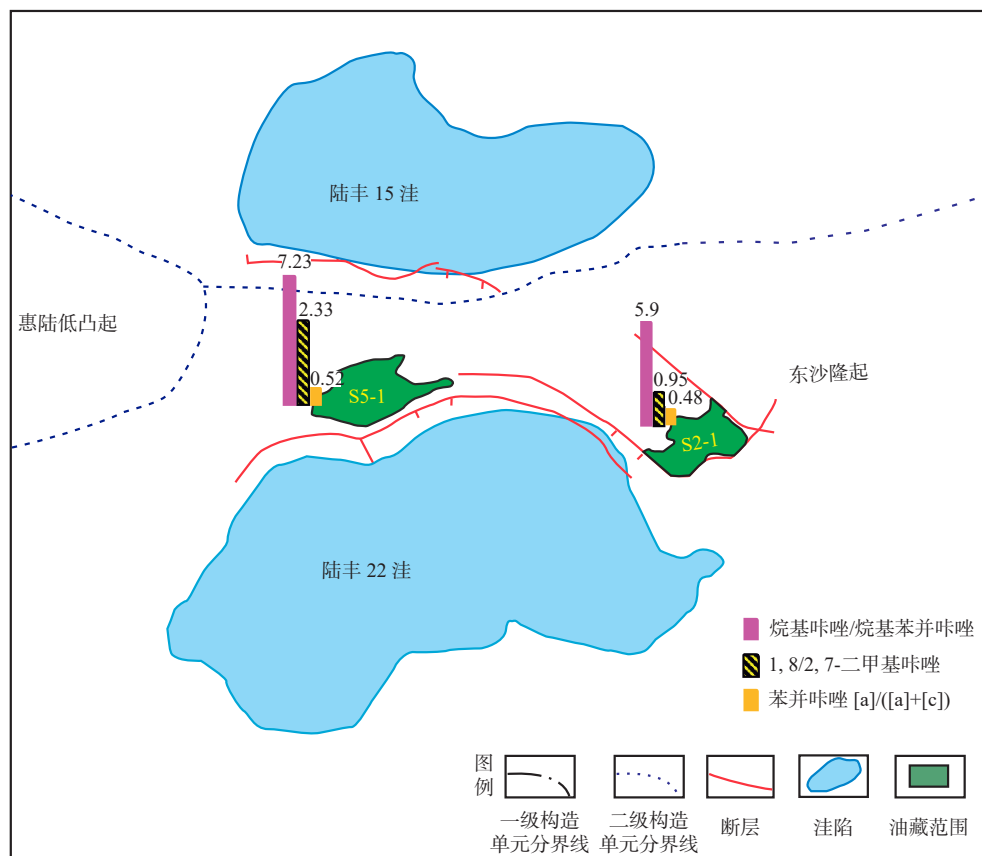


图 11 含氮化合物示踪参数分布特征

Fig.11 Distribution of tracer parameters of nitrogen-containing compounds

4 结论

(1) 陆丰 15 洼和陆丰 22 洼发育的文昌组半深湖—深湖相泥岩, 有机质丰度高, 类型好, 均存在向陆丰 15 披覆构造带供烃的可能。

(2) 陆丰 15 披覆构造带上原油为半深湖—深湖相类型, 成烃母质以低等水生生物为主, 陆源高等植物贡献有限, 从 C_{24} 四环萜烷化合物的组成及碳同位素演化特征来看, 与陆丰 22 洼的文三—文四段烃源岩具有更强的亲缘关系。

(3) 含氮化合物示踪参数指示 S2-1 油藏受到短距离烃源岩贡献, 进一步验证了陆丰 15 披覆构造带原油存在陆丰 22 洼烃源较大贡献的推测。

参考文献:

- [1] NYTOFT H P, SAMUEL O J, KILDAHL-ANDERSEN G, et al. Novel C15 sesquiterpanes in Niger Delta oils: structural identification and potential application as new markers of angiosperm input in light oils[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(5): 595-603.
- [2] SAMUEL O J, ANDERSEN G A, NYTOFT H P, et al. Novel tricyclic and tetracyclic terpanes in Tertiary deltaic oils: structural identification, origin and application to petroleum correlation[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(12): 1326-1337.
- [3] 包建平, 朱翠山, 陈希文, 等. 珠江口盆地珠一坳陷原油和烃源岩中 C_{24} 四环萜烷及其成因[J]. *地球化学*, 2018, 47(2): 122-133.
- [4] 朱扬明, 谢建明, 孙林婷, 等. 珠江口盆地原油中新二环、四环萜烷的检出及其地球化学意义[J]. *地球化学*, 2015, 44(4): 313-322.
- [5] YU F S, KOYI H, ZHANG X T. Intersection patterns of normal faults in the Lufeng Sag of Pearl River Mouth Basin, China: insights from 4D physical simulations[J]. *Journal of Structural Geology*, 2016, 93: 67-90.
- [6] 代一丁, 牛子铖, 汪旭东, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J]. *石油学报*, 2015, 40(增): 41-52.
- [7] 王玺凯, 郭建华, 刘辰生, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系烃源岩评价及油气成藏[J]. *地球科学前沿*, 2019, 9(3): 166-176.
- [8] 汪旭东, 张向涛, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地陆丰13洼复式油气成藏条件、分布规律及勘探潜力[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(3): 19-27.
- [9] 施和生, 何敏, 张丽丽, 等. 珠江口盆地(东部)油气地质特征、成藏规律及下一步勘探策略[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(3): 11-22.
- [10] 庞雄奇, 李素梅, 金之钧, 等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2004, 29(4): 384-390.

- [11] 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.
- [12] 常俊合, 李新军, 吕红玉, 等. 东濮凹陷文留潜山构造文古2井原油地球化学特征和油源研究[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(1): 47-69.
- [13] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [14] 黄保家, 李俊良, 李里, 等. 文昌A凹陷油气成藏特征与分布规律探讨[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(6): 361-366.
- [15] AARSEN B G, ZHANG Q X. An unusual distribution of bicadinanes, tricadinanes and oliocadinanes in sediments from the Yacheng Gas Field[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18: 805-812.
- [16] 米敬奎, 张水昌, 陈建平, 等. 塔北地区原油碳同位素组成特征及影响因素[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(1): 21-25.
- [17] 李素梅, 郭栋. 东营凹陷原油单体烃碳同位素特征及其在油源识别中的应用[J]. *现代地质*, 2010, 24(2): 252-258.
- [18] HAYES J M. Factors controlling ^{13}C contents of sedimentary organic compounds: principle and evidence[J]. *Marine Geology*, 1993, 113: 111-125.
- [19] LI M, LARER S R, STODDART D, et al. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration derivation of migration related geochemical parameters[C]//CUBITT J M, ENGLAND W A. *The Geochemistry of Reservoirs*. Geological Society Special Publication, 1995, 86: 103-123.
- [20] DORBO N M, SCHMITTER J M, GAR RIGUES P, et al. Distribution of carbazole derivatives in petroleum[J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 7: 111-120.
- [21] 王铁冠, 李素梅, 张爱云, 等. 利用原油含氮化合物研究油气运移[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(4): 83-86.

Geochemical characteristics and oil source correlation of reservoirs in Lufeng 15 drape structural belt, Pearl River Mouth Basin

ZHENG Yangdi^{1,2}, PENG Guangrong^{1,2}, ZHU Junzhang^{1,2}, XIAO Zhangbo^{1,2},
LONG Zulie^{1,2}, YANG Xingye^{1,2}, ZHANG Xiaolong^{1,2}

(1 Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518054, China;

2 CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: The north and south parts of Lufeng 15 drape structural belt in the Pearl River Mouth Basin are adjacent to Lufeng 22 Sag and Lufeng 15 Sag, respectively. Conventional oil source correlation indicators cannot determine the oil source of the S2-1 and S5-1 reservoirs in the structural belt, and the two adjacent sags may supply hydrocarbons to them. To reveal the origin and source of crude oils, the biomarkers, carbon isotopes and nitrogen-containing compounds of crude oils and source rocks in this area were compared. Four C_{24} tetracyclic terpanes were detected from crude oils and source rocks in the study area: des-A-oleanane, des-A-lupane, new C_{24} tetracyclic terpane and $\text{C}_{24}17,21$ -secohopane. The distribution of C_{24} tetracyclic terpanes in crude oil from S2-1 and S5-1 reservoirs are more consistent with the source rocks of Wenchang Formation in Lufeng 22 Sag in a close relationship. In addition, the carbon isotopes of whole oil and n-alkane monomers indicate that the S2-1 and S5-1 reservoirs are significantly different from those in the Lufeng 15 Sag, indicating that they are contributed by the source rocks of Lufeng 22 Sag. The tracer parameters of nitrogen-containing compounds indicate that the S2-1 reservoir has the characteristics of near-source charging, which further verifies the conclusion that the S2-1 and S5-1 reservoirs have important contributions from the Lufeng 22 Sag source rocks.

Key words: oil source; C_{24} tetracyclic terpane; carbon isotope; nitrogenous compounds; Lufeng 15 drape structural belt; Pearl River Mouth Basin