

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020090801

东海陆架盆地西湖凹陷孔雀亭区油气来源及运移方向

丁飞, 刘金水, 蒋一鸣, 赵洪, 于仲坤

中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要:孔雀亭区是西湖凹陷油气勘探重点区带, 油气来源及运移方向不清限制了勘探的进一步拓展。基于油气特征及分布研究, 通过开展烃源岩及原油生物标志化合物特征对比分析、天然气成熟度计算, 综合厘定了油气来源; 结合油气运移效应分析明确了原油及天然气运移方向。结果表明, 孔雀亭区原油主要来自平湖组下段和宝石组烃源岩, 平湖组中段及上段少量贡献, 原油自斜坡内生油次注向高部位运移, 是原油优势运聚方向; 天然气具有斜坡带本地烃源岩及西次凹双重来源, 以西次凹贡献为主, 天然气自斜坡低带向高带侧向运移, 并沿断层与斜坡带烃源岩自生天然气混合呈现垂向运移特征, 斜坡低部位是天然气勘探有利区带。

关键词: 油气来源; 油气运移; 西湖凹陷; 孔雀亭区; 东海陆架盆地

中图分类号: P736 文献标识码: A

Source and migration direction of oil and gas in Kongqueting area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

DING Fei, LIU Jinshui, JIANG Yiming, ZHAO Hong, YU Zhongkun

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: Kongqueting is a key exploration area in the Xihu sag of the East China Sea Shelf Basin. The ambiguity in source and migration direction of oil and gas has brought difficulties in efficient oil and gas exploration. This time, the source of oil and gas is jointly determined by the study of oil and gas characteristics and distribution patterns, the correlation of the biomarkers between source rocks and crude oil, and the calculation of the maturity of natural gas. In combination with the migration effect of oil and gas, the migration direction of crude oil and natural gas are discussed. The results suggest that the crude oil in Kongqueting area mainly comes from the source rocks of the Lower Pinghu Formation and Baoshi Formation, with a little from the Middle Pinghu Formation. Crude oil migrates mainly from the secondary depressions to the higher part of the slope for oil accumulation. In terms of natural gas, there are dual sources, one local source and one the source from the Western Subsag. The natural gas generated from the Western Subsag migrates from low zone to high zone along the slope, and mixed with natural gas generated by local source rock of the slope zone on the way, suggesting a pattern of vertical migration. Therefore, the low part of the slope is a potential area for natural gas exploration.

Key words: source of oil and gas; oil and gas migration; Xihu Sag; Kongqueting area; East China Sea Shelf Basin

西湖凹陷是东海陆架盆地油气资源最丰富的凹陷, 目前已发现油气田主要集中于中央反转带和西部斜坡带。随着勘探程度加深, 勘探目标由构造油气藏向构造-岩性复合油气藏转变^[1], 油气充满度是影响勘探成败的重要因素, 因此, 油气来源及运移方向刻画在油气成藏研究中愈加重要。宝武区某中型气田的发现证实了西部斜坡带平北区构造-岩性复合油气藏具有很大勘探潜力^[1], 孔雀亭区亟待突破。前人对孔雀亭区烃源岩特征、油气成因及成藏条件研究认为, 圈闭类型及盖层发育程度是本区油气成藏的主控因素^[2-4], 但精细化油源对比及油

气运移方向研究不够深入, 难以满足现阶段油气勘探需求。本文通过烃源岩生标特征精细化分析和天然气成熟度计算, 开展油气源对比厘定油气来源, 并在油气地化参数分析基础上进行油气运移效应研究, 梳理油气运移方向, 以期对孔雀亭区油气勘探提供支持。

1 地质概况

西湖凹陷是晚白垩世末期构造背景上发育的新生代沉积凹陷, 位于东海陆架盆地中北部, 是盆

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“东海盆地天然气资源潜力评价”(2016ZX05027001)

作者简介: 丁飞(1982—), 男, 工程师, 现从事油气地球化学研究工作, E-mail: dingfei@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020-09-08; 改回日期: 2020-10-07 周立君编辑

地内最大的含油气凹陷, 演化过程经历断陷、拗陷和区域沉降 3 个阶段, 可划分为 5 个构造带: 西部斜坡带、西次凹、中央反转带、东次凹及东部断阶带(图 1)。凹陷内以新生代碎屑沉积为主, 自下而上发育始新统八角亭组、宝石组、平湖组, 渐新统花港组, 中新统龙井组、玉泉组和柳浪组, 上新统三潭组以及第四系东海群(图 2)。孔雀亭位于平湖斜坡带中北部地区鼻状隆起带上, 其西靠海礁凸起, 东邻西次凹, 油气藏类型以断块、断鼻和断背斜为主。

平湖组和宝石组是西湖凹陷主要烃源层段^[5-9]。孔雀亭区平湖组烃源岩为受潮汐影响三角洲及潮坪沉积的一套煤系地层^[10-11], 岩性包括泥岩、碳质泥岩和煤; 宝石组为滨—浅海环境下形成的一套灰色泥岩。煤是西湖凹陷重要的生烃母质, 有机质类型好于泥岩^[8, 12], 主要分布在平湖组地层, 花港组及宝石组煤层发育规模较小^[13]。孔雀亭不同部位钻井纵向油气富集程度差异大, 同一钻井纵向流体性质也不相同, 揭示了研究区油气成藏复杂^[3]。

2 油气特征与分布

孔雀亭区已钻遇含油气层段包括凝析气层、油

层和气层, 其中凝析气占探明储量 60% 左右, 原油占比约 20%。油气层大多集中于平湖组中、上段, 少量分布于花港组, 纵向呈现“上油下气”特征, 横向呈现自东向西气层厚度和探明储量逐渐降低的趋势。原油密度较低, 分布于 0.75~0.86 g/cm³, 平均值约 0.82 g/cm³; 含硫量都低于 0.1%; 含蜡量差别较大, 分布于 0.07%~19.53%(表 1), 整体以低密度、低硫、低原油为主, 个别样品高含蜡。天然气主要分布在平湖组中段, 少量分布于平湖组下段, 气组分主要以烃类为主, 甲烷占比 73%~92%, 属于湿气(表 2)。非烃气主要以二氧化碳和氮气为主, 含量低于 10%。甲烷碳同位素分布于 -37.8‰~-28.2‰, 乙烷碳同位素分布于 -28.4‰~-22.7‰, 按照乙烷碳同位素母质遗传性, 以 -29‰ 为划分标准^[14], 本区天然气属于煤型气。

3 油气源分析

厘定油气来源是准确刻画油气运移方向的基础, 油气层周围、平湖组下部、宝石组及毗邻的西次凹等都属于有效供烃源岩^[4], 本地烃源岩处于生油阶段, 西次凹烃源岩处于生气阶段^[12]。

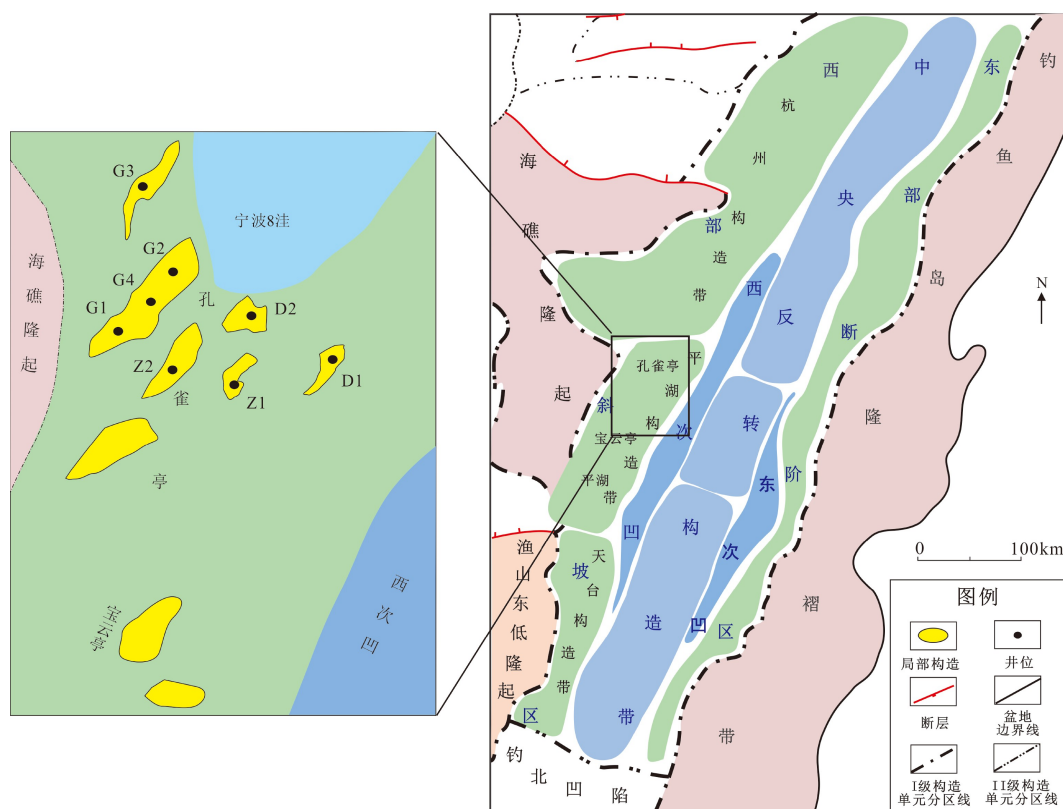


图 1 孔雀亭区域构造位置图

Fig.1 Tectonic map of the Xihu Sag and the location of Kongqueting area

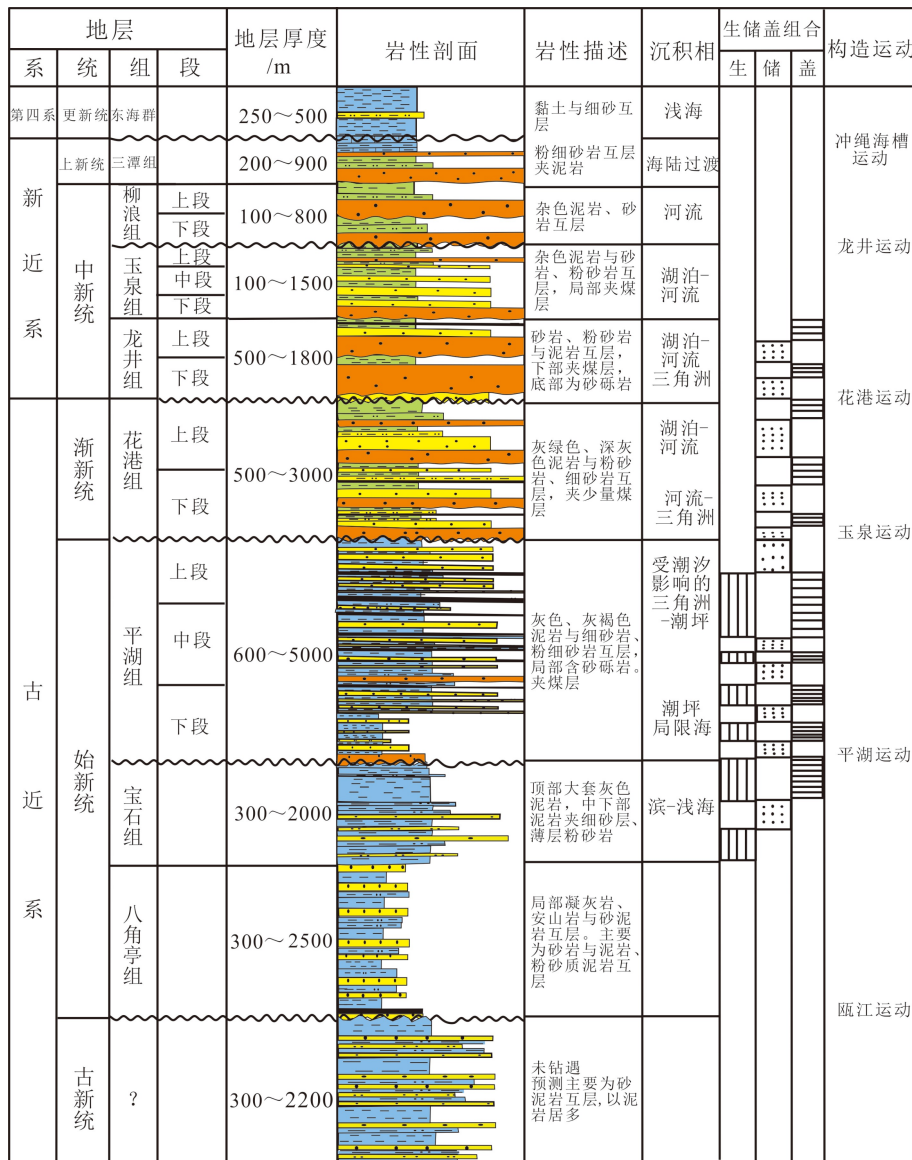


图2 西湖凹陷地层综合柱状图

Fig.2 The stratigraphic column of Xihu Sag

3.1 烃源岩典型生标参数特征

孔雀亭区平湖组中下段沉积时期属亚热带气候, 高等植物和浮游生物发育, 有机质生产率高, 且较弱水动力条件下还原-弱还原、咸水-微咸水水介质有效保存了沉积有机质, 优质烃源岩广泛发育^[12]; 平湖组上段以河湖相为主, 烃源岩发育相对较差。有机岩石学分析显示平湖组煤层样品和泥岩样品显微组分都以富含镜质组、贫惰质组, 含有一定比例的壳质组和腐泥组为特征^[15], 不同显微组分随热演化程度增加相对含量随之变化, 难以区分不同层段间烃源岩差异。生物标志化合物保留了生物有机质的原始信息, 且在后期演化过程碳骨架结构中相对稳定, 是烃源岩精细化对比研究的重要

手段, 常被用于油油对比和油岩对比^[16]。由于海陆过渡相地层有机质生源变化快, 纵向泥岩和煤的互层分布导致源岩生标参数非均质性强, 且海上钻井取心成本高, 烃源岩岩心样品不能满足大量数据统计分析条件, 因此, 本文从单井烃源岩岩屑生标特征入手, 寻找不同层段间各生标参数变化规律, 采用各层段烃源岩样品生标参数平均值代表不同层段烃源岩的整体特征, 以降低地层非均质性对烃源岩判识带来的误差。

G2井烃源岩岩屑样品深度包含从平湖组到宝石组所有层段, 是单井生标参数纵向对比分析的最优选择(图3)。C₂₇规则甾烷代表水生生物对沉积有机质的贡献, C₂₉规则甾烷代表陆源高等植物贡献, 常用规则甾烷 C₂₇/C₂₉ααα20R 比值反映有机质母

表 1 西湖凹陷孔雀亭区原油物性统计
Table 1 Oil parameters from Kongqueting area

井名	深度/m	密度/(g/cm ³)	凝固点/°C	硫含量/%	蜡含量/%
G2	4150	0.8422	9	0.10	2.11
Z2	4107.5	0.8248	15	0.06	3.14
Z2	4186	0.8152	14	0.07	3.08
Z1	4183	0.8167	5	0.04	3.27
Z1	4548.7	0.8606	29	0.07	10.54
G1	3542.6	0.8345	14	0.04	17.91
G1	3565.6	0.8239	17	0.06	19.53
G1	3810.2	0.7487	-30	0.06	0.07
D2	3949	0.8380	-34	0	0
D2	4317.4	0.8443	12	0.04	9.50
D2	4333	0.8390	-32	0.07	0
G3	2647	0.8315	5	0.02	12.00
G3	3099	0.8105	-1	0.01	7.70

表 2 西湖凹陷孔雀亭区天然气组分及同位素统计
Table 2 Natural gas parameters from Kongqueting area

井号	深度/m	组分/%										同位素/‰				<i>i</i> C ₄ H ₁₀ / <i>n</i> C ₄ H ₁₀	N ₂ /C ₂ H ₆	成熟度%
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	<i>i</i> C ₄ H ₁₀	<i>n</i> C ₄ H ₁₀	<i>i</i> C ₅ H ₁₂	<i>n</i> C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀				
G1	3542	83.52	7.61	2.42	0.49	0.37	0.11	0.04	2.98	2.45	-	-	-	-	1.32	0.39	-	
G1	3565	79.03	8.68	3.54	0.96	0.58	0.23	0.07	4.19	2.72	-	-	-	-	1.66	0.48	-	
G1	3810	75.96	10.33	5.70	1.80	0.70	0.25	0.12	1.70	3.40	-	-	-	-	2.57	0.16	-	
G2	4150	89.1	4.48	0.63	0.16	0.10	0.05	0.03	0.36	5.00	-37.1	-22.7	-20.8	-21.7	1.60	0.08	0.79	
G4	4093	79.43	8.38	2.84	1.04	0.65	0.28	0.20	0.59	6.29	-34.6	-25.3	-24.5	-25.4	1.60	0.07	1.02	
Z2	4111	81.02	7.35	3.03	0.74	0.64	0.22	0.16	0.45	6.19	-37.8	-27.2	-25.4	-24.6	1.16	0.06	0.73	
Z2	4186	81.42	7.29	2.97	0.72	0.62	0.22	0.16	0.18	6.19	-28.2	-23.8	-23.7	-23.3	1.16	0.02	1.97	
Z1	4183	85.51	6.28	2.30	0.59	0.51	0.18	0.13	0.20	4.11	-35.4	-25.7	-24.4	-24.8	1.16	0.03	0.94	
Z1	4548	73.20	8.43	5.83	1.68	1.40	0.49	0.31	0.57	7.79	-37.7	-27.6	-26.3	-26.2	1.20	0.07	0.74	
D1	4198	89.82	5.51	1.66	0.44	0.33	0.14	0.09	0	1.99	-33.4	-26.3	-24.3	-23.1	1.32	0	1.16	
D1	4810	92.05	5.38	1.51	0.36	0.36	0.17	0.12	0.02	0	-33.6	-28.4	-27.1	-22.7	1.01	0	1.14	

源特征^[16], G2 井岩屑样品规则甾烷 C₂₇/C₂₉ααα20R 比值小于 1.0 占主体, 表明有机质母源以陆源高等植物为主。规则甾烷 C₂₇/C₂₉ααα20R 比值随埋深增加呈先减小后增加趋势, 最低值出现在 3800 m 深度, 揭示 3000~3800 m 陆源高等植物对有机质贡献逐渐增加, 水生生物减少; 3800 m 以下水生生物对有机质贡献开始增加, 最大值可达到 1.0 以上。藿烷中 Ts/Tm 参数常用来表征烃源岩成熟度, 前人

依据该参数比值变化范围大推测原油可能来自不同层段^[15], 但该参数同时受有机质来源影响较大^[16]。G2 井烃源岩 3800 m 以浅 Ts/Tm 比值显示该参数并没有随埋深增加而增加, 表明受成熟度影响较小; Ts/Tm 比值与规则甾烷 C₂₇/C₂₉ααα20R 比值变化趋势一致(图 3), 随深度呈先减小后增加变化规律, 表明有机母质来源对本区 Ts/Tm 比值变化影响更大。G2 井不同层段间煤层厚度统计结果显示, 平

湖组上、中、下段煤层累计厚度分别为13、40和12.5m,平中段煤层最发育,对应规则甾烷 $C_{27}/C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 比值及Ts/Tm比值的最低点,揭示不同层段间煤层发育差异是影响该参数变化的主要原因。为进一步验证煤层对生标参数的影响,选择平北斜坡带X井同深度煤岩和泥岩岩心样品进行生标参数对比,结果显示煤岩与泥岩生标存在较大差别,与泥岩相比煤岩具有相对高 C_{29} 规则甾烷、低Ts和低伽马蜡烷特征(图4),因此,规则甾烷 $C_{27}/C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 比值、Ts/Tm比值及伽马蜡烷含量能够区分不同层段烃源岩,可作为孔雀亭区油源对比有效参数。同时,重排甾烷及 C_{24} 四环萜等化合物相对含量也都指示平湖组中段陆源高等植物较其他层位发育。

3.2 油源对比

基于以上特征生标参数,孔雀亭区烃源岩在垂向上大致可划分为两类(表3、图5),第1类包括平上段和宝石组烃源岩,以相对较高Ts/Tm(>0.4)、规则甾烷 $C_{27}/C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 比值 >0.8 和伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值 >0.1 为特征,呈现少煤、水生生物贡献相对丰富的有机母质构成和较深的沉积水体环境;第2类包括平中段和平下段烃源岩,以相对较低Ts/Tm(<0.4)、规则甾烷 $C_{27}/C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 比值 <0.4 和伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值 <0.1 为特征,呈现多煤、陆源高等植物贡献相对丰富的有机母质构成和较浅的沉积水体环境。此外,烃源岩成熟度参数显示,平湖

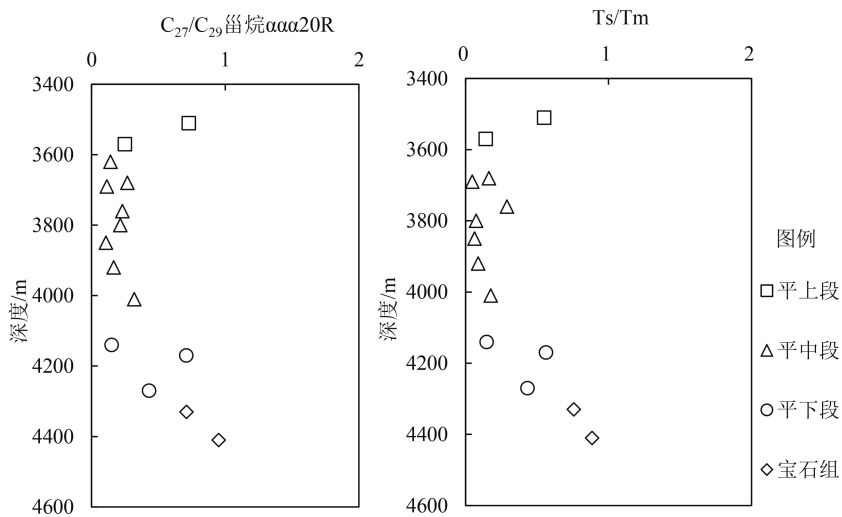


图3 G2井烃源岩生标特征随深度变化图

Fig.3 Variation of biomarkers with depth, from well G2

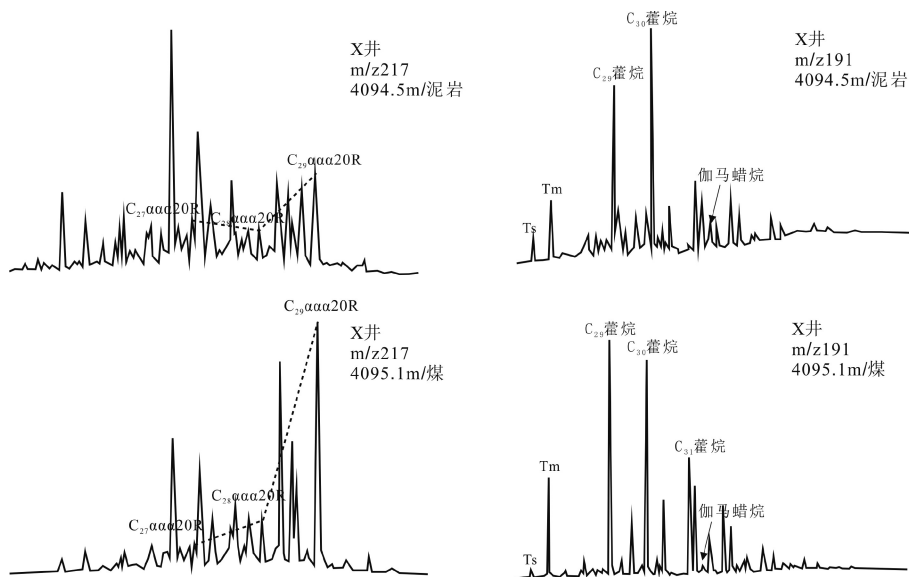


图4 西湖凹陷泥岩与煤生标特征对比

Fig.4 Biomarkers of coal and mudstone from m/z217 and m/z191 of the Xihu sag

表 3 孔雀亭区烃源岩与原油生标参数统计
Table 3 Biomarker of source rock and oil from Kongqueting area

样品类型	甾烷C ₂₇ / C ₂₉ αα20R	Ts/Tm	伽马蜡烷/ C ₃₀ 藿烷	C ₂₉ /C ₃₀ 藿烷	C ₂₉ 重排甾 烷/C ₂₉ 规 则甾烷	C ₂₄ 四环萜/ C ₂₃ 三环萜	C ₂₉ 甾烷β/ (α+β)	C ₂₉ 甾烷 20S/20 (R+S)	C ₃₁ 藿烷S/ (S+R)	运移效应	
烃源岩	平上段	0.79(14) 0.25~2.01	0.96(13) 0.01~2.66	0.18(13) 0.01~0.83	0.7(12) 0.26~2.17	0.12(14) 0.01~0.24	0.75(6) 0.24~1.50	0.39(14) 0.25~0.50	0.38(14) 0.17~0.50	0.53(14) 0.36~0.57	—
	平中段	0.24(16) 0.01~0.54	0.37(16) 0.05~1.49	0.07(16) 0.01~0.20	0.78(16) 0.46~1.22	0.18(16) 0.12~0.26	0.95(13) 0.36~3.44	0.36(16) 0.24~0.53	0.42(16) 0.28~0.49	0.56(16) 0.52~0.59	—
	平下段	0.39(4) 0.15~0.71	0.33(4) 0.15~0.56	0.05(2) 0.09~0.10	0.65(4) 0.61~0.69	0.16(4) 0.12~0.21	1.03(2) 0.43~1.68	0.45(4) 0.43~0.48	0.46(4) 0.45~0.47	0.56(4) 0.54~0.57	—
	宝石组	0.83(2) 0.70~0.95	0.82(2) 0.76~0.88	0.14(2) 0.12~0.15	0.56(2) 0.55~0.57	0.19(2) 0.19~0.20	0.25(2) 0.27~0.24	0.43(2) 0.42~0.43	0.45(2) 0.46~0.44	0.5(2) 0.48~0.52	—
原油	G2	—	0.31(1)	0.08(1)	0.62(1)	—	—	—	—	0.53(1)	—
	Z2	0.91(2) 0.89~0.94	1.16(2) 1.16~1.16	0.08(2) 0.08~0.08	0.63(2) 0.61~0.65	0.17(2) 0.16~0.17	—	0.56(2) 0.56~0.56	0.45(2) 0.44~0.46	0.55(2) 0.55~0.55	26.19(2) 23.22~29.31
	Z1	0.65(2) 0.54~0.77	0.86(2) 0.77~0.94	0.08(2) 0.07~0.09	0.61(2) 0.55~0.67	0.17(2) 0.16~0.18	—	0.55(2) 0.54~0.56	0.44(2) 0.44~0.45	0.55(2) 0.54~0.56	24.05(2) 21.53~26.62
	D2	0.67(2) 0.65~0.69	0.51(2) 0.49~0.53	0.21(2) 0.21~0.21	0.68(2) 0.66~0.70	0.13(2) 0.12~0.13	0.21(2) 0.21~0.21	0.41(2) 0.39~0.42	0.41(2) 0.40~0.42	0.53(2) 0.53~0.54	~0.59(2) ~1.89~0.64
	G3	0.74(3) 0.67~0.85	0.52(3) 0.36~0.70	0.08(3) 0.05~0.11	0.60(3) 0.55~0.65	0.21(3) 0.21~0.22	0.27(3) 0.15~0.50	0.53(3) 0.52~0.54	0.47(3) 0.45~0.49	0.56(3) 0.55~0.56	11.39(3) 8.14~21.03

注: 运移效应=参数(C₂₉甾烷β/(α+β)-C₂₉甾烷20S/20(R+S))×100/C₂₉甾烷20S/20(R+S); 数据格式: 平均值(样品数量)/最小值-最大值。

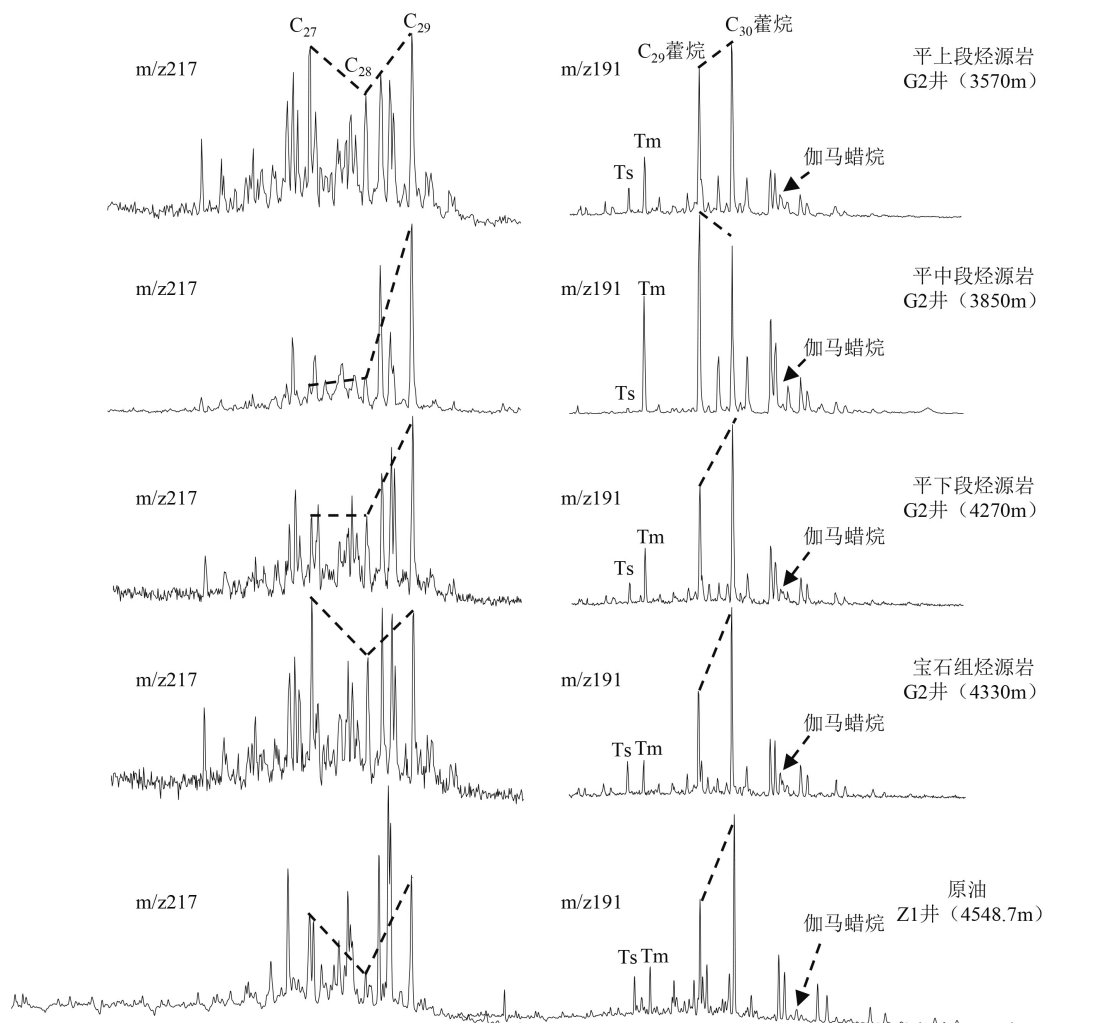


图 5 孔雀亭区烃源岩与原油饱和烃色谱质谱特征

Fig.5 GC-MS characteristics of saturated hydrocarbon of source rock and oil from Kongqueting area

组上段烃源岩 C_{29} 甾烷 $\beta/(\alpha+\beta)$ 和 $20S/20(R+S)$ 比值都在 0.4 以下 (表 3), 表明烃源岩演化程度较低, 尚未进入成熟门限, 对原油贡献少; 平湖组中段烃源岩样品成熟度略高于平湖组上段, 仅平中段下部进入生油门限, 对原油贡献有限; 平下段和宝石组烃源岩已达到成熟阶段, 处于生油高峰期。因此, 通过成熟度参数可进一步将两类烃源岩中不同层段加以区分。需要说明的是沿斜坡延伸方向构造相对低部位烃源岩埋深大, 演化程度高于高部位同层段烃源岩, 平上段和平中段烃源岩部分进入生油阶段 (如 D2 井), 对原油具有一定贡献。

孔雀亭区原油生标特征整体相似 (表 3、图 6), 属于同一组群。其中, 规则甾烷 $C_{27}/C_{29}\alpha\alpha\alpha/20R$ 比值主要分布于 0.6~0.91, 表明有机母质来源具有陆源高等植物和水生生物共同贡献, 与第 1 类烃源岩 (平上段和宝石组) 有机质母源构成相近; 原油 Ts/Tm 比值普遍高于 0.5, 与第 1 类烃源岩特征相符, 揭示煤层对原油贡献不显著, 但随着烃源岩进入成熟阶段, 热演化对 Ts/Tm 比值的影响更加显著, 表现为随演化程度增加 Ts/Tm 比值增加, 因此, 综合其他参数认为孔雀亭区原油以第 1 类烃源岩贡献为主, 同时有部分第 2 类烃源岩混入 (图 5)。结合原油成熟度参数 C_{29} 甾烷 $\beta/(\alpha+\beta)$ 和 $20S/20(R+S)$ 比值都在 0.4 以上, 高于平上段烃源岩, 表明宝石组是原油的主要贡献层段, 其次为平下段, 而平中段和平上段贡献较少。

3.3 气源分析

甲烷碳同位素是指示气源岩热演化程度的有效指标^[17], 孔雀亭区天然气甲烷碳同位素数值变化范围较大, 乙烷碳同位素都在 -28‰ 以下 (表 2), 表明天然气母源一致但成熟度范围较宽。采用刘文

汇提出的煤型气甲烷碳同位素二阶演化分馏公式计算天然气成熟度^[17], 结果显示存在两类天然气: 一类为少量中等成熟度天然气 ($R_o < 0.9\%$), 另一类为高成熟天然气 ($R_o > 0.9\%$)。现今孔雀亭区平湖组下段和宝石组烃源岩处于中等成熟度阶段, 干酪根镜质体反射率 $R_o < 1.0\%$, 生气量较少; 西次凹平湖组源岩已进入高演化阶段, $R_o > 1.3\%$, 处于主生气阶段^[18]。因此, 基于孔雀亭区和西次凹烃源岩有机质演化程度差异, 初步推测本区少量中等成熟天然气来源于本地烃源灶, 而相对较高成熟度的天然气来源于西次凹平湖煤系烃源岩, 且两者发生混合, 前人基于含油饱和度和储层孔隙度的相关性研究也证实了以上结论^[9]。

4 油气运移方向表征

油气地化参数是表征油气运移效应的重要指标, 其原理主要基于两个方面, 一是有机质生烃演化规律: 烃源岩演化早期生成油气成熟度较低, 运移时间早、距离远, 演化后期生成油气成熟度高, 运移时间晚、距离近, 因此, 成熟度差异可指示油气运移方向; 二是流体在地层运移过程中的分馏效应: 不同分子量化合物、相同分子量不同构型的化合物因极性差异导致在地层中的运移速度不同, 非极性化合物受围岩影响弱、运移速度快, 强极性化合物受围岩影响大、运移速度慢, 不同化合物间相对含量的变化可指示油气运移方向。

4.1 原油运移方向

孔雀亭区原油成熟度参数甾烷 $C_{29}20S/20(R+S)$ 分布于 0.4~0.49 (表 3), 其中, D2 原油比值在 0.42 以下, 成熟度最低; Z2 和 Z1 原油成熟度相当, 比值

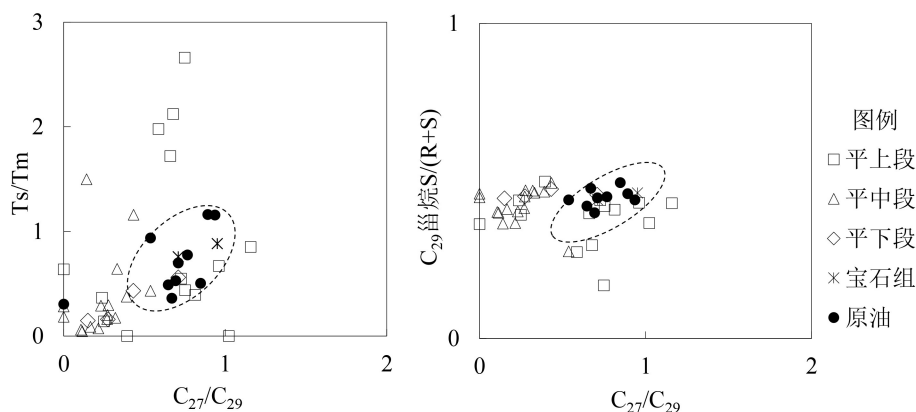


图 6 孔雀亭区烃源岩与原油生标参数交会图

Fig.6 Correlation of biomarkers from source rocks and the oil from Kongqueting area

分布于 0.44~0.46; G3 井原油成熟度最高, 其中 2861.9 m 深度样品成熟度与 Z2 和 Z1 井类似, C_{29} 甾烷 20S/20(R+S) 比值为 0.45, 其余两个样品成熟度参数分别为 0.48、0.49。勘探证实宁波 8 洼是孔雀亭区坡内供油次洼, 依据原油成熟度参数推测宁波 8 洼烃源岩低演化阶段形成原油首先在 D2 井聚集成藏, 中期形成的相对高成熟原油向 Z2、Z1 井方向以及 G3 井方向运移, 而演化中后期形成的高成熟原油主要向 G3 井方向运移。其他成熟度参数如藿烷 $C_{31}S/(S+R)$ 也具有相似变化规律, 而 Ts/Tm 由于受有机质母源影响其规律性不明显(表 3)。

甾烷 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值除受成熟度影响外, 运移距离也是重要因素, 而 C_{29} 甾烷 20S/20(R+S) 主要受成熟度影响^[19], 因此两者差异可间接反映油气运移距离, 差异大代表运移效应强、运移距离长。以不同构型 C_{29} 规则甾烷比值计算原油运移效应量化参数(表 3、图 7), 结果显示, D2 井原油运移效应弱, 原油运移距离短, Z2 及 Z1 井原油运移效应强, 原油运移距离长, 而 G3 井不同深度样品存在差别, 其中 2861.9 m 样品运移效应强, 其他样品则表现为弱运移效应特征, 原油运移距离短。

腐泥组和壳质组是孔雀亭煤系烃源岩主要生油母质, 演化早期阶段生成少量低成熟度原油^[10], 难以大范围运移, 仅在周缘圈闭就近成藏, 如 D2 井; 演化中期阶段, 生油量增加, 一定数量的成熟原油可持续运移至 Z2、Z1 及 G3 井成藏; 演化中后期阶段, 相对高成熟原油在构造相对高部位聚集, 如 G3 井(图 8)。

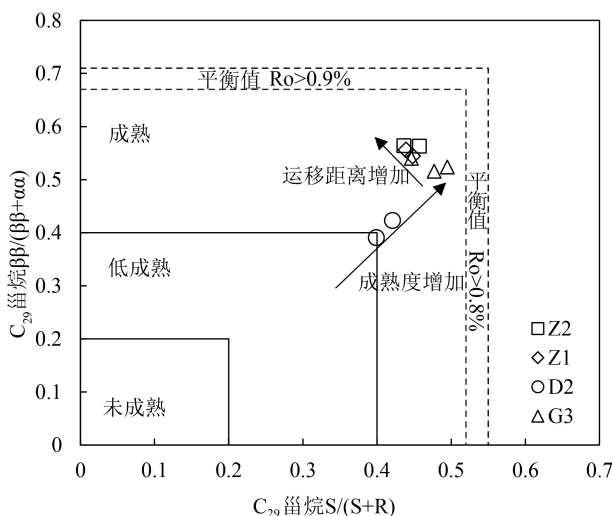


图 7 孔雀亭区原油成熟度与运移效应
Fig.7 Maturity and migration effect of the oil from Kongqueing area

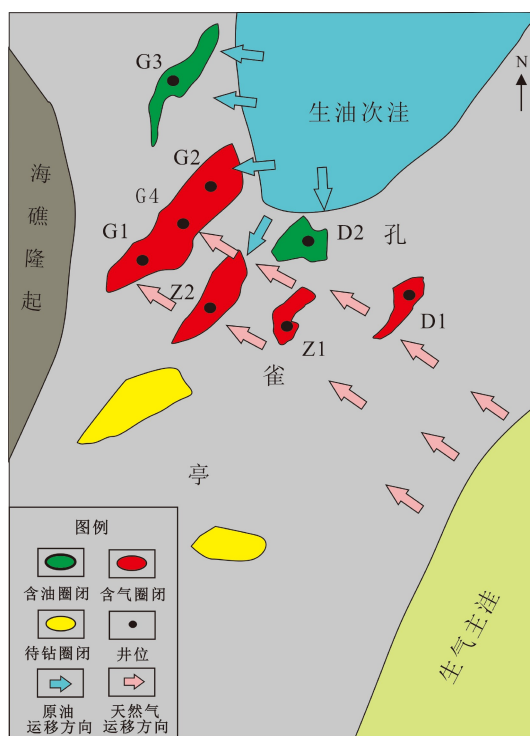


图 8 孔雀亭区原油及天然气运移方向示意图
Fig.8 Migration direction of oil and gas of the Kongqueing area

4.2 天然气运移方向

烃源岩早期生气阶段具有甲烷相对含量低、碳同位素偏轻特征, 随着演化程度增加, 甲烷相对含量逐渐增加、同位素趋于偏重^[17], 因此, 甲烷相对含量和甲烷碳同位素是指示天然气运移距离的有效参数。孔雀亭天然气甲烷相对含量分布于 80%~90%, 其中低带 D1 井天然气甲烷相对含量可达 90%, 但中高带甲烷相对含量相近, 主要分布于 75%~85%; 甲烷碳同位素具有类似变化趋势, 表现为低带偏重、中高带偏轻(表 2), 揭示了天然气自西次凹沿斜坡低带向高带运移特征。

西湖凹陷天然气中 N_2 主要以有机质热降解形成为主^[20], 因 N_2 分子直径较小、岩层吸附能力较弱, 运移速度较烃类快, 在运移分异作用影响下, 随运移距离增加天然气中 N_2 含量增加, 此参数在斜坡带平湖油气田应用效果较好^[21]。孔雀亭区低带 D1 井 N_2 含量低于 0.1%, 向斜坡中高带方向 N_2 含量呈增加趋势, Z1、Z2 井区都在 0.2% 以上, 至高带 G1 井区达到 4%, (表 2), 氮气与乙烷比值(N_2/C_2)揭示了天然气由低带向高带运移(图 9)。 iC_4/nC_4 比值随运移距离增加而增加, 在天然气运移示踪中有着广泛应用^[21], 孔雀亭区 iC_4/nC_4 呈现低带(D1)相对较低、高带(G1、G2)较高的特征, 是天然气由低带向高带运移的结果(图 9), 表明斜坡低部位天然气

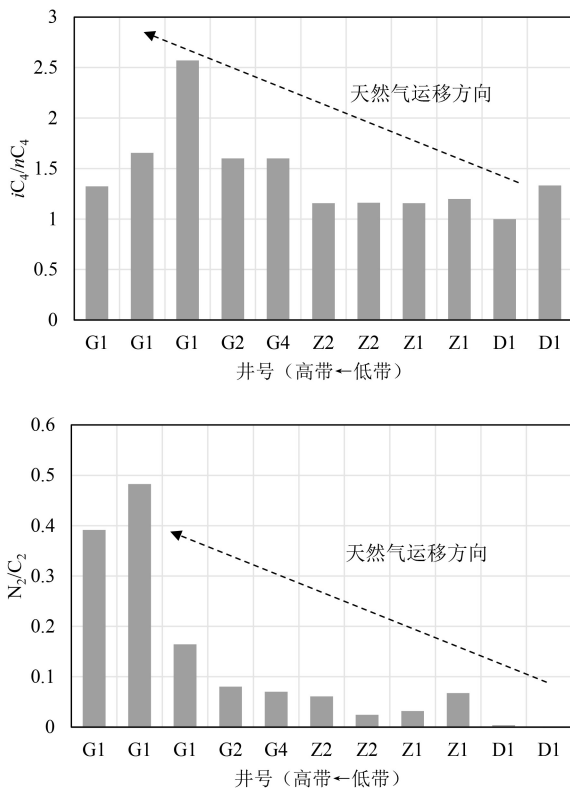


图9 孔雀亭区天然气运移效应

Fig.9 Migration effect and direction of natural gas of the Kongqueting area

供给丰富,勘探潜力大(图8)。

斜坡带本地烃源岩自生天然气和西次凹外源气双重贡献条件下,两者混合作用导致斜坡低带(D1、Z1井)浅层系天然气成熟度高于深层系天然气的特征(表2)。成藏中后期,西次凹高成熟天然气沿斜坡低带向高带运移过程中沿断层垂向运移至有效圈闭聚集成藏,此时斜坡低带烃源岩部分进入生气阶段,低成熟度天然气就近聚集至附近圈闭,并与西次凹高成熟天然气混合,浅部层位烃源岩演化程度低、生气量少,混合后表现为西次凹天然气的高成熟特征,而深部层位烃源岩演化程度高、生气量大,混合后天然气成熟度较西次凹天然气程度低,且低于浅部层系天然气。

5 结论

(1) 西湖凹陷孔雀亭区原油呈低密度、低硫、低蜡特征,主要分布于平湖组中、上段;天然气为煤型气,以湿气为主,主要分布于平湖组中、下段。

(2) 原油主要来自斜坡带内生油次洼,以宝石组和平下段烃源岩贡献为主,平中、上段烃源岩少量贡献;天然气以西次凹烃源岩贡献为主,同时有

部分斜坡带自生天然气混入。

(3) 煤系烃源岩演化早期生成少量低熟油短距离运移成藏,中后期形成成熟原油由次洼向相对高部位运移,环次洼区域是原油优势聚集方向;天然气主要呈自西次凹沿斜坡低带向高带运移特征,斜坡低部位是天然气勘探有利区带。

参考文献 (References)

- [1] 周心怀,高顺莉,高伟中,等. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 153-164. [ZHOU Xinhuai, GAO Shunli, GAO Weizhong, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei slope belt, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 153-164.]
- [2] 徐发,张建培,张田,等. 西湖凹陷输导体系特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(7): 24-29, 43. [XU Fa, ZHANG Jianpei, ZHANG Tian, et al. Features of migration system in Xihu sag and its control on hydrocarbon accumulation [J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(7): 24-29, 43.]
- [3] 单超,叶加仁,曹强,等. 西湖凹陷孔雀亭气田成藏主控因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 135-144. [SHAN Chao, YE Jiaren, CAO Qiang, et al. Controlling factors for gas accumulation in Kongqueting gas field of Xihu sag [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2015, 35(1): 135-144.]
- [4] 刘金水. 西湖凹陷平湖构造带地层压力特征及与油气分布的关系[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2015, 42(1): 60-69. [LIU Jinshui. Characteristics of formation pressure and their relationship with hydrocarbon distribution in Pinghu tectonic belt of Xihu sag, East China Sea [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2015, 42(1): 60-69.]
- [5] 刘金水,赵洪. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖斜坡带差异性气侵的成藏模式[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2019, 46(4): 487-496. [LIU Jinshui, ZHAO Hong. Characteristics of differential gas invasion on Pinghu slope of Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2019, 46(4): 487-496.]
- [6] 朱扬明,周洁,顾圣啸,等. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 32-39. [ZHU Yangming, ZHOU Jie, GU Shengxiao, et al. Molecular geochemistry of Eocene Pinghu formation coal-bearing source rocks in the Xihu depression, East China Sea shelf basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 32-39.]
- [7] 贾健谊,须雪豪,孙伯强. 东海西湖凹陷原油与天然气的地球化学特征[J]. 海洋石油, 2000(2): 1-7. [JIA Jianyi, XU Xuehao, SUN Boqiang. Oil/gas geochemical character in the Xihu trough of the East China Sea [J]. Offshore Oil, 2000(2): 1-7.]
- [8] 傅宁,李友川,陈桂华,等. 东海平湖油气田油藏地球化学研究[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(4): 240-244. [FU Ning, LI Youchuan, CHEN Guihua, et al. Reservoir geochemistry in Pinghu

- field, East China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(4): 240-244.]
- [9] 曹倩, 宋在超, 周小进, 等. 东海盆地西湖凹陷原油地化特征及来源分析[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 251-259. [CAO Qian, SONG Zaichao, ZHOU Xiaojin, et al. Geochemical characteristics and source of crude oil in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 251-259.]
- [10] Zhu Y M, Li Y, Zhou J, et al. Geochemical characteristics of Tertiary coal-bearing source rocks in Xihu depression, East China Sea basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 154-165.
- [11] Su A, Chen H H, Lei M Z, et al. Paleo-pressure evolution and its origin in the Pinghu slope belt of the Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 198-213.
- [12] 苏奥, 陈红汉. 东海盆地西湖凹陷油岩地球化学特征及原油成因来源[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2015, 40(6): 1072-1082. [SU Ao, CHEN Honghan. Geochemical characteristics of oil and source rock, origin and genesis of oil in Xihu depression, East China Sea Basin [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(6): 1072-1082.]
- [13] 蒋一鸣, 周倩羽, 李帅, 等. 西湖凹陷西部斜坡带平湖组含煤岩系沉积环境再思考[J]. *中国煤炭地质*, 2016, 28(8): 18-25. [JIANG Yiming, ZHOU Qianyu, LI Shuai, et al. Reconsideration of Pinghu formation coal-bearing rock series sedimentary environment in western slope of Xihu Depression [J]. *Coal Geology of China*, 2016, 28(8): 18-25.]
- [14] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. *天然气工业*, 2011, 31(12): 1-6. [DAI Jinxing. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12): 1-6.]
- [15] 李贤庆, 钟宁宁, 王铁冠, 等. 东海西湖凹陷早第三纪烃源岩生烃组分剖析[J]. *煤田地质与勘探*, 1995, 23(6): 24-31. [LI Xianqing, ZHONG Ningning, WANG Tieguan, et al. The study on hydrocarbon-generating macerals of lower tertiary source rocks in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1995, 23(6): 24-31.]
- [16] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [17] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. *地球化学*, 1999, 28(4): 359-366. [LIU Wenhui, XU Yongchang. A two stage model of carbon isotopic fractionation in coal gas [J]. *Geochemica*, 1999, 28(4): 359-366.]
- [18] 苏奥, 陈红汉, 吴悠, 等. 东海盆地西湖凹陷中西部低渗透致密—致密砂岩气成因、来源及运聚成藏[J]. *地质学报*, 2018, 92(1): 184-196. [SU Ao, CHEN Honghan, WU You, et al. Genesis, origin and migration-accumulation of Low-Permeable and nearly tight-tight sandstone gas in the central western part of Xihu sag, East China Sea Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(1): 184-196.]
- [19] 陈中红, 查明, 吴孔友, 等. 准噶尔盆地陆梁地区油气运移方向研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(2): 19-22. [CHEN Zhonghong, ZHA Ming, WU Kongyou, et al. Hydrocarbon migration direction in Luliang section of Junggar Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27(2): 19-22.]
- [20] 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 521-527. [SU Ao, CHEN Honghan, WANG Cunwu, et al. Genesis and maturity identification of oil and gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 521-527.]
- [21] 傅宁, 李友川, 刘东, 等. 东海平湖气田天然气运移地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 34-37. [FU Ning, LI Youchuan, LIU Dong, et al. Geochemical characteristics of natural gas migration in Pinghu gas field, East China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 34-37.]