

doi:10.3799/dqkx.2016.132

福山凹陷西部地区原油地化特征与油源对比

卢政环^{1,2}, 甘华军^{1*}, 时 阳², 陈善斌¹, 王 华¹, 马庆林²

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中石油南方石油勘探开发有限责任公司, 广东广州 510240

摘要: 福山凹陷是北部湾盆地的重要含油气单元, 是一个“小而肥”的富生烃凹陷, 充分利用烃源岩和原油的有机地球化学等分析测试数据, 针对凹陷内研究较少的西部地区的原油进行地化特征分析, 进而研究该区油气藏的油源, 研究结果显示凹陷西部原油主要为轻质油, 族组分以高饱和烃和芳烃含量、低非烃+沥青质含量为特点, 凹陷西部的原油生油母质为陆源高等植物和低等水生生物的混合来源, 为陆相湖盆混合型母质特征, 不同区块不同层段原油的生油母质具有一定的差别, 研究区生油母质沉积环境为偏淡水氧化沉积环境的湖沼相, 结合原油成熟度, 可将研究区原油划分为 3 类: (1) 美台—红光流三上段原油, 具有“中等成熟度, 低奥利烷含量”特征; (2) 永安流—上段原油, 具有“高成熟度, 高奥利烷含量”特征; (3) 朝阳流—上段原油, 具有“低成熟度, 中等奥利烷含量”特征。进一步油源对比结果显示, 美台—红光地区流三段原油来自流三段和流二下段烃源岩, 而永安地区的流一段烃源岩为永安地区的原油提供油源。

关键词: 福山凹陷; 流沙港组; 原油; 生物标志物; 油源对比; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2016)11-1909-12

收稿日期: 2016-05-12

Geochemical Characteristics of Crude Oil and Oil-Source Correlation in the Western Fushan Depression

Lu Zhenghuan^{1,2}, Gan Huajun^{1*}, Shi Yang², Chen Shanbin¹, Wang Hua¹, Ma Qinglin²

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. South Petroleum Exploration and Development Co., Ltd., Guangzhou 510240, China

Abstract: Fushan depression is a small and resource-rich petroliferous depression, and becomes one of the significant petroleum units in Beibuwan Basin. Making full use of organic geochemical data from source rock and oil, the paper focuses on the geochemical characteristics of crude oil in the western Fushan depression which few documents mentioned, and probes into the source of typical reservoirs. It is shown that the petroleum is mainly light oil with high content of saturated hydrocarbon and aromatic and low content of asphaltene and non-hydrocarbon matter. The kerogen is made up of terrestrial higher plants mixed with lower aquatic organisms, and is typical of the hybrid sources just as that of continental basin. The feature of kerogen from different area and layers are diversity. The sedimentary environment is partial oxidation and freshwater lacustrine. Combined with maturity of petroleum, the crude oil can be classified as three categories. The first class of oil is characteristic of medium maturity and low content of Ol occurred in the upper part of Third Member of Liushagang Formation (El_{s_3}). The second class is found in upper part of First Member in Liushagang Formation (El_{s_1}) in Yong'an area, with high maturity and high content of Oleane (Ol). The third class also comes from upper part of El_{s_1} in Chaoyang area, and its maturity is low with the medium content of Ol. Further studies on the oil-source correlation indicated that the oil in El_{s_3} originates from the source rock in the El_{s_3} and lower part of El_{s_2} in Meitai and Hongguang area, and the source rock from El_{s_1} in Yong'an area is the main oil source for the oil in El_{s_1} .

Key words: Fushan depression; Liushagang Formation; crude oil; biomarker; oil-source correlation; petroleum geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41202074).

作者简介: 卢政环 (1974—), 男, 高级工程师, 主要从事石油地质及油气勘探的研究工作, E-mail: zhlu_1997@163.com

*** 通讯作者:** 甘华军, E-mail: hjgan@cug.edu.cn

引用格式: 卢政环, 甘华军, 时阳, 等, 2016. 福山凹陷西部地区原油地化特征与油源对比. 地球科学, 41(11): 1909—1920.

组(Ewz)3套地层(图 1b)。

2 原油地球化学特征

2.1 原油物性与族组分特征

研究区原油具有“低密度、低粘度、低凝固点、低含硫量、中—低含蜡量”的特征。原油密度平均值为 0.825 5 g/cm³,为典型的轻质油。原油粘度较低,平均值为 3.85 cp,一般低于 5.00 cp。油凝固点平均值为 24.28 ℃,一般低于 30 ℃;流一上段原油的凝固点(平均值为 21.50 ℃)同样略低于流三上段原油(平均为 26.13 ℃)。含硫量低,平均值为 0.100 9%,具有典型陆相成因原油低含硫量的特征。原油含蜡量平均值为 9.16%,具有中—低的含蜡量(表 1)。

原油族组成中以饱和烃馏分为主,全部样品饱和烃含量平均值达 77.37%,芳香烃含量平均值为 14.24%,饱芳比值平均为 6.02(表 1)。其中,美台地区流三上段原油样品的饱和烃含量和饱芳比值平均值为 79.37%和 7.23;红光地区流三上段原油样品的饱和烃含量和饱芳比值平均值为 80.37%和 8.45;永安地区流一上段原油样品的饱和烃含量和饱芳比值平均值为 73.72%和 4.47;朝阳地区流一上段原油样品的饱和烃含量和饱芳比值平均值为 78.41%和 5.86。流三段原油的饱和烃含量和饱芳比值整体要比流一段原油都要高。原油族组成中非烃和沥青质含量低,所有原油样品的非烃+沥青质含量平均值约为 8.64%。高饱和烃和芳烃含量、低非烃+沥青质

含量的特点与原油主要为轻质油的特征相吻合。

2.2 原油饱和烃气相色谱特征

原油正构烷烃碳数范围一般为 $nC_{11} \sim nC_{35}$ 。其中,美台地区流三上段原油饱和烃色谱曲线以双峰态前峰型为主(图 2),CPI 平均值为 1.19,具有弱奇偶优势,指示美台地区原油生烃母质为水生生物和陆源高等植物混合来源;永安地区流一上段原油饱和烃色谱曲线为双峰态后峰型,显示其生油母岩为低等水生生物和陆源高等植物混合来源,且以陆源高等植物占优(图 2);朝阳地区的流一上段原油饱和烃色谱曲线主要为双峰型(图 2),其主峰碳含量具均势特征,反映其生油母质为低等水生生物和陆源高等植物混合来源(卢双舫和张敏,2008)。

研究区原油姥植比(Pr/Ph)均较高,Pr/Ph 平均值为 6.06,指示氧化条件下陆源有机质的输入(表 2)。研究区 Pr/Ph、Pr/ nC_{17} 及 Ph/ nC_{18} 三角图反映研究区原油成因环境均为湖沼相,指示烃源岩有机质偏氧化沉积环境(图 3)。

2.3 甾、萜化合物组成特征

2.3.1 甾烷 研究区部分原油样品 $C_{27}-C_{28}-C_{29} \alpha\alpha\alpha-R$ 甾烷丰度大部分呈“V”型分布,其中 C_{27} 、 C_{29} 甾烷相对含量相当,均为 30%~60%, C_{28} 甾烷相对含量较低,为 10%~20%,反映母质输入中陆源高等植物和低等水生生物都很丰富,具有陆相湖盆混合型母质特征(王飞宇等,2001;孟凡巍等,2006)。少数样品呈“L”型或者反“L”分布,反映部分原油样品母质输入类型存在差别(图 2,表 2)。规则甾烷 $C_{27}-C_{28}-$

表 1 福山凹陷西部地区原油物性及族组分统计

Table 1 The physical property and component of crude oil in the western Fushan depression

地区	井号	深度(m)	层位	比重 (20℃)	粘度 (cp)	凝固点 (℃)	含硫 (%)	含蜡 (%)	饱和烃 (%)	芳烃 (%)	沥+非烃 (%)	饱芳比
永安	A1	2 952.0~2 994.0	El _{S1} [±]	0.82	2.05	19.00	0.04	/	82.16	12.03	5.81	6.83
	A2	3 081.2~3 019.2	El _{S1} [±]	0.80	1.27	9.00	0.06	6.98	83.33	12.56	4.10	6.63
朝阳	C1	2 466.6~2 525.4	El _{S1} [±]	/	/	/	/	/	77.84	13.40	8.76	5.81
	C2	2 498.2~2 509.0	El _{S1} [±]	0.84	5.33	30.00	0.10	4.80	76.06	14.40	9.53	5.28
	F1	2 605.0~2 698.2	El _{S1} [±]	0.84	4.21	28.00	0.13	3.60	76.76	16.22	7.03	4.73
美台	T1	3 084.0~3 086.0	El _{S3} [±]	0.83	3.32	26.00	0.32	13.49	73.30	15.34	11.36	4.78
	T2	3 011.8~3 047.6	El _{S3} [±]	0.84	7.31	27.80	0.09	21.67	72.39	19.02	8.59	3.81
	T4	3 208.2~3 275.8	El _{S3} [±]	0.82	2.44	29.00	0.09	15.05	67.72	12.17	20.11	5.56
	T4-1	3 459.6~3 493.4	El _{S3} [±]	0.84	7.04	35.00	0.07	2.20	81.94	11.81	6.25	6.94
	T5-1	3 150.0~3 160.1	El _{S3} [±]	/	/	/	/	/	81.79	10.33	7.88	7.92
	T5	3 217.3~3 219.0	El _{S3} [±]	/	/	/	/	/	83.96	9.80	6.24	8.57
	T6X	2 628.2~2 631.0	El _{S3} [±]	/	/	/	/	/	82.89	11.09	6.02	7.47
	G5	2 725.4~2 775.0	El _{S3} [±]	0.81	1.71	18.00	0.06	5.60	84.02	8.98	7.00	9.36
红光	G3X	2 504.0~2 513.4	El _{S3} [±]	0.81	/	21.00	0.04	8.66	79.62	14.63	5.75	5.44
	G5-1	2 725.4~2 775.0	El _{S3} [±]	0.83	/	/	0.11	9.53	77.48	7.34	15.19	10.56

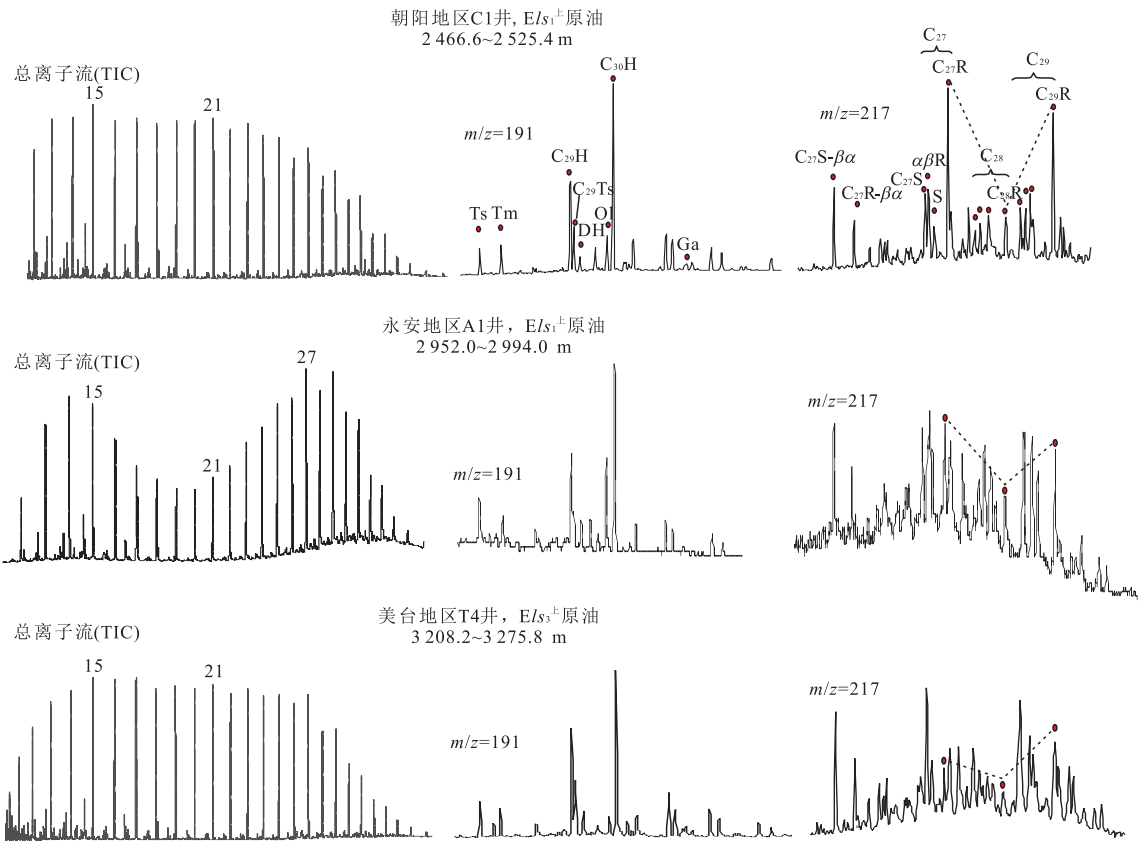


图 2 福山凹陷西部地区原油饱和烃的气相色谱(TIC)以及 m/z 191 和 217 质谱图

Fig.2 The gas chromatograms and m/z 191 and 217 mass fragmentograms of saturated hydrocarbon in crude oil from the western Fushan depression

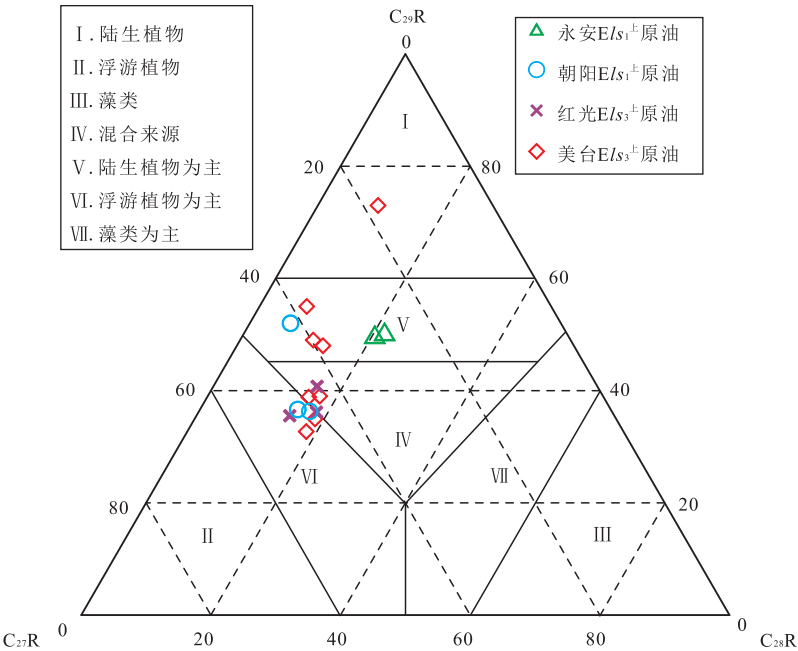


图 3 福山凹陷西部地区原油 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷三角图

Fig.3 The triangle diagram of C_{27} - C_{28} - C_{29} regular steranes of crude oil in the western Fushan depression

表 2 福山凹陷西部地区原油生物标志物参数
Table 2 The biomarker parameters of oil in the western Fushan depression

地区	井位	深度(m)	层位	Pr/ Ph	Pr/ nC ₁₇	Ph/ nC ₁₈	C ₂₁ -/ C ₂₂ +	CPI	OEP	C ₂₇ - aaa-R	C ₂₈ - aaa-R	C ₂₉ - aaa-R	C ₂₉ R/ C ₂₇ R	C ₂₉ ββ/ (aa+ββ)	C ₂₉ S/ (R+S)	Ts/ (Ts+Tm)	C ₂₉ Ts/ (C ₂₉ Ts+C ₂₉ H)	C ₃₀ DH/ C ₃₀ H	Ol/ C ₃₀ H	Ga/ C ₃₀ H	C ₂₀ H/ C ₃₀ H
永安	A1	2 952.0~2 994.0	EI _{s1} [±]	3.46	0.56	0.18	0.44	1.20	1.21	0.25	0.25	0.50	2.00	0.48	0.54	0.62	0.31	0.18	0.59	0.03	0.51
	A2	3 081.2~3 019.2	EI _{s1} [±]	3.97	0.51	0.16	/	1.15	/	0.25	0.18	0.57	2.28	0.48	0.42	0.50	0.27	0.19	0.70	0.06	0.51
朝阳	C1	2 466.6~2 525.4	EI _{s1} [±]	3.69	0.88	0.25	1.00	1.23	1.05	0.42	0.22	0.36	0.86	0.4	0.23	0.47	0.27	0.08	0.19	0.06	0.52
	C2	2 498.2~2 509.0	EI _{s1} [±]	1.13	0.21	0.21	0.72	1.05	1.07	0.44	0.20	0.37	0.84	0.38	0.33	0.53	0.30	0.11	0.40	0.06	0.50
	F1	2 605.0~2 698.2	EI _{s1} [±]	3.45	0.78	0.26	0.46	1.24	/	0.37	0.11	0.52	1.41	0.3	0.46	0.51	0.29	0.11	0.38	0.02	0.46
美台	T1	3 084.0~3 086.0	EI _{s3} [±]	3.45	0.68	0.21	0.74	1.22	/	0.33	0.12	0.55	1.39	0.34	0.62	0.58	0.36	0.15	0.11	0.13	0.57
	T2	3 011.8~3 047.6	EI _{s3} [±]	3.68	0.60	0.19	0.88	1.22	/	0.35	0.16	0.49	1.67	0.33	0.52	0.58	0.34	0.14	0.11	0.14	0.59
	T4	3 208.2~3 275.8	EI _{s3} [±]	17.49	0.48	0.03	4.25	1.21	1.19	0.34	0.18	0.48	1.41	0.41	0.56	0.46	0.53	0.13	0.08	0.09	0.39
	T4-1	3 459.6~3 493.4	EI _{s3} [±]	3.99	0.80	0.20	0.62	1.19	1.36	0.46	0.24	0.34	0.74	0.48	0.46	0.58	0.42	0.24	0.18	0.11	0.65
	T5	3 217.3~3 219.0	EI _{s3} [±]	4.06	0.60	0.16	0.96	1.17	1.46	0.39	0.21	0.41	1.05	0.43	0.55	0.60	0.41	0.21	0.16	0.03	0.65
	T5-1X	3 150.0~3 212.2	EI _{s3} [±]	10.06	0.47	0.05	4.12	1.15	1.13	0.13	0.14	0.73	5.42	0.41	0.53	0.62	0.36	0.23	0.16	0.03	0.57
红光	T6X	2 628.2~2 631.0	EI _{s3} [±]	4.24	0.61	0.15	0.97	1.17	1.43	0.42	0.21	0.40	0.95	0.47	0.45	0.58	0.40	0.22	0.19	0.13	0.67
	G5	2 628.2~2 631.0	EI _{s3} [±]	4.35	0.46	0.11	1.28	1.13	/	0.41	0.23	0.36	0.90	0.48	0.47	0.70	0.42	0.35	0.29	0.13	0.41
	G3X	2 725.4~2 775.0	EI _{s3} [±]	4.64	0.58	0.13	1.06	1.16	/	0.39	0.21	0.41	1.05	0.50	0.42	0.58	0.43	0.24	0.23	0.12	0.56
	G5-1	2 504.0~2 513.4	EI _{s3} [±]	4.38	0.72	0.19	1.51	1.21	/	0.45	0.19	0.35	0.78	0.47	0.40	0.61	0.46	0.25	0.19	0.10	0.52

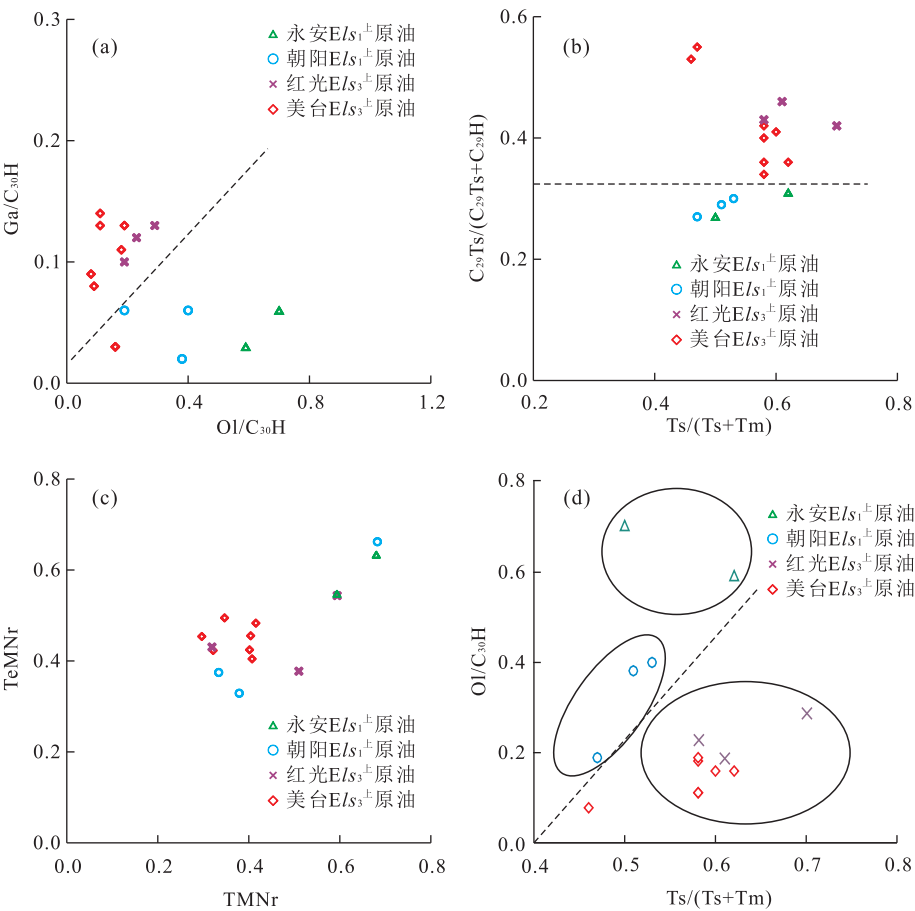


图 4 福山凹陷西部地区原油生标参数相关图

Fig.4 The biomarker correlation of crude oil in the western Fushan depression

C₂₉ααα-R 三角图也显示原油数据点绝大部分集中于Ⅳ区(母质输入为混合来源)和Ⅴ区(母质输入以陆生植物为主,并有少量湖相水生母质)(图 3)。区域上,美台地区流三上段原油母质类型主要为混合来源和以陆生植物为主,且有一个样品点分布在陆生植物来源区域;红光地区流三上段原油母质类型为混合来源;永安地区流一上段原油母质类型为陆生植物为主;朝阳地区流一上段原油母质类型以混合来源为主,有一个样品点分布在以陆生植物分布区域为主。由此可见,红光地区流三上段原油母质类型与永安地区流一上段原油母质类型具有不同的生源构成;而美台—红光—朝阳地区原油生源构成具有一定的相似性。

2.3.2 萘烷 原油五环三萜烷中藿烷含量相对较高,占绝大部分,莫烷系列含量较低;非藿烷类化合物中奥利烷(Ol)在本研究区相对丰富,而伽马蜡烷(Ga)含量相对较低,伽马蜡烷指数(Ga/C₃₀ 藿烷)是常用来指示水体盐度的参数指标 (Moldowan *et al.*, 1985)(图 2)。根据原油 Ol/C₃₀ 藿烷与 Ga/C₃₀

藿烷相关图(图 4a,表 2)可以看出,所有原油样品 Ga/C₃₀ 藿烷值都小于 0.15,指示淡水的氧化沉积环境;美台地区流三上段原油奥利烷指数(Ol/C₃₀ 藿烷)较低,平均值为 0.16;红光地区流三上段原油奥利烷指数与美台地区原油值相当,平均值为 0.24;而永安地区流一上段原油与朝阳地区流一上段原油具有较高的奥利烷指数,平均值分别达 0.60 和 0.44。总体反映出在研究区由南向北陆源高等植物的输入量可能逐渐增加。

2.4 原油成熟度

沉积物中的生物标志化合物一些特征参数随着有机质热演化程度的增大,呈现出有规律的变化,其异构体的一些比值是常用的成熟度指标,如姥鲨烷、植烷的 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈, Ts/(Ts+Tm) 和 C₂₉ Ts/(C₂₉ Ts+C₂₉ H)、三甲基萘比值(TMNr)与四甲基萘比值(TeMNr)和甲基菲比值(MPR)与甲基菲指数(MPI1)等(Seifert and Moldowan, 1978;Radke *et al.*, 1986; Ten *et al.*, 1986;Peters and Moldowan, 1993;Chakhmakhchevetal., 1997;李美俊和王

铁冠,2005).

$Ts/(Ts+Tm)$ 和 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}H)$ 是依据三降新藿烷与降藿烷建立的常规成熟度参数.福山凹陷西部地区原油 $Ts/(Ts+Tm)$ 和 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}H)$ 值呈现良好的相关性(图 4b),因为这两个参数受相同的热成熟机理控制,随着成熟度增高,参数值增大(曾宪章等,1989).总体上,美台地区流三上段原油 $Ts/(Ts+Tm)$ 值位于 $0.5\sim 0.7$, $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}H)$ 值位于 $0.35\sim 0.45$;红光地区流

三上段原油与永安地区流一上段原油数据点较为分散,参数值整体与美台地区流三段原油参数值相当;而朝阳地区流一段原油成熟度较其他地区偏低;此结果与前述内容较为一致.

三甲基萘比值(TMNr)与四甲基萘比值(TeM-Nr) 作为成熟度参数,随着成熟度增长, TMNr 与 TeMnr 值均增大(李美俊和王铁冠,2005)(图 4c).研究区内原油的 TMNr 和 TeMnr 值具有较好的相关性,表明二者受相同的化学反应机理所制约.总的

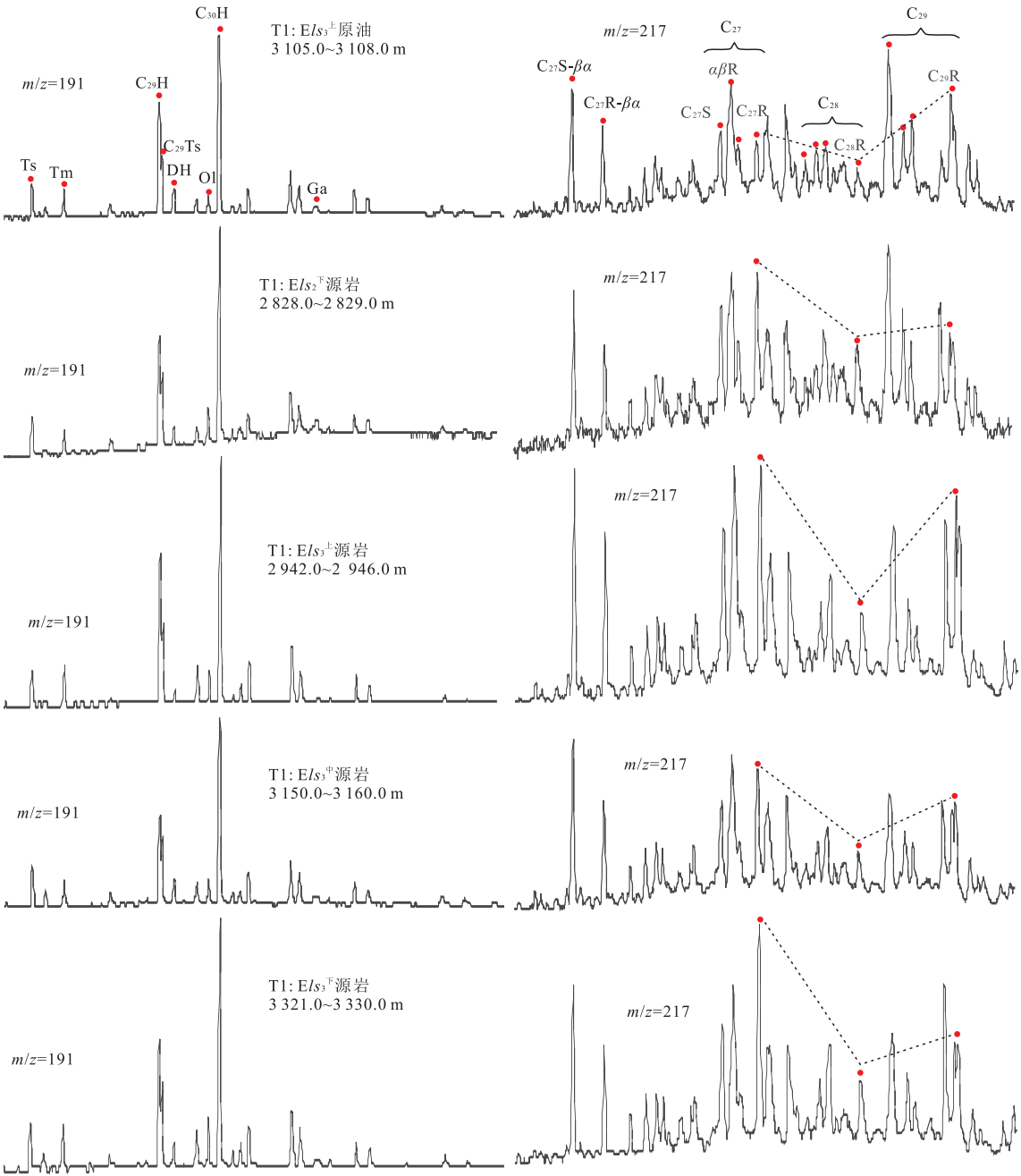


图 5 美台地区 M1 井油一源的生物标志化合物分布谱图

Fig.5 The spectrum of biomarker of oil and extracted oil from well M1 in Meitai area

来看,永安地区流一上段原油 TMNr 和 TeMNr 值最高,成熟度最高;朝阳地区流一上段原油 TMNr 和 TeMNr 值最低,成熟度最低;而美台—红光地区流三段成熟度处于二者之间.在此倾向于利用芳烃成熟度参数,主要原因是成熟度较高的原油或者凝析油、轻质油中生物标志化合物浓度较低影响了检测结果的精度.

综上所述,研究区内不同地区不同层位原油成熟度具有一定的差异性.其中,永安地区流一上段原油成熟度最高,朝阳地区流一上段原油成熟度最低,美台地区流三上段原油成熟度与红光地区流三上段原油成熟度相当,均介于永安地区和朝阳地区原油之间.

2.5 原油成因类型划分

笔者对研究区 15 件原油样品进行地球化学分析,包括原油族组成、正烷烃分布特征及生标参数特征.研究表明,研究区原油来自沉积环境和生源组成相似的烃源岩,属于同一族群.但原油成熟度参数和奥利烷指标表明,永安地区流一上段和朝阳地区流一上段及美台—红光地区流三上段原油成熟度和成因存在着差别,可以划分为 3 种类型(图 4d):

(1)美台—红光流三上段原油,具有“中等成熟度,低奥利烷含量”特征;(2)永安流一上段原油,具有“高成熟度,高奥利烷含量”特征;(3)朝阳流一上段原油,具有“低成熟度,中等奥利烷含量”特征.

3 油源对比分析

由于不同地区原油的产出层位及其地化特征存在着差异,在此以美台—红光地区流三上段原油和

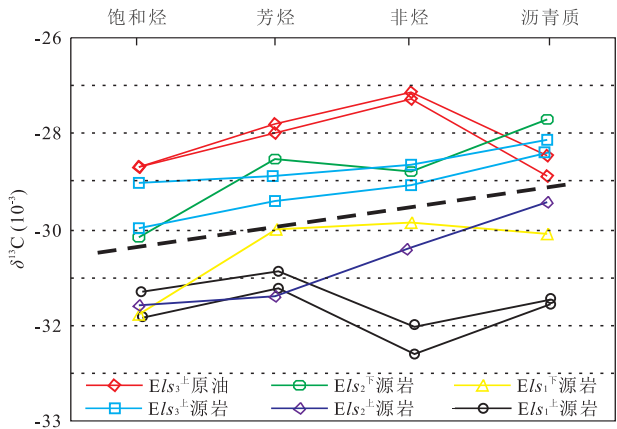


图 7 美台—红光地区原油和源岩抽提物的族组分碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布

Fig.7 The distribution of carbon isotope of family component in oil and extracted oil from Meitai and Hongguang area

永安地区流一段原油为代表进行油源对比分析,探讨研究区不同层位的油源.

3.1 美台—红光地区油源对比

美台地区 T1 井、T5X 井流三上段原油及红光地区 G3X 井、G5-1 井流三上段原油指纹分布基本一致,具有相同的生源构成(图 5,表 2),且均以“低丰度的奥利烷”为主要特征,母质环境属于低盐度偏氧化的沉积环境,其成熟度介于永安地区流一上段原油和朝阳地区流一上段原油成熟度之间.为进一步研究美台—红光地区流三上段油源关系,笔者以 T1 井流三上段原油(3 084.0~3 086.0 m)为典型代表,与该井源岩的藿烷、甾烷等生物标志化合物特征进行对比.T1 井流三上段原油与流二下段和流三段源岩的藿烷、甾烷指纹分布图具有很强的相似性(图

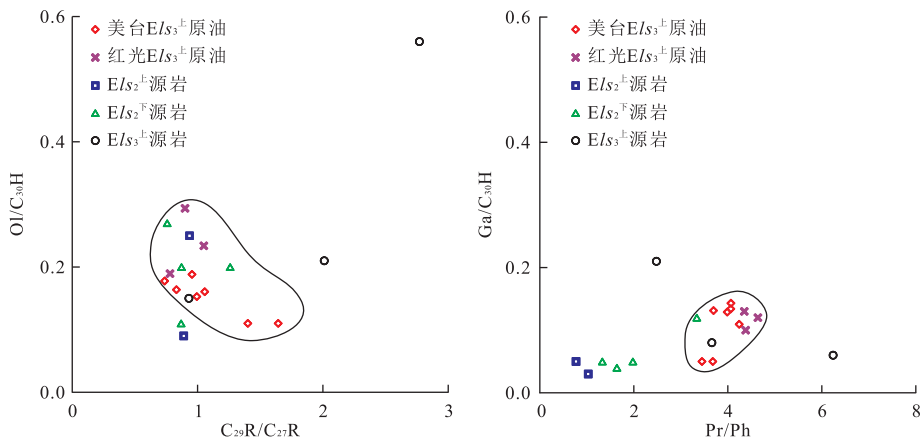


图 6 美台—红光地区生标参数油—源对比

Fig.6 The oil and source correlation by biomarker parameters in the Meitai and Hongguang area

5).T1 井流三上段原油的 $C_{29}H/C_{30}H$ 值为 0.63,T1 井流二下段和流三段源岩的 $C_{29}H/C_{30}H$ 值为 0.50~0.63,与 T1 井原油值基本一致;T1 井流二下段和流三段源岩的 $Ol/C_{30}H$ 介于 0.14~0.18,与 T1 井原油值 0.10 非常接近.因此,福山凹陷西部美台一红光地区流三上段原油来源于流二下段和流三段烃源岩.

从油-岩的 $Ol/C_{30}H$ 与 $C_{29}R/C_{27}R$ 和 $Ga/C_{30}H$ 与 Pr/Ph 相关图(图 6)可以看出,流三上段原油与流三段和流二下段烃源岩具有更好的亲缘关系,与流二段上段及其以上的源岩亲缘关系变差,由此推测美台一红光地区原油主要来源于流三段烃源岩,流二下段烃源岩也有所贡献.

不同来源的有机质其 $\delta^{13}C$ 值不同,且 $\delta^{13}C$ 值受热演化和生物降解等影响小,因此成为油源对比

最常用和最有效的指标之一(Fuex,1977;Peters and Moldowan,1993).从原油馏分稳定碳同位素组成可以看出(图 7),流三段和流二下段源岩的馏分稳定碳同位素 $\delta^{13}C$ 值分布指纹,与 T1 井原油最为相近,进一步表明流三段和流二下段是美台一红光地区的烃源岩.综合以上油源对比结果,福山凹陷西部美台一红光地区流三段原油来自流三段和流二下段烃源岩.

3.2 永安地区油源对比

永安地区 A1 井流一上段原油与 A2 井流一上段原油藿烷、甾烷指纹分布基本一致(图 8),具有相同的生源构成.

永安地区以 A2 井流一上段原油(3 019.0~3 081.8 m)为典型代表,与永安地区 A1、A2 和 F5 井源岩的生物标志化合物分布对比分析.A1 井流一

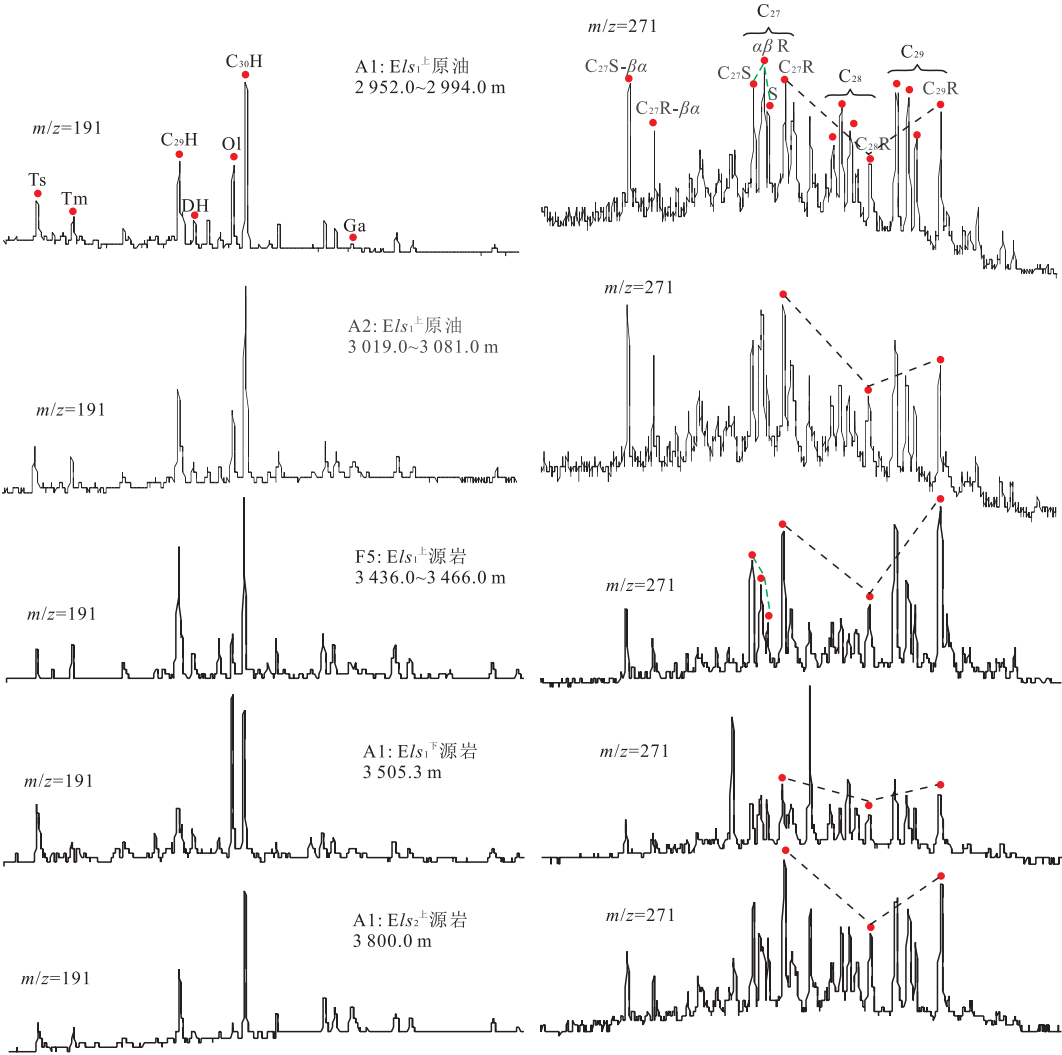


图 8 永安地区油-源的生物标志物分布图谱

Fig.8 The spectrum of biomarker of oil and source rock from Yong'an area

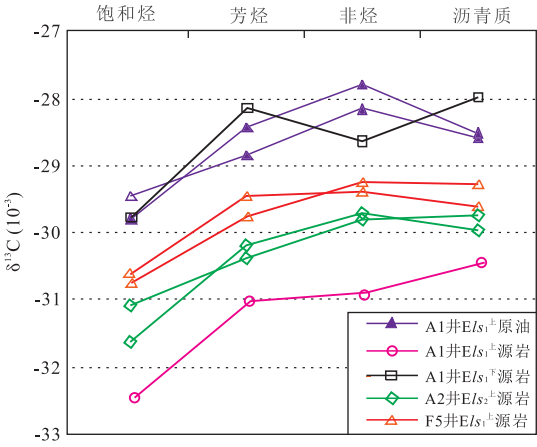


图 9 永安地区原油和源岩抽提物的族组分碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布
Fig.9 The distribution of carbon isotope of family component in oil and extracted oil from Yong'an area

上段(3 038.5 m)、流二上段(3 800.0 m)源岩的奥利烷丰度较低,为 0.06 ~ 0.11;而流一下段源岩(3 505.3 m)的奥利烷指数高达 1.17,并且其甾烷分布与 A2 井流一段原油有较大差异,其分子组成特征几乎无可对比性(图 8).处于永安地区西侧 F5 井流一段上段源岩(3 436.0 ~ 3 466.0 m)Ol/C₃₀H 值为 0.57,与 A2 井原油指纹分布较为相近.虽然,在甾烷分布图中,F5 井源岩 C₂₇ααα20S、C₂₇αββ20R 及 C₂₇αββ20S-甾烷 3 个峰的丰度呈逐渐降低趋势,而 A2 井流一段原油呈明显的倒“V”型分布,二者似乎有差异(图 8).但是 αββ20R-属于生物构型,αββ20S-属于地质构型,随成熟度增加,生物构型向地质构型转化(Peters and Moldowan, 1993).因此, A2 井原油和 F5 井源岩在 C₂₇甾烷上的差异可能是由成熟度因素造成的,对油源研究结论影响不大.

原油馏分稳定碳同位素组成分析也可为 A1 井油源探讨提供依据.从图 9 可见,A1 井流一段上段和 A2 井流二上段源岩的馏分稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值普遍偏轻,与 A1 井原油的馏分稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差 $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$,只有 A1 井流一下段源岩的馏分稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布指纹,与 A1 井原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布指纹相关性最好.此外,F5 井流一段两个源岩的馏分稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值较 A1 井原油略偏轻,但二者之间的差值均在 1×10^{-3} 左右,仍在油一岩对比相关性的变化范围之内.因此,原油馏分稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布指纹对比结果可进一步指示流一段是永安地区原油的烃源层.

综合以上油源对比结果,笔者认为福山凹陷永

安地区流一段原油来自于皇桐洼陷(F5 井方向)流一段的烃源岩.

4 结论

(1)福山凹陷西部地区原油具有“低密度、低粘度、低凝固点、低含硫量、中—低含蜡量”的特征.原油主要为轻质油,具有高饱和烃和芳烃含量、低非烃+沥青质含量的特征.

(2)原油的饱和烃气相色谱曲线为明显双峰型,生标参数均指示母质输入中陆源高等植物和低等水生生物都很丰富,具有陆相湖盆混合型母质特征,且不同原油的母质类型存在一定的差别.红光地区流三上段原油的母质类型与永安地区流一段原油母质类型具有差异性,具有不同的生源构成;而美台—红光—朝阳地区原油生源构成具有一定的相似性.

(3)研究区福山凹陷西部地区生油母质的沉积环境均为浅水偏氧化性的湖沼相环境.综合生标参数,笔者将凹陷西部地区的原油划分为 3 类:①美台—红光流三上段原油,具有“中等成熟度,低奥利烷含量”特征;②永安流一段原油,具有“高成熟度,高奥利烷含量”特征;③朝阳流一段原油,具有“低成熟度,中等奥利烷含量”特征.

(4)通过对美台—红光地区和永安地区为代表进行油源对比分析,结果显示:美台—红光地区流三段原油来自流三段和流二段烃源岩,而永安地区流一段原油来自于皇桐洼陷(F5 井方向)流一段的烃源岩.

References

Chakhmakhchev, A., Suzuki, M., Takayama, K., 1997. Distribution of Alkylated Dibenzothiophenes in Petroleum as a Tool for Maturity Assessments. *Organic Geochemistry*, 26(7–8): 483–489. doi:10.1016/s0146–6380(97)00022–3

Ding, W.X., Wang, W.J., Ma, Y.J., 2003. The Petroleum Systems Characteristic of Liushagang Formation in Fushan Depression, Beibuwan Basin. *Offshore Oil*, 23(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).

Fuex, A.N., 1977. The Use of Stable Carbon Isotopes in Hydrocarbon Exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 7: 155–188. doi:10.1016/0375–6742(77)90080–2

Gong, Z.S., Li, S.T., 1997. The Research of Oil and Gas Accumulation Kinetics in the Continental Margin Basin of Northern South China Sea. Science Press, Beijing, 88–

- 104(in Chinese).
- Li, M. J., Wang, T. G., 2005, The Generating Mechanism of Methylated Naphthalene Series in Crude Oils and the Application of Their Maturity Parameters. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(6): 606—611, 623(in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Wang, T. G., 2015, The Progress and Application of Reservoir Geochemistry in Hydrocarbon Exploration; An Example from the Fushan Depression, Beibuwan Basin, South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 215—222(in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Wang, T. G., Liu, J., et al., 2007, Oil Charging Orientation and Accumulation Characteristics of Oil Reservoirs in the Fushan Sag, Beibuwan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(2): 172—177(in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Wang, T. G., Liu, J., et al., 2008, The Occurrence of Oleananes in the Beibuwan Basin and Its Application to the Study of Maturity and Oil-Source Rock Correlation. *Acta Geologica Sinica*, 82(3): 585—595. doi: 10.1111/j.1755—6724.2008.tb00609.x
- Li, M. J., Wang, T. G., Shi, S., et al., 2014, Benzo [B] naphthothiophenes and Alkyl Dibenzothiophenes: Molecular Tracers for Oil Migration Distances. *Marine and Petroleum Geology*, 57: 403—417. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2014.06.012
- Lin, Z. L., Wang, H., Li, H. J., et al., 2015, Genetic Mechanism of Double-Layer Structure in Paleogene of Fushan Sag, Beibu Gulf Basin. *Earth Science*, 40(1): 169—178 (in Chinese with English abstract).
- Liu, E. T., W. H., Li, Y., et al., 2012, Characteristics and Hydrocarbon Enrichment Rules of Transfer Zone in Fushan Sag, Beibuwan Basin. *Journal of Central South University—Science and Technology*, 43(10): 3946—3953 (in Chinese with English abstract).
- Liu, E. T., W. H., Li, Y., et al., 2014, Sedimentary Characteristics and Tectonic Setting of Sublacustrine Fans in a Half-Graben Rift Depression, Beibuwan Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 52: 9—21.
- Lu, S. F., Zhang, M., 2008, Petroleum Geochemistry. Petroleum Industry Press, Beijing, 206—213(in Chinese).
- Luo, Q., Pang, X. Q., 2008, Reservoir Controlling Mechanism and Petroleum Accumulation Model for Consequent Fault and Antithetic Fault in Fushan Sag of Hainan Area. *Acta Petrolei Sinica*, 29(3): 363—367 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q. L., Zhao, S. E., Liao, Y. T., et al., 2012, Sequence Architectures of Palcogene Liushagang Formation and Its Significance in Fushan Sag of the Beibuwan Basin. *Earth Science*, 37(4): 667—678 (in Chinese with English abstract).
- Meng, F. W., Zhou, C. M., Yan K., et al., 2006, Biological Origin of Early Palaeozoic and Precambrian Hydrocarbon Source Rocks Based on C_{27}/C_{29} Sterane Ratio and Organic Carbon Isotope. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 23(1): 51—56 (in Chinese with English abstract).
- Moldowan, J. M., Seifert, W. K., Gallegos, E. J., et al., 1985, Relationship between Petroleum Composition and Depositional Environment of Petroleum Source Rocks. *AAPG Bulletin*, 69(8): 1255—1268. doi: 10.1306/ad462bc8—16f7—11d7—8645000102c1865d
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., 1993, The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. *Choice Reviews Online*, 30(5): 30—2690—30—2690. doi: 10.5860/choice.30—2690
- Radke, M., Welte, D. H., Willsch, H., 1986, Maturity Parameters Based on Aromatic Hydrocarbons; Influence of the Organic Matter Type. *Organic Geochemistry*, 10(1—3): 51—63. doi: 10.1016/0146—6380(86)90008—2
- Seifert, W. K., Moldowan, J. M., 1978, Applications of Steranes, Terpanes and Monoaromatics to the Maturation, Migration and Source of Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(1): 77—95. doi: 10.1016/0016—7037(78)90219—3
- Shi, Y. M., Liu, J., Zhang, M. Z., et al., 2007, Experience and Understand in Oil and Gas Exploration in Fushan Sag, Hainan Province. *South China Journal of Seismology*, 27(3): 57—68(in Chinese with English abstract).
- Ten Haven, H. L., De Leeuw, J. W., Peakman, T. M., et al., 1986, Anomalies in Steroid and Hopanoid Maturity Indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(5): 853—855.
- Wang, F. Y., Bian, L. Z., Zhang, S. C., et al., 2001, Two Kinds of Precursors of Hydrocarbon of Ordovician Marine Source Rocks. *Science in China (Series D)*, 31(2): 96—102 (in Chinese).
- Yu, J. J., Luo, Q., Zhang, D. J., 2004, Characteristics of Faults in the Fushan Depression of Harman, the Beibuwan Basin and Their Controlling Roles to Hydrocarbon Pool-Formation. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(3): 241—248(in Chinese with English abstract).
- Zeng, X. Z., Liang, D. G., Wang, Z. R., et al., 1989, Continental Oil and Source Rock Biomarkers in China. Gansu Press of Science and Technology, Lanzhou, 171—189(in Chinese).
- Zhao, Y. D., Wang, H., Gan, H. J., et al., 2014, The Analysis about Evolution of Basin Morphology in Fushan Sag of

Hainan Province, *Journal of China University of Mining & Technology*, 43(6):1078–1086(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

丁卫星,王文军,马英俊,2003.北部湾盆地福山凹陷流沙港组含油气系统特征.海洋石油,23(2):1–6.

龚再生,李思田,1997.南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集.北京:科学出版社,88–104.

李美俊,王铁冠,2005.原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用.石油实验地质,27(6):606–611,623.

李美俊,王铁冠,刘菊,等,2007.北部湾盆地福山凹陷原油充注方向及成藏特征.石油实验地质,29(2):172–177.

李美俊,王铁冠,2015.油藏地球化学在勘探中的研究进展及应用:以北部湾盆地福山凹陷为例.地学前缘,22(1):215–222.

林正良,王华,李红敬,等,2015.北部湾盆地福山凹陷古近系双层结构形成机制.地球科学,40(1):169–178.

刘恩涛,王华,林正良,等,2012.北部湾盆地福山凹陷构造转换带及其油气富集规律.中南大学学报(自然科学版),43(10):3946–3953.

卢双舫,张敏,2008.油气地球化学.北京:石油工业出版社,206–213.

罗群,庞雄奇,2008.海南福山凹陷顺向和反向断裂控藏机理及油气聚集模式.石油学报,29(3):363–367.

马庆林,赵淑娥,廖远涛,等,2012.北部湾盆地福山凹陷古近系流沙港组层序地层样式及其研究意义.地球科学,37(4):667–678.

孟凡巍,周传明,燕夔,等,2006.通过 C_{27}/C_{29} 甾烷和有机碳同位素来判断早古生代和前寒武纪的烃源岩的生物来源.微体古生物学报,23(1):51–56.

石彦民,刘菊,张梅珠,等,2007.海南福山凹陷油气勘探实践与认识.华南地震,27(3):57–68.

王飞宇,边立曾,张水昌,等,2001.塔里木盆地奥陶系海相源岩中两类生烃母质.中国科学(D辑),31(2):96–102.

赵迎冬,王华,甘华军,等,2014.海南福山凹陷盆地形态演化分析.中国矿业大学学报,43(6):1078–1086.

于俊吉,罗群,张多军,2004.北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用.石油实验地质,26(3):241–248.

曾宪章,梁狄刚,王忠然,等,1989.中国陆相原油和生油岩中的生物标志物.兰州:甘肃科学技术出版社,171–189.