

# 北部湾盆地涠西南凹陷深层原油和烃源岩 地球化学特征及成藏模式

周刚, 胡德胜, 徐新德, 刘爱群, 钟佳

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

**摘要:**北部湾盆地涠西南凹陷油气勘探主要集中于中、浅层, 深层勘探程度低、油气发现少。根据研究区深层原油物理化学性质、族组成、饱和烃气相色谱和饱和烃色谱质谱等资料, 以及烃源岩总有机碳、岩石热解、族组成、饱和烃气相色谱和饱和烃色谱质谱等资料, 采用有机地球化学分析方法, 研究深层原油和烃源岩地球化学特征并进行油源对比, 分析深层原油成藏模式。结果表明: 研究区深层原油性质较轻, 运动黏度(温度为 50 ℃)低, 含硫质量分数很低, 含蜡质量分数中等。族组成总体具有饱和烃质量分数高、饱和烃/芳烃比高, 以及芳烃、非烃及沥青质质量分数较低的“两高三低”特征。深层原油划分为 3 种类型, I 类原油具有正构烷烃呈“双峰型”分布、三环萜烷质量分数中等、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷呈不对称“V”型分布、4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数中等特征, 与流沙港组二段中上亚段泥页岩亲缘关系良好; II 类原油具有正构烷烃呈“单峰状后峰型”分布、三环萜烷质量分数较高、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷呈不对称“V”型分布、4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数较高等特征, 主要来自流沙港组二段下亚段油页岩; III 类原油具有正构烷烃呈“单峰状前峰型”分布、三环萜烷质量分数较高、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷呈“L”型分布、4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数较低等特征, 主要来自流沙港组三段上亚段泥页岩。研究区为自生自储式、旁生侧储式及自生自储和旁生侧储混合式 3 种类型深层原油成藏模式。该结果对北部湾盆地涠西南凹陷深层原油勘探具有指导意义。

**关键词:** 深层原油; 生物标志物; 地球化学特征; 油源对比; 成藏模式; 流沙港组; 涠西南凹陷; 北部湾盆地

**中图分类号:** TE122.1; P595

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-4107(2025)02-0046-14

## 0 引言

涠西南凹陷是南海西部主要产油区, 长期以来的勘探活动主要集中于中、浅层(埋藏深度在 2.0~3.5 km 之间)<sup>[1-3]</sup>, 原油探明储量占比超过 90%。中、浅层圈闭呈“碎、小、难找”特征, 挖潜难度逐渐增大, 深层(埋藏深度大于 3.5 km)勘探程度相对较低, 油气发现少, 资源潜力丰富, 是原油增储上产的重要领域<sup>①</sup>。通过下注近源探索, 深层原油勘探获得系列进展, 发现多个油气田或含油构造。2023 年, 钻探的 W16 井在深层流沙港组三段(流三段)获得近百米厚度油层, 实现深层原油勘探重大突破。

受勘探程度和油气发现的限制, 人们研究涠西南凹陷中、浅层的原油地球化学特征、成因类型及油源等。周雯雯<sup>[4]</sup>认为涠西南凹陷中、浅层原油主要来自流沙港组二段(流二段)泥岩, 其次为流沙港组一段(流一段)、三段和涠洲组泥岩; 范蕊等<sup>[5]</sup>将涠西南凹陷中、浅层原油划分为 I、II、III 类, I 类原油主要来自流一段泥页岩, II 类原油主要来自流三段泥页岩, III 类原油以流二下亚段油页岩贡献为主, 并混有一定量的流一段泥页岩; 杨希冰等<sup>[6]</sup>将涠西南凹陷中、浅层原油划分为 A、B1、B2、C1 和 C2 三大类五亚类, 其中, A 类原油主要来自流二下亚段底部一流三上亚段顶部油页岩, B1、B2 类原油主要来自流二中一下亚段泥页岩, C1、C2 类原油主要来自流二上亚段和流一段泥页岩。

有关深层原油地球化学特征及油源分析鲜有研究。根据北部湾盆地涠西南凹陷深层原油物理化学性质、族组成、饱和烃气相色谱和饱和烃色谱质谱资料, 分析深层原油地球化学特征; 采用甾、萜烷指纹特征对比法和生物标志物参数交会对比法, 开展精细油源对比, 建立深层原油成藏模式, 为研究区深层原油下

收稿日期: 2024-06-25; 编辑: 朱秀杰

基金项目: 中国海洋石油有限公司前瞻基础研究项目(KJQZ-2024-2003); “十四五”全国油气资源评价项目(QGYQZYPJ2022-3)

作者简介: 周刚(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质与油气地球化学综合方面的研究。

①胡德胜. 涠西南凹陷深层勘探潜力与下步部署建议[R]. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司内部报告, 2022: 1-112.

一步的勘探部署决策提供依据。

### 1 区域地质概况

涠西南凹陷位于广西壮族自治区以南、海南岛以北、雷州半岛以西的北部湾海域,是在前古近系基底之上发育的新生代拉张裂谷盆地,东西长度约为 90 km,南北宽度约为 40 km,整体呈北东—南西向,平面上可进一步划分为 A、B、C 3 个次洼,总面积约为  $3.8 \times 10^3 \text{ km}^2$  (见图 1)。构造演化主要经历古近纪裂陷、新近纪拗陷及第四纪局部扭压反转 3 个阶段,沉积环境发生从河流到湖泊再到开阔滨浅海的变迁,纵向上形成“先陆后海”的沉积体系<sup>[7-8]</sup>。涠西南凹陷的基岩主要为古生界志留系(S)和泥盆系(D)变质岩、石炭系(C)碳酸盐岩及中生界(Mz)花岗岩等;新生代地层自下而上为古新统长流组( $E_1c$ )、始新统流沙港组( $E_2l$ )、渐新统涠洲组( $E_3w$ )、下中新统下洋组( $N_1x$ )、上一中新统角尾组( $N_1j$ )和灯楼角组( $N_1d$ )、上新统望楼港组( $N_2w$ )及第四系(Q)<sup>[9]</sup>(见图 2)。涠西南凹陷发现的原油主要分布于涠洲组和流沙港组碎屑岩储层,少数分布于角尾组、下洋组碎屑岩储层和石炭系碳酸盐岩储层,油藏埋藏深度大多小于 3.5 km。

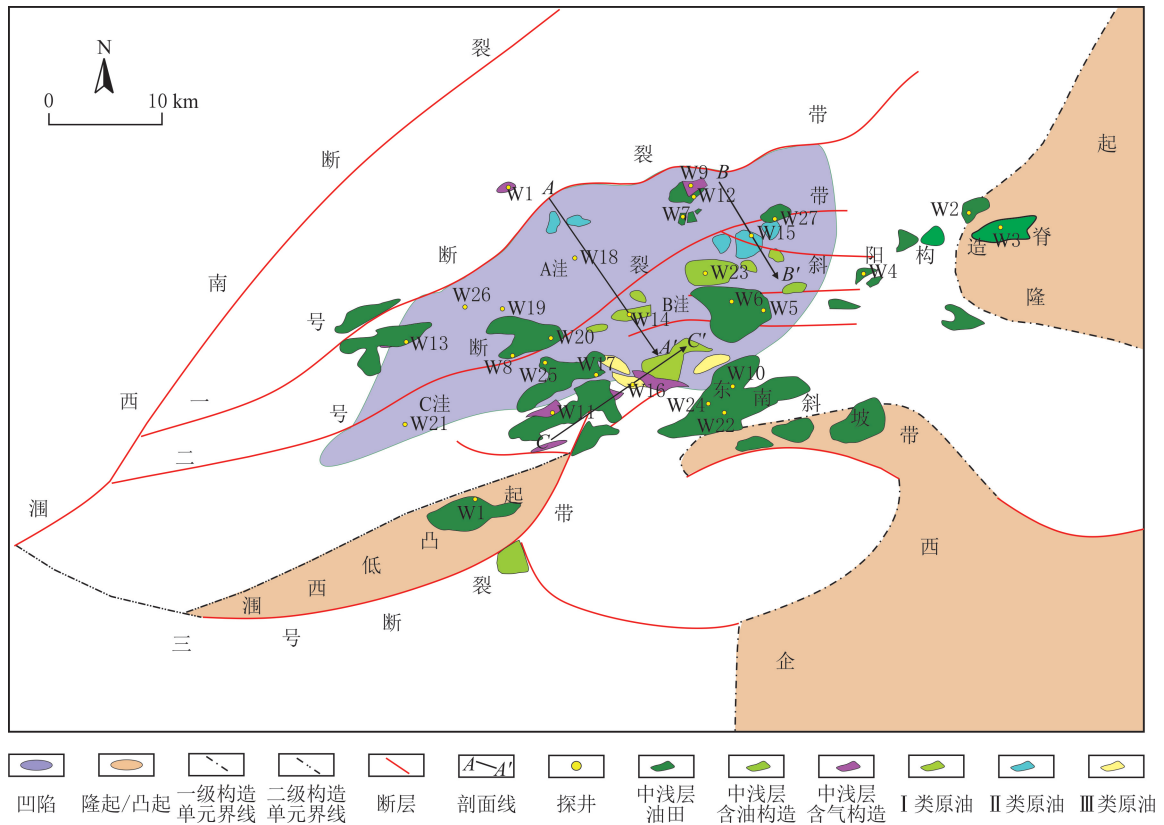


图 1 北部湾盆地涠西南凹陷构造划分

Fig. 1 The tectonic units division of the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

区域构造沉积演化分析表明,始新世裂陷 II 幕阶段,涠西南凹陷构造应力以北北西—南南东向的拉张应力为主,产生一系列北东东—南西西向的控凹断裂体系,如涠西南一号断裂强裂陷作用使湖盆范围扩大,水体逐渐加深,沉积一套流沙港组河流三角洲、滨浅湖—中深湖相沉积体系,发育盆地内主要的烃源岩层——流沙港组湖相暗色泥页岩和油页岩,为新生代油气田的形成奠定良好的物质基础。流三段沉积晚期,以半干旱—半湿润气候为主,季节性降雨量较少,湖盆水体较浅,水体以弱氧化—弱还原性为主,有机质保存条件一般,形成的烃源岩多数为贫有机质浅湖相泥页岩;流二段沉积早期,以温暖湿润气候为主,季节性降雨量剧增,湖盆发育达到鼎盛阶段,营养物质供给充足,刺激藻类勃发<sup>[10]</sup>,水体还原性强,有机质保存条件好,形成的烃源岩以中深湖相富含有机质油页岩为主<sup>[11-14]</sup>;流二段沉积中晚期,季节性降雨量减

弱,营养物质供给降低,水体以弱还原性为主,形成的烃源岩多数以中深湖相中等有机质丰度泥页岩为主。

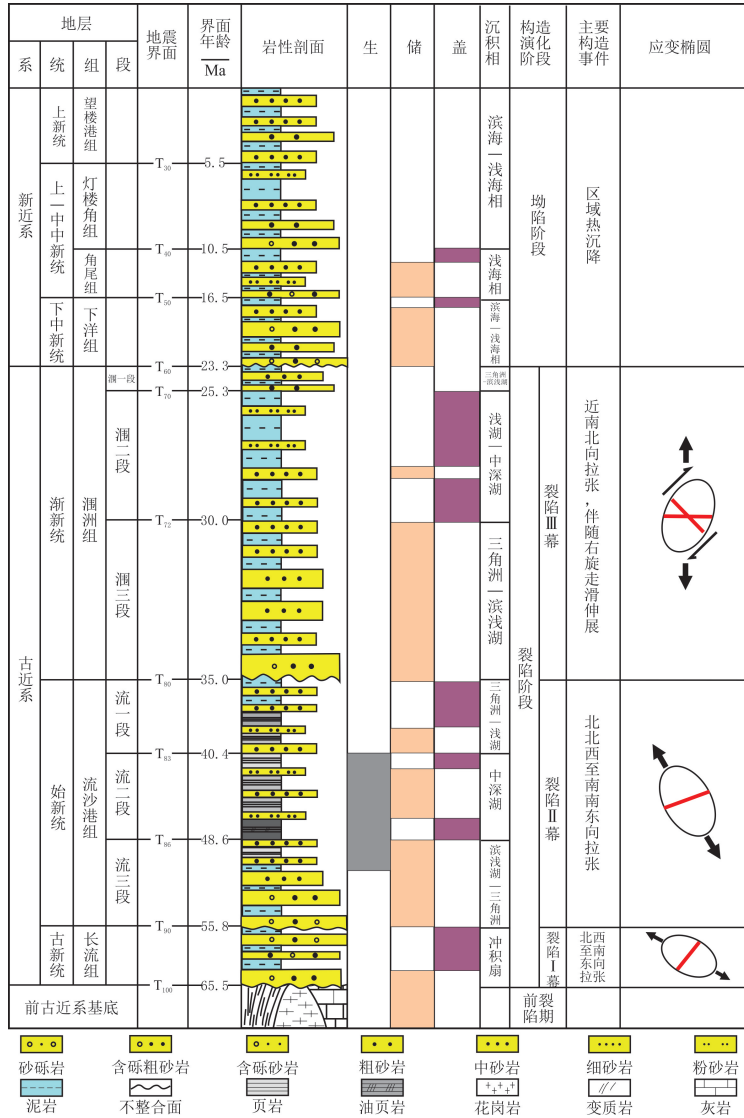


图 2 北部湾盆地涠西南凹陷地层综合柱状图  
Fig. 2 The stratigraphic column of the Weixinan Sag in Beibuwan Basin

## 2 实验样品与方法

采集北部湾盆地涠西南凹陷 7 个深层原油样品、13 个中层和浅层原油样品,以及 154 个烃源岩样品,对原油样品进行物理化学性质、族组成、饱和烃气相色谱和饱和烃色谱质谱等测试,对烃源岩样品进行总有机碳、岩石热解、族组成、饱和烃气相色谱和饱和烃色谱质谱等测试。分析测试在中国海洋石油能源发展股份有限公司工程技术分公司湛江实验中心完成。

首先,将原油样品与正己烷混合,静置 12 h 以上,充分过滤去除沥青质;然后,用柱层析法分离,得到饱和烃、芳烃和非烃馏分。原油饱和烃气相色谱分析参照 GB/T 18340.5—2010《地质样品有机地球化学分析方法第 5 部分:岩石提取物和原油中饱和烃分析 气相色谱法》,所用仪器为美国 Agilent7890B 型气相色谱仪,色谱柱为 HP-5 弹性石英毛细管柱(30.00 m×0.32 mm×0.25 mm);氦气作为载气,柱流量为 1.5 mL/min,恒流模式,进样口温度为 320 °C,分流比为 10:1,检测器温度为 320 °C;氢气流量为 30 mL/min,空气流量为 400 mL/min;先在 50 °C 温度时平衡 2 min,再以 6 °C/min 的速率升温至 310 °C,平衡 18 min。

原油饱和烃色谱质谱分析参考 GB/T 18606—2017《气相色谱—质谱法测定原油中生物标志物》,所用仪器为美国 Agilent7890B/5977B 型气相色谱—质谱联用仪,色谱柱为 HP-5MS 弹性石英毛细管柱(60.00 m×0.25 mm×0.25 mm);初始温度设置为 60 °C,先以 6 °C/min 的速率升温至 260 °C,再以 1.5 °C/min 的速率升温至 320 °C,恒温 20 min;载气为 99.99% 的氦气,样品入口温度为 300 °C,进样速度为 1 mL/min,传输线温度为 250 °C;采用 EI(70 eV)电子轰击法,灯丝电流为 100 mA,离子源温度为 250 °C。

烃源岩总有机碳分析参考 GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳测定》,所用仪器为 Leco CS-230 碳硫测定仪。首先,将岩石样品磨碎至粒径小于 0.2 mm 的颗粒,称重后放入处理好的坩埚,加入 1 mol/L 的稀盐酸溶液去除无机碳,经去离子水反复洗涤至中性后,在 60~80 °C 温度下烘干;然后,在高温氧气流中将总有机碳燃烧,转化成 CO<sub>2</sub> 气体,用红外检测器检测总有机碳质量分数。

烃源岩岩石热解分析参考 GB/T 18602—2012《岩石热解分析》,所用仪器为 Rock Eval 6 型岩石热解仪。首先,将岩石样品磨碎至粒径为 0.07~0.15 mm 的颗粒,称重后按程序升温(气态烃量:90 °C 恒温 2 min;液态烃量:快速加热至 300 °C,恒温 3 min;热解烃量:以 50 °C/min 的速率升温至 600 °C,恒温 1 min),使用氢焰离子化检测器检测岩样在热解过程中排出的烃;然后,对有机质生成的 CO 与 CO<sub>2</sub>、热解后的残余有机质加热氧化而生成的 CO<sub>2</sub>,使用热导检测器或红外检测器检测,或催化加氢生成甲烷后由氢火焰离子化检测器检测,记录各组分的质量分数和热解烃量峰温( $t_{max}$ )。

烃源岩饱和烃气相色谱、饱和烃色谱质谱等测试与原油样品分析测试方法一致。

### 3 原油地球化学特征

#### 3.1 物理化学性质

涠西南凹陷深层原油密度(温度为 20 °C)介于 0.799~0.834 g/cm<sup>3</sup>,平均为 0.818 g/cm<sup>3</sup>,属于轻质原油;凝固点温度为 21~42 °C;运动黏度(温度为 50 °C)为 2.64~8.50 mm<sup>2</sup>/s;含硫质量分数很小,可忽略不计;含蜡质量分数介于 11.50%~28.10%。总体上,与涠西南凹陷中、浅层原油相比,深层原油密度偏低、运动黏度较小、凝固点及含蜡质量分数中等(见表 1)。

表 1 北部湾盆地涠西南凹陷原油物理化学性质

Table 1 The physicochemical properties of the crude oils in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

取样位置	井号	深度/ m	样品类型	层位	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	运动黏度/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	凝固点/ °C	含蜡质 量分数/ %	含硫质 量分数/ %	族组分质量分数/%				饱和烃/ 芳烃	备注
										饱和烃	芳烃	非烃	沥青质		
	W1	986.0~993.0	DST	N <sub>1j2</sub>	0.887	24.26	32	23.94	0.18	73.00	9.00	11.00	7.00	8.11	正常原油
	W2	741.5~750.5	DST	N <sub>1j2</sub>	0.967	3 196.00	6	0.67	0.50	39.00	26.20	18.60	8.00	1.49	次生降解原油
	W3	891.0~900.0	DST	N <sub>1xy</sub>	0.969	2 886.00	8	0.60	0.45	38.11	29.10	17.83	7.58	1.31	次生降解原油
	W4	1 569.0	MDT	E <sub>2w3</sub>	0.876	23.84	27	10.21	0.23	60.00	14.00	17.00	9.00	4.29	正常原油
	W5	2 616.0~2 626.0	DST	E <sub>2w3</sub>	0.844	11.93	30	15.82	0.14	67.00	15.00	9.00	9.00	4.47	正常原油
	W6	2 357.0~2 378.0	DST	E <sub>2w2</sub>	0.837	6.08	27	20.98	0.13	66.00	16.00	13.00	5.00	4.13	正常原油
中、浅层	W7	1 972.8	MDT	E <sub>2l1</sub>	0.860	21.47	39	18.95	0.19	73.39	14.22	10.32	5.28	5.16	正常原油
	W8	2 360.0~2 383.8	DST	E <sub>2l1</sub>	0.979	—	94	12.20	0.37	28.00	9.00	20.00	43.00	3.11	次生降解原油
	W9	1 796.9~2 000.0	DST	E <sub>2l2</sub>	0.706	0.54	-32	0.91	0.02	82.00	9.00	9.00	0.00	9.11	凝析油
	W10	2 597.0~2 630.0	DST	E <sub>2l2</sub>	0.845	9.70	31	18.66	0.12	74.00	13.00	11.00	2.00	5.69	正常原油
	W11	2 592.0~2 629.5	DST	E <sub>2l3</sub>	0.758	1.06	2	—	0.02	88.00	7.00	4.00	1.00	12.57	凝析油
	W12	1 930.0~1 963.0	DST	C	0.715	0.54	-32	0.11	—	89.00	7.00	3.00	1.00	12.71	凝析油
	W13	1 487.0~1 800.0	DST	C	0.830	6.04	33	21.11	0.07	78.00	11.00	9.00	2.00	7.09	正常原油
	W14	3 515.2	MDT	E <sub>2l3</sub>	0.804	2.68	—	15.93	0.04	94.78	6.58	0.91	0.68	14.40	正常原油
	W14	3 540.1	MDT	E <sub>2l3</sub>	0.799	2.64	—	11.50	0.04	83.91	5.20	2.23	0.20	16.14	正常原油
	W15	3 553.1	MDT-1	E <sub>2l3</sub>	0.830	8.09	42	26.80	0.08	82.96	7.80	2.34	4.68	10.64	正常原油
深层	W15	3 553.1	MDT-2	E <sub>2l3</sub>	0.834	8.50	42	25.10	0.09	54.41	16.36	9.99	4.26	3.33	正常原油
	W15	3 553.1	MDT-3	E <sub>2l3</sub>	0.830	8.10	42	28.10	0.07	60.91	14.62	12.4	3.32	4.17	正常原油
	W16	3 501.0~3 574.5	DST-2	E <sub>2l3</sub>	0.816	3.81	21	12.00	—	87.58	7.80	1.22	2.44	11.23	正常原油
	W16	3 501.0~3 574.5	DST-3	E <sub>2l3</sub>	0.815	2.89	22	12.50	—	70.80	8.18	4.09	2.22	8.66	正常原油

注:MDT 为模块式地层动态测试;DST 为钻杆地层测试。

### 3.2 族组成特征

原油族组成分析表明, 涪西南凹陷深层原油总体具有“两高三低”的特征, 即饱和烃质量分数较高, 为 54.41%~94.78%, 平均为 76.48%; 芳烃质量分数较低, 为 5.20%~16.36%, 平均为 9.51%; 饱和烃/芳烃比较高, 介于 3.33~16.14, 平均为 9.79; 非烃质量分数较低, 低于 10.00%; 沥青质质量分数较低, 小于 5.00%。整体上, 与大多数涪西南凹陷中、浅层原油族组成特征类似(见表 1)。

### 3.3 生物标志物特征

#### 3.3.1 链烷烃

原油饱和烃气相色谱分析显示, 涪西南凹陷深层原油正构烷烃碳数分布范围较宽, 主要在  $nC_{13} \sim nC_{40}$  之间, 呈“单峰状前峰型”“双峰型”“单峰状后峰型”3 种特征, 主峰碳数为  $nC_{17} \sim nC_{27}$ , 基线较为平直, 没有明显的鼓包(见图 3), 说明未遭受生物降解作用;  $\sum nC_{21-} / \sum nC_{21+}$  普遍小于 1.00, 介于 0.26~0.95, 奇偶优势比(OEP)和碳优势指数(CPI)约为 1.0, 奇偶优势消失, 显示正常成熟原油特征。此外, 类异戊二烯烷烃质量分数相对较低, 姥鲛烷、植烷质量分数明显低于  $nC_{17}$  和  $nC_{18}$  的, Pr/ $nC_{17}$  和 Ph/ $nC_{18}$  分别为 0.23~0.50、0.14~0.31(见表 2)。姥鲛烷与植烷比(Pr/Ph)可以指示有机质沉积时的氧化还原条件, 当 Pr/Ph 小于 1.00, 指示还原环境; 当 Pr/Ph 大于 3.00, 指示氧化环境<sup>[15-17]</sup>。研究区 Pr/Ph 介于 0.54~2.14(见表 2), 反映涪西南凹陷深层原油母质主要形成于还原或弱还原—弱氧化环境。

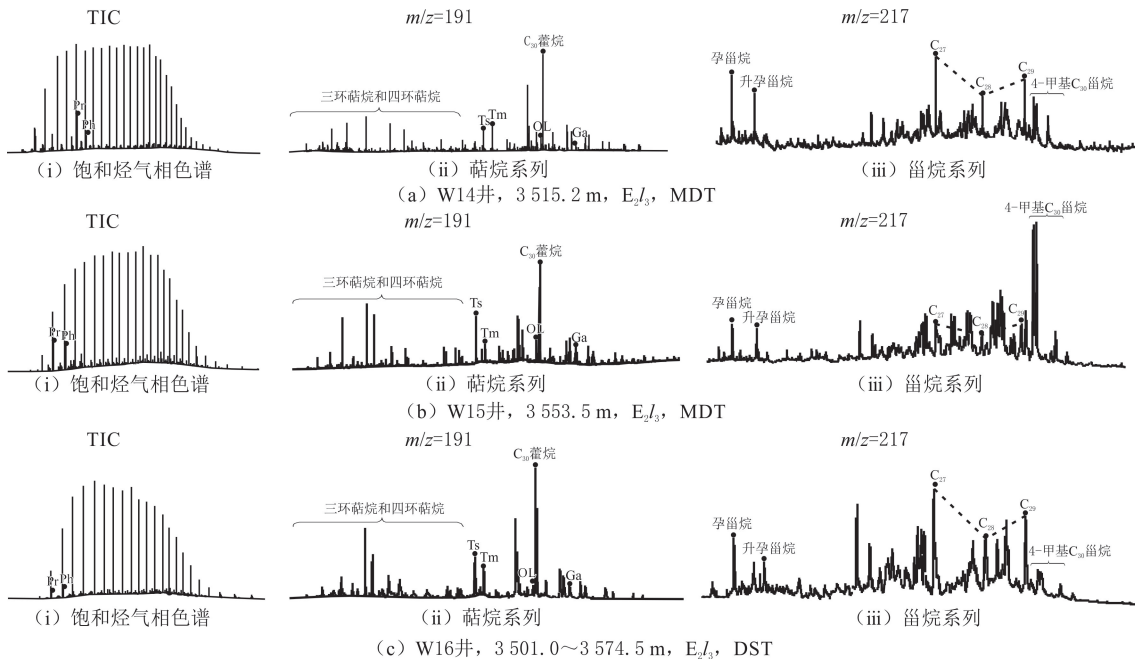


图 3 北部湾盆地涪西南凹陷深层原油饱和烃气相色谱和色质谱质谱特征

Fig. 3 Gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry of the saturated hydrocarbon of crude oils in deep strata of the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

表 2 北部湾盆地涪西南凹陷深层原油生物标志物参数

Table 2 The parameters of biomarker compounds of crude oils in deep strata of the Weixinan sag, Beibuwan Basin

井号	深度/m	样品类型	层位	主峰碳	$\frac{\sum nC_{21-}}{\sum nC_{21+}}$	CPI	OEP	Pr/Ph	Pr/ $nC_{17}$	Ph/ $nC_{18}$	OL/ $C_{30}$ 藿烷	Ga/ $C_{30}$ 藿烷	孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 甾烷	(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷	$\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}/C_{28}$	$C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$	$C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$	$\sum 4\text{-甲基 } C_{30} \text{ 甾烷} / \sum C_{29} \alpha\alpha\alpha \text{ 甾烷}$
W14	3 515.2	MDT	$E_2L_3$	$nC_{27}$	0.65	1.08	1.07	2.14	0.40	0.20	0.16	0.13	1.23	0.21	1.12	0.42	0.46	0.86
W14	3 540.1	MDT	$E_2L_3$	$nC_{17}$	0.95	1.06	1.04	2.05	0.36	0.19	0.24	0.14	1.25	0.22	1.15	0.57	0.53	1.10
W15	3 553.1	MDT-1	$E_2L_3$	$nC_{27}$	0.26	1.08	1.08	0.54	0.50	0.31	0.34	0.37	0.58	0.11	0.96	0.44	0.48	1.49
W15	3 553.1	MDT-2	$E_2L_3$	$nC_{27}$	0.29	1.07	1.08	1.00	0.50	0.28	0.21	0.31	0.52	0.09	0.95	0.43	0.49	1.64
W15	3 553.1	MDT-3	$E_2L_3$	$nC_{27}$	0.31	1.08	1.09	1.17	0.49	0.28	0.29	0.30	0.53	0.09	0.94	0.44	0.52	1.73
W16	3 501.0~3 574.5	DST-2	$E_2L_3$	$nC_{21}$	0.45	1.05	1.00	0.81	0.24	0.14	0.09	0.16	1.44	0.19	1.97	0.51	0.53	0.38
W16	3 501.0~3 574.5	DST-3	$E_2L_3$	$nC_{29}$	0.45	1.08	0.99	0.70	0.23	0.14	0.10	0.15	1.33	0.19	1.77	0.49	0.51	0.45

### 3.3.2 萜烷类化合物

由萜烷分布特征(见表2)可知,涠西南凹陷深层原油饱和烃生物标志物中三环萜烷质量分数中等—较高;与三环萜烷相比,四环萜烷的质量分数明显偏低, $C_{24}$  Tet/ $C_{23}$  TT一般低于0.2,反映原油母质中有较多的低等水生生物贡献<sup>[18]</sup>;五环萜烷系列质量分数较高,藿烷碳数分布介于 $C_{27} \sim C_{35}$ 之间,以 $C_{30}$ 为主峰, $C_{29}$ 为次主峰(见图3);伽马蜡烷质量分数较低,伽马蜡烷指数(Ga/ $C_{30}$ 藿烷)为0.13~0.37,反映深层原油母质沉积环境为淡水—微咸水环境<sup>[19]</sup>;源于陆生高等植物的奥利烷质量分数较低,奥利烷指数(OL/ $C_{30}$ 藿烷)为0.09~0.34,指示深层原油母质有不同程度的陆源高等植物贡献<sup>[20]</sup>。

### 3.3.3 甾烷类化合物

由甾烷分布特征(见表2)可知,涠西南凹陷深层原油饱和烃生物标志物中孕甾烷和升孕甾烷质量分数中等—较高,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 甾烷最高为1.44,(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷为0.09~0.22,表明存在较多的低等水生生物输入<sup>[21-23]</sup>。规则甾烷质量分数丰富,总体上以 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}$ 规则甾烷占优势为特征, $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{28}$ 规则甾烷和 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 规则甾烷质量分数相对较少, $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27} \sim C_{28} \sim C_{29}$ 规则甾烷呈“L”型或不对称的“V”型分布(见图3);通常认为 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}$ 规则甾烷来源于低等水生生物, $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{28}$ 规则甾烷主要来源于硅藻和颗石藻, $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 规则甾烷以陆源高等植物来源为主<sup>[24-28]</sup>,表明深层原油母质以低等水生生物输入为主或为低等水生生物和高等植物混合输入。此外,检测出一定量的4-甲基 $C_{30}$ 甾烷,4-甲基 $C_{30}$ 甾烷指数( $\sum$ 4-甲基 $C_{30}$ 甾烷/ $\sum C_{29} \alpha\alpha\alpha$ 甾烷)介于0.38~1.73,表明生物标志物与非海相沟鞭藻(甲藻类)、绿藻和球藻等密切相关<sup>[29]</sup>,指示深层原油母质有不同程度的藻类输入贡献。甾烷异构化参数 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 介于0.46~0.53, $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 介于0.42~0.57(见表2), $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 和 $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 具有随成熟度增加而逐渐增大的特性<sup>[30-31]</sup>。HUANG Difan等<sup>[32]</sup>将原油成熟度划分为未成熟、低成熟和成熟3个演化阶段,建立 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R) - C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 成熟度判别图版,可判断涠西南凹陷深层原油具有较高的成熟度,处于成熟演化阶段(见图4)。

### 3.4 原油类型划分

根据反映原油母源输入、沉积环境和成熟度等生物标志物参数特征,可将涠西南凹陷深层原油划分为3种类型(见图5)。

(1) I类原油。原油正构烷烃碳数主要在 $nC_{13} \sim nC_{40}$ 之间,呈“双峰型”分布,主峰碳为 $nC_{27}$ ;姥鲨烷优势明显,Pr/Ph介于2.05~2.14(见图5(a)),反映原油母质主要形成于弱还原—弱氧化环境。萜烷类化合物中以五环萜烷为主,其次为三环萜烷,四环萜烷的质量分数较低, $C_{24}$  Tet/ $C_{23}$  TT介于0.16~0.17(见图5(b));伽马蜡烷质量分数较低,Ga/ $C_{30}$ 藿烷介于0.13~0.14(见图5(b)),指示沉积水体为淡水环境。甾烷类化合物中孕甾烷和升孕甾烷质量分数较高,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 甾烷最高为1.25,(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷为0.21~0.22; $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27} \sim C_{28} \sim C_{29}$ 规则甾烷呈不对称的“V”型分布; $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 介于0.42~0.57(见图5(c));4-甲基 $C_{30}$ 甾烷质量分数中等,4-甲基 $C_{30}$ 甾烷指数介于0.86~1.10(见图5(d)),反映原油母质既有藻类又有一定量的高等植物的双重贡献。该类原油主要分布于二号断裂带中段,以W14井深层流三段原油为代表。

(2) II类原油。原油正构烷烃碳数主要在 $nC_{16} \sim nC_{39}$ 之间,呈“单峰状后峰型”分布,主峰碳为 $nC_{23} \sim nC_{27}$ ;Pr/Ph介于0.54~1.17(见图5(a)),反映原油母质主要形成于还原—弱还原环境。萜烷类化合物

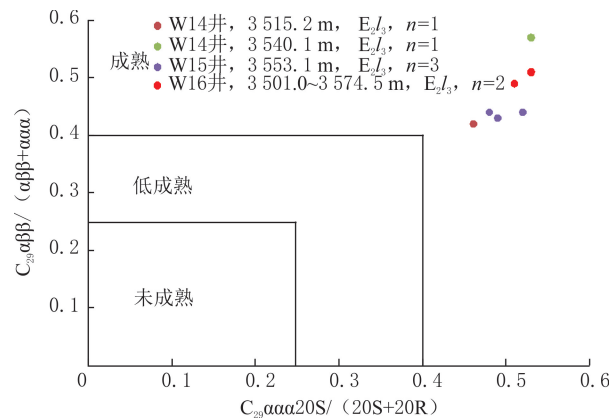


图4 北部湾盆地涠西南凹陷深层原油成熟参数交会图(据文献[32]修改)

Fig. 4 Crossplot of maturity parameters of crude oils in deep strata of the Weixinan Sag, Beibuwan Basin (modified by reference[32])

中以五环萜烷为主,其次为三环萜烷,四环萜烷的质量分数较低, $C_{24}$  Tet/ $C_{23}$  TT 介于 0.18~0.21(见图 5(b));伽马蜡烷质量分数较高, $Ga/C_{30}$  藿烷介于 0.30~0.37(见图 5(b)),指示沉积水体为微咸水环境。甾烷类化合物中孕甾烷和升孕甾烷质量分数中等,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$  甾烷介于 0.52~0.58,(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷为 0.09~0.11; $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷呈不对称的“V”型分布; $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$  介于 0.43~0.44(见图 5(c));4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数丰富,4-甲基  $C_{30}$  甾烷指数介于 1.49~1.73(见图 5(d)),反映原油母质来源以藻类贡献为主。该类原油主要分布于二号断裂带东段,以 W15 井深层流三段原油最为显著。

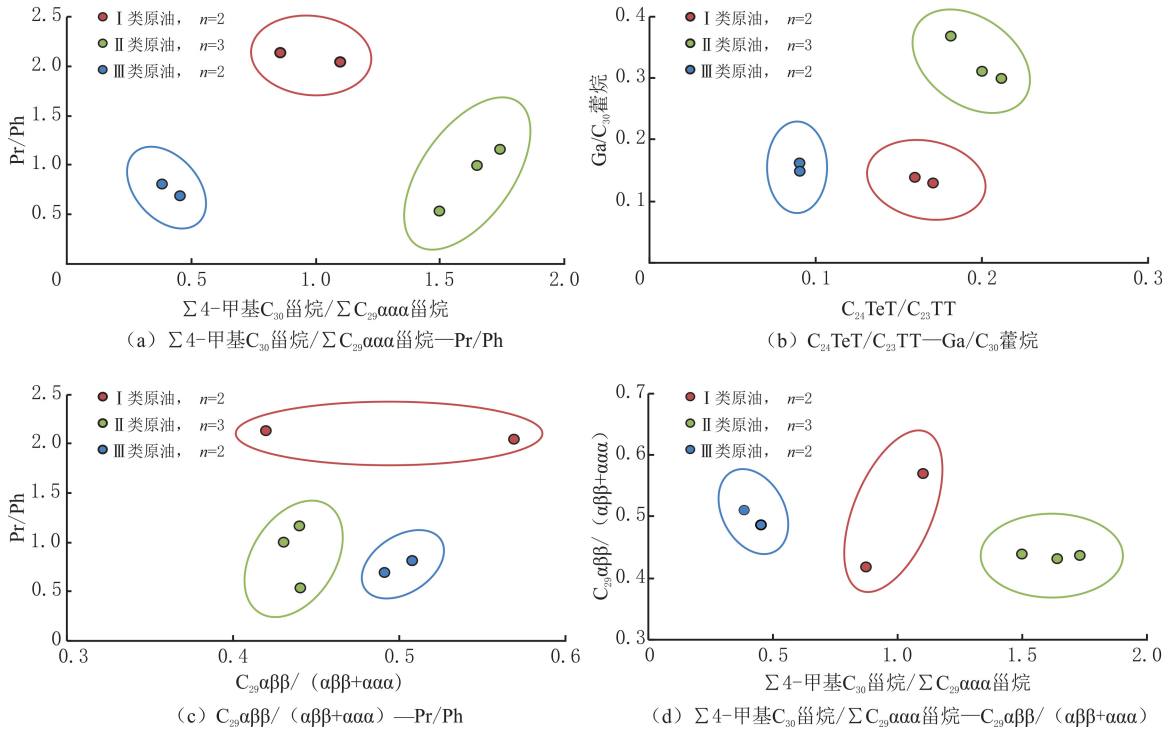


图 5 北部湾盆地涠西南凹陷深层原油类型划分

Fig. 5 The classification of crude oil types in deep strata in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

(3) III类原油。原油正构烷烃碳数主要在  $nC_{16} \sim nC_{36}$  之间,呈“单峰状前峰型”分布,主峰碳为  $nC_{20} \sim nC_{21}$ ;植烷优势明显, $Pr/Ph$  介于 0.70~0.81(见图 5(a)),反映原油母质主要形成于弱还原—弱氧化环境。萜烷类化合物中以五环萜烷为主,其次为三环萜烷,四环萜烷的质量分数较低, $C_{24}$  Tet/ $C_{23}$  TT 约为 0.09(见图 5(b));伽马蜡烷质量分数较低, $Ga/C_{30}$  藿烷介于 0.15~0.16(见图 5(b)),指示沉积水体为淡水环境。甾烷类化合物中孕甾烷和升孕甾烷质量分数较高,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$  甾烷最高为 1.44,(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷为 0.19; $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}$  规则甾烷占优势, $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷呈“L”型分布; $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$  介于 0.49~0.51(见图 5(c));4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数较低,4-甲基  $C_{30}$  甾烷指数介于 0.38~0.45(见图 5(d)),反映原油母质来源中藻类贡献较少。该类原油主要分布于涠西南低凸起倾末端,以 W16 井深层流三段原油最为典型。

#### 4 烃源岩地球化学特征

涠西南凹陷主要发育始新统流二中上亚段泥页岩、下亚段油页岩及流三上亚段泥页岩 3 套烃源岩。根据 154 个烃源岩样品总有机碳、岩石热解、饱和烃气相色谱和饱和烃质谱等测试数据,流二中上亚段泥页岩有机质丰度较高,总有机碳质量分数( $w(TOC)$ )主要分布在 1.26%~3.80%之间,平均为 2.42%;生烃潜量( $S_1 + S_2$ )为 3.12~25.61 mg/g,平均为 11.49 mg/g;氢指数(HI)为 203.97~457.60 mg/g,平均为 339.66 mg/g,有机质类型主要为 II<sub>1</sub>—II<sub>2</sub> 型,属于好—优质烃源岩(见图 6-7);热演化程度较低,R<sub>o</sub>

主要介于0.48%~1.00%,以生油为主;饱和烃生物标志物中正构烷烃多数呈“双峰型”(见图8(a)),Pr/Ph介于0.79~2.11,反映生烃母质主要形成于弱还原—弱氧化环境;萜烷类化合物中以五环萜烷为主,其次为三环萜烷,四环萜烷质量分数较低;伽马蜡烷质量分数较低,Ga/C<sub>30</sub>藿烷介于0.07~0.13,指示沉积水体为淡水环境;甾烷类化合物中孕甾烷和升孕甾烷质量分数较高,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 甾烷介于1.02~1.21; $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷总体呈不对称“V”型分布;4-甲基C<sub>30</sub>甾烷质量分数中等,4-甲基C<sub>30</sub>甾烷指数介于0.58~1.21,表明生烃母质既有藻类又混有一定量的高等植物贡献(见表3)。

相比而言,流二下亚段油页岩生烃品质更佳, $w(\text{TOC})$ 普遍大于3.00%,最高为10.30%,平均为5.01%; $S_1+S_2$ 为13.84~75.66 mg/g,平均为33.25 mg/g;HI为299.39~915.48 mg/g,平均为550.74 mg/g,有机质类型主要为I—II<sub>1</sub>,绝大多数为优质烃源岩(见图6-7);热演化程度中等, $R_o$ 主要介于0.60%~1.10%,以生油为主;饱和烃生物标志物中正构烷烃多数呈“单峰状后峰型”(见图8(b)),Pr/Ph介于0.55~1.64,反映生烃母质主要形成于还原—弱还原环境;萜烷类化合物中以五环萜烷为主,其次为三环萜烷,四环萜烷质量分数较低;伽马蜡烷质量分数较低,Ga/C<sub>30</sub>藿烷介于0.18~0.39,指示沉积水体为淡水—微咸水环境;甾烷类化合物中孕甾烷和升孕甾烷质量分数中等,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 甾烷介于0.39~0.76; $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷总体呈不对称“V”型分布;4-甲基C<sub>30</sub>甾烷质量分数高,4-甲基C<sub>30</sub>甾烷指数介于1.62~2.31,表明生烃母质主要来自藻类的贡献(见表3)。

流三上亚段泥页岩有机质丰度相对较低, $w(\text{TOC})$ 主要分布在0.54%~2.09%之间,平均为1.13%; $S_1+S_2$ 为1.37~24.87 mg/g,平均为7.09 mg/g;HI为62.13~500.54 mg/g,平均为291.78 mg/g,有机质类型主要为II<sub>1</sub>—II<sub>2</sub>型,部分为I或III型,多数为中等—好烃源岩,部分为优质烃源岩(见图6-7);热演化程度较高, $R_o$ 主要介于0.70%~1.30%,以生油为主;饱和烃生物标志物中正构烷烃多数呈“单峰状前峰型”(见图8(c)),植烷优势较明显,Pr/Ph介于0.61~2.31,反映生烃母质主要形成于弱还原—弱氧化环境;萜烷类化合物中以五环萜烷为主,其次为三环萜烷,四环萜烷质量分数较低;伽马蜡烷质量分数较低,Ga/C<sub>30</sub>藿烷介于0.07~0.17,指示沉积水体为淡水环境;孕甾烷和升孕甾烷质量分数较高,孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$ 甾烷介于1.30~1.51; $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷总体呈“L”型分布;4-甲基C<sub>30</sub>甾烷质量分数较低,4-甲基C<sub>30</sub>甾烷指数介于0.23~0.51,表明生烃母质中来源藻类的贡献较少(见表3)。

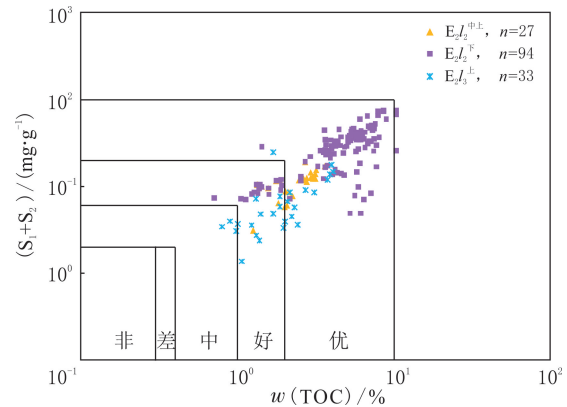


图6 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组烃源岩评价  
Fig. 6 Source rock evaluation of Liushagang Formation in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

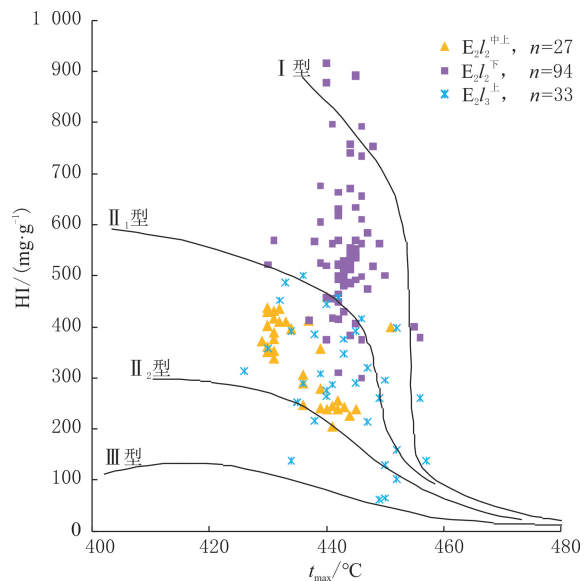


图7 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组烃源岩有机质类型判别图版  
Fig. 7 Distinction charts of organic matter types of source rocks from Liushagang Formation in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

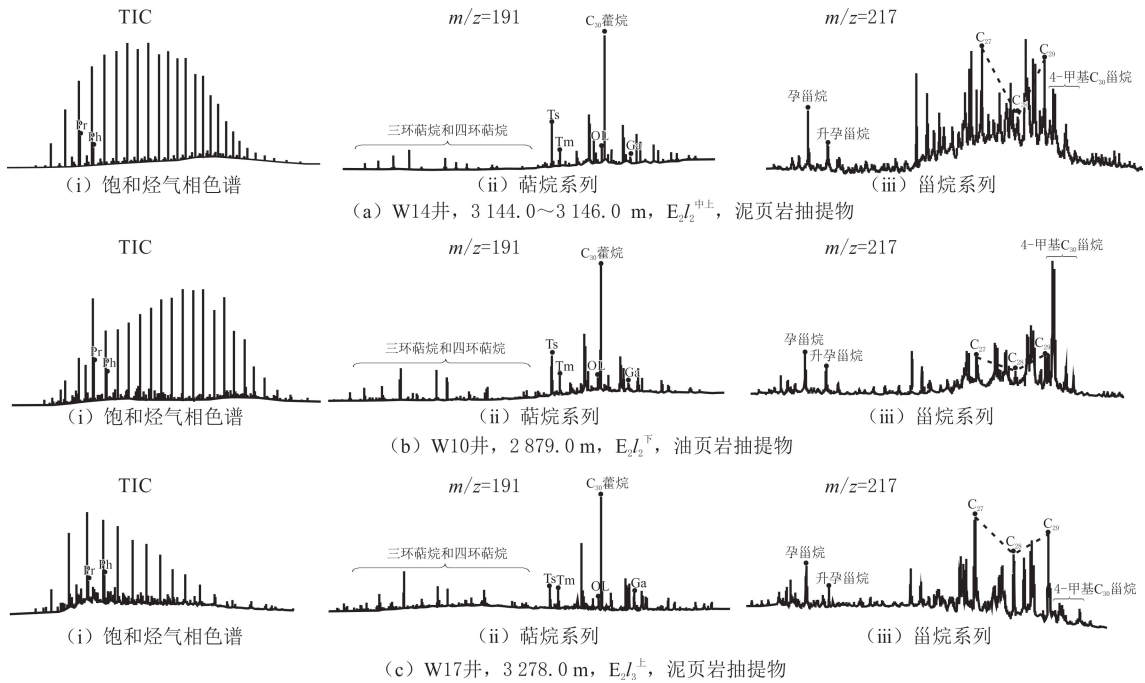


图 8 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组烃源岩饱和烃气相色谱和色谱质谱特征

Fig. 8 Gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry of the saturated hydrocarbon of source rocks from Liushagang Formation in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

## 5 油源对比

原油和烃源岩饱和烃的生物标志物蕴藏丰富的母质来源、沉积环境、成熟度等信息,可用来进行油源对比分析,常用的方法有甾烷、萜烷指纹特征对比法和生物标志物参数交会对比法<sup>[33-35]</sup>。

### 5.1 甾烷、萜烷指纹特征

涠西南凹陷 3 种类型深层原油的甾烷、萜烷指纹特征明显不同,反映油源存在差异。I 类原油的甾烷、萜烷指纹特征与流二中上亚段泥页岩的甾烷、萜烷指纹特征非常相似,表现为孕甾烷和升孕甾烷质量分数较高、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷总体呈不对称“V”型分布、4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数中等的特征,表明原油主要来自流二中上亚段泥页岩。II 类原油的甾烷、萜烷指纹特征与流二下亚段油页岩的甾烷、萜烷指纹特征非常相似,表现为孕甾烷和升孕甾烷质量分数中等、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷总体呈不对称“V”型分布、4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数丰富的特征,表明原油主要来自流二下亚段油页岩。III 类原油的甾烷、萜烷指纹特征与流三上亚段泥页岩的甾烷、萜烷指纹特征非常相似,表现为孕甾烷和升孕甾烷质量分数较高、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$  规则甾烷总体呈“L”型分布、4-甲基  $C_{30}$  甾烷质量分数相对较低的特征,表明二者具有良好的亲缘关系(见图 3、图 8)。

### 5.2 生物标志物参数交会

选取反映原油和烃源岩的母源输入、沉积环境和成熟度等生物标志物参数,包括 3 个母源输入参数 ( $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}/C_{29}$ 、孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$  甾烷和  $\sum$  4-甲基  $C_{30}$  甾烷/ $\sum C_{29} \alpha\alpha\alpha$  甾烷)、1 个沉积环境参数(伽马蜡烷/ $C_{30}$  藿烷)、1 个成熟度参数 ( $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ ),绘制  $\sum$  4-甲基  $C_{30}$  甾烷/ $\sum C_{29} \alpha\alpha\alpha$  甾烷— $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}/C_{29}$ — $\sum$  4-甲基  $C_{30}$  甾烷/ $\sum C_{29} \alpha\alpha\alpha$  甾烷、孕甾烷/ $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{29}$  甾烷— $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}/C_{29}$ 、 $\sum$  4-甲基  $C_{30}$  甾烷/ $\sum C_{29} \alpha\alpha\alpha$  甾烷—伽马蜡烷/ $C_{30}$  藿烷关系图(见图 9)。由图 9 可知,代表 I 类原油的散点与流二中上亚段泥页岩散点所落范围相似,表明 I 类原油主要来自流二中上亚段泥页岩;II 类原油的散点所落位置与流二下亚段油页岩的较接近,表明 II 类原油主要来自流二下亚段油页岩;III 类原油的散点所落位置与流三上亚段泥页岩的较接近,表明 III 类原油主要来自流三上亚段泥页岩。

表 3 北部湾盆地涠西南凹陷烃源岩地球化学参数  
Table 3 The geochemical parameters of source rocks in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

井号	深度/m	层位	岩性	$\omega(\text{TOC})/\%$	$(\text{S}+\text{S}_2)/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$\text{HI}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$\text{R}_0/\%$	主峰碳	$\frac{\sum \text{nC}_{21}}{\sum \text{nC}_{23}}$	CPI	OEP	Pr/Ph	Pr/nC <sub>17</sub>	Ph/nC <sub>18</sub>	OL/ C <sub>30</sub> 藿烷	Ga/ C <sub>30</sub> 藿烷	$\frac{\text{孕甾烷} + \text{孕甾烷(20R)}}{\text{孕甾烷(20R) + 孕甾烷(20S)}} / \text{C}_{29}$ 藿烷	$\frac{\text{孕甾烷} + \text{孕甾烷(20R)}}{\text{孕甾烷(20R) + 孕甾烷(20S)}} / \text{C}_{29}$ 藿烷	$\frac{\text{C}_{29}\alpha\alpha}{20\text{S}(20\text{S}+20\text{R})}$	$\frac{\sum \text{H-甲基C}_{30}\text{藿烷}}{\sum \text{C}_{29}\alpha\alpha\text{藿烷}}$		
W14	3 200.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	1.26	3.12	203.97	0.75	nC <sub>23</sub>	1.07	1.05	1.06	2.11	0.40	0.21	0.21	0.11	1.21	0.21	0.89	0.43	0.44	0.84
W14	3 144.0~3 146.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	2.02	5.14	212.12	0.72	nC <sub>23</sub>	1.03	1.04	1.08	1.60	0.38	0.24	0.15	0.08	1.14	0.22	1.21	0.41	0.42	0.61
W18	4 005.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	1.98	5.37	239.90	0.93	nC <sub>23</sub>	1.02	1.03	1.04	1.12	0.41	0.25	0.20	0.12	1.18	0.21	0.64	0.51	0.53	0.58
W19	2 750.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	2.09	5.24	218.18	0.69	nC <sub>23</sub>	1.01	1.03	1.04	0.79	0.36	0.21	0.19	0.13	1.02	0.20	0.87	0.41	0.43	0.79
W19	2 942.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	3.80	25.61	457.60	0.72	nC <sub>23</sub>	1.01	1.07	1.08	0.82	0.33	0.24	0.21	0.07	1.09	0.23	0.79	0.44	0.45	1.21
W20	2 430.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	2.46	11.66	429.67	0.51	nC <sub>23</sub>	0.96	1.21	1.25	1.17	0.29	0.26	0.20	0.12	1.13	0.21	0.94	0.38	0.40	0.87
W21	2 420.0~2 425.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	1.71	5.88	336.26	0.48	nC <sub>23</sub>	0.94	1.25	1.30	1.05	0.35	0.31	0.18	0.11	1.11	0.19	0.89	0.38	0.37	0.78
W15	3 370.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	3.31	14.48	404.53	0.81	nC <sub>25</sub>	0.48	1.01	1.01	0.59	0.51	0.32	0.31	0.23	0.39	0.11	0.79	0.45	0.45	1.93
W22	2 254.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	4.46	45.24	915.48	0.60	nC <sub>25</sub>	0.43	1.24	1.28	0.55	0.52	0.31	0.29	0.31	0.61	0.09	0.66	0.33	0.34	1.62
W23	3 174.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	3.21	19.37	455.45	1.10	nC <sub>26</sub>	0.37	1.01	1.00	0.67	0.53	0.30	0.28	0.39	0.57	0.11	0.91	0.41	0.45	1.64
W10	2 813.00	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	6.11	34.28	417.02	0.73	nC <sub>25</sub>	0.39	1.12	1.13	1.59	0.49	0.33	0.27	0.26	0.40	0.10	0.95	0.39	0.40	1.88
W10	2 879.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	4.07	13.84	299.39	0.74	nC <sub>25</sub>	0.40	1.12	1.12	1.42	0.46	0.37	0.18	0.31	0.76	0.09	0.89	0.38	0.41	1.86
W10	2 894.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	5.79	14.68	302.15	0.75	nC <sub>26</sub>	0.33	1.11	1.13	1.37	0.53	0.29	0.16	0.25	0.74	0.13	0.95	0.38	0.40	1.82
W24	2 798.0~2 800.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	5.93	26.79	354.13	0.71	nC <sub>25</sub>	0.36	1.10	1.14	1.64	0.50	0.31	0.19	0.21	0.58	0.11	0.87	0.38	0.39	1.70
W19	2 984.6	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	油页岩	10.30	75.66	563.30	0.75	nC <sub>26</sub>	0.41	1.08	1.09	1.08	0.48	0.29	0.16	0.18	0.65	0.09	0.93	0.39	0.39	2.31
W18	4 582.5	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	1.35	1.26	62.13	1.30	nC <sub>17</sub>	2.12	1.01	1.02	2.31	0.23	0.15	0.09	0.13	1.48	0.19	1.32	0.55	0.56	0.48
W25	3 373.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	0.83	7.98	354.21	0.87	nC <sub>17</sub>	2.01	1.02	1.02	0.88	0.28	0.19	0.08	0.15	1.40	0.19	1.80	0.45	0.48	0.42
W25	3 278.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	0.54	6.54	342.51	0.81	nC <sub>18</sub>	1.95	1.01	1.01	0.61	0.21	0.15	0.10	0.16	1.30	0.18	1.90	0.41	0.43	0.51
W16	3 526.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	1.01	3.29	258.41	1.00	nC <sub>17</sub>	2.03	1.00	1.00	0.74	0.22	0.16	0.10	0.15	1.30	0.17	1.71	0.46	0.45	0.23
W16	3 790.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	0.93	3.88	363.44	1.11	nC <sub>18</sub>	1.96	1.03	1.02	0.81	0.27	0.13	0.09	0.17	1.33	0.18	1.56	0.47	0.46	0.25
W26	3 082.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	2.09	8.50	387.56	0.73	nC <sub>17</sub>	1.89	1.12	1.21	0.74	0.21	0.23	0.08	0.09	1.46	0.21	0.87	0.39	0.40	0.31
W27	3 054.0~3 056.0	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	0.92	4.82	500.54	0.71	nC <sub>17</sub>	2.16	1.18	1.14	0.81	0.21	0.18	0.07	0.07	1.51	0.20	0.97	0.38	0.39	0.28
W19	3 059.8	E <sub>2</sub> L <sub>2</sub> <sup>+</sup>	泥页岩	1.14	24.87	357.89	0.70	nC <sub>17</sub>	2.07	1.17	1.13	0.76	0.26	0.19	0.08	0.14	1.31	0.18	0.92	0.39	0.40	0.30

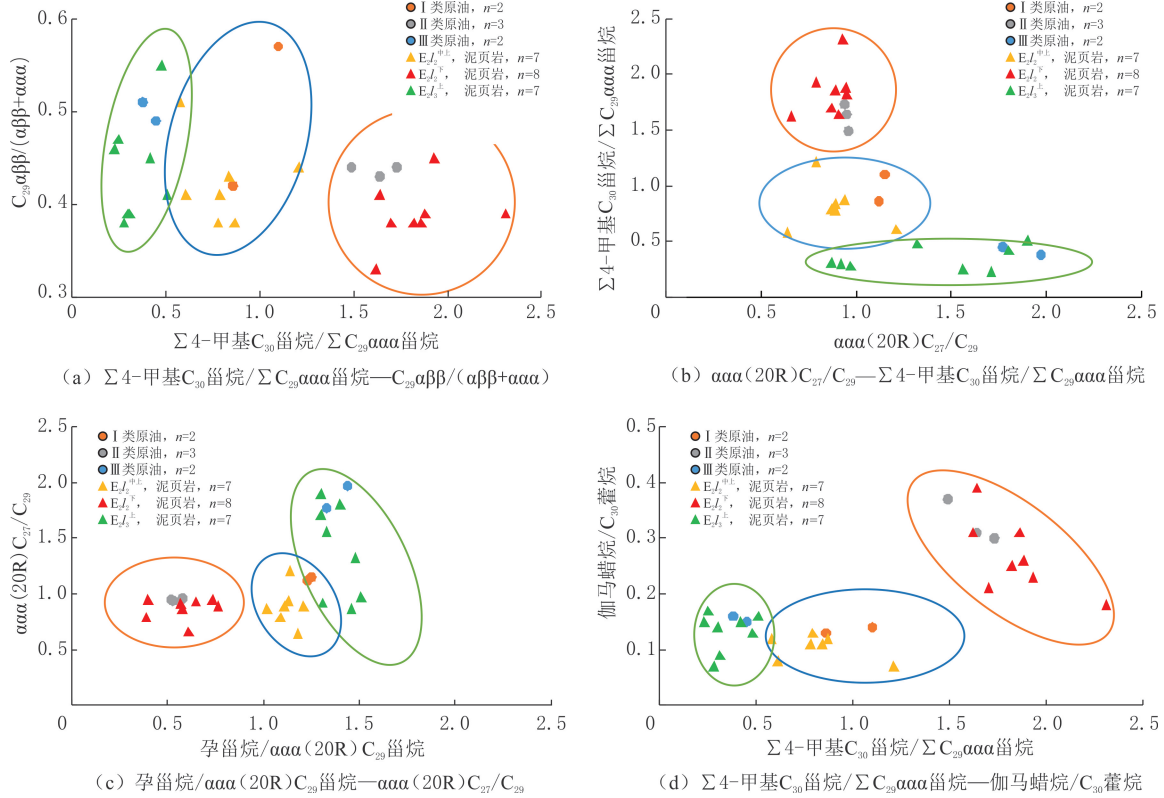
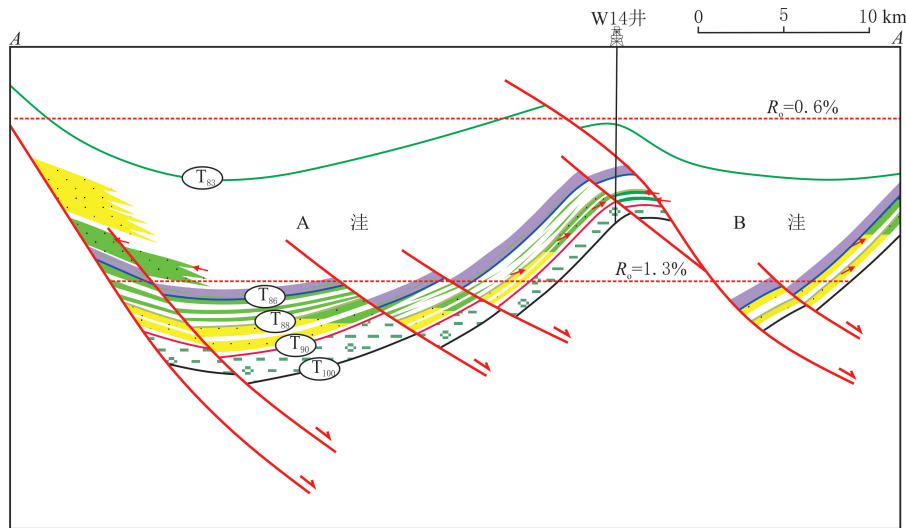


图 9 北部湾盆地涠西南凹陷深层原油和烃源岩生物标志物参数相关关系

Fig. 9 The crossplots of biomarkers of crude oils and source rocks from deep strata in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin

## 6 成藏模式

I 类原油主要来自二号断裂带中段流三上亚段薄层砂岩储层,通过断面与 B 洼流二中上亚段泥页岩对接,直接接受流二中上亚段泥页岩供烃;流三上亚段薄层砂岩储层被 A 洼流三上亚段厚层泥页岩夹持包裹,不排除流三上亚段泥页岩的供烃可能,与 I 类原油具有中等质量分数的 4-甲基  $C_{30}$  甾烷(4-甲基  $C_{30}$  甾烷指数为 0.86~1.10,在流二中上亚段泥页岩与流三上亚段泥页岩之间)一致,整体上具有近距离运移、旁生侧储式或自生自储和旁生侧储混合式成藏的特征(见图 10(a))。II 类原油主要来自二号断裂带东



(a) 过 W14 井成藏模式

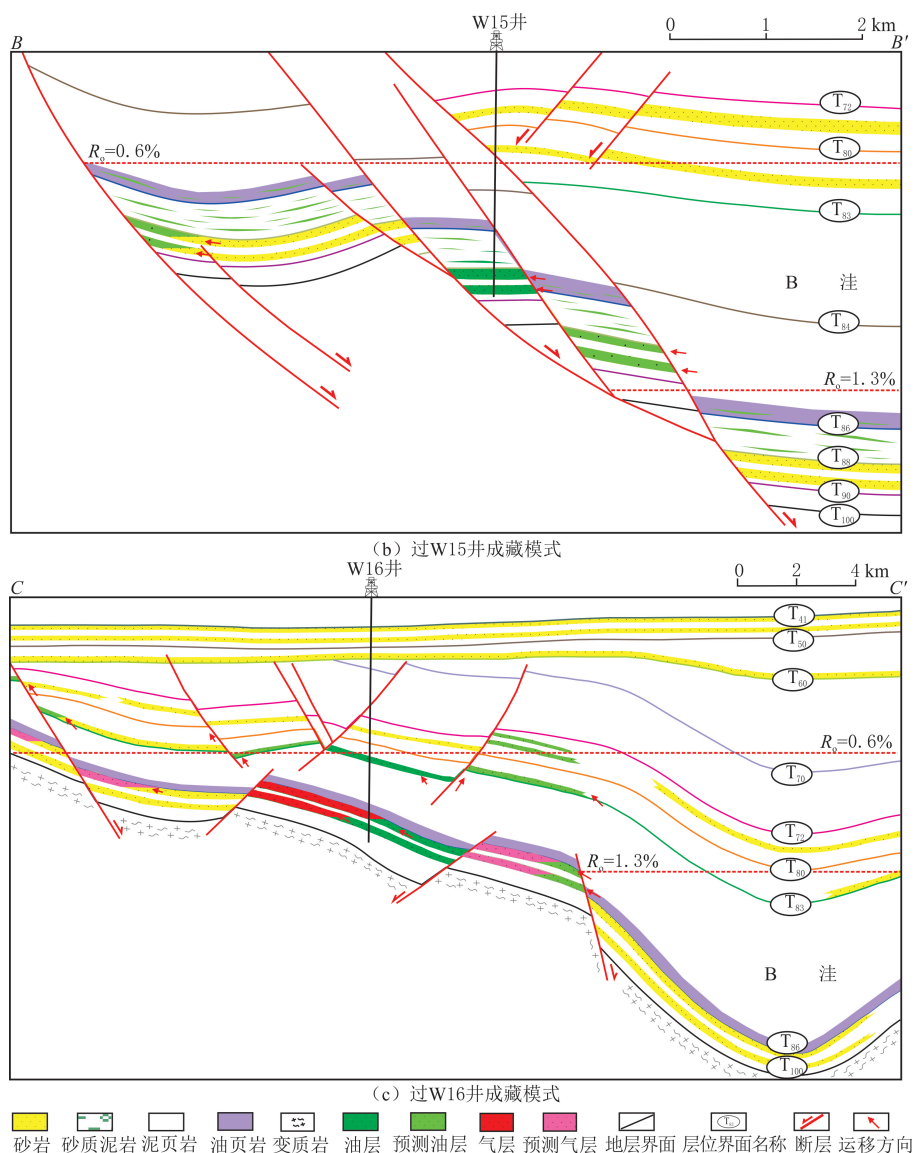


图 10 北部湾盆地涠西南凹陷深层油气成藏模式(剖面位置见图 1)  
 Fig. 10 The hydrocarbon accumulation patterns of oils and gases in deep strata of the Weixinan Sag, Beibuwan Basin(section position as shown in fig. 1)

段流三下亚段厚层砂岩储层,通过断面与 B 洼流二下亚段油页岩及流三上亚段泥页岩对接,直接接受流二下亚段油页岩及流三上亚段泥页岩两套烃源岩供烃,与 II 类原油具有较高质量分数的 4-甲基 C<sub>30</sub> 甾烷(4-甲基 C<sub>30</sub> 甾烷指数为 1.49~1.73,在流二下亚段油页岩与流三上亚段泥页岩之间)一致,整体上具有近距离运移、旁生侧储式成藏的特征(见图 10(b))。III 类原油主要来自涠西南低凸起倾末端流三段砂岩储层,油藏比较特殊,整体为深入 B 洼的一个大型鼻状构造圈闭,被多条断层切割成不同的断块,如 W16 井所处断块高部位和低部位由反向断层遮挡,储层被流三段泥页岩夹持包裹,主洼中烃源岩生成的烃类向圈闭方向运移不畅,主要靠本地流三上亚段泥页岩供烃,与 III 类原油具有低质量分数的 4-甲基 C<sub>30</sub> 甾烷(4-甲基 C<sub>30</sub> 甾烷指数为 0.38~0.45,低于其他两套烃源岩的)一致,整体上具有近距离运移、自生自储式成藏的特征。与 W16 井相邻的更靠近洼中的断块低部位,通过断面与流二中上亚段泥页岩对接,接受流二中上亚段泥页岩的供烃,油藏具有自生自储和旁生侧储混合式成藏的特征(见图 10(c))。3 类深层原油来自流三段,具有近源充注成藏的特征,近烃源的流三段是深层原油重点勘探层系;同时,考虑深层圈闭埋藏深度大,储层物性存在变差风险,应继续寻找近烃源、成岩演化慢和溶蚀改造作用强的目标储层。

## 7 结论

(1)北部湾盆地涠西南凹陷深层原油性质较轻,温度为20℃时,密度普遍小于0.850 g/cm<sup>3</sup>;流动性好,温度为50℃时的运动黏度为2.64~8.50 mm<sup>2</sup>/s;含硫质量分数很小,含蜡质量分数中等,平均为18.85%;与中、浅层原油相比,深层原油整体呈低密度、低运动黏度、低含硫质量分数、中等含蜡质量分数的特点,属于轻质原油。

(2)研究区深层原油具有“两高三低”的特点,即饱和烃质量分数高,平均为76.48%;饱和烃/芳烃比高,平均为9.79;芳烃质量分数低,平均为9.51%;非烃质量分数低,基本低于10.00%;沥青质质量分数低,不超过5.00%。

(3)研究区深层原油可划分为3种类型,I类原油正构烷烃呈“双峰型”分布、姥鲛烷优势明显、三环萜烷质量分数较低、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷呈不对称“V”型分布、4-甲基C<sub>30</sub>甾烷质量分数中等,与流二中上亚段泥页岩具有亲缘关系;II类原油正构烷烃呈“单峰状后峰型”分布、三环萜烷质量分数较高、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷呈不对称“V”型分布、4-甲基C<sub>30</sub>甾烷质量分数丰富,与流二下亚段油页岩特征相似;III类原油正构烷烃呈“单峰状前峰型”分布、植烷优势明显、三环萜烷质量分数较高、 $\alpha\alpha\alpha(20R)C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷呈“L”型分布、4-甲基C<sub>30</sub>甾烷质量分数低,主要来自流三上亚段泥页岩。

(4)研究区深层原油成藏模式可分为自生自储式、旁生侧储式及自生自储和旁生侧储混合式3种类型。I类原油整体上具有近距离运移、旁生侧储式或自生自储和旁生侧储混合式成藏的特征;II类原油整体上具有近距离运移、旁生侧储式成藏的特征;III类原油整体上具有近距离运移、自生自储式成藏的特征。

## 参考文献(References):

- [1] 朱伟林,江文荣.北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏[J].石油学报,1998,19(3):6-10.  
ZHU Weilin, JIANG Wenrong. Relations between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998,19(3):6-10.
- [2] 孙文钊,王传雷,杨希冰.北部湾盆地涠西南凹陷始新统隐蔽油气藏类型及勘探方向[J].天然气地球科学,2007,18(1):84-88.  
SUN Wenzhao, WANG Chuanlei, YANG Xibing. Types and favorable exploration areas of Eocene subtle traps in Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007,18(1):84-88.
- [3] 徐新德,王碧维,李旭红,等.北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组隐蔽油气藏油源及成藏特征[J].天然气地球科学,2012,23(1):92-98.  
XU Xinde, WANG Biwei, LI Xuhong, et al. Oil sources of concealed reservoirs in Liushagang Formation of the Weixinan Sag and accumulation feature, Beibuwan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012,23(1):92-98.
- [4] 周雯雯.涠西南凹陷原油地球化学特征及油源对比[J].中国海上油气(地质),1993,7(3):15-24.  
ZHOU Wenwen. Crude oil geochemical characteristic and source correlation of Weixinan Sag[J]. China Offshore Oil & Gas(Geology), 1993,7(3):15-24.
- [5] 范蕊,李水福,何生,等.涠西南凹陷烃源岩地球化学特征及油源对比[J].石油实验地质,2014,36(2):238-244.  
FAN Rui, LI Shuifu, HE Sheng, et al. Geochemical characteristics of source rocks and oil-source correlation in Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014,36(2):238-244.
- [6] 杨希冰,金秋月,胡林,等.北部湾盆地涠西南凹陷原油成因类型及分布特征[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(3):51-60.  
YANG Xibing, JIN Qiuyue, HU Lin, et al. Genetic types and distribution of crude oil in Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2019,41(3):51-60.
- [7] 李春荣,张功成,梁建设,等.北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J].石油学报,2012,33(2):195-203.  
LI Chunrong, ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(2):195-203.
- [8] 李绪深,甘军,张迎朝,等.南海西部海域断陷湖盆油气聚集规律及勘探前景[J].中国海上油气,2015,27(4):22-29.  
LI Xushen, GAN Jun, ZHANG Yingzhao, et al. Hydrocarbon accumulation regularity and exploration prospects of fault lacustrine basins in Western South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015,27(4):22-29.
- [9] 赵顺兰,杨希冰,陈林,等.南海西部涠西南凹陷碳酸盐岩潜山油气成藏条件及勘探潜力[J].中国海上油气,2019,31(2):51-61.  
ZHAO Shunlan, YANG Xibing, CHEN Lin, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and potential analyses of carbonate buried hills in Weixinan Sag in South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019,31(2):51-61.
- [10] 黄保家,黄合庭,吴国璋,等.北部湾盆地始新统湖相富有机质页岩特征及成因机制[J].石油学报,2012,33(1):25-31.

- HUANG Baojia, HUANG Heting, WU Guoxuan, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012,33(1):25-31.
- [11] 傅宁,刘建升.北部湾盆地流沙港组二段3类烃源岩的生烃成藏特征[J].*天然气地球科学*,2018,29(7):932-941.  
FU Ning, LIU Jiansheng. Hydrocarbon generation and accumulation characteristics of three type source rocks of Liu II Segment in Beibuwan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018,29(7):932-941.
- [12] 李友川,兰蕾,王柯,等.北部湾盆地流沙港组湖相烃源岩的差异[J].*石油学报*,2019,40(12):1451-1459.  
LI Youchuan, LAN Lei, WANG Ke, et al. Differences in lacustrine source rocks of Liushagang Formation in the Beibuwan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019,40(12):1451-1459.
- [13] 于水,邓运华,李宏义,等.北部湾盆地流沙港组二段页岩形成条件与分布控制因素[J].*中国海上油气*,2020,32(2):24-33.  
YU Shui, DENG Yunhua, LI Hongyi, et al. Forming conditions and distribution controlling factors of oil shale in Liu 2 Member of Beibuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020,32(2):24-33.
- [14] 高岗,徐新德,刘诗局,等.涠西南凹陷流沙港组二段优质烃源岩判别及其控油作用[J].*石油与天然气地质*,2020,41(2):339-347.  
GAO Gang, XU Xinde, LIU Shiju, et al. Organic geochemistry identification of high-quality source rocks in the 2nd member of Liushagang Fm and its controls on petroleum occurrence in the Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(2):339-347.
- [15] DIASTY W S, BEIALY S Y, ANWARI T A, et al. Organic geochemistry of the Silurian Tanezzuft Formation and crude oils, NC115 Concession, Murzuq Basin, Southwest Libya[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017,86:367-385.
- [16] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs New Jersey: Prentice Hall, 1993:120-159.
- [17] 覃建华,高偃博,彭寿昌,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油地球化学特征及油源对比[J].*东北石油大学学报*,2021,45(1):1-10.  
QIN Jianhua, GAO Xuanbo, PENG Shouchang, et al. Geochemical characteristics and oil source correlation of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin, China[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(1):1-10.
- [18] 侯读杰,冯子辉.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社,2011:218-219.  
HOU Dujie, FENG Zihui. Oil and gas geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:218-219.
- [19] MOLDOWAN J M, SEIFERT W K, GALLEGOS E J, et al. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 1985,69(8):1255-1268.
- [20] LI Meijun, WANG Tieguan, LIU Ju, et al. The occurrence of oleananes in the Beibuwan Basin and its application to the study of maturity and oil-source rock correlation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008,82(3):585-595.
- [21] 刘成林,马寅生,周刚,等.柴达木盆地石炭系生烃证据[J].*石油学报*,2012,33(6):925-931.  
LIU Chenglin, MA Yinsheng, ZHOU Gang, et al. Evidence for the Carboniferous hydrocarbon generation in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012,33(6):925-931.
- [22] 石正勇,金芸芸,李杭兵,等.春光区块白垩系稠油地球化学特征及成因分析[J].*特种油气藏*,2020,27(2):37-44.  
SHI Zhengyong, JIN Yunyun, LI Hangbing, et al. Geochemical properties and genesis of Cretaceous heavy-oil in the Chunguang Block[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020,27(2):37-44.
- [23] 徐佑德.车排子凸起东翼石炭系稠油特征及成因分析[J].*特种油气藏*,2019,26(1):50-56.  
XU Youde. Characteristics and genesis analysis of Carboniferous heavy oil on east flank of Chepaizi Salient[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019,26(1):50-56.
- [24] HUANG W Y, MEINSCHEN W G. Sterols as ecological indicators[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979,43(5):739-745.
- [25] PETERS K E, SNEDDEN J W, SULAEMAN A, et al. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia[J]. *AAPG Bulletin*, 2000,84(1):12-44.
- [26] VOLKMAN J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter[J]. *Organic Geochemistry*, 1986,9(2):83-99.
- [27] 傅宁.论4-甲基C<sub>30</sub>甾烷丰度与烃源岩质量的关系:基于北部湾盆地勘探实践[J].*中国海上油气*,2018,30(5):11-20.  
FU Ning. On relationship between abundance of 4-methyl-C<sub>30</sub> sterane and rock quality: a case study of exploration practices in Beibuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018,30(5):11-20.
- [28] 李博德,李美俊,唐友军,等.烃源岩生物标志物分布特征及其地质意义:以准噶尔盆地腹部地区中二叠统下乌尔禾组为例[J].*东北石油大学学报*,2022,46(5):68-82.  
LI Bocai, LI Meijun, TANG Youjun, et al. Distribution characteristics and geological significance of biomarkers in source rocks of Lower Wuerhe Formation of Middle Permian in Central Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(5):68-82.

(下转第70页)