

涠西南凹陷 A 洼及周缘含油构造油藏地球化学性质及成藏特征

满勇¹, 魏琳^{2*}, 邓勇¹, 李文龙¹, 胡德胜¹, 马潇潇², 尹嘉²

1 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570311

2 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

* 通信作者, linwei@cugb.edu.cn

收稿日期: 2021-09-08

中国地质大学(北京)基本科研业务费(35832019035)、中海油南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究“南海西部在生产油气田提高采收率技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ)资助

摘要 通过对北部湾盆地涠西南凹陷 A 洼及其周缘区域不同井典型原油样品的地球化学特征进行分析, 将原油划分为 3 类: I 类原油为重质油, 碳同位素轻, 4-甲基甾烷丰度低, 成熟度低; III 类原油为轻质油, 碳同位素重, 4-甲基甾烷丰度高, 成熟度高; II 类原油整体地球化学特征介于两者之间。涠西南 A 洼主体原油为 II 类和 III 类原油。烃源岩地球化学特征对比结果表明, 涠西南凹陷发育上中下 3 套烃源岩。上源岩沉积环境偏氧化, 以藻类生源为主, 有一定的陆源高等植物贡献; 中源岩沉积环境偏氧化, 陆源高等植物输入增多; 下源岩沉积环境为弱还原+弱氧化, 4-甲基甾烷含量高, 藻类勃发。精细的油源对比结果表明: I 类和 II 类原油来源于上源岩, III 类原油来源于下源岩。结合成藏期次和输导体系综合分析, 可知 I 类原油为上源岩第一期早期充注, 通过砂体垂向运移至烃源岩上覆砂体成藏, II 类原油为上源岩第二期早期充注, 通过断裂和砂体近距离运移至 A 洼周缘浅层圈闭成藏, III 类原油为下源岩晚期充注, 通过构造脊和层间断层远距离侧向运移后聚集。该研究成果对北部湾盆地涠西南凹陷 A 洼的油气勘探突破具有一定的指导意义。

关键词 涠西南凹陷; 油藏地球化学; 生物标志化合物; 油源对比; 运移成藏; 供烃组合

Oil geochemical and accumulation characterization in the A sag and surrounding oil-bearing structures of the Weixinan depression, Beibuwan Basin

MAN Yong¹, WEI Lin², DENG Yong¹, LI Wenlong¹, HU Desheng¹, MA Xiaoxiao², YIN Jia²

1 Hainan Branch of CNOOC (China) Co. Ltd., Haikou 570311, China

2 School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Based on geochemical characteristics analysis of crude oil samples from different typical wells in the Weixinan sag A

引用格式: 满勇, 魏琳, 邓勇, 李文龙, 胡德胜, 马潇潇, 尹嘉. 涠西南凹陷 A 洼及周缘含油构造油藏地球化学性质及成藏特征. 石油科学通报, 2022, 02: 155-173

MAN Yong, WEI Lin, DENG Yong, LI Wenlong, HU Desheng, MA Xiaoxiao, YIN Jia. Oil geochemical and accumulation characterization in the A sag and surrounding oil-bearing structures of the Weixinan depression, Beibuwan Basin. Petroleum Science Bulletin, 2022, 02: 155-173. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.02.014

and its surrounding areas in the Beibuwan Basin, the crude oils in this area can be divided into three types (I, II, and III). The first type of crude oil (I) mainly distributed in the shallow reservoirs has relatively heavier oil density, relatively lighter isotopic value, relatively lower abundance of 4-methyl sterane and lower thermal maturity. The third type of crude oil (III) mainly distributed in the deep reservoirs has relatively lower oil density, relatively heavier carbon isotopic value, relatively higher abundance of 4-methyl sterane and the highest thermal maturity. The overall geochemical characteristics of second type of crude oils (II) mainly distributed in the shallow reservoirs are in between. Most of the crude oil of the Weixinan sag A belong to class II and class III. The comparison of geochemical characteristics of source rocks samples shows that there are three sets of source rocks developing in the Weixinan Sag. The upper part source rocks that deposited in an oxidizing environment are dominated by algal input with certain contribution from terrigenous higher plants. The sedimentary environment of the middle part source rocks was more oxidized, and higher plants contributed more to its source materials. The lower part source rocks were formed in a weak reducing-oxidizing environment with large amounts of algal inputs. Oil-source correlation results show that type I and type II oils are mainly derived from the upper part source rocks, and type III oils are chiefly derived from the lower part source rocks. Considering the comprehensive analysis of generation stages, accumulation stages, and migration pathways, this study concludes that type I oil, which mainly derived from the first hydrocarbon charging stage of the upper part source rocks, is accumulated in the overlying reservoir by migrating upward through sand bodies. Type II oil came from the second hydrocarbon charging stage from the upper part source rocks and accumulated in traps in shallow reservoirs on the periphery of the A Sag. Type III oil was generated from the inner center of sag A and migrated along structural crests through longer migration pathways, and finally accumulated into oil reservoirs when being stopped by big faults and faults between formations. The results of this study not only are helpful to further understand the hydrocarbon accumulation and distribution, but is also significant towards the further breakthrough of petroleum exploration in sag A.

Keywords Weixinan depression; oil geochemical characterization; biomarkers; oil-source correlation; migration and accumulation characteristics; hydrocarbon supply combination

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.02.014

0 引言

南海北部大陆架油气资源丰富, 位于北部湾盆地西北边缘的涠西南凹陷是我国已证实的典型湖相富烃洼陷代表。涠西南凹陷内部发育A、B、C等多个主要次级洼陷^[1-5]。南海西部的原油经历了多年的勘探开发, 现有油田群发现众多, 但逐年面临稳产压力^[6-10], 亟需进一步加大勘探工作量和新的规模性油气发现。流三段深层和古近系基岩潜山成为下部勘探领域的新走向。近年来含油构造的发现主要集中于B洼, A洼作为烃源发育范围和品质与B洼相近的次级洼陷, 勘探的成果发现却明显低于B洼^[11-15]。截止2016年底, 构造圈闭已经逐渐钻探殆尽, 岩性圈闭、构造—岩性圈闭成为了勘探拓展的新方向, 因此, 油气来源、运移方向及成藏模式方面的精细研究对于指导勘探发现愈加重要^[16-19]。涠西南10-A/B含油构造的发现证实A洼整体具有很大勘探潜力, A洼成藏主控因素及有利区带亟待突破。当前的研究和钻井勘探主要集中在B洼, 针对A洼不同含油构造的解剖, 油源对比及运移成藏的研究还相对缺乏, 难以满足现阶段油气勘探需求。由于A洼钻井对烃源层段揭示较少, 本文通过油藏地球化学精细化分析, 结合原油分类, 明确油源及供烃单元, 结合断裂—砂体配置明确油气运移方向,

确立涠西南A洼陷油气成藏特征, 为进一步勘探的深入提供理论支持。

1 区域构造概况

涠西南凹陷位于北部湾盆地北部坳陷的北边, 是盆地次级构造单元。凹陷西北临万山隆起, 东南与企西隆起相接。西北以涠西南大断层为界, 内部为一个被3条主要断裂控制的箕状断陷, 呈现北断南超的构造格局(图1)^[20-21]。涠西南凹陷主要经历了古近纪的断陷期和新近纪的坳陷期两个阶段。古近纪一共经历了三期不同方向的张裂作用, 控制了长流组(Ech)、流沙港组(EI)及涠洲组(Ew)的沉积, 新近纪后地层发生沉降作用, 发育了下洋组(Nx)、角尾组(Nj)、灯楼角组(Nd)、望楼港组(Nw)和第四系(Q)地层(图2)。流沙港组包括流一段(EI¹), 流二段(EI²)和流三段(EI³)。其中流二段时期盆地总体张裂作用最强, 形成了大范围的半深湖—深湖沉积。流一段和流三段岩性主要为砂岩和砂泥混合, 流二段岩性主要包括中深湖相的泥岩、页岩及油页岩^[22-25], 是盆地的主要烃源岩发育层段。油气藏主要存在于流二段以上的流一段、涠洲组及部分浅层, 以及深层的流三段及潜山层段。

涠西南凹陷的1号断层为流沙港组和涠三段沉积

期间的凹陷主控边界断层，呈现铲式正断层特征，在流三段和流二段沉积时期活动最为强烈，流一段后活动量和强度明显降低。进入涠一、二段后，凹陷主控断层为 2 号断层取代^[26-28]。流沙港组时期是区域沉降作用最强的阶段，伴随着断层的差异性活动，凹陷内部发育 A、B、C 三个主要次级洼陷，近年陆续发现的含油构造主要集中于 B 洼^[11-15]。前人的古地貌恢复等相关研究认为 A、B 两个次级洼陷的古沉积深度接近，A 洼烃源岩的发育范围和品质与 B 洼相近，洼陷晚期无强烈构造破坏作用，勘探的成果发现却明显低于 B 洼，仅在周缘部分地区取得了一定的勘探进展(图 1)^[29-30]。近年涠西南凹陷的原油和成藏研究主要集中在 B 洼周缘，包括 B 洼相关的东南斜坡区^[15]，以及以 B 洼样品为代表的盆地总体原油分类^[7]。研究认为涠西南凹陷次级洼陷和不同构造单元内原油性质差异较大，主要根据孕甾烷，重排甾烷，规则甾烷和 4-甲基甾烷含量进行区分^[31-33]。近年来，海南西部逐渐加强了对 A 洼、C 洼等次洼的进一步勘探力度，涠西南

10-A/B 含油构造的发现证实了 A 洼整体具有很大勘探潜力。油气纵向上分布于古近系和新近系砂岩、石炭系潜山基岩中，在涠洲组、流一段、流二段和流三段等层中均发现油气藏。油气性质在纵向的不同层位及其平面不同区带均有差异。目前 A 洼精细化油源对比及油气有利运聚方向研究不够深入，整体成藏条件及有利区带亟待突破。本文通过原油在不同层段、不同构造位置的差异性进行成因划分，明确盆地运移输导特征，理清涠西南凹陷 A 洼及周缘含油构造油藏地球化学性质及运移成藏特征。

2 原油特征与分类

本研究详细对 A 洼及周缘相关井原油的有机地球化学特征进行了分析，包括原油物性、全油碳同位素、饱和烃色谱-质谱特征等方面，明确原油地球指标的指示意义，确立原油在不同层段和区带成因分类，明确供烃单元。

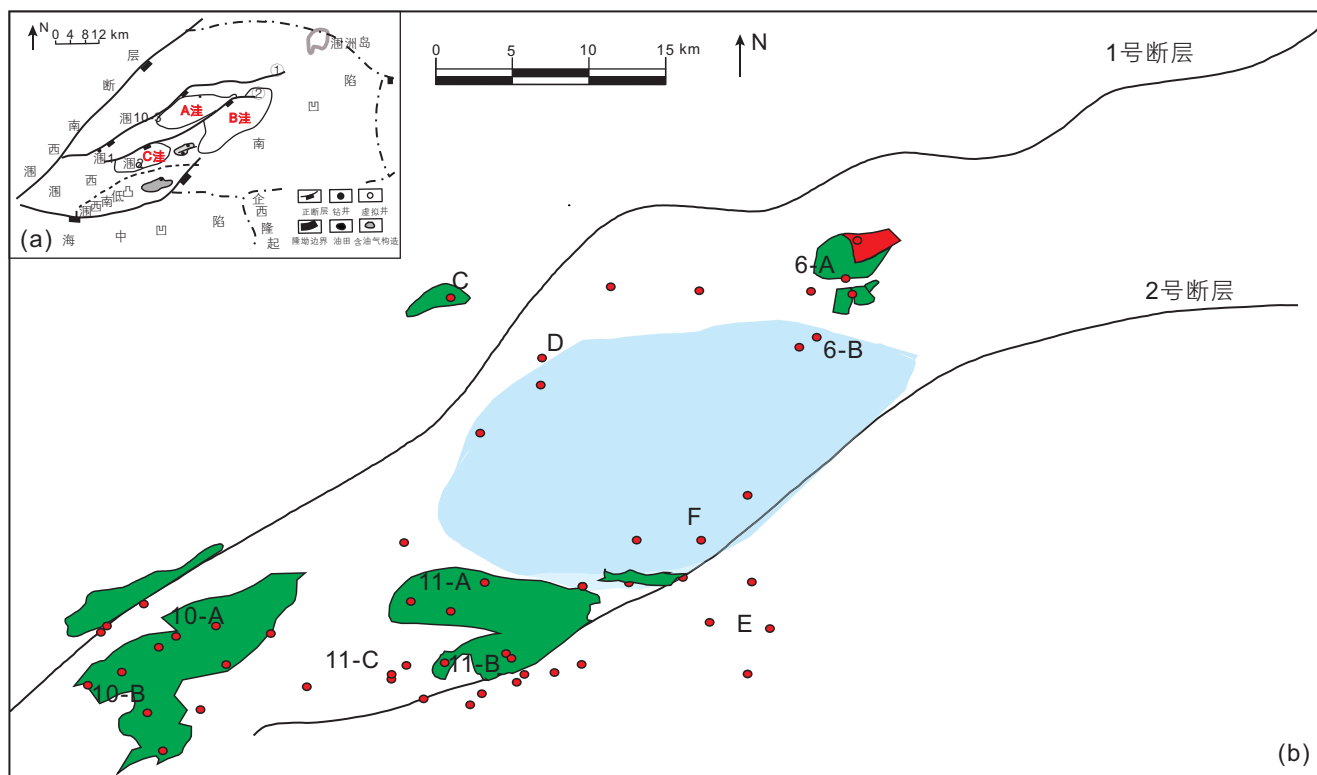


图 1 北部湾盆地涠西南凹陷基本地质单元(A, B, C 次级洼陷)和主要油田分布(a)为涠西南凹陷构造单元分布图; (b)为涠西南凹陷 A 洼陷及周缘主要含油构造分布(包括 10-A/B, 11-A/B/C, 6-A/B, C-F 构造, 其中 E 构造位于二号断层下降盘的 B 洼, 11-B 包括二号断裂带上盘和下盘的部分井)

Fig. 1 Structural unit location and main oilfield distribution in Weixinan depression, Beibuwan Basin (a) the main structural geological units in Weixinan depression; (b) main oilfield distribution in sag A and surrounding areas in Weixinan depression (Oil bearing structure 10-A/B, 11-A/B/C, 6-A/B, C-F. Structural E located in hanging wall area of fault 2 in sag B, 11-B including wells in both ascending and descending plates of fault 2)

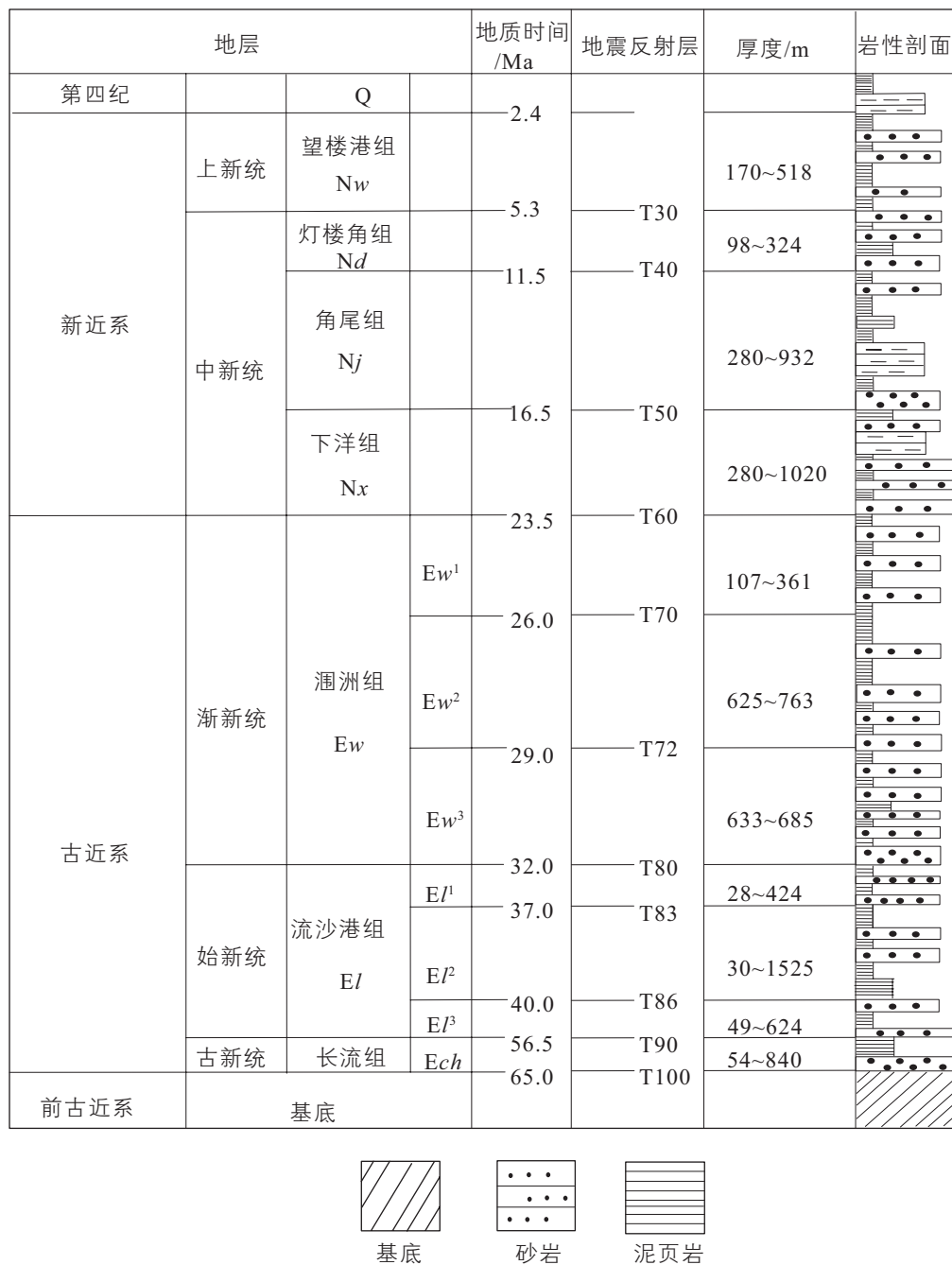


图2 北部湾盆地涠西南凹陷地层柱状图和沉积的主要地质时间、平均地层厚度和地震反射层分层

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of source rocks in Weixinan sag in Beibuwan Basin, including stratigraphic lithology, geological time, formation thickness and seismic layers

2.1 原油物性特征

研究区A注典型井的宏观参数如表1所示,原油密度表明,涠西南凹陷A注原油可分为凝析油、轻质油、中质油和重质油,其中以轻质油为主。原油的密度分布在平面上规律分布表现为从洼陷中心往外油质逐渐变轻(图3)。环A注附近为中-重质油,如涠洲D构造,涠洲E构造,涠洲11-B构造的流一段及部分涠

洲、下洋和角尾组原油等。除此之外,原油物性特征在纵向上也具有明显差异性。流二段和流三段原油密度较轻,运动黏度小,饱和烃和芳烃含量高。涠洲组和流一段原油密度、运动黏度、饱和烃和芳烃含量均处于中等水平,原油密度较流二段和流三段稍高。角尾组和下洋组原油密度和运动黏度较高,非烃和沥青质含量较高(表1)。结合色质谱资料,分析认为控制重质油密度的成因有两种,一种是低成熟度所控,以

表 1 涪西南 A 洼及周缘典型井原油宏观参数

Table 1 Oil geophysical and geochemical characteristics of wells in sag A and its surrounding areas

井号	样品	层位	全油碳同位素 /‰	黏度 /mPs·s (50 °C)	密度 / (g/cm ³)	饱和烃 /%	芳香烃 /%	非烃 /%	沥青质 /%
WZ-C	原油	下洋组	-25.3	/	0.97	33.44	24.41	19.40	12.71
WZ-D	原油	流一段	-29.7	95.09	0.91	46.05	13.49	20.47	10.70
WZ6-A	原油	壶天组	-24.9	4.94	0.84	/	/	/	/
WZ6-B	原油	涪三段	-27.2	12.58	0.85	60.37	16.82	8.06	4.15
WZ6-B	原油	涪三段	-27.1	12.11	0.85	72.16	15.87	8.98	4.19
WZ6-B	原油	流一段	-26.9	16.91	0.86	73.39	14.22	10.32	5.28
WZ6-B	原油	流一段	-27.0	18.05	0.86	63.53	14.99	9.84	6.49
WZ10-A	原油	流三段	-25.2	8.05	0.84	72.00	13.00	12.00	3.00
WZ10-B	原油	流三段	-26.0	/	0.83	50.92	17.28	7.31	3.02
WZ11-B	原油	流三段	-24.2	5.26	0.81	/	/	/	/
WZ11-B	原油	流一段	-26.2	35.26	0.92	56.03	14.66	12.29	8.04
WZ11-A	原油	流一段	-26.0	37.78	0.87	33.44	24.41	19.4	12.71
WZ11-A	原油	长流组	-26.6	40.54	0.84	/	/	/	/

注：“/”表示无数据或数据无效

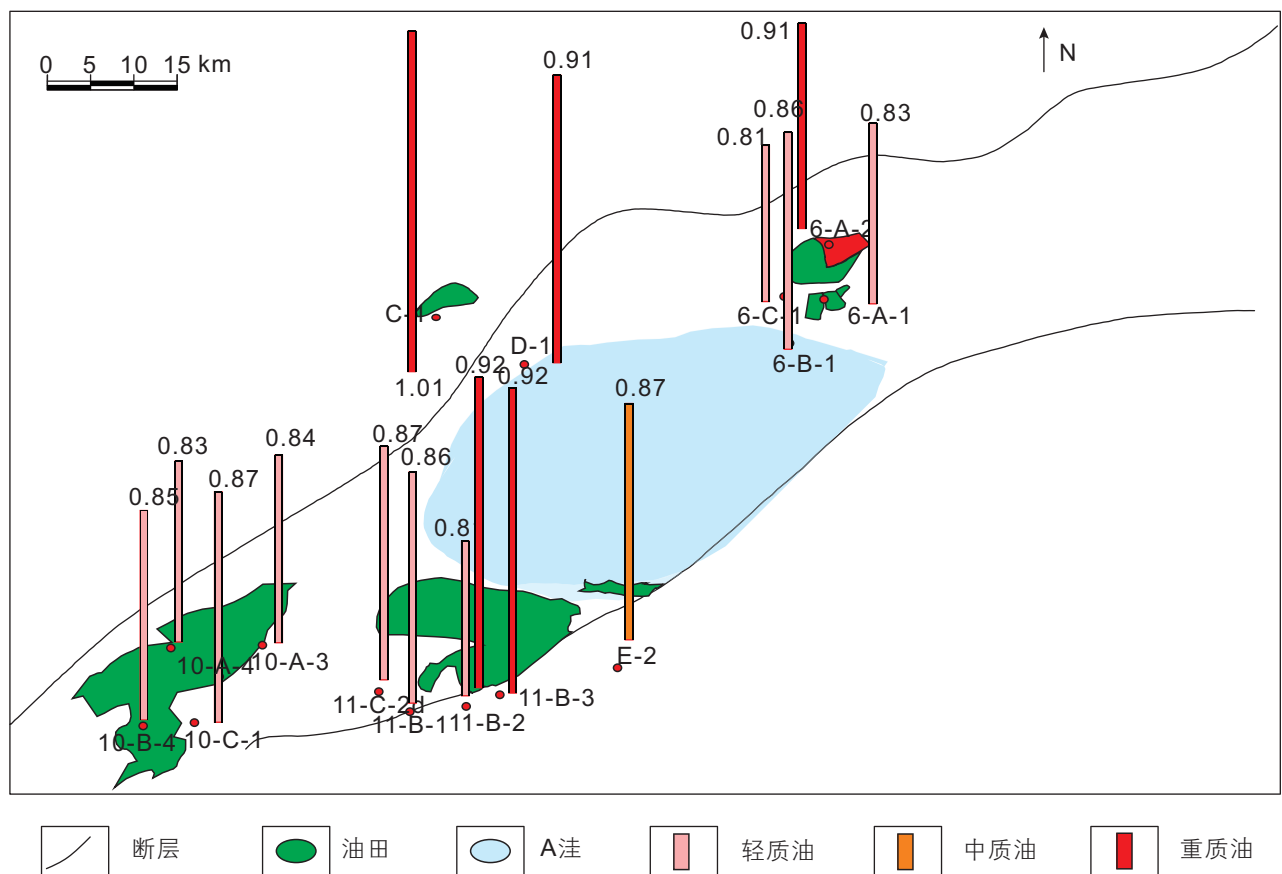


图 3 涪西南凹陷 A 洼陷不同含油构造原油密度平面分布

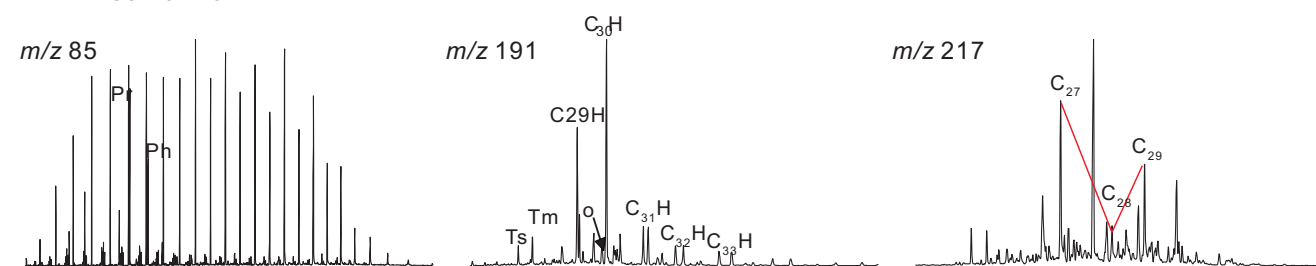
Fig. 3 Planar distribution of density of oils from different oil-bearing structures in sag A in Weixinan depression

WZ-D 流一段油藏为代表，一种是生物降解成因重质原油，分别以 WZ11-B 角尾组和 WZ-C 下洋组油藏为

代表(图 4)。

特别值得注意的是，传统的有机地球化学理论一

WZD-12831.9 m oil



WZ11-B-3995.5 m oil

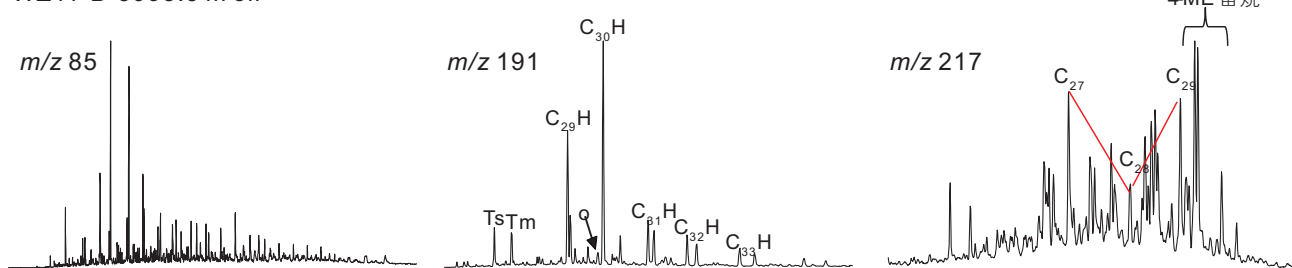


图4 涪西南凹陷A注不同成因类型重质油质量色谱图,包括正构烷烃 (m/z 85), 萜烷 (m/z 191) 和甾烷 (m/z 217) 分布

Fig. 4 Typical biomarker distributions of heavy oils in the A sag of Weixinan depression, showing in the order of *n*-alkanes (m/z 85), terpanes (m/z 191) and steranes (m/z 217) distribution

般认为,生物母质类型对有机质和烃类的碳同位素特征范围有重要影响。一般来说,藻类生源为主的湖相有机质碳同位素组成偏轻($\delta^{13}\text{C} < -26\text{‰}$),陆生植物来源的有机质碳同位素组成偏重($\delta^{13}\text{C} > -26\text{‰}$)^[34-40]。然而在涪西南A注周缘含油构造中,如10-A/B构造和11-B构造等,原油的碳同位素呈现偏重特征,且原油碳同位素的变化和密度变化呈现一定相关性。综合分析认为,在本研究中,涪西南A注原油碳同位素值的轻重在一定程度上并不反应母质来源,而是受到成熟度的影响。平面上看,不同含油构造原油碳同位素呈现差异性特征,洼陷中心向外同位素增重。纵向上,深层(流三段和潜山层位)原油碳同位素重,流一段及涪三段层位原油碳同位素轻(表2)。

综合来看,涪西南凹陷原油的密度和碳同位素是反映原油差异,进行进一步分类划分的可靠标志,根据原油的密度、全油碳同位素、成熟度的生物标志物数据如Ts/(Ts+Tm) (Ts: 18 α (H)-22,29,30-三降藿烷; Tm: 17 α (H)-22,29,30-三降藿烷)、C₂₃-三环萜烷/C₃₀藿烷的相关关系图,原油的密度主要受成熟度影响,除了生物降解的浅层原油外,成熟度越高原油密度越小。Ts/(Ts+Tm)、C₂₃-三环萜烷(C₂₃TT)/C₃₀藿烷等参数是表征原油成熟度的有效指标;原油碳同位素偏低主要受到生源和成熟度的双重控制影响。成熟度接近时,碳同位素与4-MSI(C₃₀ 4-甲基甾烷)指数呈正相关关系。高熟的湖相优质烃源岩生成原油的碳同位素

值偏重(表3;图5),低熟的一般烃源生成的原油碳同位素值偏轻。

2.2 原油生物标志物特征和成因类型

原油正构烷烃主要呈现单峰型特征,萜烷和甾烷类的生物标志物在不同参数的分布和含量上存在明显差异。根据原油密度、碳同位素特征,结合C₂₃TT/C₃₀H, C₁₉TT/C₂₃TT(C₁₉三环萜烷/C₂₃三环萜烷), Ts/Tm, C₂₇, C₂₈, C₂₉规则甾烷类与4-甲基C₃₀甾烷的含量差异,将原油分为3大类(图5;表1,表3)。

I类原油为重质原油,主要分布在WZ-D构造的流一段,构造位于近A注的陡坡带。原油碳同位素值最轻,生物标志物特征为高Pr/Ph值(姥鲛烷/植烷),代表水生藻类4-甲基C₃₀甾烷(4-MSI)含量低,奥利烷指数较高, C₁₉TT/C₂₃TT值相对低, C₂₃TT/C₃₀H值相对低。代表低等水生生物的20R-*aaa*-C₂₇甾烷/20R-*aaa*-C₂₉甾烷偏高含量较高(图5)。成熟度参数Ts/Tm显示为低成熟原油。

II类原油为中轻质原油,主要分布在WZ-E构造的流一段和角尾组,构造位于2号断裂带中段,临近A注东部。全油碳同位素值相对低,生物标志物特征为较高Pr/Ph值,4-甲基C₃₀甾烷含量低,奥利烷指数较高, C₁₉TT/C₂₃TT值较高, C₂₃TT/C₃₀H值相对中等。20R-*aaa*-C₂₇甾烷/20R-*aaa*-C₂₉甾烷中等。成熟度参数Ts/Tm显示为成熟原油。

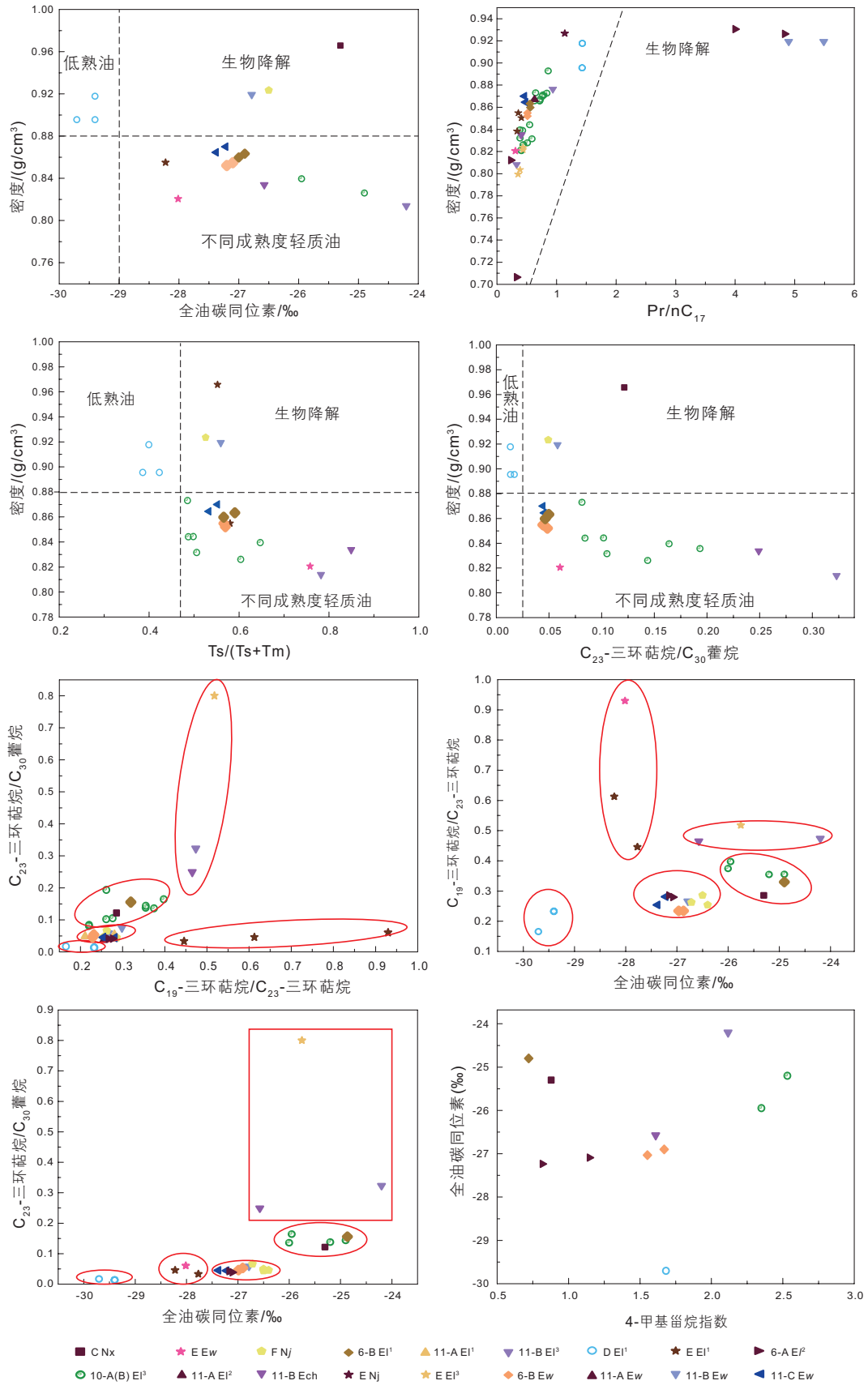


图 5 涪西南凹陷 A 洼不同构造原油分类图(注: $C_{19}TT/C_{23}TT$: C_{19} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷; 4-甲基甾烷指数 = C_{30} 4-甲基甾烷/ C_{29} 规则甾烷)

Fig. 5 Classification of crude oils of different structures in sag A in Weixinan depression

表2 涠西南凹陷A注及周缘不同含油构造的甲基菲指数甲基菲指数(MPI1), $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 与换算的原油成熟度(R_o)

Table 2 Methylphanthrene, $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ and converted maturity of crude oils (R_o) in oil-bearing structures in sag A and its surrounding areas in Weixinan depression

含油构造及层位	MPI1	$C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	R_o /%
WZ-D 流一段	/	0.249	0.5-0.7
WZ-E 流一段/流二段	0.67-1.25	/	0.8-1.15
	(0.83)	/	(0.9)
WZ11-A/B/C 流一段/流三段	0.47-0.56	/	0.68-0.74
	(0.52)	/	(0.71)
WZ10-A/B 流三段	0.62	/	0.77

表3 涠西南A注及周缘典型井原油地球化学特征

Table 3 The summary GC-MS parameters of saturated fractions for crude oils in Sag A in Weixinan depression

井位	C_{27}/C_{29}	C_{28}/C_{29}	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	C_{26}/C_{25} 三环 萜烷	C_{23} -三环萜 烷/ C_{30} 藿烷	C_{32} 藿烷 S/R	C_{31} - 22R/ C_{30}	C_{22}/C_{21} 三环 萜烷	Ts/Tm
WZ6-A-1	0.65	0.43	1.50	0.29	0.21	2.52	0.16	1.28	0.19	0.23	2.03
WZ10-A-1	/	/	/	/	/	1.07	0.14	1.10	0.18	0.33	1.46
WZ10-A-1	0.73	0.42	1.65	0.45	0.28	2.50	0.14	1.34	0.19	0.20	1.76
WZ10-B-1	0.62	0.42	1.88	0.55	0.34	1.04	0.12	1.26	0.19	0.21	1.19
WZ10-C-1	0.58	0.42	1.60	0.41	0.26	2.34	0.16	1.33	0.18	0.22	1.84
WZ10-C-2	/	/	/	/	/	2.80	0.14	1.16	0.26	0.30	1.52
WZ11-B-3	0.88	0.49	1.10	7.50	6.68	1.30	0.06	1.26	0.20	0.22	1.27
WZ11-B-2	0.63	0.43	1.55	0.33	0.23	3.54	0.32	1.28	0.19	0.24	3.60
WZ11-B-2	0.57	0.51	1.68	0.41	0.25	2.44	0.25	1.33	0.21	0.21	5.64
WZ11-C-1	0.86	0.50	/	/	/	1.38	0.07	1.25	0.20	0.22	1.30
WZ11-C-1	/	/	/	/	/	2.16	0.04	1.39	0.19	0.23	1.15
WZ11-C-1	/	/	/	/	/	2.27	0.05	/	0.20	0.27	1.11
WZ11-C-1	/	/	/	/	/	2.34	0.05	1.14	0.21	0.32	1.11
WZ11-A-3	0.97	0.52	1.36	0.56	0.43	2.63	0.03	1.27	0.16	0.21	1.07
WZ11-D-2d	0.71	0.21	/	/	/	0.52	0.05	1.60	0.17	0.21	1.14
WZ11-D-2d	0.71	0.21	/	/	/	0.52	0.05	1.60	0.17	0.21	1.14
WZ11-D-2d	0.86	0.22	/	/	/	0.57	0.04	1.56	0.15	0.24	1.23
WZ E-3	0.67	0.49	1.58	0.39	0.27	2.72	0.80	1.09	0.17	0.19	7.11
WZ C-1	0.74	0.49	1.53	1.00	0.80	8.61	0.12	1.28	0.20	0.04	1.23
WZ D-1	1.52	1.60	2.02	1.13	0.64	1.18	0.02	0.93	0.19	0.18	0.73
WZ D-1	/	/	2.64	/	/	2.44	0.12	1.07	0.16	/	/
WZ D-1	/	/	2.64	/	/	0.11	0.01	0.90	0.20	0.00	0.67
WZ D-1	/	/	2.64	/	/	3.31	0.01	0.87	0.20	0.00	0.63
WZ6-B-1	0.92	0.53	1.43	0.46	0.33	2.50	0.05	1.25	0.18	0.21	1.32
WZ6-B-1	0.85	0.53	1.44	0.46	0.34	2.54	0.04	1.25	0.19	0.21	1.30
WZ6-B-1	0.97	0.47	1.45	0.48	0.34	2.65	0.05	1.25	0.17	0.21	1.30
WZ6-B-1	0.85	0.48	1.44	0.50	0.36	2.76	0.05	1.27	0.18	0.21	1.44

注: “/”表示无数据或数据无效, Pr: 姥鲛烷; Ph: 植烷; Ts: $C_{27}18\alpha(H)-22,29,30-$ 三降藿烷; Tm: $C_{27}17\alpha(H)-22,29,30-$ 三降藿烷; C_{30} : $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷; $C_{31}H$: $C_{31}\alpha\beta$ 藿烷; C_{27} , C_{28} 和 C_{29} 分别代表 C_{27} 甾烷, C_{28} 甾烷和 C_{29} 甾烷

III类原油为轻质原油，原油呈现低Pr/Ph值，高4-甲基C₃₀甾烷含量，高C₁₉TT/C₂₃TT值，C₂₃TT/C₃₀H值相对高，全油碳同位素较轻等特征。在20R-aaa-C₂₇、20R-aaa-C₂₈、20R-aaa-C₂₉甾烷组成中，代表陆源输入物的生标参数20R-aaa-C₂₈相对含量低，20R-aaa-C₂₇甾烷/20R-aaa-C₂₉甾烷总体偏高。III类原油均为成熟石油，但在不同构造带的成熟度有所不同，根据Ts/Tm指数，WZ-D、WZ11-A构造原油成熟度相对最低，WZ6-A和6-B构造原油成熟度低于涪洲10-A、10-B，WZ11-B和WZ-E成熟度相对最高。此外，采用甲基菲指数(MPI1)可计算出研究区的MPI1为0.47~1.25，换算成原油成熟度R_o为0.50~1.15(表2)，因此，研究区原油为生油窗内正常成熟原油。R_o的计算公式^[41-42]为

$$R_o = 0.6 \times MPI1 + 0.4 \quad (1)$$

WZ-D构造原油成熟度表征参数使用C₂₉规则甾烷的异构化程度C₂₉ββ/(αα+ββ)，原油参数为低熟，即换算的成熟度处于0.5-0.7区间内。总体来看和Ts/Tm表征成熟度的规律相似，即WZ-D构造原油成熟度相对最低，WZ-E成熟度相对较高，WZ10-A、10-B构造原油成熟处于中等，且高于WZ-11构造。

结合A洼附近原油宏观指标和生物标记物特征，研究认为涪西南凹陷总体分为三类原油，I类和II类原油主要分布在流一段及部分浅层段，表现为有限的水生藻类输入，较高的陆源输入。II类原油整体的成熟度高于I类。III类原油主要分布在流三段和潜山深层

段，原油表现为明显的藻类输入，较低的陆源来源，整体为成熟石油，但在不同含油构造带成熟度有差异。

2.3 油源精细对比

涪西南流沙港组烃源岩非均质性强，从I-III型均有分布，流二段源岩最优，多为I-II₁型，其次为流一段，多为II₁-II₂型，流三段泥岩相对差，多为II₂-III型。主要以TOC含量大于1%的烃源岩为主(图6)。涪西南A洼陷的断裂系统上下分段特征明显，包括流一段一流二段之间，流二段一流三段上下两套层间断层。依据烃源不同层段地球化学特征的差异性，本研究将涪西南的流沙港组分为上源岩，中源岩和下源岩。上源岩包括流一段和流二段上部的油页岩和普通泥岩，供烃主力为油页岩。中源岩主要为普通泥岩。下源岩包括流二段下部和流三段的油页岩和普通泥岩，供烃主力为油页岩。

涪西南A洼没有完整揭示流二段的钻井，选取涪西南B洼E构造靠近B洼中心典型井揭示烃源岩特征。上中下源岩的区分主要依靠平均TOC含量，Pr/Ph均值，正构烷烃峰型、Ts与Tm相对含量、C₂₉降藿烷-C₂₉Ts-C₃₀重排藿烷，4-甲基-C₃₀甾烷相对含量区分。下源岩地球化学参数，包括总有机碳(TOC)，热解烃参数(S₂)，氢指数值(HI)均相对最高。下源岩ββ-C₂₇甾烷，ββ-C₂₈甾烷，ββ-C₂₉甾烷相对含量排列呈现“L”字形，4-甲基C₃₀甾烷相对含量最高，重排甾烷相对含量中等较低。萘烷组成重，三环萘含

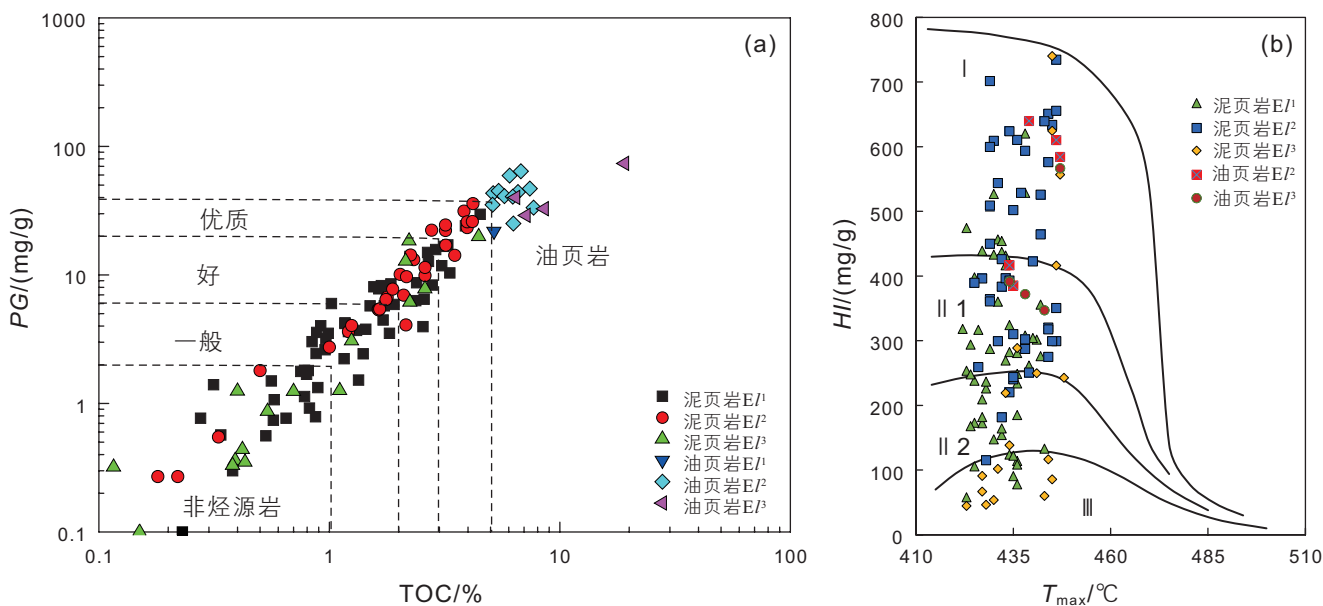


图 6 涪西南凹陷 A 洼烃源岩评价 (a) 和有机质类型 (b)

Fig. 6 Plot of TOC versus PG (S₁ + S₂) (a), showing the quality of the source rocks and HI versus T_{max} diagram based on rock-eval pyrolysis (b).

量较高, Ts/Tm比值较高, C₃₀重排藿烷和C₂₉新藿烷(C₂₉Ts)含量中等(图7)。中源岩TOC均值为1.9%, ββ-C₂₇甾烷, ββ-C₂₈甾烷, ββ-C₂₉甾烷相对含量排列呈现倒“L”形, 4-甲基-C₃₀甾烷相对含量较低, Ts/Tm比值中等, 三环萜含量最低。上源岩各地球化学指标处于中源岩和下源岩中间, 整体低于下源岩而优于中源岩。生物标记物上, ββ-C₂₉甾烷, ββ-C₂₇甾烷, ββ-C₂₈甾烷呈现相对含量排列逐渐降低, 呈现“L”字形。4-甲基-C₃₀甾烷相对含量中等—低。三环萜含量较低, C₁₉TT/C₂₃TT含量低, C₂₃TT/C₃₀H值相对低。

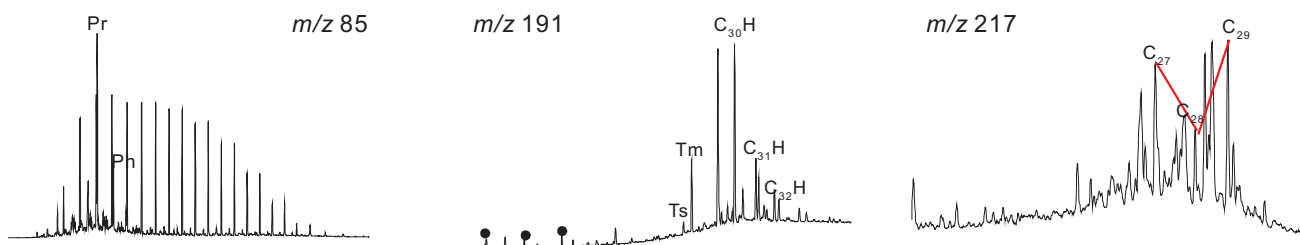
结合原油和烃源岩包括萜烷和甾烷在内的生物标记物谱图分析, I类原油主要与上源烃源岩的生物标记物分子组成接近。I类原油主要来自流二段上部 and 流一段泥页岩, 呈现较轻的碳同位素, 中等的密度和黏度物性, 较低的4-MSI指数, 较高的Pr/Ph等特征, 总体代表了偏氧化沉积环境、较高陆源输入、低丰度藻

类等低等水生生物, 以及较低成熟度的特征(图8); III类型原油主要来自成熟的流二段底部/流三段油页岩, 各项地球化学指标与上源原油呈现相异性, 代表了中深湖相偏还原沉积环境、较低陆源输入、较高丰度藻类等低等水生生物, 以及较高成熟度的一类供烃组合。

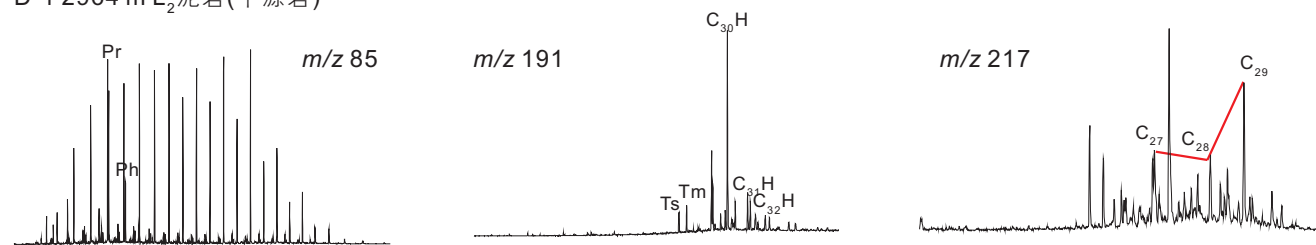
3 原油充注特征

原油充注历史是研究盆地油气运移和成藏问题的重要组成部分, 常用方法包括构造期次和过程分析、流体包裹体岩相学和均一温度分析、生排烃模拟、自生伊利石定年等。其中, 流体包裹体的分析是确定流体成藏期次的重要手段之一, 也可以被用来进行油气古压力恢复和示踪油气运移路径^[43]。本研究选取了涪西南A洼陷及周缘油气典型井进行了流体包裹体分析。在综合包裹体岩相学、均一温度测试基础上, 结合单

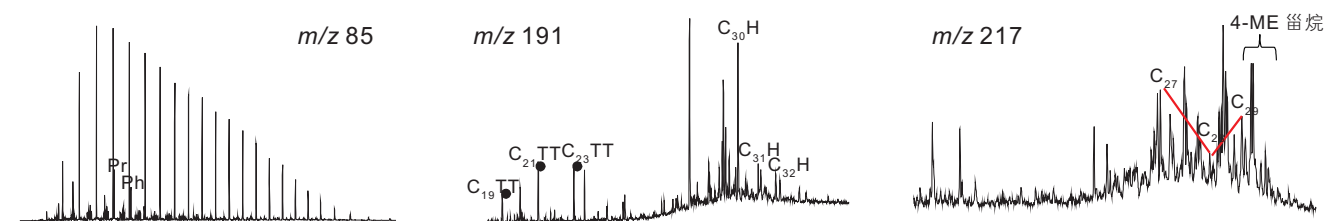
E-1 2984 m L₁泥岩(上源岩)



D-1 2964 m L₂泥岩(中源岩)



E-1 3344 m L₂油页岩(下源岩)



注: Pr: 姥鲛烷; Ph: 植烷; Ts: C₂₇ 18 α (H)-22,29,30-三降藿烷; Tm: C₂₇ 17 α (H)-22,29,30-三降藿烷; C₃₀ H: C₃₀ α β 藿烷; TT: 三环二萜类; C₃₁H: C₃₁ α β 藿烷; C₃₂H: C₃₂ α β 藿烷; C₂₇, C₂₈ 和 C₂₉ 分别代表 C₂₇ 甾烷, C₂₈ 甾烷和 C₂₉ 甾烷

图7 涪西南凹陷上、中、下3套烃源岩组合生物标志物对比图

Fig. 7 Comparison of organic geochemical biomarkers of source rocks in the Weixinan depression

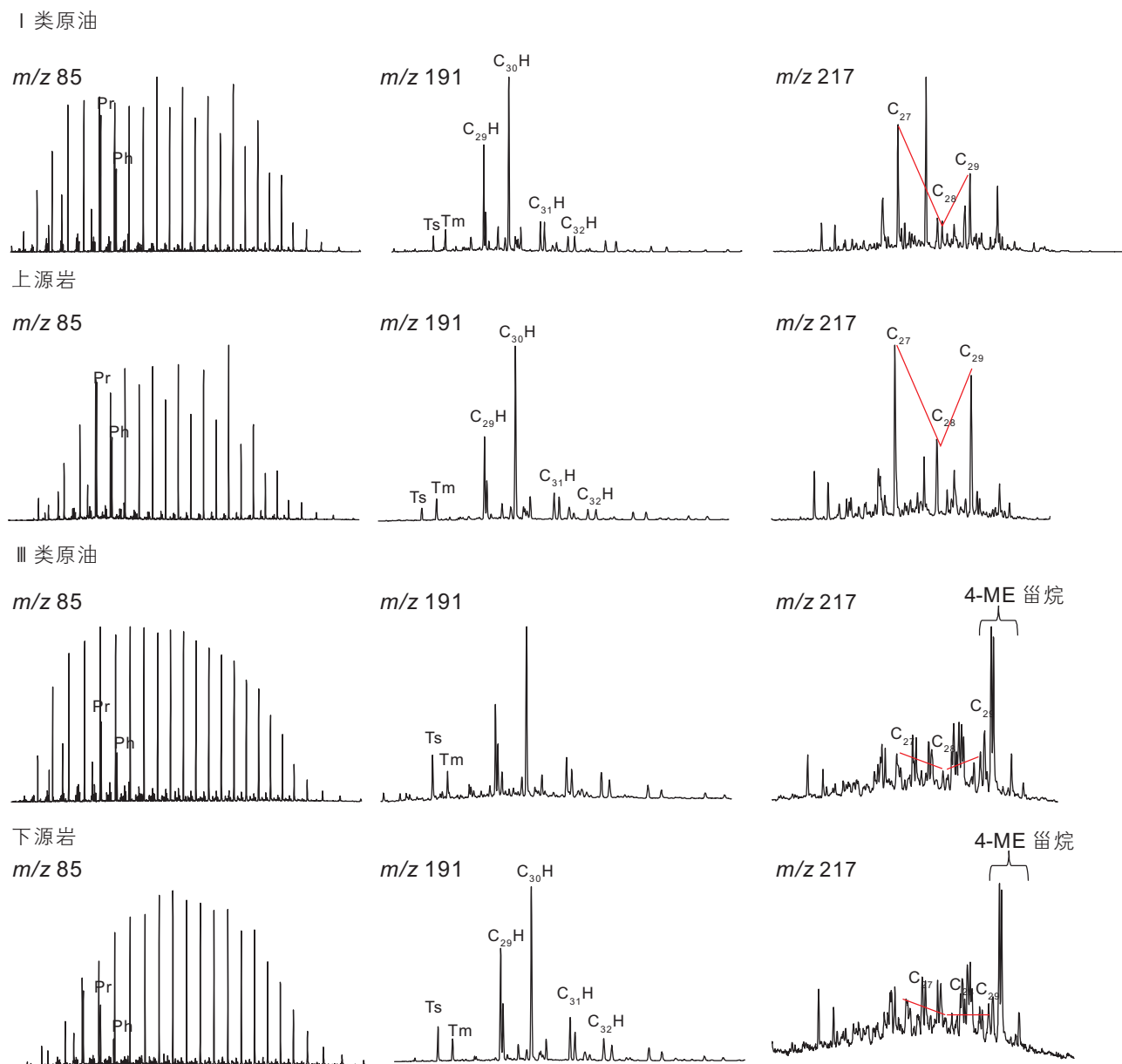


图 8 涪西南凹陷油源对比生物标记物谱图

Fig. 8 Oil-source correlation spectrogram of biomarkers in sag A in Weixinan depression

井的地层埋藏史和热历史恢复，分析油气充注时间、期次等相关分析。

研究选取了WZ11-A构造典型井的流一段砂岩进行了流体包裹体的岩相学和均一温度分析。镜下显微观察表明，研究区储层主要发育2种类型的流体包裹体：盐水包裹体和含烃盐水包裹体。包裹体主要分布在石英加大边、加大边微裂隙、切穿石英颗粒的微裂隙，其大小不一、形态各异，多分布在3~10 μm之间，形状主要为椭圆形、规则形、不规则形及负晶形。综合分析该岩发育2期次的油气包裹体：第1期油气包裹体发育于砂岩石英颗粒成岩次生加大早中期，发育丰度低(GOI为±1%)，包裹体大多为环砂岩石英颗

粒加大边的成岩期线状或成带分布。多为呈褐色、深褐色的包裹体。第2期油气包裹体发育于砂岩石英颗粒成岩次生加大期后，发育丰度中等偏低(GOI为±2%)，包裹体大多为沿切穿砂岩石英颗粒及其加大边的成岩期后微裂隙成线状或成带分布。包裹体液烃呈淡黄色，显示黄绿色荧光(图9)。

通过对包裹体均一温度的分析认为，样品均一温度主要包括90~100℃，120~130℃以及大于130℃三组，结合该地区的埋藏史—热史的一维盆模结果，认为均一温度指示中新世—上新世期间充注成藏，说明两期充注时期对应于，21~17 Ma(中新世早期)和7 Ma(晚中新世—上新世早期)左右(图10)。烃源岩处

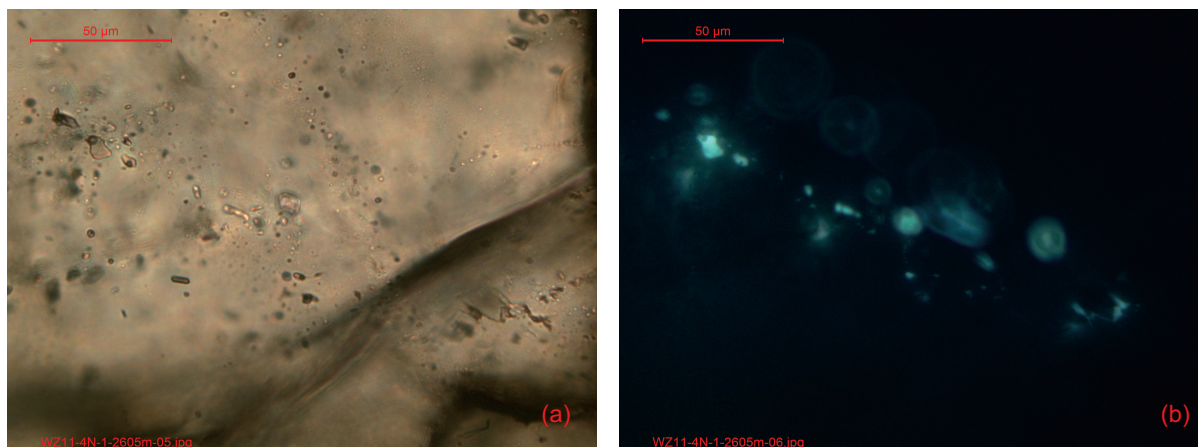


图9 WZ11-A井流一段井沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布的含烃盐水包裹体(a)单偏光;(b)UV激发荧光
Fig. 9 Fluid inclusion pictures under microscope of samples from Liushagang 1 formation in WZ 11-A well, which was distributed along quartz grain fractures (a) plane-polarized light; (b) UV fluorescence excitation

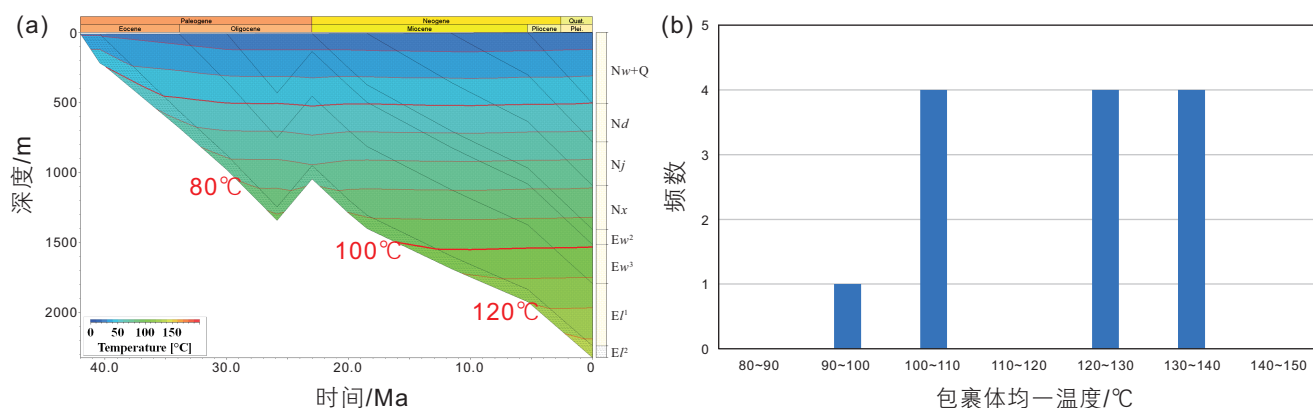


图10 (a)WZ 11-A构造埋藏史-热史演化图;(b) 11-A井流一段流体包裹体均一温度分布
Fig. 10 (a) Burial history and thermal history evolution of WZ 11-A oil bearing structure; (b) Homogenization temperature distribution of fluid inclusions in reservoirs of Liushagang 1 Formation

于生油高峰阶段。研究区样品的统一显微测温结果表明: 涪西南凹陷流沙港组一段储层共存在2幕油气充注。第一幕盐水包裹体均一温度介于90~100 °C之间, 代表早期低熟油大量充注过程。第二幕盐水包裹体均一温度介于120~150 °C之间, 代表了高成熟度油大量充注过程。

4 不同含油构造原油运移输导特征

4.1 含油构造运移输导特征

涪西南A洼陷及周缘油气平面、垂向差异富集特征明显, A洼中心无断裂分布, 相关钻井的油气显示有限, 总体油气集中分布在周缘凸起活动断裂带。从1号断裂—A洼—2号断裂—B洼方向延伸的地震剖面(取A-A'和D-D'两条分别过A洼西南侧和中心剖

面, 如图11所示)可以看出, A洼、B洼流沙港组二段上、下发育不同期次和样式的断裂, 运移输导体系有显著差异。流一段和流二段之间不发育明显沟源断裂, 流二段和流三段之间则有层间小断层沟通。1号断裂下降盘的A洼和2号断裂主控的B洼断裂密度尤其在流沙港二段上部明显不同, B洼远高于A洼。

A洼及周缘不同含油构造中油藏化学性质的差异性不同供烃单元和输导体系组合结果。根据油源对比和输导配置结果, 平面上A洼陷及周缘原油主要包括两大类, 近洼陷原油主要赋存于流一段及浅层, 原油以低成熟重质油为主, 部分经历了次生降解, 主要来自流二段上部和流一段泥页岩。较远距离以高成熟流二段底部流三段油页岩生轻质油为主, 沿构造脊线运移, 充注强度高, 主要赋存在深层流三段及潜山。此外, 不同含油构造原油成熟度的区别反映了原油充注沿砂体侧向运移, 多次充注的结果。

WZ-D 含油构造原油成熟度为 A 洼周缘油藏最低，油源对比结果显示为上源烃源近源浮力成藏。地震剖面绘制的成藏模式图显示，WZ-D 构造流一段与下覆烃源缺乏沟源断裂，可以通过浮力和生烃膨胀力向上充注，近源成藏(图 12)。

WZ10-A/B 油田原油集中富集在流三段，在东西方向上密度相差不大，属于轻质油，且萘烷和甾烷特征图谱均显示原油来自于 A 洼中心的优质成熟下烃源

岩，通过构造脊和骨架砂体从 A 洼中心长距离运移成藏(图 13)。

WZ11-A/B/C 含油构造特征更为复杂。WZ11-A 流一段单层系成藏，成熟度稍低，为上源岩供烃。原油主要是砂体近距离运移，通过断裂垂向调整。WZ11-B 构造表现多层系成藏，原油以砂体和断裂侧向运移为主，原油密度从下往上逐渐增大，表明在断裂发育处可垂向运移。WZ11-B 流二段及以下层位成

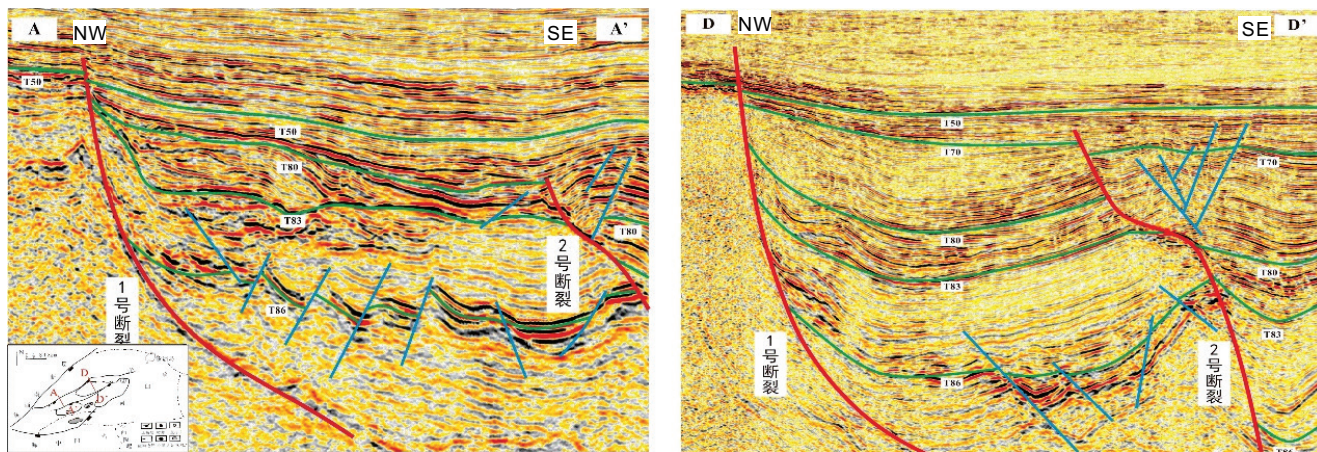


图 11 涪西南凹陷过 1 号断裂—2 号断裂地震剖面图 (A-A' 和 D-D' 两条测线)
 Fig. 11 Seismic profiles of fault 1 to fault 2 in Weixinan depression (line A-A' and B-B')

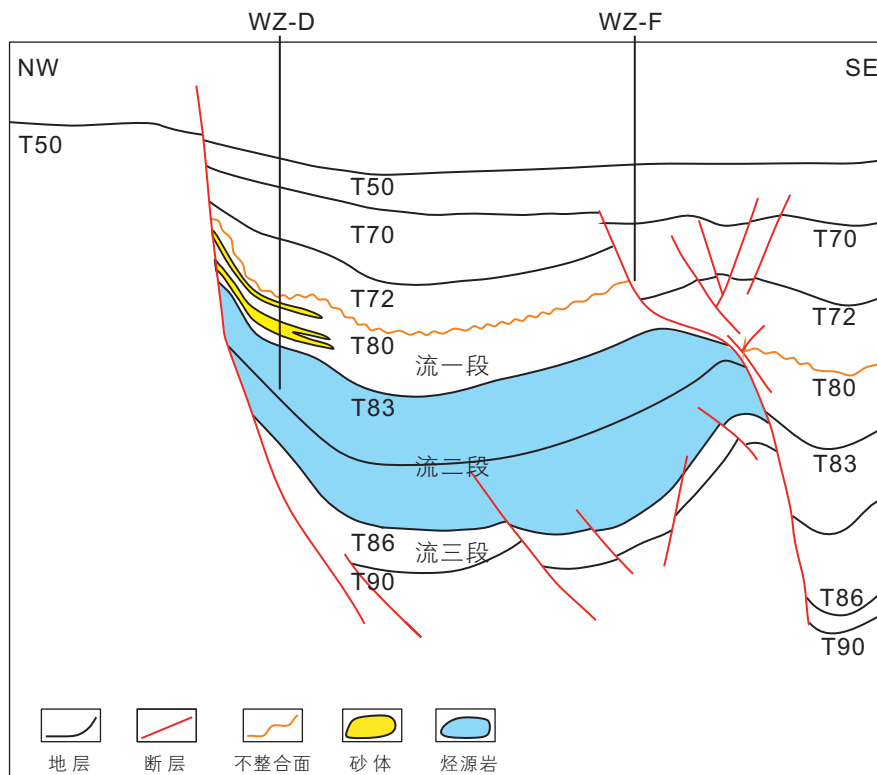


图 12 涪西南凹陷 A 洼 WZ-D 含油构造成藏模式图
 Fig. 12 Oil accumulation pattern of WZ-D oil-bearing structure in sag A in Weixinan depression

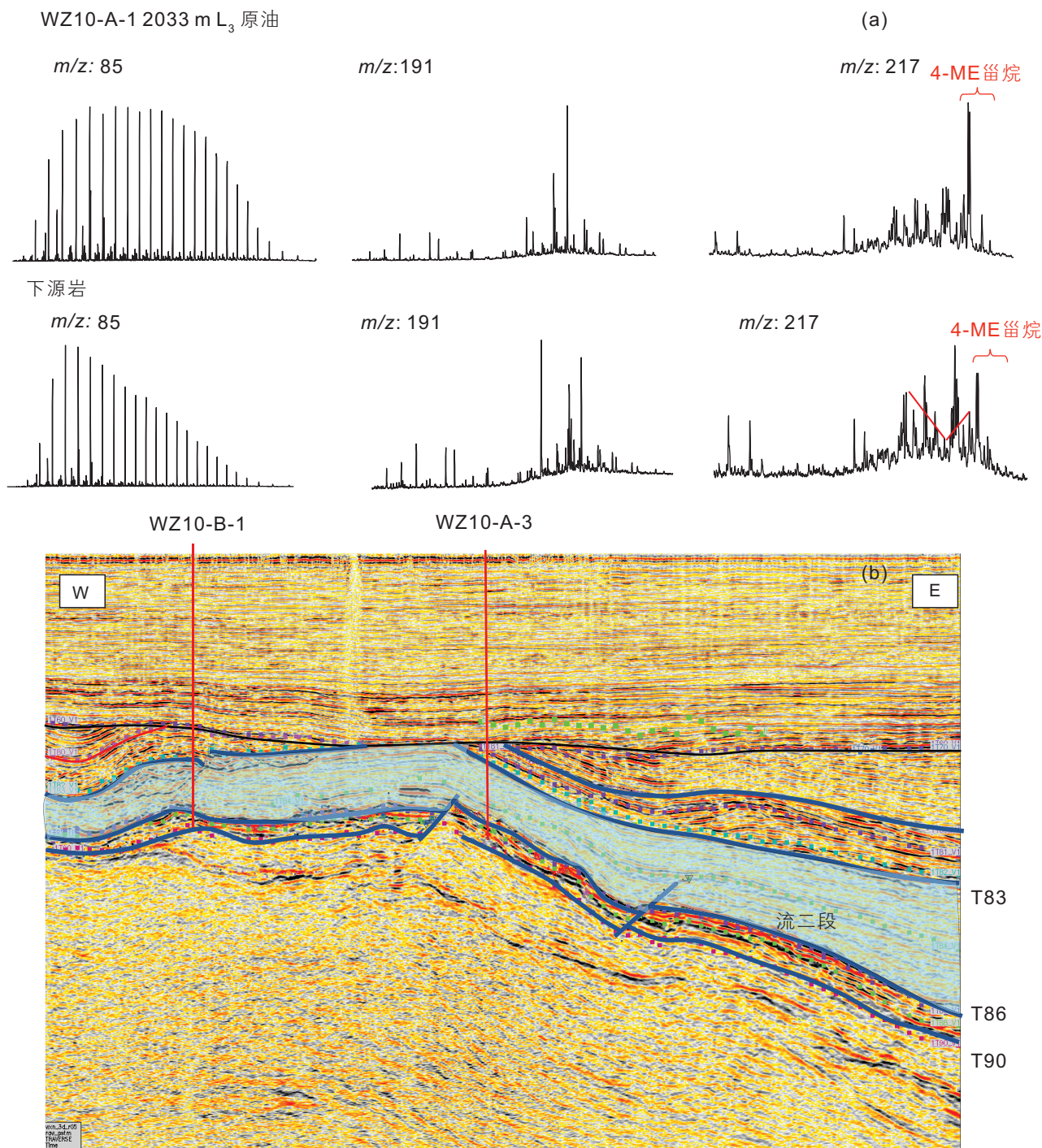


图 13 (a) 涪西南 A 洼 10-A/B 构造原油和洼陷近中心典型下源岩生物标记物谱图; (b) 10-A/B 构造油气从 A 洼中心沿流二段砂体侧向运移地震剖面示意图

Fig. 13 (a) The biomarker spectrum of oil and typical source rock in oil bearing structure 10-A/B in the A sub-sag in the Weixinan depression; (b) The seismic profile of 10-A/B structures showing related fault pattern and oil migration pathways (in direction from center A sag to WZ10-A and WZ10-B)

藏来源于下源岩, 可以由 A 洼与 B 洼混合供烃(图 14)。

WZ6-A/B 含油构造中, WZ6-B 的成熟度低于涪洲 6-A, WZ6-B 流二段原油来源于下源岩, 由洼陷成熟烃源排烃, 通过不整合面输导运移。WZ6-B 流一

段和涪洲组原油为流二段上源排烃后短距离垂向运移。

WZ-E 构造原油结合输导体系和油源特征认为主要来自于 B 洼供烃, B 洼供烃含油构造成熟度高于 A 洼主供烃的 WZ11-A/B/C 构造原油。

4.2 涪西南 A 洼及周缘油气成藏组合

涪西南凹陷 A 洼及周缘原油的差异性表现为层段上和平面上的区别。层段上表现为流一段及浅层，与流三段和基岩潜山深层的原油的母质来源和沉积环境有区别。平面上则表现为近洼原油和远洼含油构造原油有明显区别。总体来说，涪西南 A 洼可以划分为上源岩和下源岩两套生烃单元，下源岩(主要为流二段下部油页岩)在渐新世末-早中新世大量排烃，生成油

气沿着构造脊和砂体/不整合面可长距离运输，遇断块聚集，主要富集在高带凸起区，面，主要原油赋存层位为流二段、流三段及深层潜山等，不同含油构造原油差异性主要是不同期次充注的结果，主要表现为成熟度的差异性(图 15)。A 洼上源岩(主要为流二段上部油页岩)在中新世-现今大量生排烃，生成油气近洼富集，通过砂体/断裂或砂体近距离垂向运移，主要赋存层位为流一段。从不同层系的成藏组合来说，流一段为下生上储，流二段上源岩供烃，通过垂向砂体/断

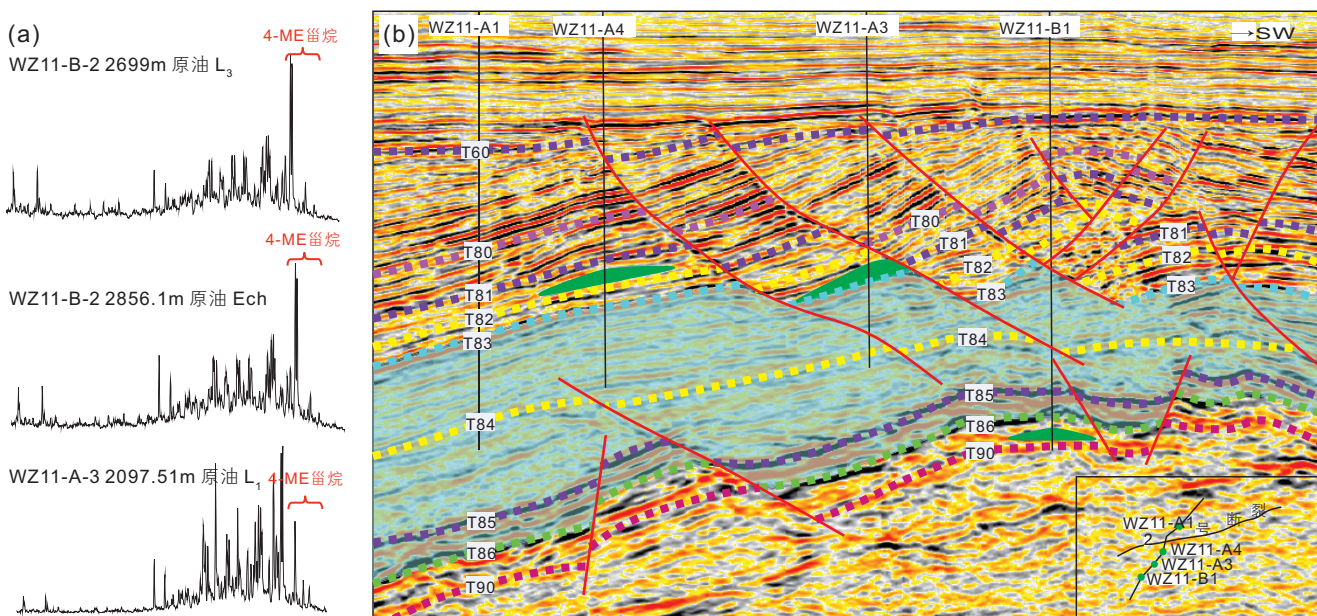


图 14 (a) 涪西南 A 洼 WZ11-A/B 含油构造不同层段原油甾烷 (m/z 217) 谱图; (b) WZ11-A/B 含油构造地震剖面 (测线方向从近 A 洼中心至 WZ11-A 至 WZ11-B) 示意相关油气和断裂分布

Fig. 14 (a) The biomarker spectrum (sterane, m/z 217) in different formations in oil bearing structure WZ11-A/B in the A sub-sag in the Weixinan depression; (b) The seismic profile of WZ11-A/B structures showing related oil accumulation and fault pattern (in direction from center A sag to WZ11-A and WZ11-B)

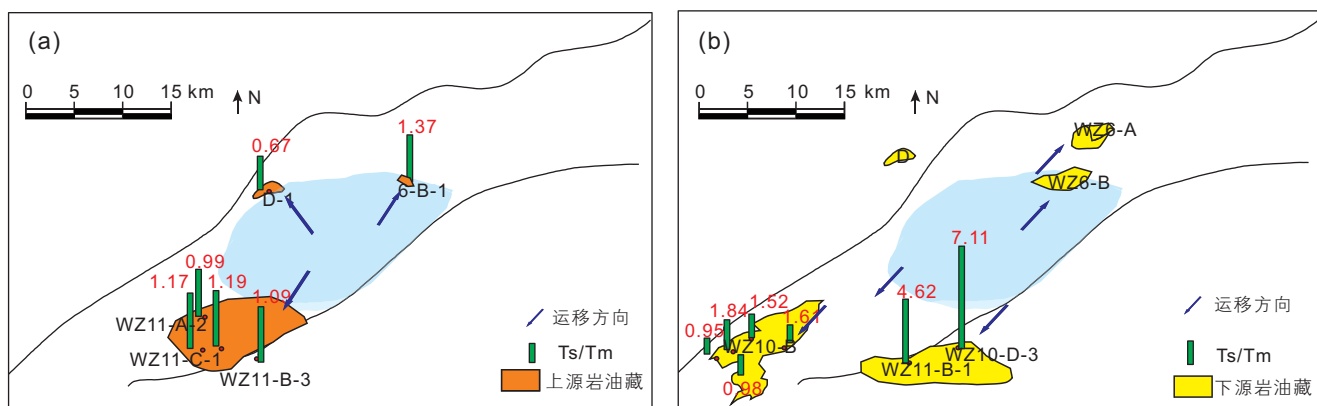


图 15 涪西南凹陷 A 洼上(a)、下(b)两套供烃组合油气运移方向

Fig. 15 Oil migration direction of two sets of hydrocarbon supply assemblages ((a) upper and (b) lower) in sag A in Weixinan depression

裂和砂体近距离垂向运移成藏,代表性油藏WZ-D, 11-A, 6-B,等。流二段为自生自储,流二段下源岩供烃,通过不整合面和砂体长距离侧向运移成藏,代表性油藏6-A等。流三段及长流组为上生下储,流二段下源岩供烃,通过构造脊和骨架砂体长距离运移,断裂和砂体阶梯式运移,代表性油藏10-A/B、11-A、E等(图15)。由于A注内部断裂不发育,上下层段烃源岩和层间断层的差异发育控制了不同类型原油的分布。A注近源的流一段岩性圈闭是寻找第I, II类原油的有利区, III类原油沿构造脊侧向运移到远源的流三段储层,形成断块油气藏。总体来说,层间断裂发育程度,构造脊线的分布,烃源岩和储层的配置关系是原油的差异性运移成藏的主控因素。该研究成果对北部湾盆地涠西南凹陷,特别是和A注陷类似的中心断裂不发育的盆地油气勘探具有重要指导意义。

5 结论

(1)北部湾盆地涠西南凹陷A注及周缘的原油依照物性和生物标记物差别可以划分为三类: I类和II类原油包括重质原油和中等密度原油,具有较低的水生藻类输入,较高的陆源输入(C_{30-4} -甲基甾烷丰度, $20R-aaa-C_{27}$ 、 $20R-aaa-C_{28}$ 、 $20R-aaa-C_{29}$ 甾烷分布呈“V”字形,全油碳同位素偏轻, $C_{19}TT/C_{23}TT$ 值相对低, $C_{23}TT/C_{30}H$ 值相对低等特征),主要分布在流一段和涠洲组的砂层中。B注附近II类原油成熟度高于I类原油; III类原油为轻质原油,较轻的全油碳同位素,原油为成熟油,明显的藻类输入,较强的还原性(Pr/Ph值低, C_{30-4} -甲基甾烷含量高, $C_{19}TT/C_{23}TT$ 值相对高, $C_{23}TT/C_{30}H$ 值相对高, $20R-aaa-C_{27}$ 、 $20R-aaa-C_{28}$ 、 $20R-aaa-C_{29}$ 甾烷含

量分布呈“L”字形)。I类和II类原油表现为成熟度的区别,其与III类原油差别主要表现在藻类母质、陆源输入、氧化还原条件方面。结合运移输导特征,认为第I和III类原油为A注上下两套不同烃源供烃,第II类为B注烃源供烃。III类原油均为成熟石油,但在不同构造带的成熟度有所不同,对比来说, WZ11-B、WZ-D构造原油成熟度高于WZ10-A、10-B、WZ6-A和6-B构造相对最低。

(2)涠西南A注没有完整揭示流二段的钻井,选取涠西南B注典型井揭示烃源岩特征。A注及周缘可划分为2套供烃组合:第I类和II类原油主要来源于上部供烃组合,包括流一段泥岩-流二段中上泥页岩,成熟度较低或中等,藻类输入量较少。第III类原油主要来源于下部供烃组合,包括流二段底部油页岩-流三段上部泥页岩,原油烃源均表现为高藻类输入,同时因为藻类勃发全油碳同位素较重。

(3)通过对包裹体均一温度和埋藏史、热史综合分析认为,涠西南A注及周缘原油主要于中新世一上新世期间充注成藏,两期充注时期对应于,中新世早期和晚中新世一上新世早期)。烃源岩处于生油高峰阶段。流沙港一段储层共存在2幕油气充注,包括早期低熟油和晚期高成熟度油大量充注过程。

(4)北部湾盆地涠西南凹陷A注流二段上下两套源岩和输导体系的差异性控制了周围不同含油构造原油性质,层间断层发育、构造脊线位置、侧向砂体展布方式均是研究区油气运移的主要通道。A注上源供烃组合主要富集层位为流一段及部分浅层层位,为上源浮力成藏,主要形成近源岩性圈闭。下源供烃组合原油主要富集层位为流三段,部分为流二段,油气自生自储或者上生下储,主要依靠构造脊沿砂体侧向运移,原油充注强度高,远源运移至断块圈闭成藏。

参考文献

- [1] 郭飞飞,郭小文,孙建峰,等.北部湾盆地涠西南凹陷C注烃源岩热史及成熟史模拟[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(2):87-93. [GUO F F, GUO X W, SUN J F, et al. Thermal history and maturity history simulation of c-depression source rocks in Weishan Sag, Beibu Gulf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(2): 87-93.]
- [2] 王健,操应长,李俊良.北部湾盆地涠西南凹陷古近系层序结构与非构造圈闭[J].石油勘探与开发,2012,39(3):304-312. [WANG J, CAO Y C, LI J L. Sequence structure and non-structural traps of the Paleogene in the Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 304-312.]
- [3] 姜平,张建光,姚光庆,等.涠西南凹陷11-7区块流沙港组沉积体系构成及演化特征[J].地质科技情报,2013,(02):97-104. [JIANG P, ZHANG J G, YAO G Q, et al. Sedimentary system and evolution of Liushagang Formation, 11-7 Block of Weixi'nan depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, (02): 97-104.]
- [4] 裴健翔,董贵能,朱其.北部湾盆地涠西南凹陷流一段强制湖退沉积体的特征及其油气地质意义[J].石油与天然气地质,2016,37(04):520-527. [PEI J X, DONG G N, ZHU Q. Characteristics and petroleum geological significance of lacustrine forced regressive

- deposits in the 1st Member of Liushagang Formation in Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(04): 520–527.]
- [5] 刘一鸣, 胡林, 张强, 等. 涠西南凹陷流沙港组二段至一段构造特征及其对沉积的控制作用[J]. *东北石油大学学报*, 2018, 42(06): 52–61+8–9. [LIU Y M, HU L, ZHANG Q, et al. Structure characteristics of Weixi'nan Sag during Liushagang–2 member to Liushagang–1 member depositional period and its control on sedimentary fill[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2018, 42(06): 52–61+8–9.]
- [6] 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): 6–11. [ZHU W L, JIANG W R. Fault and reservoir in Weishan Sag, Beibu Gulf Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 6–11.]
- [7] 杨希冰, 金秋月, 胡林, 胡德胜. 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(03): 51–60. [YANG X B, JIN Q Y, HU L, HU D S. Genetic types and distribution of crude oil in Weixi'nan Depression, Beibuwan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2019, 41(03): 51–60.]
- [8] 李绪深, 甘军, 张迎朝. 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(04): 22–29. [LI X J, GAN J, ZHANG Y C. Hydrocarbon accumulation regularity and exploration prospects of fault lacustrine basins in western South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(04): 22–29.]
- [9] 李茂, 董桂玉, 漆智. 涠西南凹陷涠洲 10–3 油田及围区流三段沉积相研究[J]. *沉积学报*, 2015, 33(02): 314–325. [LI M, DONG G Y, QI Z. Sedimentary facies of member 3 of Liushagang formation of WZ10–3 oilfield and surrounding areas in Weixi'nan Sag[J]. *ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA*, 2015, 33(02): 314–325.]
- [10] 赵顺兰, 赵亚卓, 杨希冰. 北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山储层特征与主控因素分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(09): 43–53. [ZHAO S L, ZHAO Y Z, YANG X B. An analyse on the characteristics and main controlling factors of reservoir in carbonate buried hill in the Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(09): 43–53.]
- [11] 董贵能, 李俊良. 北部湾盆地涠西南凹陷流一段非构造油气藏[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(5): 552–560. [DONG G N, LI J L. Subtle hydrocarbon reservoirs in Liu–1 Member of the Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(5): 552–560.]
- [12] HUANG B J, XIAO X M, CAI D S, et al. Oil families and their source rocks in the Weixinan Sub-basin, Beibuwan Basin, South China Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(1): 134–145.
- [13] 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 X D, WANG B W, LI X H, et al. Oil sources of concealed reservoirs in Liushagang Formation of the Weixi'nan Sag and accumulation feature, Beibuwan basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 92–98.]
- [14] 邹明生, 曾小明, 吴碧波, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷涠洲组二段油气成藏特征分析[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(3): 330–336. [ZOU M S, ZENG X M, WU B B, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of the 2nd member of Weizhou Formation in the Weixi'nan Sag, Beibu Gulf Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(3): 330–336.]
- [15] 金秋月. 北部湾盆地涠西南凹陷东南斜坡原油成因类型及成藏特征[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(1): 11–18. [JIN Q Y. Genesis types and accumulation characteristics of crude oil in southeast slope of Weixi'nan Depression, Beibuwan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(1): 11–18.]
- [16] 孙文钊, 王传雷, 杨希滨. 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, (01): 84–88. [SUN W Z, WANG C L, YANG X B. Types and favorable exploration areas of eocene subtle traps in Weixinan Sag, BBW basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, (01): 84–88.]
- [17] 赵顺兰, 赵亚卓, 陈传福, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷缓坡类型及油气特征[J]. *天然气技术与经济*, 2018, 12(01): 8–12+81. [ZHAO S L, ZHAO Y Z, CHEN C F, et al. Oil and gas characteristics in gentle slopes, Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Nature Gas Technology And Economy*, 2018, 12(01): 8–12+81.]
- [18] 刘诗局, 高岗, 徐新德, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷涠洲 11–4—涠洲 11–4N 油田油气运聚的源控特征[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(09): 1312–1318. [LIU S J, GAO G, XU X D, et al. Source rock controlling effects on hydrocarbon migration and accumulation of Weizhou11–4 & Weizhou11–4N oil fields in Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(9): 1312–1318.]
- [19] 尹嘉, 魏琳, 李朝阳, 等. 水对烃源岩生烃反应的物理—化学影响探讨[J]. *石油科学通报*, 2019, 03: 254–262. [YIN J, WEI L, LI C Y, et al. Physical and chemical influence of water on hydrocarbon generation from source rocks. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 03: 254–262.]
- [20] 赵永强. 北部湾盆地涠西勘查区反转构造及其油气成藏意义[J]. *石油实验地质*, 2007, (05): 457–461. [ZHAO Y Q. Inversion structure and its implication to hydrocarbon accumulation in Weixi exploration region of the Beibuwan basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, (05): 457–461.]
- [21] 邓运华. 试论中国近海两个坳陷带油气地质差异性[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 1–8. [DENG Y H. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 1–8.]
- [22] 游君君, 徐新德, 李里, 等. 涠西南凹陷流沙港组二段烃源岩有机相研究[J]. *中国矿业*, 2012, 21(11): 78–91. [YOU J J, XU X

- D, LI L, et al. Organic facies of source rocks of the second member of Liushagang Formation in the Weixi'nian Sag[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(11): 78–91.]
- [23] 王健, 操应长, 李俊良. 北部湾盆地涠西南凹陷古近系层序结构与非构造圈闭[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 304–312. [WANG J, CAO Y C, LI J L. Sequence structure and non-structural traps of the Paleogene in the Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 304–312.]
- [24] 黄保家, 黄合庭, 吴国暄, 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*, 2013, 33(1): 25–31. [HUANG B J, HUANG H T, WU G X, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 33(1): 25–31.]
- [25] 严德天, 陆江, 魏小松, 等. 断陷湖盆富有机质页岩形成环境及主控机制浅析——以涠西南凹陷流沙港组二段为例[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(05): 21–29. [YAN D T, LU J, WEI X S, et al. Sediment environment and major controlling factors of organic-rich shales in the rift lake basin: A case study of the 2nd Member of Liushagang Formation of the Weixi'nan Sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(05): 21–29.]
- [26] 刘震, 谭卓, 蔡东升, 等. 用断层面正压力法分析北部湾盆地涠西南凹陷断层垂向封闭性及其演化[J]. *地质科学*, 2008, (04): 695–711. [LIU Z, TAN Z, CAI D S, et al. Analysis on fault's vertical sealing and its evolution by normal pressure of fault surface method in the Weixi'nan Sag, Beibu gulf Basin. *Chinese Journal of Geology*, 2008, (04): 695–711.]
- [27] 谭卓, 刘志国, 李运振, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷陡坡带砂体成因类型及其演化[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(01): 1–9. [TAN Z, LIU Z G, LI Y Z, et al. Forming types and evolution of sand body in steep slope belt of Weixi'nan Sag, Beibu gulf Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 2015, 38(01): 1–9.]
- [28] 陈奎, 周家雄, 张辉, 等. 涠西南凹陷二号断裂带断裂控藏研究及应用[J]. *海洋学报*, 2019, 41(07): 92–102. [Chen K, Zhou J X, Zhang H, et al. The research and application of the reservoir controlling mechanism for the No.2 Fracture Zone, Weixi'nan Sag[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(7): 92–102.]
- [29] 谢瑞永, 黄保家, 李旭红, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组烃源岩生烃潜力评价[J]. *地质学刊*, 2014, 38(04): 670–675. [XIE R Y, HUANG B J, LI X G, et al. Hydrocarbon generation potential evaluation of source rocks in Liushagang formation in Weixi'nan Sag of Beibuwan Basin[J]. *Journal of Geology*, 2014, 38(04): 670–675.]
- [30] 胡德胜, 邓勇, 李安琪, 等. 涠西南凹陷南斜坡流二段成藏条件新认识及勘探实践[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(05): 30–38. [HU D S, DENG Y, LI A Q, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration practice in member 2 of Liushagang formation in the south slope of Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(05): 30–38.]
- [31] 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*, 1993, (03): 15–24. [ZHOU W W. Crude oil geochemical characteristic and source correlation of Weixi'nan Sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1993, (03): 15–24.]
- [32] 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(02): 238–244. [FAN R, LI Y S, HE S, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration practice in member 2 of Liushagang formation in the south slope of Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(02): 238–244.]
- [33] 赵顺兰, 陈林, 李才, 等. 涠西南凹陷碳酸盐岩潜山原油来源及成藏模式[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(06): 1–7+133. [ZHAO S L, CHENG L, LI C, et al. Origin and accumulation model of crude oil of carbonate buried hill in Weixi'nan Depression[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2019, 16(06): 1–7+133.]
- [34] 卢粤哈, 孙永革, 翁焕新. 湖泊沉积有机质的地球化学记录与古气候古环境重建[J]. *地球化学*, 2004, (01): 20–28. [LU Y H, SUN Y G, WEN H X. Lacustrine sediments as a record of changes of regional climate and environment[J]. *GEOCHIMICA*, 2004, (01): 20–28.]
- [35] 张成君, 张菀漪, 张丽, 等. 中国西部、东北地区湖泊沉积物中碳酸盐碳、氧和有机碳同位素组成及与环境的响应[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(04): 609–617+607. [ZHANG C J, ZHANG W Y, ZHANG L, et al. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbonates and organic matters of the lacustrine sediments in Western and Northeast China and its response to the environment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(04): 609–617+607.]
- [36] 万延周, 陈春峰, 陈文侠, 等. 西湖凹陷南部始新统烃源岩有机质碳同位素组成特征[J]. *非常规油气*, 2019, 6(05): 18–22+46. [WAN Y C, CHEN C F, CHEN W X, et al. Characteristics of carbon isotopic composition of the Eocene hydrocarbon source rocks in southern Xihu Depression[J]. *Unconventional oil & gas*, 2019, 6(05): 18–22+46.]
- [37] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M. Paleoreconstruction by biological markers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(2): 783–794.
- [38] SNOWDON L R, POWELL T G. Immature oils and condensate modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(6): 775–788.
- [39] FU J M, SHENG G Y, XU J Y, et al. Application of biological markers in the assessment of paleoenvironment of Chinese nonmarine sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(3): 769–779.
- [40] PETERSEN H I, ANDSBJERG J, BOJESEN-KOEGOED J A, et al. Coal generated oil source rock evaluation and petroleum geochem-

- istry of the Lulita Oilfield, Danish North Sea[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2000, 23(1): 55–90.
- [41] 宋长玉, 金洪蕊, 刘璇, 等. 烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响[J]. *石油实验地质*, 2007, (02): 183–187. [SONG C Y, JIN H R, LIU X, et al. Distribution of methyl phenanthrene in sediments and its impacting on maturity parameters[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, (02): 183–187.]
- [42] RADKE M, WELTE D H. The methylphenanthrene index(MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons– Bjory M J. *Advance in Organic Geochemistry*. Hoboken: John Wiley and Sons Limited, 1981: 504–512.
- [43] 李朝阳, 魏琳, 刁慧, 等. 西湖凹陷孔雀亭构造平湖组油气来源及充注特征[J]. *石油科学通报*, 2021, 02: 196–208. [LI C Y, WEI L, DIAO H, et al. Hydrocarbon source and charging characteristics of the Pinghu Formation in the Kongqueting Structure, Xihu Depression. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 02: 196–208.]

(责任编辑 姜福杰 编辑 付娟娟)