

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508290038

冀中保定凹陷清苑构造带油气运移与成藏模式

刘佳^{1,2}, 李素梅^{1,2,*}, 李晓燕³, 李依航³, 严梦颖³, 徐翠云³, 孟婧³,
高增荣³, 金娟娟³, 邓硕³, 庞秋菊³

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552)

摘要: 近年来冀中保定凹陷清苑构造带东营组发现亿吨级油气资源, 主力烃源岩分布不甚明了。采用色谱-质谱、高分辨率质谱等技术, 分析该区原油地球化学特征, 对油气来源及其运移路径进行示踪, 明确成藏模式。结果表明, 清苑构造主体带原油整体可划为重质油、稠油范畴, 部分原油遭受生物降解等次生作用, 且原油中 N_1 类化合物相对含量较高, 与深层烃源岩具有较好可比性; 原油主要来自蠡县斜坡中南部及相邻洼槽沙一段烃源岩的混合贡献, 且大多数油样中混入30%以上来源于蠡县斜坡南部及肃宁—河间洼槽的成熟原油。基于 $C_{29}Ts/C_{30}$ 藿烷、 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 、4-/1-MDBT等相关参数及 N_1 类化合物成熟度判识图, 认为清苑构造主体带原油成熟度多高于蠡县斜坡中上部而低于斜坡南部及相邻洼槽原油, 且成熟原油由清苑构造带西南方向充注。研究区属于同期同源运移中混合的成藏模式, 相关研究同样也完善了对低熟油成藏机制的认识。

关键词: 保定—饶阳凹陷; 清苑构造带; 低熟油; 混合原油; 地球化学特征

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)03-0790-16

Hydrocarbon Migration and Accumulation Model in the Qingyuan Tectonic Belt of the Baoding Sag, Jizhong Depression

LIU Jia^{1,2}, LI Sumei^{1,2,*}, LI Xiaoyan³, LI Yihang³, YAN Mengying³, XU Cuiyun³, MENG Jing³,
GAO Zengrong³, JIN Juanjuan³, DENG Shuo³, PANG Qiuju³

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Geosciences Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development,
PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China)

Abstract: A significant amount of hydrocarbon have been discovered in the Dongying Formation of the Qingyuan Tectonic Belt of the Baoding Sag, Jizhong Depression, yet the distribution of the main source rocks remains unclear. Through the analysis of geochemical characteristics of the crude oils by conventional geochemical methods and negative ESI FT-ICR MS, the hydrocarbon sources and migration pathways was traced and the accumulation model was clarified. The crude oils in the Qingyuan Tectonic Belt were classified as heavy oil and viscous oil, with some crude oils having undergone secondary processes such as biodegradation. The

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-10-27; 编辑: 戚开静。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42073064); 华北油田探区“十四五”油气资源评价项目。

作者简介: 刘佳, 男, 博士研究生, 1995年出生, 地质学专业。Email: liuxishendeyouxiang@foxmail.com.

*通信作者: 李素梅, 女, 教授, 1968年出生, 有机地球化学专业, 主要从事油气地质地球化学研究工作。
Email: smli@cup.edu.cn.

引用格式: 刘佳, 李素梅, 李晓燕, 等. 冀中保定凹陷清苑构造带油气运移与成藏模式[J]. 现代地质, 2026, 40(3): 790-805. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508290038.

LIU Jia, LI Sumei, LI Xiaoyan, et al. Hydrocarbon Migration and Accumulation Model in the Qingyuan Tectonic Belt of the Baoding Sag, Jizhong Depression [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(3): 790-805. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508290038.

relatively high content of N_1 compounds in the crude oils had good comparability with deep source rocks. The crude oils mainly came from the mixed contribution of the source rocks from the first member of the Shahejie Formation (Es_1) in the middle and south of the Lixian Slope and the adjacent sub-sag, and most of the oil samples contain more than 30% mature crude oil originating from the southern part of the Lixian Slope and the Suning-Hejian Sub-Sag. Based on relevant parameters such as $C_{29}Ts/C_{30}$ hopane, C_{29} sterane $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$, 4-/1-MDBT (methyldibenzothiophene) and N_1 compounds maturity identification diagram, it was concluded that the maturity of the crude oils in the Qingyuan Tectonic Belt were higher than that in the middle to the upper part of the Lixian Slope, lower than that in the south of the Lixian Slope and adjacent sub-sag, with the mature crude oil filled from the southwest direction of the Qingyuan Tectonic Belt. The oil-mixing model was concluded that the hydrocarbon from the same source rocks with different thermal evolution degrees were mixed during the same period of migration, and related studies have also improved the understanding of the mechanism of the less mature oil reservoir formation.

Key words: Baoding-Raoyang Sag; Qinyuan Tectonic Belt; low mature oil; mixed crude oil; geochemical characteristics

0 引言

低熟油是指非干酪根晚期热降解形成的非常规原油,对应的镜质体反射率(R_o)为0.2%~0.7%^[1]。早期国外油气勘探实践中发现了大量低熟油^[2-3],我国低熟油资源同样丰富,柴达木盆地、渤海湾盆地、苏北盆地等地区均有储量发现^[4-7]。国内外不少学者对低熟油进行过深入研究,其成因多种多样,受控于沉积环境、生源等地球化学条件。一般认为咸化、强还原沉积环境有利于低熟油的生成;低等微生物中的菌藻类、高等植物中的树脂体、木栓质等是重要的生烃母质^[8-11]。低熟油的形成还受控于特定的油气成藏地质条件,砂岩和断层发育地区有利于低熟油的排出与运移^[12-13]。中国东部第三系断陷盆地断砂配置类型多样,为油气输导提供了较好的条件,因此低熟油与成熟油混源也较为常见^[14]。近年冀中保定凹陷清苑构造带浅层东营组获得了近两千万吨的油气探明储量,原油具有明显的低熟特征,藻类脂体低温生烃被认为是其主要成因机制^[15],而当前油气的主力烃源灶及其成藏机制研究薄弱。部分研究认为,该区原油主要来自保定凹陷沙一段未熟烃源岩,保定凹陷及邻区较高的地温场演化背景促进了低熟油的生成规模^[15]。近期有学者指出,研究区低熟油来源于保定凹陷未熟和饶阳凹陷成熟烃源岩的混合贡献^[16];另有学者指出,油气来自饶阳凹陷沙一段烃源岩^[17]。清苑构造带的原油是否主要来自保定凹

陷本地低熟烃源岩、蠡县斜坡生成的低熟油能否运至清苑构造带、蠡县斜坡东侧的任西洼槽、东南侧的肃宁—河间洼槽是否也有贡献甚至为主力生油灶?此类问题仍有疑虑。本文结合地质与地球化学研究,进一步剖析保定凹陷清苑构造带油气的主力烃源灶分布及油气运聚模式,为下一步油气勘探提供依据,并进一步完善和深化断陷盆地低熟油形成机制。

1 地质背景

保定凹陷位于渤海湾盆地冀中坳陷西部,东临太行山大断裂、西接高阳低凸起,为北东走向的不对称双断箕状断陷^[18],勘探面积约4000 km²(图1)。清苑构造带为保定凹陷东部的断鼻构造单元,紧邻高阳低凸起和饶阳凹陷蠡县斜坡。研究区古近系、新近系发育齐全,自下而上依次发育古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)四至一段、东营组(Ed),新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)。岩性上, Ek — Es_4 主要为砂岩和紫红色泥岩,底部为砾岩; Es_3 — Es_2 为砂岩和泥岩互层; Es_1 底部发育砂岩,其上为暗色泥岩和油页岩, Es_1 砂岩含量明显增加; Ed 同样以砂、泥岩互层为主^[19],且厚度多>100 m。保定凹陷为典型的新生代断陷盆地,构造演化主要经历了古近纪断陷期与新近纪坳陷期2个演化阶段。古近纪早期(孔店组—沙四段沉积期)盆地进入强烈伸展裂陷阶段,太行山东断裂活动强烈,其下降盘形成保北和保南深洼槽,晚期(沙一段—东营组沉积期)

断裂活动较弱,保定—饶阳凹陷接受了统一的广湖盆沉积^[16]。伴随太行山东断裂的伸展,清苑构造带等地区同时也发育较多对应次级西掉补偿断

层。东营组末期区域性构造反转使得保定凹陷地层抬升剥蚀,保定—饶阳凹陷沙一段和东营组共同构成了一个东倾的宽缓大斜坡^[19](图1)。

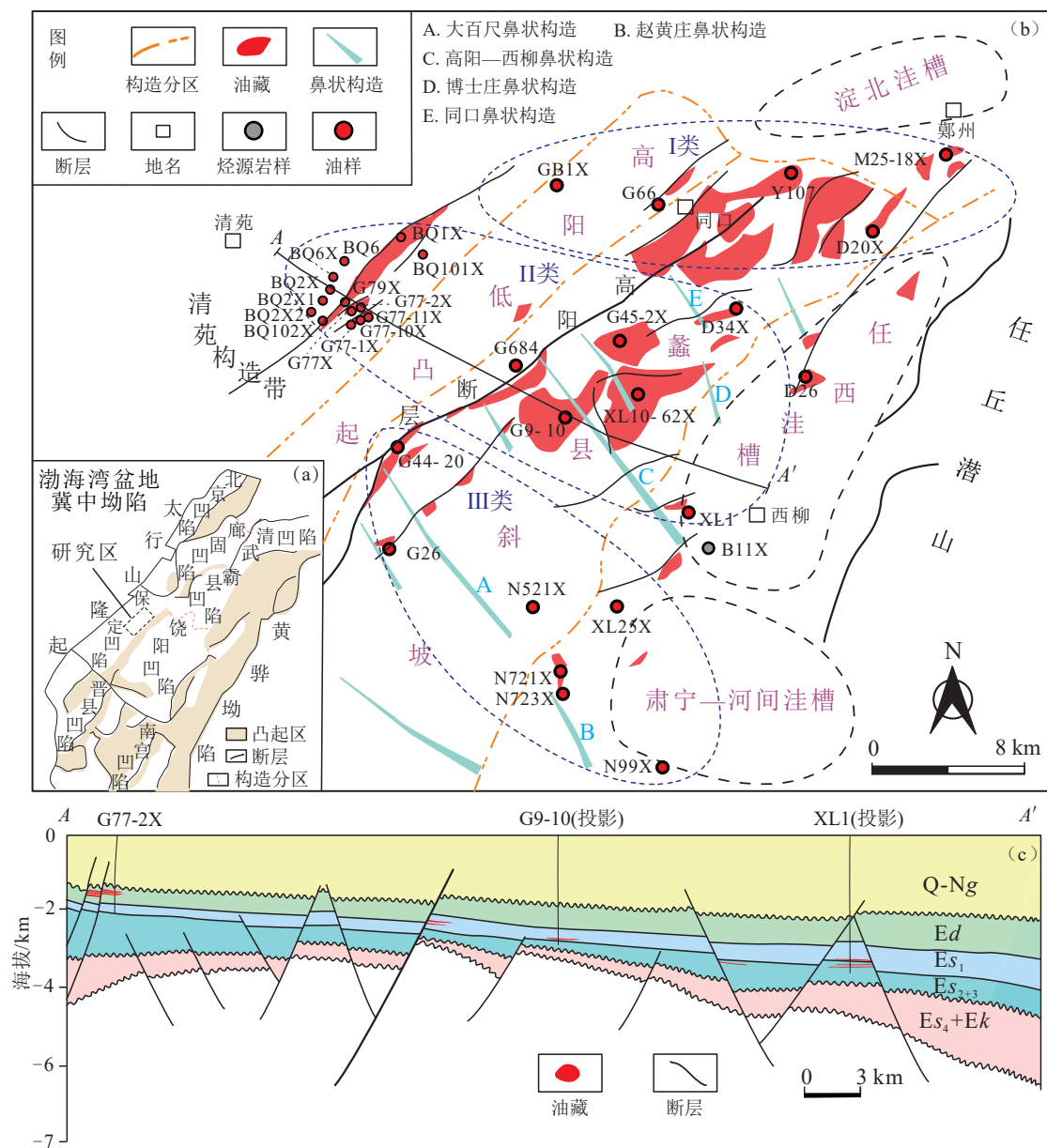


图1 冀中保定—饶阳凹陷位置 (a)、区域构造图 (b) 及地质结构剖面 (c)

Fig. 1 Illustration of location (a), regional structure skeleton (b) and structural section (c) of the Baoding-Raoyang Sag, Jizhong Depression

2020年以来华北油田对高阳断层西侧进行三维地震勘探,部署钻探高77X井、保清1X井,发现保定凹陷清苑构造带中浅层富集油藏,实现了老区找油新突破。本文对清苑构造带油气来源的精细化研究对相关地区后续油气勘探具有一定指导意义。

2 样品与实验

采集保定凹陷清苑构造带原油样品16个、饶

阳凹陷原油样品19个及烱源岩样品2个,对原油样品进行饱和烱和芳烱色谱-质谱分析,并选取其中6个原油样品和2个烱源岩样品开展傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)分析。

饱和烱和芳烱色谱-质谱(GC-MS)分析采用Agilent 6890GC/5975ims型仪器,色谱分析条件:载气为氦气,流速为1 mL/min。饱和烱色谱-质谱的分析条件:初温为50℃,保持1 min,以20℃/min

升至120℃,再以3℃/min升至310℃,保持25 min。芳烃色谱-质谱的分析条件:初温为80℃,保持1 min,以3℃/min升至310℃,保持20 min。离子源为EI源,电子输出能量为70 eV。使用Apex-Ultra 9.4T型FT-ICR MS, ESI电离源,负离子模式,傅里叶变换离子回旋共振质谱分析操作程序和数据处理方法参见文献[20]。

3 原油基本地球化学特征及其成因

对所取原油样品物性数据进行分析(图2),清苑构造主体带原油密度为0.908~0.949 g/cm³(均值0.926 g/cm³),多属于重质油范畴;黏度为377~5825 mPa·s,平均为1354 mPa·s,投点落入稠油范畴;含硫量和含蜡量分别为0.49%~1.24%(均值0.77%)、4.45%~14.10%(均值8.72%),含蜡含硫原油和高蜡含硫原油共存,不

同于东营凹陷八面河高硫低熟油。结合统计的大量油田内部原油物性资料,发现靠近清苑构造带的蠡县斜坡中部地区(高阳—西柳鼻状构造与博士庄和同口鼻状构造夹持区域及周缘)原油密度、含硫量和含蜡量分别为0.901~0.924 g/cm³、0.64%~1.16%和3.20%~11.15%,多为高蜡含硫原油;靠近清苑构造带的蠡县斜坡南部地区(大百尺鼻状构造周缘)原油密度、含硫量和含蜡量分别为0.867~0.894 g/cm³、0.19%~0.52%和11.20%~17.68%,属于高蜡低硫原油;清苑构造带北侧(即蠡县斜坡北部及邻区,包括同口—郑州等地区)原油密度和含硫量偏低(分别<0.90 g/cm³、<0.5%)、含蜡量较高(>12%),同样为高蜡低硫原油。相较附近其他地区原油,清苑构造主体带原油密度和黏度特征总体与斜坡中部原油类似,但其含蜡量和含硫量变化范围较广。

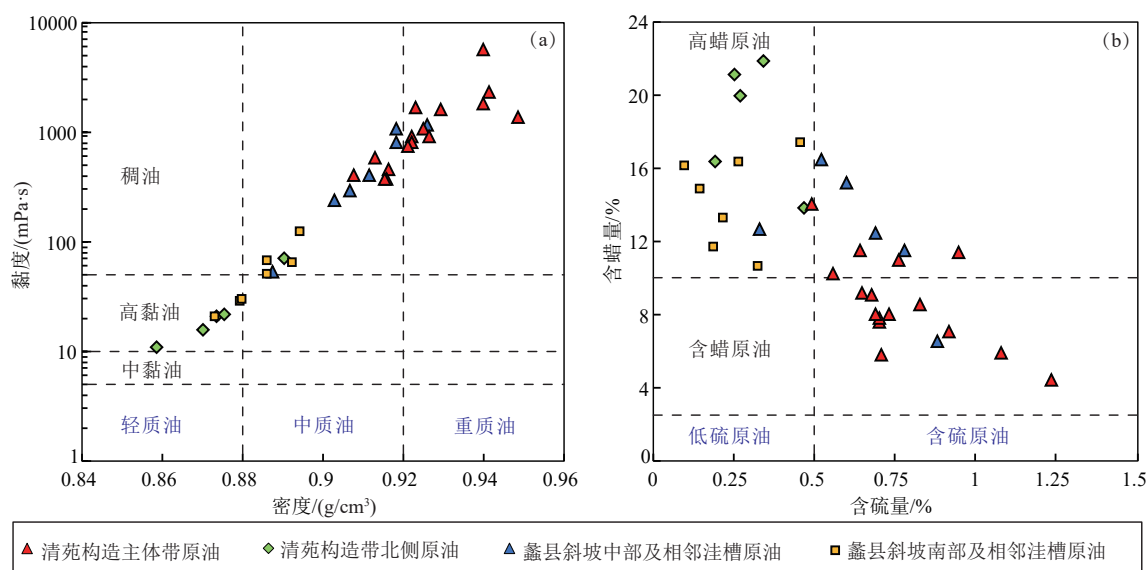


图2 保定—饶阳凹陷原油密度与黏度(a)、含硫量与含蜡量(b)关系图

Fig. 2 Relationship between density and viscosity (a), sulfur content and wax content (b) of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

选用伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷、 C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷、甾烷/藿烷、硫芴/氧芴等沉积环境和生源指标对原油类型进行划分。按照上述指标可将保定—饶阳凹陷原油分为三类(图1,图3,表1):Ⅰ类为清苑构造带北侧原油,其典型特征是伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷、硫芴/氧芴值偏低,均值分别为0.37、0.97, C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷值偏高(0.73~0.91),反映母源岩主要形成于还原性偏弱、水体分层不明显的原始沉积环境中^[21];甾烷/藿烷比值介于0.24~1.12,说明生烃母质中藻类等低等水

生生物输入较少,高等植物输入增多^[22]。Ⅱ类主要为保定凹陷清苑构造主体带、蠡县斜坡中部及相邻洼槽原油:典型特征是伽马蜡烷丰度较高(伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷均值1.21),硫芴/氧芴均值0.95, C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷值偏低(均值0.63),指示咸湖相强还原环境^[21]。甾烷/藿烷比值较大(3.04~5.62),揭示其藻类贡献较多^[22];Ⅲ类主要为蠡县斜坡南部及相邻洼槽原油,另D26井原油划归此类:伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷、硫芴/氧芴值和 C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷均值分别为0.74、

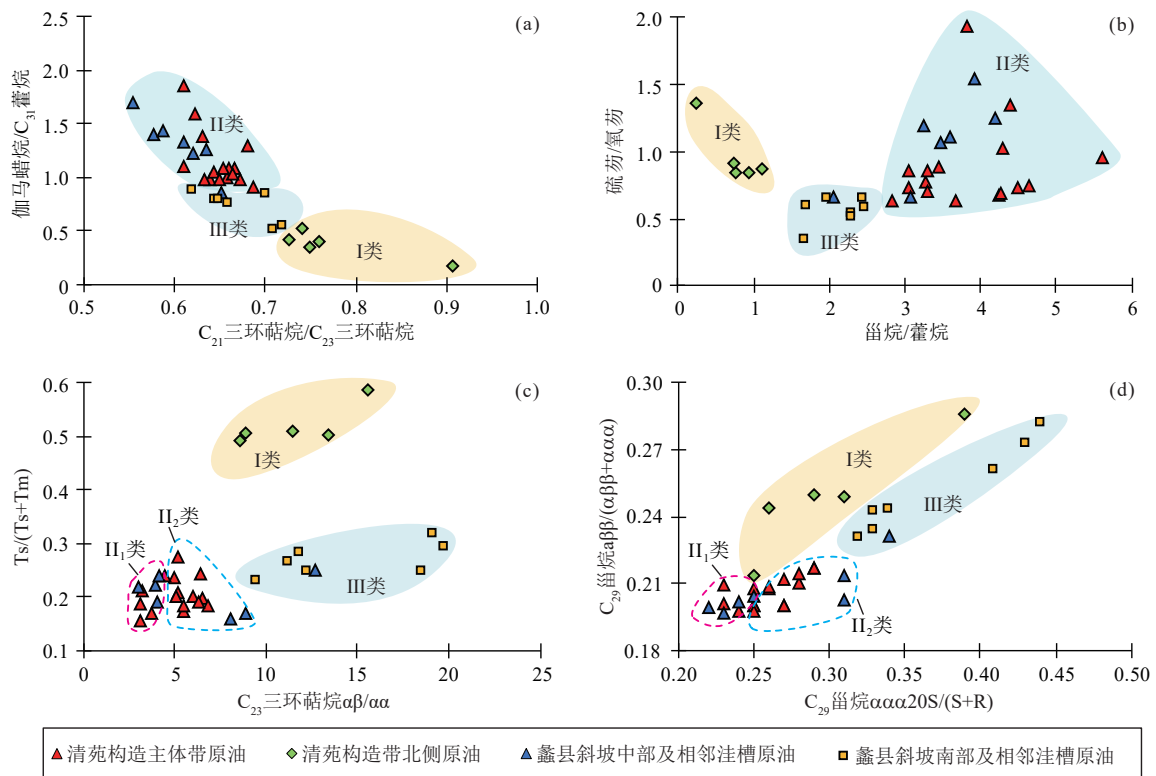


图3 保定—饶阳凹陷原油族群划分

Fig. 3 Classification of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

0.56、0.67, 同样说明母源岩来源于咸湖相还原环境^[21], 但相较于Ⅱ类还原性较弱; 甾烷/藿烷比值较大(1.68~2.48), 藻类输入较多^[22]。整体上后两类母源岩沉积于偏咸化还原的原始沉积环境, 且藻类含量丰富。Ⅱ类原油依据成熟度指标可进一步划分为Ⅱ₁类原油和Ⅱ₂类原油(图3), 其中Ⅱ₂类原油成熟度更高, 具有甾烷异构化程度较大(C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 值介于0.25~0.31、 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 值介于0.20~0.22、 $Ts/(Ts+Tm)$ 均值0.20)和 C_{23} 三环萜烷 $\alpha\beta/\alpha\alpha$ 值偏高(均值6.07)的特征。饶阳凹陷Ⅱ₁类原油主要分布在蠡县斜坡中上部, Ⅱ₂类原油分布于靠近注槽区的斜坡中下部; 保定凹陷清苑构造主体带Ⅱ₁和Ⅱ₂类原油均发育, 一定程度说明该区油气成藏的复杂性。

部分原油正构烷烃相对亏空, 异构烷烃含量增加(如BQ101X、G77-2X和G77X)(表1), 且总离子流图中并未见明显鼓包^[17], 表明清苑构造带浅层部分原油遭受过轻度的生物降解, 但整体对甾萜烷等影响微弱(表1)。清苑构造主体带和其他地区原油饱和烃中正构烷烃碳优势指数CPI为0.85~1.25(均值1.10), 反映具有一定的成熟特征。研究区原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 为0.23~0.29, 被划为

低熟油^[13]。折算镜质体反射率 R_c 为0.69%~0.80%, 同样说明原油成熟度相对较高。 $Pr/nC_{17}-Ph/nC_{18}$ 关系图^[23]中指示母源岩应沉积于藻类输入较多的还原环境。依据 $Pr/Ph-DBT/P$ 关系图版^[24], 清苑构造主体带原油样品点均落在了盐湖相区域。

保定凹陷沙一段下亚段烃源岩主要分布于清苑构造带北部, 有机碳含量为2.7%~5.1%(均值3.5%), 有机质类型以Ⅱ₁型为主^[15], 热演化程度较低(镜质体反射率 $R_o < 0.5\%$); 饶阳凹陷沙一段下亚段主要发育在蠡县斜坡内带—注槽区, 有机碳含量为1.0%~9.7%, 有机质类型以Ⅰ—Ⅱ₁型为主, 热演化程度中等^[18](R_o 为0.5%~0.9%)。前人基于色谱—质谱分析, 认为清苑构造主体带原油和蠡县斜坡中南部原油相似, 主要来自埋深>3000 m的沙一段烃源岩, 清苑构造带北侧原油则为沙一段和沙三段烃源岩混合贡献^[17]。本次利用高分辨率质谱技术对油源进行分析, 可以看出浅层成熟度较低沙一段烃源岩抽提物中 N_1 类化合物(咔唑类)^[20]相对含量很少, 仅可识别出少量化合物。相比之下, 埋深较大的烃源岩中不同DBE(等效双键数)的 N_1 类化合物分布相对完整。清苑构造带低熟油中 N_1 类化合物含量丰富, 同样与深部沙一段烃源岩具有更好的相关性(图4)。

表1 保定—饶阳凹陷原油基本地球化学参数
Table 1 Basic geochemical parameters of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

凹陷	构造单元	分类	井号	层位	深度(m)	P _T /P _H	CPI	P _T /nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	i/n	C ₂₁ /C ₂₃	αβ/αα	C ₂₉ Ts	Ts	G	20S	S/H	SF/OF	MTTC(%)	4-/1-M	D/P	R _c (%)
饶阳	清苑构造带北侧		GB1X	Es ₁	2194.0~ 2198.0	0.67	1.23	0.56	0.88	0.12	0.75	11.46	0.26	0.51	0.34	0.29	0.76	0.85	1.97	2.30	0.13	0.72
饶阳	清苑构造带北侧		G66	Es ₁	2622.2~ 2626.2	0.63	1.25	0.60	1.01	0.13	0.73	8.85	0.25	0.51	0.42	0.26	0.93	0.84	3.35	2.27	0.14	0.72
饶阳	清苑构造带北侧	I类	Y107	Es ₃ -Es ₄	2807.0~ 2817.0	0.66	1.23	0.57	0.90	0.12	0.76	13.37	0.24	0.50	0.40	0.31	0.73	0.92	3.17	2.09	0.15	0.70
饶阳	清苑构造带北侧		M25-18X	Es ₃	3382.2~ 3402.9	1.32	1.21	0.48	0.37	0.08	0.91	15.60	0.32	0.59	0.17	0.39	0.24	1.36	0.85	2.71	0.10	0.74
饶阳	清苑构造带北侧		D20X	Es ₁	3071.0~ 3079.0	0.43	1.19	0.68	1.71	0.16	0.74	8.53	0.25	0.49	0.52	0.25	1.12	0.87	6.12	1.99	0.14	0.71
饶阳	蠡县斜坡中部及 相邻洼槽		XL1	Es ₁	3266.0~ 3330.0	0.23	1.27	1.47	7.20	0.47	0.58	3.01	0.07	0.22	1.39	0.22	3.59	1.11	44.84	0.65	0.42	0.76
饶阳	蠡县斜坡中部及 相邻洼槽		G45-2X	Es ₁	2714.1~ 2722.5	0.20	1.28	1.55	9.74	0.64	0.55	4.08	0.06	0.19	1.70	0.25	4.19	1.25	34.16	0.65	0.33	0.73
饶阳	蠡县斜坡中部及 相邻洼槽		G684	Es ₁	2423.0~ 2430.0	0.20	1.26	1.52	8.54	0.53	0.63	4.18	0.07	0.26	1.25	0.24	3.46	1.07	38.34	0.79	0.31	0.75
饶阳	蠡县斜坡中部及 相邻洼槽		G9-10	Es ₁	2754.2~ 2772.2	0.19	1.24	1.46	8.66	0.55	0.59	3.96	0.07	0.22	1.43	0.23	3.91	1.54	43.54	0.75	0.23	0.77
保定	清苑构造主体带	II ₁ 类	BQ6X	Ed	1400.9~ 1408.7	0.14	-	0.45	13.45	1.37	0.70	3.74	0.09	0.17	1.29	0.25	3.82	1.93	20.75	0.81	1.01	0.69
保定	清苑构造主体带		G77-2X	Ed	1664.1~ 1680.9	0.15	1.03	2.76	13.07	5.84	0.62	3.13	0.06	0.19	1.59	0.24	4.28	1.03	43.53	0.67	0.35	0.77
保定	清苑构造主体带		BQ101X	Ed	1695.9~ 1700.3	0.19	—	4.65	108.22	9.88	0.63	3.11	0.11	0.16	1.85	0.23	4.38	1.35	45.78	0.76	0.33	0.77
保定	清苑构造主体带	II类	G77-11X	Ed	1670.0~ 1702.5	0.19	0.86	2.23	13.26	0.79	0.65	3.27	0.05	0.26	1.38	0.23	5.62	0.95	24.20	0.62	0.27	0.73
保定	清苑构造主体带		BQ102X	Ed	1598.8~ 1600.7	0.29	0.85	2.43	14.24	0.91	0.64	6.57	0.11	0.20	0.98	0.29	3.28	0.78	15.47	1.15	0.18	0.79
保定	清苑构造主体带		BQ102X	Ed	1563.5~ 1566.3	0.25	1.06	5.17	39.35	1.84	0.63	6.82	0.10	0.18	0.98	0.29	3.04	0.74	15.79	1.11	0.19	0.80
保定	清苑构造主体带		G79X	Ed	1570.1~ 1586.3	0.23	0.92	1.82	8.78	0.58	0.69	6.44	0.07	0.24	0.91	0.28	3.66	0.63	6.02	1.23	0.14	0.77
保定	清苑构造主体带		BQ1X	Ed	1494.0~ 1510.0	0.21	1.03	2.76	13.07	1.01	0.64	5.97	0.08	0.20	1.05	0.28	3.30	0.70	22.30	1.07	0.19	0.77
保定	清苑构造主体带		BQ2X	Ed	1505.2~ 1536.4	0.15	1.03	1.23	18.01	0.78	0.66	5.15	0.04	0.21	1.08	0.25	4.24	0.67	10.99	0.99	0.19	0.79

续表

凹陷	构造单元	分类	井号	层位	深度(m)	Pr/Ph	CPI	Pt/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	i/n	C ₂₁ /C ₂₃	αβ/αα	C ₂₉ Ts	Ts	G	20S	SH	SF/OF	MTTC(%)	4-/1-M	D/P	R _c (%)
保定	清苑构造主体带		BQ2X1	Ed	1543.9~1556.3	0.20	—	0.61	10.38	1.10	0.66	6.31	0.08	0.19	0.99	0.27	2.84	0.60	15.86	0.79	0.39	0.76
					1581.3~1584.4	0.22	1.13	2.78	21.07	1.42	0.66	5.52	0.09	0.17	1.09	0.26	3.30	0.86	17.40	1.01	0.23	0.80
	清苑构造主体带		BQ6	Ed	1458.0~1463.4	0.07	1.20	1.78	15.80	0.41	0.57	5.10	0.09	0.20	1.12	0.26	3.44	0.88	13.47	1.12	0.21	0.80
	清苑构造主体带		G77-2X	Ed	1609.0~1620.7	0.23	1.11	4.01	27.48	2.45	0.65	5.45	0.09	0.18	1.08	0.27	3.06	0.86	20.14	1.06	0.20	0.79
保定	清苑构造主体带	Ⅱ ₂ 类	G77X	Ed	1669.8~1673.3	0.14	0.93	4.24	67.82	2.66	0.58	5.21	0.03	0.28	0.97	0.25	4.27	0.69	12.81	1.02	0.17	0.77
保定	清苑构造主体带		G77-1X	Es ₁	1737.0~1778.8	0.17	0.88	1.91	13.70	0.81	0.67	5.01	0.04	0.24	0.98	0.27	4.48	0.74	13.87	0.97	0.19	0.78
保定	清苑构造主体带		G77-10X	Es ₁	1701.0~1778.0	0.16	0.87	2.63	21.34	1.27	0.66	4.50	0.04	0.24	1.02	0.25	4.64	0.75	20.42	0.84	0.22	0.77
饶阳	蠡县斜坡中部及相邻洼槽		D34	Es ₂₊₃	3272.0~3279.4	0.22	1.11	1.48	7.58	0.51	0.63	8.05	0.05	0.14	1.34	0.31	3.26	1.19	18.17	0.65	0.34	0.72
饶阳	蠡县斜坡中部及相邻洼槽		XL10-62X	Es ₂	3122.9~3141.3	0.24	1.19	1.43	6.37	0.44	0.62	8.93	0.08	0.16	1.22	0.31	3.07	0.66	—	—	0.19	0.90
饶阳	蠡县斜坡中部及相邻洼槽		D26	Es ₂	3431.0~3472.0	0.31	1.08	1.12	3.57	0.28	0.65	12.70	0.06	0.21	0.85	0.34	2.06	0.65	7.06	1.36	0.16	0.76
					2275.2~2315.0	0.27	1.09	1.10	4.31	0.34	0.70	11.28	0.08	0.26	0.84	0.33	2.48	0.57	6.28	2.13	0.09	0.76
	蠡县斜坡南部及相邻洼槽		G26	Es ₁	2597.0~2601.0	0.29	1.13	1.22	4.50	0.32	0.62	9.47	0.09	0.23	0.87	0.32	2.45	0.64	12.09	1.24	0.17	0.76
	蠡县斜坡南部及相邻洼槽		XL25X	Es ₁	3328.2~3342.1	0.31	1.12	1.07	3.59	0.28	0.65	12.31	0.09	0.24	0.78	0.34	2.31	0.53	4.66	2.13	0.09	0.77
饶阳	蠡县斜坡南部及相邻洼槽	Ⅲ类	N521X	Es ₁	3062.5~3082.1	0.28	1.17	0.90	3.07	0.24	0.65	11.82	0.08	0.28	0.79	0.33	1.98	0.65	8.55	1.81	0.10	0.77
饶阳	蠡县斜坡南部及相邻洼槽		N723X	Es ₁	2999.4~3017.3	0.29	1.09	0.98	3.61	0.29	0.66	18.51	0.09	0.25	0.75	0.41	2.30	0.51	2.26	2.65	0.09	0.76
饶阳	蠡县斜坡南部及相邻洼槽		N721X	Es ₁	3429.4~3457.0	0.33	1.14	0.75	2.19	0.19	0.72	19.75	0.09	0.29	0.53	0.44	1.72	0.59	1.12	3.25	0.10	0.74
饶阳	蠡县斜坡南部及相邻洼槽		N99X	Es ₁	3560.2~3622.5	0.28	1.13	0.70	2.58	0.22	0.71	19.19	0.10	0.32	0.50	0.43	1.68	0.34	0.68	5.24	0.04	0.78

注：Pr/Ph. 姥蛟烷/植烷；CPI. 碳优势指数；i/n. 总异构烷烃与总正构烷烃比值；C₂₁/C₂₃. C₂₁三环萘烷/C₂₃三环萘烷；αβ/αα. C₂₃三环萘烷；αβ/αα. C₂₉Ts. C₂₉Ts/C₃₀藿烷；Ts. Ts/(Ts+Tm)；G. 伽马蜡烷/C₃₁藿烷；20S. C₂₉甾烷ααα20S(S+R)；SH. 甾烷/藿烷；SF/OF. 疏苈/氧苈；MTTC/%. 脱烷基维生素E/芳烃总量×100；4-/1-M. 4-/1-甲基二苯并噻吩；D/P. 二苯并噻吩/菲；R_c/%. 折算镜质体反射率. 其中G77-1X、G77-10X、G77-11X、G684、XL1、XL25X、GB1X、G66、D20X等部分数据引自文献[17]。

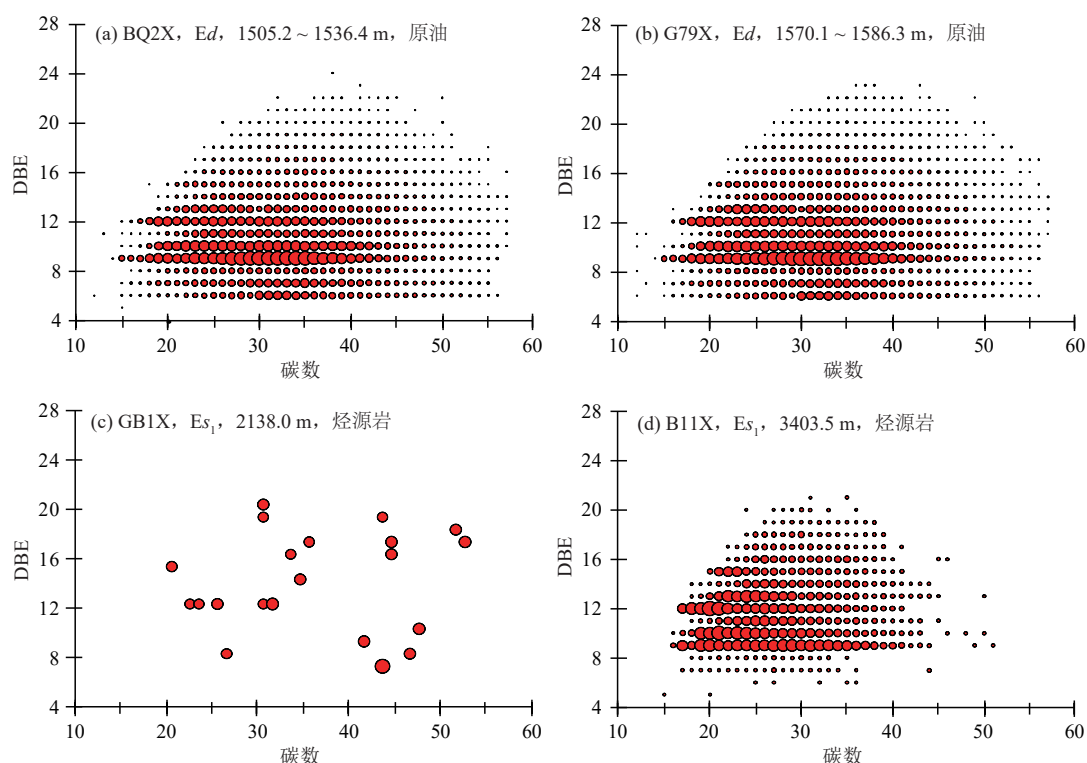
图4 清苑构造带原油、沙一段烃源岩中 N_1 系列化合物碳数、DBE及其强度关系

Fig. 4 Relation of DBE versus the carbon number of N_1 class in the oils and source rocks assigned from negative-ion ESI FT-ICR MS

4 混源识别与相对贡献预测

4.1 混源识别

烃源岩不同产油阶段排出的化合物具有显著差异,理化性质不同的原油混合后,势必会造成指标或参数的异常^[25]。从原油物性特征来看,清苑构造主体带原油受到有机质成熟度、油气运移、生物降解等因素共同影响,密度和黏度较大,但从其含硫量与含蜡量仍可体现出母源岩热演化特征,研究区多数为含硫原油,与蠡县斜坡中部原油类似;部分原油含硫量低而含蜡量较高,受次生变化影响较小的G79X原油含硫量和含蜡量分别为0.49%和14.05%(表1),有别于蠡县斜坡中部原油,一定程度上反映了清苑构造主体带原油具有混源特征。另外结合前人对储层流体包裹体的分析^[15],保定凹陷清苑构造主体带沙一段和东营组储层油包裹体主要发黄绿色荧光,而蠡县斜坡中部地区沙一段储层油包裹体多显示黄色荧光,说明两地区储层流体包裹体中的原油成分不同^[15],油气来源可能存在差异。

选用伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷、 C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷等参数,结合芳烃中脱羟基维生素E相对含量分析,以期更好地识别研究区原油混合特

征。清苑构造主体带原油伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷值为0.91~1.85,Ⅰ类和饶阳凹陷Ⅱ、Ⅲ类原油分别为0.17~0.52、1.22~1.70和0.50~0.87,整体上清苑构造主体带原油该参数值分布范围介于饶阳凹陷Ⅱ类和Ⅲ类原油之间,而明显有别于Ⅰ类原油,指示其具有一定的混合作用^[21]。清苑构造主体带Ⅱ₁类原油(如G77-11X、BQ101X)相关参数值与蠡县斜坡中部原油更为接近,推测混入了较多来源于饶阳凹陷的Ⅱ类原油(图5);研究区原油 C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷值为0.61~0.69,Ⅰ类原油和饶阳凹陷Ⅱ、Ⅲ类原油分别为0.73~0.91、0.55~0.63和0.62~0.72,同样反映了清苑构造主体带原油存在一定混合作用。

一般认为丰富的脱羟基维生素E在富藻咸水湖相低熟油中分布广泛^[22],清苑构造主体带原油脱羟基维生素E相对含量为6.02%~45.78%(均值19.92%),与上文分析类似,参数值分布范围介于饶阳凹陷Ⅱ类原油(18.17%~44.84%,均值35.81%)和Ⅲ类原油(0.68%~12.09%,均值4.84%)之间,Ⅱ₂类G79X、G77X、BQ102X等井原油中脱羟基维生素E相对含量偏低(<16%),可能混入了更多的Ⅲ类原油(图6,表1)。依据生

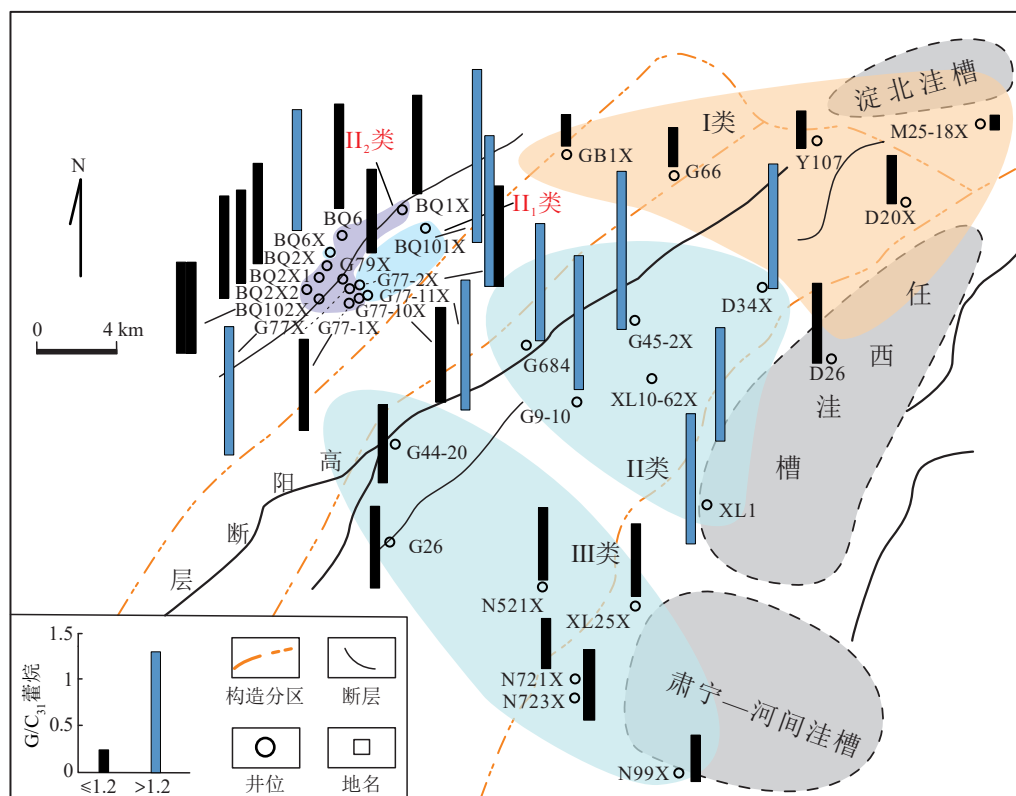


图5 保定—饶阳凹陷原油伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷值平面分布图

Fig. 5 Plane distribution of the gammacerane/ C_{31} -hopane ratios of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

源、沉积环境等参数特征综合认为清苑构造主体带原油具有混合特征，为蠡县斜坡中南部及相邻洼槽区沙一段烃源岩的混合贡献。

结合不同地区原油性质及地质资料分析，蠡县斜坡和任西洼槽沙一段烃源岩演化程度整体低于肃宁—河间洼槽，相邻地区同一套烃源岩差异化演化为不同成熟度原油的混合提供了物质基础；蠡县斜坡上倾方向为油气运移有利方向，同样为原油混合提供了动力学基础；断层与砂体等构成的输导体系则决定了不同油气的混合充注方向。

4.2 混源相对贡献预测

清苑构造带浅层东营组油藏为不同地区热演化各异的沙一段烃源岩排出油共同充注而成。为了更好地理清不同供烃区原油混合比例，采用标样共注的绝对定量技术对原油中甾萜类进行定量分析。混合油 C_{29} 甾萜 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 值可计算为：

$$K = [nC_{ms} + C_{IS} (1-n)] / [(C_{ms} + C_{mR}) n + (1-n)(C_{IS} + C_{IR})] \quad (1)$$

$$n \text{ 值可推导为: } n = [C_{IS} - k(C_{IS} + C_{IR})] / [K(C_{ms} + C_{mR} - C_{IS} - C_{IR}) - C_{ms} + C_{IS}] \times 100\% \quad (2)$$

式中： C_{ms} 、 C_{mR} 分别代表成熟原油中 C_{29} $\alpha\alpha\alpha$ 甾萜

20S、20R 构型的绝对丰度； C_{IS} 、 C_{IR} 分别代表低熟原油中 C_{29} $\alpha\alpha\alpha$ 甾萜 20S、20R 构型的绝对丰度； K 代表最终混入成熟烃类后的混合油 C_{29} 甾萜 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 值； n 代表混合进的成熟油百分含量。

我们选择距离清苑构造带距离较近的蠡县斜坡区不同类型原油进行分析：选用Ⅲ类 G44-20 井原油作为成熟原油，Ⅱ类 G9-10 井原油作为低熟原油，计算结果表明，清苑构造主体带大部分井位显示至少混入了约 30% 的成熟原油。尤其是 BQ102X、G79X 和 BQ1X 所处的油藏平面分布面积广，油层累计厚度大，石油地质储量丰富，混入了 50% ~ 70% 来源于蠡县斜坡南部及肃宁—河间洼槽沙一段排出的成熟原油，但由于成熟原油较低熟原油的生物标志化合物浓度偏低，混入少量的低熟油即可使基于甾萜烷异构化参数表征的成熟特征不明显（图 7）。

5 油气成藏模式解析

5.1 基于 GC-MS 的油气运移示踪

T_s 是藿烷的热降解产物，且 T_m 的稳定性要弱于前者，成熟度的增高或黏土矿物的催化使得 $T_s/$

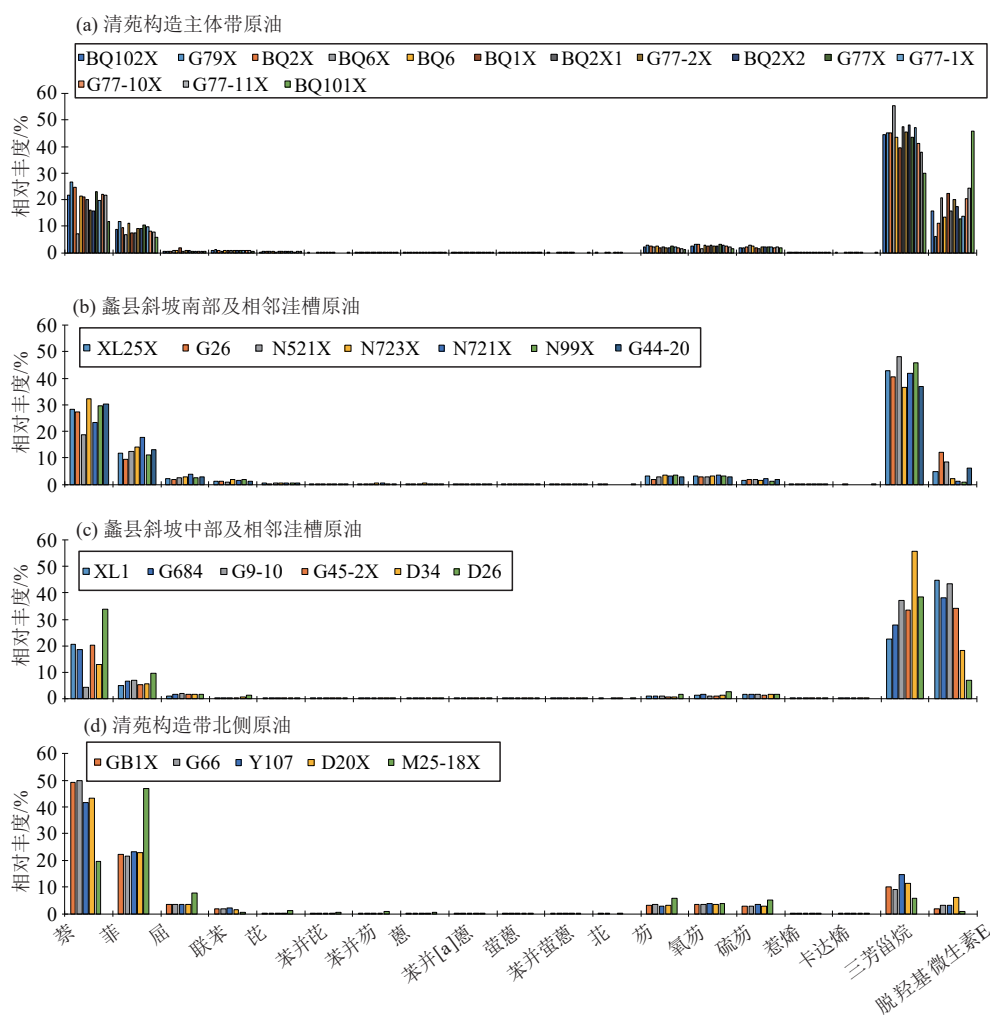


图6 保定—饶阳凹陷部分原油芳烃组成与分布特征

Fig. 6 Composition and distribution of aromatic hydrocarbons in the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

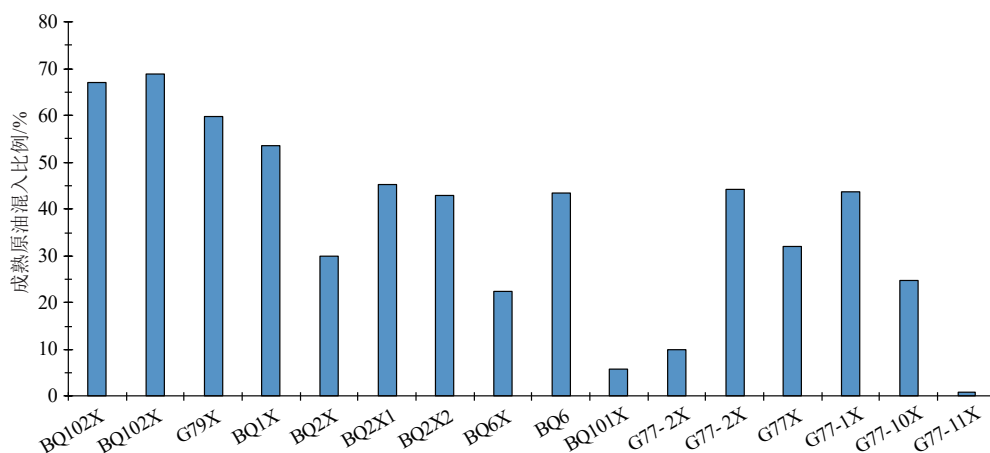


图7 清苑构造主体带混合原油定量计算

Fig. 7 Quantitative calculation of the mixed crude oils from the Qingyuan Tectonic Belt

(T_s+T_m) 值增加, 且在成熟-高成熟阶段变化敏感^[26]。相较其他类别原油, I 类原油中该参数值最高 (0.49 ~ 0.51), 且差异明显, 反映了其具有较高的成熟度/母源岩沉积环境还原性弱^[26]。同时也

暗示清苑主体构造带原油与饶阳凹陷 II 类和 III 类原油亲缘关系更为密切 (表 1)。C₂₉Ts 稳定性大于 C₃₀ 藿烷, C₂₉Ts/C₃₀ 藿烷值同样受控于成熟度和沉积环境^[27]。靠近生烃洼槽处 (如 M25-18X) 数值较大,

且 I 类原油明显大于其他类别原油。与上文分析结果类似, 清苑构造主体带原油数值同样整体介于饶阳凹陷 II 类和 III 类原油之间 (表 1), 指示其为蠡县斜坡中南部及相邻洼槽排出油运移而来。

$13\alpha(\text{H})$ 、 $14\alpha(\text{H})$ 三环萜烷系列热稳定性较低, 对成熟度变化较为敏感, 在有效生油窗内 C_{23} 三环萜烷 $\alpha\beta/\alpha\alpha$ 值具有增加趋势^[28]。位于洼槽区的 N99X、N723X、N721X、D26、M25-18X 井原油参数值较高, 且随着原油运移距离的增加, 蠡县斜坡中上部油样具有降低趋势 (图 8)。高阳断层以西的清苑构造主体带 II₂ 类原油 C_{23} 三环萜烷 $\alpha\beta/\alpha\alpha$ 值多大于蠡县斜坡中上部的 II 类原油而低于 I 类和 III 类原油, 说明其来源于不同地区原油的共同充注。

C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20\text{S}/(\text{S}+\text{R})$ 是比较常用的成熟度指标, 在未成熟度-成熟阶段变化敏感^[26]。从其平面分布图 (图 9, 10a) 可以看出, 沿斜坡上倾方向参数值有降低趋势。保定清苑构造主体带 II₂ 类原油成熟度整体高于位于蠡县斜坡中上部的 II 类原油, 低于 I 类和 III 类原油。将清苑构造带原油进行单独投点, 很明显看到位于西南部的原油成熟度高于东北部, 成熟原油应由 BQ102X 井附近运移充

注。同时针对同一油藏而言, 较成熟原油从充注点向圈闭构造高点逐渐运移聚集 (图 10 (a))。与 $\text{Ts}/(\text{Ts}+\text{Tm})$ 和 $\text{C}_{29}\text{Ts}/\text{C}_{30}$ 藿烷反映的 I 类原油具有较高的成熟度不同, 基于 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20\text{S}/(\text{S}+\text{R})$ (或 C_{23} 三环萜烷 $\alpha\beta/\alpha\alpha$) 显示部分 I 类原油成熟度偏低, 这是因为 I 类原油来源于沙一段和沙三段烃源岩, 沉积环境偏咸化且演化程度相对较低的沙一段烃源岩不利于 Ts 的形成^[14, 22], 不同来源的油气混合使得基于不同生标建立的成熟度参数存在差异。

影响 4-/1-甲基二苯并噻吩 (4-/1-MDBT) 值的因素主要为成熟度和运移距离^[29]。随成熟度增加该比值增加, 随运移距离增大该比值减小。虽然烃源岩排出油沿斜坡上倾方向进行了广泛的运移, 但 III 类原油的 4-/1-MDBT 值主要分布在 1.36 ~ 5.24, 饶阳凹陷 II 类原油介于 0.65 ~ 0.79, 由此可见本次所取油样的成熟度差异主要控制了该参数值的大小。清苑构造带 II₂ 类原油在清苑构造带西南方向 BQ102X 和 G79X 井区 4-/1-MDBT 值较高, 沿东北方向参数值逐渐减小 (图 10b)。同时 II₁ 类原油 (G77-2X, G77-11X 等) 并未充分混合, 其较低的参数值与蠡县斜坡中上部 II 类原油更为接近

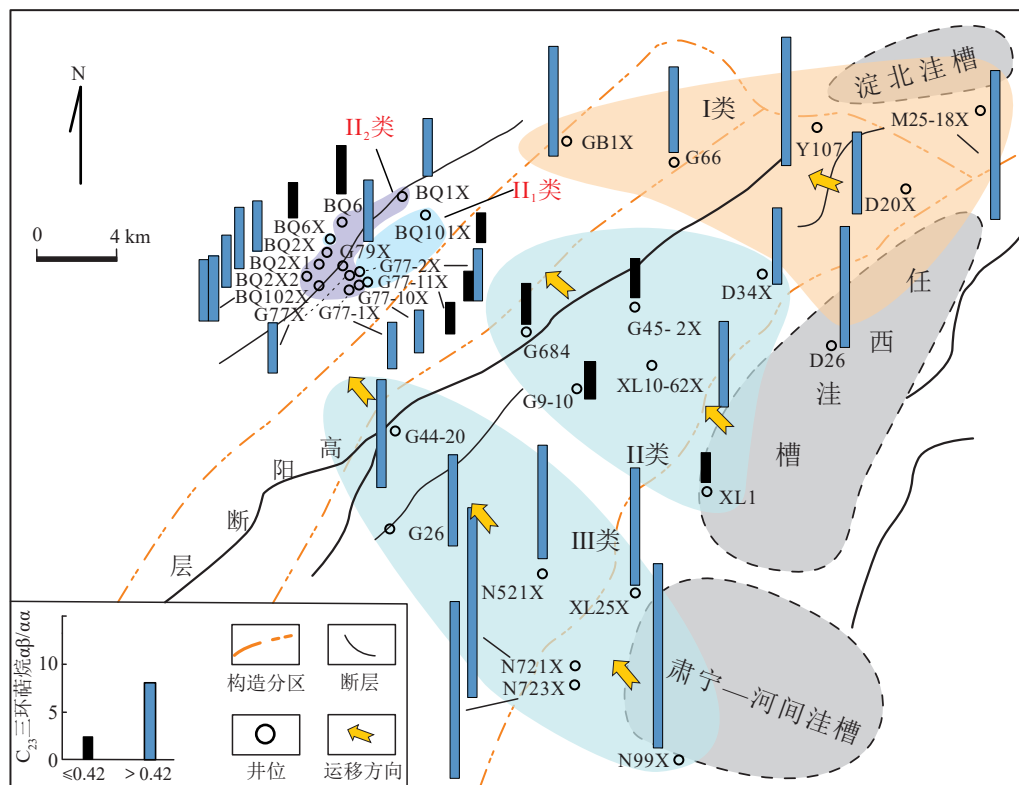


图 8 保定—饶阳凹陷原油 C_{23} 三环萜烷 $\alpha\beta/\alpha\alpha$ 值平面分布图

Fig. 8 Plane distribution of the C_{23} tricyclic terpene $\alpha\beta/\alpha\alpha$ ratios of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

(表1)。结合清苑构造带到蠡县斜坡整体为宽缓斜坡的地质背景,我们认为来源于饶阳凹陷肃宁—河间洼槽的成熟原油可以越过高阳断层继续向斜坡上倾方向运移,之后沿次级断层横向调整运移到断鼻构造高部位聚集成藏。

5.2 基于高分辨率质谱的油气运移示踪

原油负离子ESI FT-ICR MS鉴定出的化合物主要为酸性含氧化合物和非碱性含氮化合物^[17, 30]。由于清苑构造带油藏埋藏浅,保存条件较差,本次重点对受微生物降解影响较小的 N_1 类杂原子化

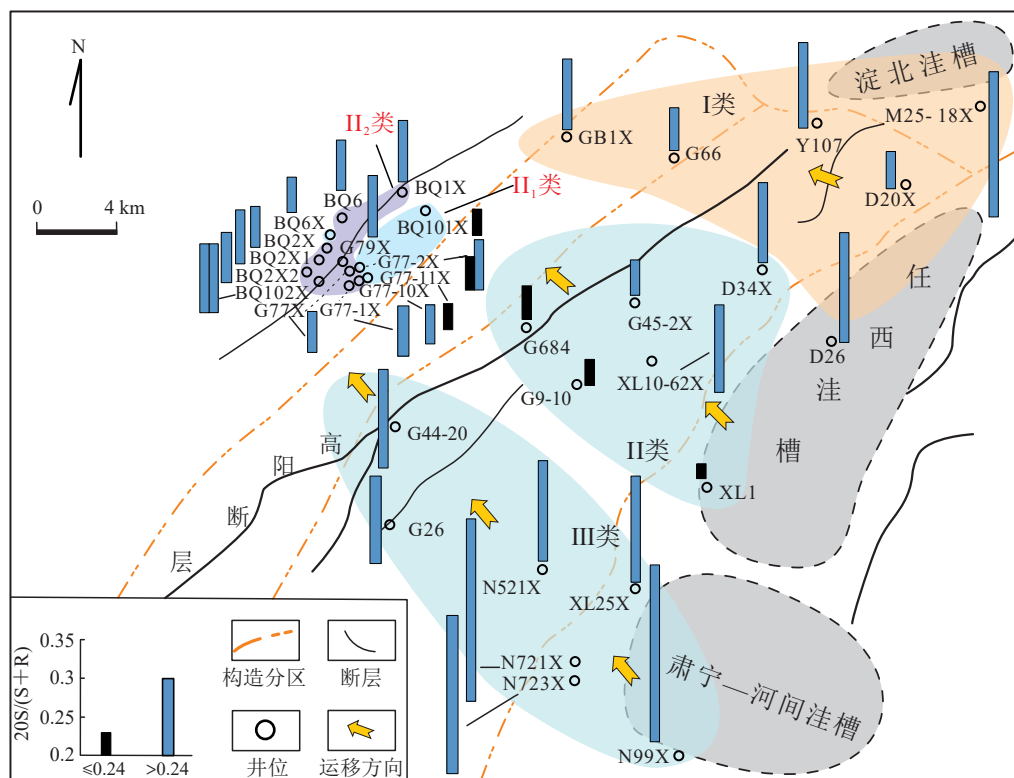


图9 保定—饶阳凹陷原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 值平面分布图

Fig. 9 Plane distribution of the $20S/(20S+20R)$ ratios for C_{29} - $\alpha\alpha$ steranes of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

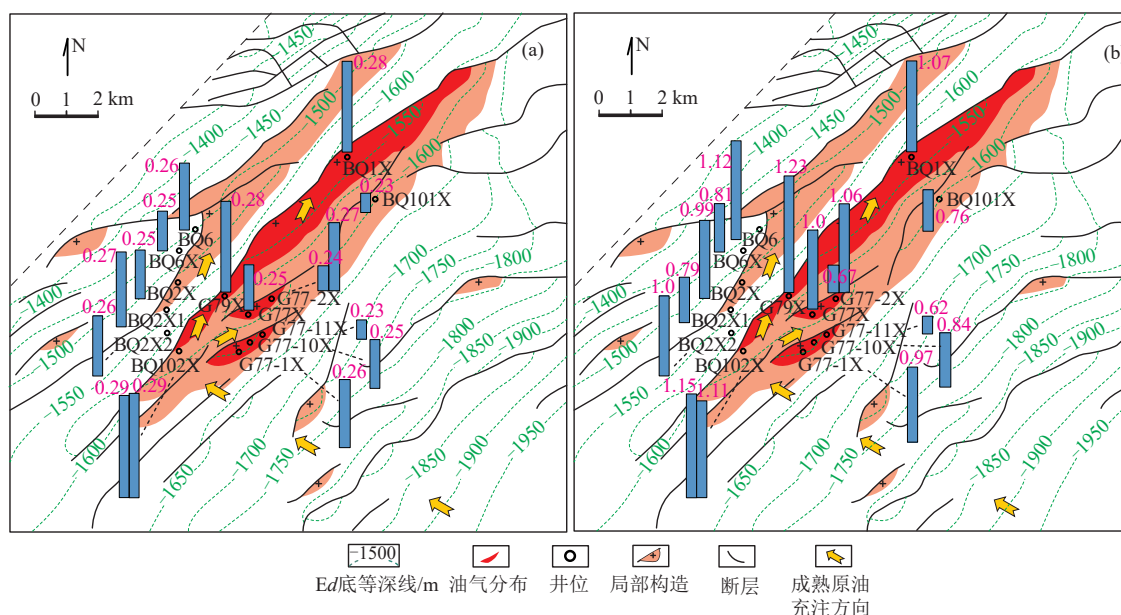


图10 清苑构造带原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha 20S/(S+R)$ (a) 和4-/1-MDBT (b) 运移示踪平面图

Fig. 10 Plane distribution of the $20S/(20S+20R)$ ratios (a) for C_{29} - $\alpha\alpha$ steranes and 4-/1-MDBT ratios (b) of the crude oils from the Qingyuan Tectonic Belt

合物进行分析^[31]。保定—饶阳凹陷原油中 N_1 类化合物 DBE（等效双键数）值分布范围为 6 ~ 24（图 4），其中 DBE=9, 12, 15 系列分别对应咔唑类、苯并咔唑类和二苯并咔唑类。随成熟度越高，分子缩合度越高、芳香性越强，前人^[32]提出利用 N_1 类不同 DBE 化合物相对丰度关系对成熟度进行判断。需要说明的是，在较长的油气运移距离下，地质层析作用同样可以明显改变不同化合物的分布特征，由于烷基侧链对强极性官能团具有屏蔽作用，原油中具有长侧链烷基的低 DBE 极性化合物在运移过程中逐渐富集^[33]。研究区油气运移距离整体小于 25 km，且油气供给充足，清苑构造主体带油气探明储量超千万吨，认为中性含氮化合物分布特征应更多受控于原油的成熟度。清苑构造主体带原油成熟度明显高于饶阳凹陷 II 类原油而低于 III 类原油，与基于饱和烃色质分析的结果相同，反映了研究区原油多为不同成熟度原油运移混合而成（图 11）。不同于甾萜类生标化合物在低成熟原油中含量较多，相关咔唑类化合物的含量在成熟原油中明显增加^[34]，因此研究咔唑类化合物的特征对体现混合原油中成熟油的性质也有一定的实际意义。

5.3 油气运聚模式重建

蠡县斜坡中南段整体属于弱构造区，地层接受稳定沉积，沙河街组沙一段时期斜坡上沉积了一套分布广泛的富砂地层^[35-37]，根据钻井油气显示统计发现含油砂岩多属沙一段，指示其

可作为良好的输导层系。保定凹陷清苑构造带地区东三段河道砂体叠置连片，同样具有较好的连通性^[16]，且东二段泥岩盖层分布广泛，可与东三段砂岩形成良好的储盖组合。另外斜坡带发育与其走向近垂直的构造脊，其与砂体配合可形成优势运移路径，有利于油气远距离运移（图 12）。

新近纪以来，斜坡及洼槽区沙一段烃源岩逐渐进入大量生排烃阶段，清苑构造带储层油气包裹体测温显示油气充注时间在 4 ~ 0 Ma^[15]。由于斜坡中南段断层发育数量较少、规模小，馆陶组沉积以来断层活动微弱^[38-40]，垂向输导油气作用有限，油气主要在古近系聚集成藏，于新近系分布局限。且由斜坡区到保定凹陷清苑构造带发育的断层多为西掉补偿断层，断层的错断使得斜坡下倾方向较老地层与断层上盘较新地层对接，随着运移距离的增大，油气主力分布层位逐渐由沙河街组过渡到东营组。清苑断鼻构造带具有较大的汇油面积，上文提到的地化指标指示来源于蠡县斜坡和任西洼槽的较低成熟度原油和肃宁—河间洼槽的成熟原油沿着由断层和砂体构成的输导体系向斜坡上倾方向运移，后者于清苑构造带西南部位注入，与低熟原油共同聚集，形成了东营组亿吨级的规模效益储量，为同期同源于运移中混合、浅层聚集的成藏模式（图 12）。

渤海湾盆地发育数十个含油气凹陷，油气则主要分布于正向构造带中。许多凹陷多洼共生，

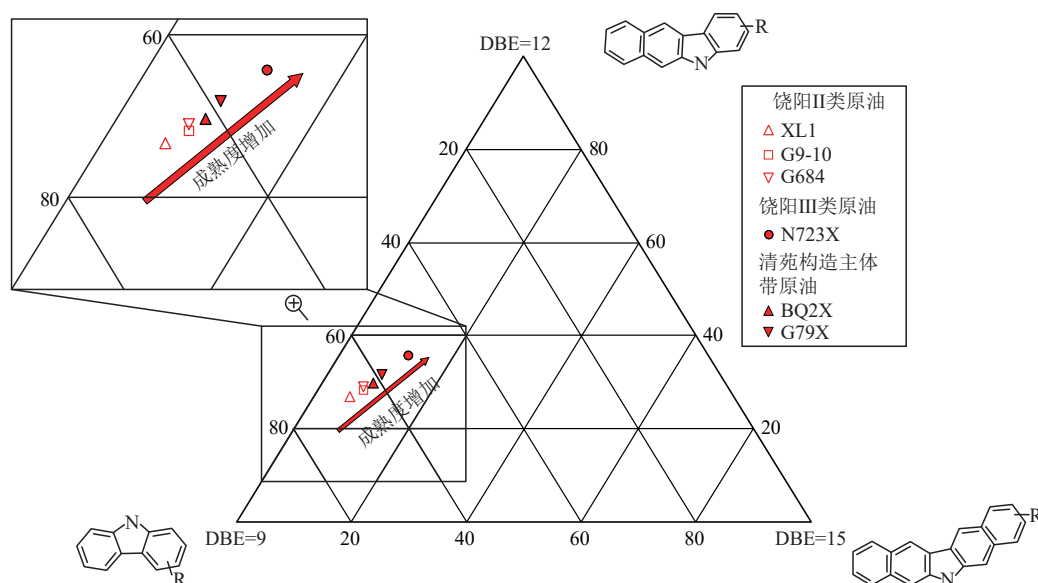


图 11 基于 N_1 类化合物的保定—饶阳凹陷原油成熟度判识

Fig. 11 Maturity assessment based on the distribution of carbazole and its higher fused homologues of the crude oils from the Baoding-Raoyang Sag

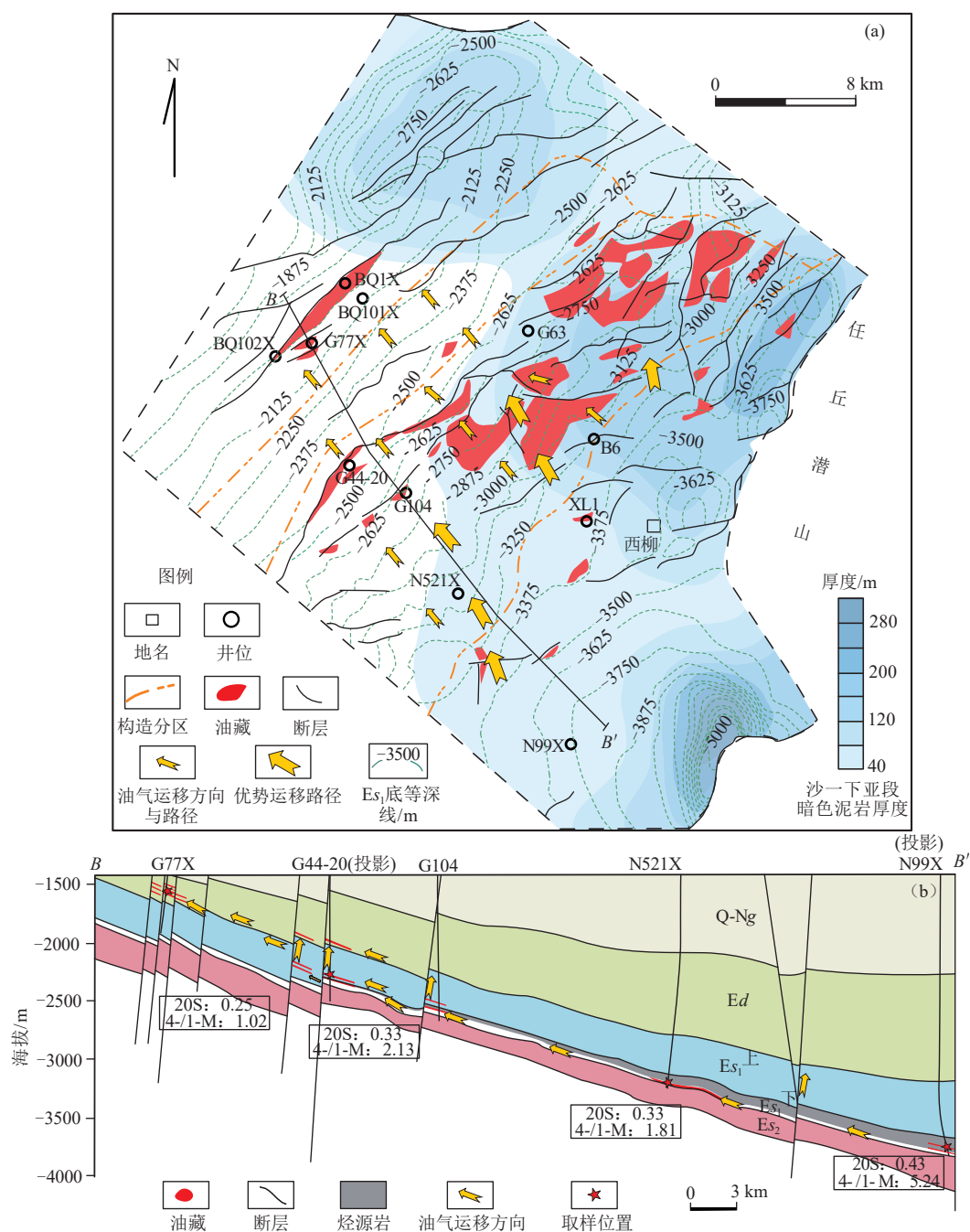


图12 清苑构造带油气平面(a)和剖面(b)运移模式示意图(参数含义同表1)

Fig. 12 Hydrocarbon migration pattern in plane (a) and section (b) in the Qingyuan Tectonic Belt

且不同地区差异的沉降幅度控制着烃源岩的热演化程度^[41-43],这意味着地质历史时期同一凹陷相邻洼槽或同一洼槽不同层位的烃源岩热演化可能存在差异,烃源岩排出的油气在沿断裂/砂体向正向构造带运移聚集过程中不可避免会发生混合作用,尤其是低成熟度原油中含有丰度较高的甾萜类生标化合物,即使混入一定量成熟/高熟原油,也可使 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 、 C_{31} 藿烷 $22S/(S+R)$ 等参数表征的成熟特征不明显。目

前渤海湾盆地在辽河拗陷、济阳拗陷和临清拗陷等地区均发现储量可观的低熟油气,明确油气成藏机制,对于指导渤海湾盆地低熟油勘探具有重要意义。

6 结 论

(1) 清苑构造主体带原油的物性较差,且 N_1 类化合物相对含量较高,与深层沙一段烃源岩抽提物可比性好。原油主要来自蠡县斜坡中南部及

相邻洼槽沙一段烃源岩的混合贡献,大多数油样中混入了30%以上来源于蠡县斜坡南部及肃宁—河间洼槽的成熟原油,尤其是BQ102X、G79X、BQ1X井等原油,混入了50%~70%的成熟原油。

(2) 对Ts/(Ts+Tm)、C₂₉Ts/C₃₀藿烷、C₂₃三环萜烷αβ/αα、C₂₉甾烷ααα20S/(S+R)和4-/1-MDBT等相关参数进行分析、N₁类化合物成熟度进行判识,发现清苑构造主体带原油成熟度多高于蠡县斜坡中上部而低于斜坡南部及相邻洼槽原油,且成熟原油由清苑构造带西南方向充注。

(3) 清苑构造主体带地区属于同期同源于运移中混合、浅层聚集的成藏模式。富油凹陷多洼共生,同一洼槽或相邻洼槽烃源岩排出的油气沿断裂或砂体等运移中同样可以发生混合,因此加强对低熟油气成藏机制研究对下一步油气勘探具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王铁冠,钟宁宁,侯读杰,等.低熟油气形成机理与分析[M].北京:石油工业出版社,1995:2-5.
- [2] SNOWDON L R, POWELL T G. Immature oil and condensate-modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter[J]. AAPG Bull, 1982, 66(6): 775-788.
- [3] MARTIN R L, WINTERS J C, WILLAMS J. Distributions of n-Paraffins in crude oils and their implications to origin of petroleum[J]. Nature, 1963, 199: 110-113.
- [4] PANG X Q, LI M W, LI S M, et al. Origin of crude oils in the Jinhu Depression of North Jiangsu-South Yellow Sea Basin, eastern China[J]. Organic geochemistry, 2003, 34(4): 553-573.
- [5] 侯读杰,王铁冠,李贤庆,等.洪泽凹陷低熟原油的饱和烃化合物组合[J].沉积学报,1996,14(4):38-44.
- [6] 邓硕,李素梅,曹敬涛,等.辽河西部凹陷低熟油的高分辨质谱特征及其成因机制[J].现代地质,2024,38(5):1354-1369.
- [7] 李素梅,徐田武,史权,等.东濮凹陷盐湖相原油氮/氧化合物分布特征及其应用[J].现代地质,2019,33(6):1137-1150.
- [8] 李素梅,刘佳,马学峰,等.渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷全油气系统特征与勘探潜力[J].石油与天然气地质,2025,46(4):1183-1199.
- [9] SNOWDON L R. Oil from Type III organic matter: resinite revisited[J]. Organic Geochemistry, 1991, 17(6): 743-747.
- [10] TANNENBAUM E, AIZENSHTAT Z. Formation of immature asphalt from organic-rich carbonate rocks—I. Geochemical correlation[J]. Organic Geochemistry, 1985, 8: 181-192.
- [11] PETERS K E, CUNNINGHAM A E, WALTERS C C, et al. Petroleum systems in the Jiangling-Dangyang area, Jiangnan Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(10/11): 1035-1060.
- [12] 邹华耀,陆建峰.断层—低熟油烃源岩排油的控制因素[J].江汉石油学院学报,1998,20(2):36-40.
- [13] 黄第藩,张大江,王培荣,等.中国未成熟石油成因机制和成藏条件[M].北京:石油工业出版社,2003:56-59.
- [14] 李素梅,庞雄奇,金之钧,等.苏北金湖凹陷混合原油的地质地球化学特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2002,26(1):11-15+8.
- [15] 李志军,马学峰,罗强,等.渤海湾盆地保定凹陷早熟低熟油特征及成烃机制[J].石油学报,2024,45(3):500-516.
- [16] 张锐锋,何海清,朱庆忠,等.渤海湾盆地保定凹陷东营组油气勘探重要发现与启示[J].中国石油勘探,2023,28(2):11-23.
- [17] 李小冬,李志军,李熹微,等.冀中拗陷保定凹陷清苑构造带低熟油成因解析[J].现代地质,2024,38(5):1338-1353.
- [18] 李志军,肖阳,田建章,等.渤海湾盆地冀中拗陷新领域、新类型油气勘探潜力及有利方向[J].石油学报,2024,45(1):69-98.
- [19] 单帅强,何登发,方成名,等.渤海湾盆地冀中拗陷高阳低凸起构造特征及成因机制[J].石油实验地质,2022,44(6):989-996,1007.
- [20] 史权,董智勇,张亚和,等.石油组分高分辨质谱的数据处理[J].分析测试学报,2008,27(增刊):246-248.
- [21] DAMSTÉ J S, KENIG F, KOOPMANS M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(9): 1895-1990.
- [22] 孟仟祥,张松林,崔明中,等.不同沉积环境湖相低熟原油的芳烃分布特征[J].沉积学报,1999,17(1):112-120.
- [23] HUGHES W B, HOLBA A G. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrenes and pristane to phytane as indicators of the depositional environment and lithology of petroleum source rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3581-3598.
- [24] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M. Use of biological markers in petroleum exploration[J]. Methods in Geochemistry & Geophysics, 1986, 24: 261-290.
- [25] 帕尔扎娜·帕尔哈提,宋宇,朱凯,等.多元统计分析在油源对比中的应用——以渤海湾盆地歧口凹陷滨海地区中浅层系混源油为例[J].石油实验地质,2025,47(5):1163-1176.
- [26] 王崇敬,张鹤,李世宇,等.基于分子标志物的有机质成熟度评价参数选择及其适用范围分析[J].地质科技情报,2018,37(4):202-211.
- [27] 周晨曦,于双,张海祖,等.塔里木盆地台盆区原油甾萜烷浓度与热稳定性[J].地球化学,2023,52(2):158-171.
- [28] PAUL F, JON C B, ANDY N B. Tricyclic terpane maturity parameters: response to heating by an igneous intrusion[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(8): 1011-1019.
- [29] 王铁冠,何发岐,李美俊,等.烷基二苯并噻吩类:示踪油藏充注途径的分子标志物[J].科学通报,2005,50(2):176-182.

- [30] 李蕾, 李素梅, 张洪安, 等. 东濮凹陷西斜坡盐湖相原油地球化学特征与油源分析[J]. 现代地质, 2018, 32(6): 1109 – 1124.
- [31] PAN Y H, LIAO Y H, SHI Q. Variations of Acidic Compounds in Crude Oil during Simulated Aerobic Biodegradation: Monitored by Semiquantitative Negative-Ion ESI FT-ICR MS [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(2): 1126 – 1135.
- [32] POETZ S, HORSFIELD B, WILKES H, et al. Maturity-Driven Generation and Transformation of Acidic Compounds in the Organic-Rich Posidonia Shale as Revealed by Electrospray Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(8): 4877 – 4888.
- [33] LIU P, LI M W, JIANG Q G, et al. Effect of secondary oil migration distance on composition of acidic NSO compounds in crude oils determined by negative-ion electrospray Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. Organic Geochemistry, 2015, 78: 23 – 31.
- [34] BAO J, LIU Y, FAN Y P, et al. Influence of thermal maturity on carbazole distributions in coal source rocks during compaction pyrolysis experiments [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 6848.
- [35] 杜一帆, 朱筱敏, 高园, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组一段物源特征研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 115 – 130.
- [36] 张宏国, 王玉秀, 付鑫, 等. 石臼坨凸起东段斜坡区油气运移模式与明化镇组下段勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(1): 168 – 177.
- [37] 张中巧, 杨海风, 钱赓, 等. 现今储层剩余地层压力变化对油气纵向运移的指示意义: 以渤海海域黄河口凹陷中洼油田区为例[J]. 断块油气田, 2025, 32(1): 96 – 101.
- [38] 滕长宇, 邹华耀, 郝芳. 渤海湾盆地构造差异演化与油气差异富集[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 579 – 590.
- [39] 高雁飞, 杨海风, 赵弟江, 等. 渤海青东凹陷北部断垒带沙河街组近源成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 111 – 127.
- [40] 张在振, 曾溅辉, 张本华, 等. 渤海湾盆地埕岛东部新近纪火山活动及其油气地质意义[J]. 现代地质, 2024, 38(2): 312 – 321.
- [41] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1255 – 1264.
- [42] 万涛. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系层序地层格架新解[J]. 断块油气田, 2025, 32(3): 389 – 397.
- [43] 姚雅琴, 杨纪磊, 赵都菁, 等. 渤海湾盆地辽西凹陷古近纪微体化石组合特征及地质意义[J]. 现代地质, 2024, 38(1): 230 – 239.
- [44] 孙藏军, 汪全林, 王腾, 等. 石臼坨凸起西段Q油藏原油稠化机制及原油密度预测[J]. 断块油气田, 2025, 32(5): 843 – 850.