

复合油藏形成中的蒸发分馏与生物降解联合控制作用

——以渤海海域秦皇岛 29-2 油田为例

牛成民, 王飞龙, 汤国民, 燕 歌, 赵国祥

(中海石油(中国)有限公司 天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300452)

摘要:通过对秦皇岛 29-2 油田地质构造背景、油气及其烃源岩地化特征等方面研究,从蒸发分馏与生物降解联控的角度探讨了秦皇岛 29-2 油气藏原油物性差异性成因。研究表明:油源对比证实该古近系油藏与新近系油藏同源,但它们在轻烃组成、族组成和饱和烃色谱分布上存在显著差异,表明经历了强烈的蒸发分馏作用。结合该区烃源岩热演化、成藏期次和断裂活动史认为,幔源 CO₂ 气体侵入引起了该区蒸发分馏作用;蒸发分馏和生物降解作用联合控制着该油气藏的原油物性差异分布,深、浅层油藏整体受控于前者,浅层油藏同时受控于后者,从深到浅依次分布着特稠油、轻质油、凝析油和稠油;2 种作用共存于同一油藏,既需要有已遭受蒸发分馏影响的先存深层油藏,也需要后成藏的浅层油藏遭到生物降解的同时,接受先存油藏的晚期持续充注。

关键词:蒸发分馏;生物降解;秦皇岛 29-2 油田;复合油藏;秦南凹陷;渤海海域

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

Evaporative fractionation and biodegradation impacts on a complex petroleum system:

QHD29-2 oil field, Bohai Sea area

NIU Chengmin, WANG Feilong, TANG Guomin, YAN Ge, ZHAO Guoxiang

(Research Institute of Bohai Oilfield, Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300452, China)

Abstract: By studying the tectonic background of QHD29-2 oil field and the geochemical characteristics of oil and gas and its source rocks, the dissimilarity of crude oil physical properties was discussed from the perspective of evaporative fractionation and biodegradation. Oil source comparison confirmed that the oils in Paleogene and Neogene had the same source. However, there were significant differences in light hydrocarbon composition, family composition and the chromatographic distribution of saturated hydrocarbons, indicating that they had experienced a strong evaporative fractionation. Combined with the analyses of source rock thermal evolution, accumulation stage and fault activity history, it was believed that the intrusion of mantle-derived CO₂ gas had caused evaporative fractionation in the area. The evaporative fractionation and biodegradation jointly controlled crude oil physical properties in the reservoir. Evaporative fractionation and biodegradation were the main factors controlling the differences of crude oil physical properties in reservoirs, and the differences were mainly controlled by evaporative fractionation, whereas, the oil in shallow reservoirs was controlled by both evaporation and biodegradation. Extra-heavy, light, condensate and heavy oils distributed in sequence from deep to shallow reservoirs. The two mechanisms had an impact on the same reservoir simultaneously. The early reservoirs in deep formations were affected by evaporative fractionation. After the shallow reservoirs of the post-accumulation were biodegraded, they were continuously charged in the late stage of the pre-existing reservoir.

Key words: evaporative fractionation; biodegradation; QHD29-2 oil field; multi-layer composite reservoir; Qinnan Sag; Bohai Sea

自 20 世纪 80 年代末开始,油气在成藏过程中的“蒸发分馏”现象就引起了国内外学者的广泛关

注和研究^[1-14],它对于油气性质及其组分具有较强的次生改造作用,在凝析油成因机制中的作用更是

值得关注^[4,7],但在渤海海域的油气勘探中却鲜有研究。“生物降解”作用同样对于原油性质及其组分具有较强的次生改造作用,是稠油最重要的一种形成机制^[15-19],自 20 世纪 70 年代有报道以来一直是国内外的研究热点,国内有关生物降解稠油的研究正是从渤海湾盆地辽河油田开始^[20],之后有关研究多有报道,渤海海域有关生物降解稠油研究也有少许报道^[21-22]。蒸发分馏作用是自下而上的,多见于深层;而生物降解作用则基本全部见于浅层,两者均需要较为严苛的地质条件。因此,蒸发分馏与生物降解现象在油气藏中往往是独立存在,难以出现在同一油气藏中。即使在多层系复合油藏广布的渤海湾盆地,目前为止也尚未见到蒸发分馏和生物降解共同作用于同一油气藏的报道。正因如此,少有学者将二者一并综合研究。

秦皇岛 29-2 油田是中—大型优质商业油气藏,位于渤海海域的秦南凹陷南部,西块和东块分别发现于 2009 年和 2012 年,单井油层厚度和最大油层厚度可达 218.4 m 和 133.7 m,测试平均日产原油和天然气分别为 900 t 和 $12.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,是渤海海域碎屑岩的产能之最^[23]。秦皇岛 29-2 油田不仅规模大、油层厚,而且同时具有凝析油、正常原油和稠油 3 种类型原油,原油类型复杂、物性多变。本文以秦皇岛 29-2 新近系和古近系复合成藏的油田为研究对象,从深层和浅层共选择了 12 个原油样品(古近系 10 个、新近系 2 个),对其物理性质、油源特征、族组成、碳同位素、饱和烃 GC/MS 和成藏期次等进行研究,综合分析秦皇岛 29-2 油藏中的原油变化规律及主控因素。

1 区域地质背景

秦皇岛 29-2 构造位于渤海海域石臼坨凸起的东倾末端的北侧边界断层下降盘,凸起北部紧邻秦南凹陷次级洼陷(秦南凹陷东南洼),南部为渤中凹陷。构造内部古近系发育有依附边界断层和地层尖灭的圈闭,新近系则主要发育断背斜圈闭。秦皇岛 29-2 构造地层发育完整,自下而上依次发育了古近系的沙河街组和东营组、新近系的馆陶组和明化镇组、第四系的平原组(图 1)。油气主要分布在沙一、二段(E_2s_{1+2})、馆陶组(N_1g)和明化镇组(N_1m),其中又以沙一、二段为主,约占总储量的 85%。

2 油藏特征

2.1 原油物性特征

秦皇岛 29-2 油气田原油类型多样,根据原油样品的密度和黏度特征,可将本区原油自下而上分为特稠油、轻质油、凝析油和稠油 4 种类型原油。特稠油位于整个油藏底部,密度($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 1.03 g/cm^3 ,黏度($50 \text{ }^\circ\text{C}$) $68\,940.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,含蜡量 10.96%,胶质含量 11.95%,沥青质含量高达 25.07%,凝固点 $39 \text{ }^\circ\text{C}$,为高蜡、多胶、高凝特稠油;轻质油主要分布在沙一、二段,少量在馆陶组,密度 $0.815 \sim 0.872 \text{ g/cm}^3$,黏度 $2.71 \sim 15.76 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,含蜡量 14.98%~25.22%,胶质含量 3.28%~5.96%,沥青质含量 $0.62\% \sim 5.48\%$,凝固点 $21 \sim 32 \text{ }^\circ\text{C}$,为高蜡、少胶、高凝轻质油;凝析油主要分布在古近系气顶气之下、轻质原油之上,密度 $0.759 \sim 0.777 \text{ g/cm}^3$,含蜡量 $5.72\% \sim$

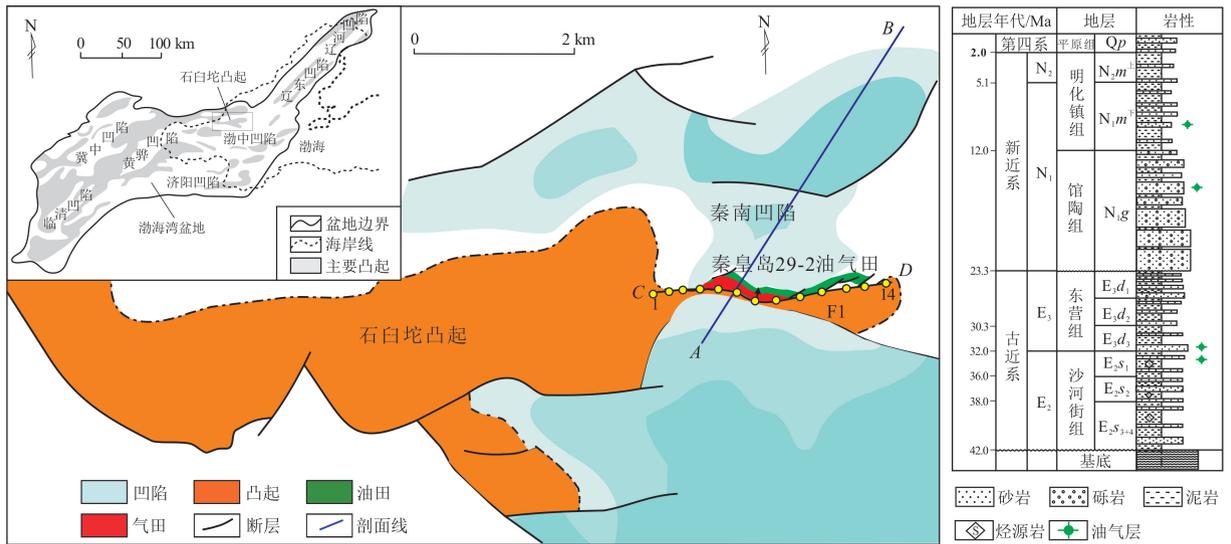


图 1 渤海海域秦皇岛 29-2 油气藏位置及地层剖面

Fig.1 Location of QHD29-2 reservoir and stratigraphic section in the Bohai Sea area

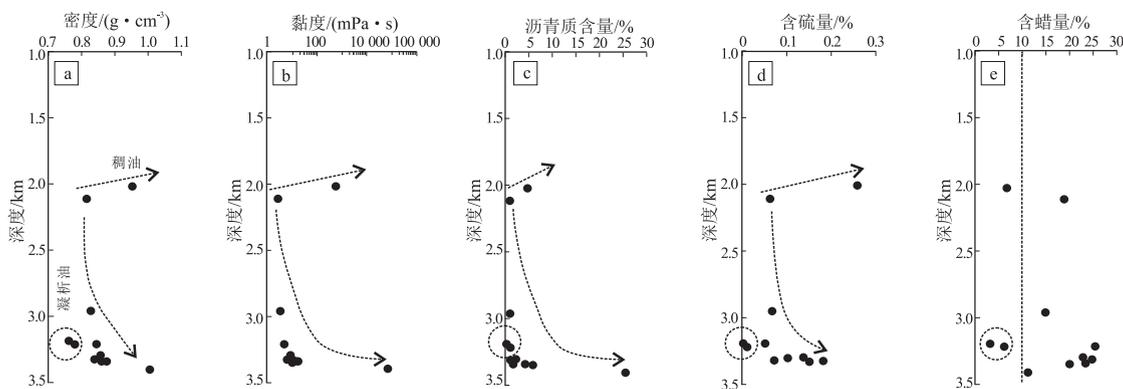


图2 渤海海域秦皇岛29-2油田原油物性特征

Fig.2 Physical characteristics of crude oils of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

6.26%, 胶质含量 0.05%~0.73%, 沥青质含量 0~0.1%, 凝固点为 4~7 °C, 为中蜡、少胶、中凝凝析油; 稠油分布在复合油藏最上部, 位于新近系馆陶组和明化镇组, 原油密度 0.951 g/cm³, 黏度 533.5 mPa·s, 含蜡量为 6.67%, 胶质含量 14.33%, 沥青质含量 4.42%, 凝固点为 -7 °C, 为中蜡、中胶、低凝稠油。从空间分布来看, 轻质油分布层位最广最厚, 其密度、黏度从深层油层(古近系)向浅层(馆陶组)逐渐降低, 浅层向上、深层向下原油密度和黏度增加变为稠油(图2), 轻质油的规律性和稠油的异常性反映了次生蚀变作用的影响。

2.2 油源特征

秦南凹陷是渤海湾盆地一个中小型凹陷, 其烃源岩特征与渤海湾盆地基本一致, 共发育沙三段(E₂s₃)、沙一段(E₂s₁)和东三段(E₃d₃)3套烃源岩^[24-25]。沙三段沉积期湖盆处于强裂陷期, 快速沉降导致水体加深, 连通性变好、水动力变弱、补给充足, 稳定水体分层容易形成, 半咸水—淡水的水体促使湖相藻类勃发, 其中沟鞭藻大量发育可以形成高丰度的C₃₀4-甲基甾烷^[26-27]。沙一段沉积期湖盆处于裂陷热沉降期, 构造整体抬升、水体变浅、断裂活动弱, 气候干旱、补给不足, 微咸水—咸水的水体易形成盐跃层, 造成强还原环境, 发育耐盐性生物致使伽马蜡烷丰富。东三段沉积期湖盆处于较强裂陷期, 显著增加的沉降速率导致水体加深、湖盆扩张, 水体为淡水, 不仅藻类发育, 陆源高等植物同样发育。由于沙三段和沙一段烃源岩发育时期藻类十分丰富, 其有机质来源主要为水生低等生物, 而陆源有机质输入则较有限, 因此, 渤海湾盆地沙三段和沙一段烃源岩有机质类型相对更好一些。

钻井资料证实, 秦南凹陷发育有古近系沙三段、沙一段和东三段3套烃源岩。沙三段为Ⅱ₁-Ⅱ₂型好—优质烃源岩, 厚度最大, 成熟度高; 沙一段为

Ⅱ₁-Ⅰ型优质烃源岩, 厚度最小, 成熟度较低; 东三段为Ⅱ₁-Ⅱ₂型中—好烃源岩, 厚度较大, 成熟度低或未熟。沙三段烃源岩生标特征表现为高C₃₀4-甲基甾烷和低伽马蜡烷; 沙一段烃源岩生标特征表现为较低C₃₀4-甲基甾烷和高伽马蜡烷; 东三段烃源岩生标特征表现为低C₃₀4-甲基甾烷和低伽马蜡烷。

从原油色谱—质谱分析来看(图3), 秦皇岛29-2油气田无论深层还是浅层原油均表现为中等C₃₀4-甲基甾烷和中等伽马蜡烷的特征, 具有相同的母质来源和沉积环境。结合烃源岩生标特征和烃源岩演化程度可以推测, 研究区原油来自于紧邻的秦南凹陷南洼沙三段和沙一段烃源岩混源的贡献, 但以沙三段为主, -26.7‰左右的全油碳同位素特征同样印证了这一点。这与前人认识的研究区原

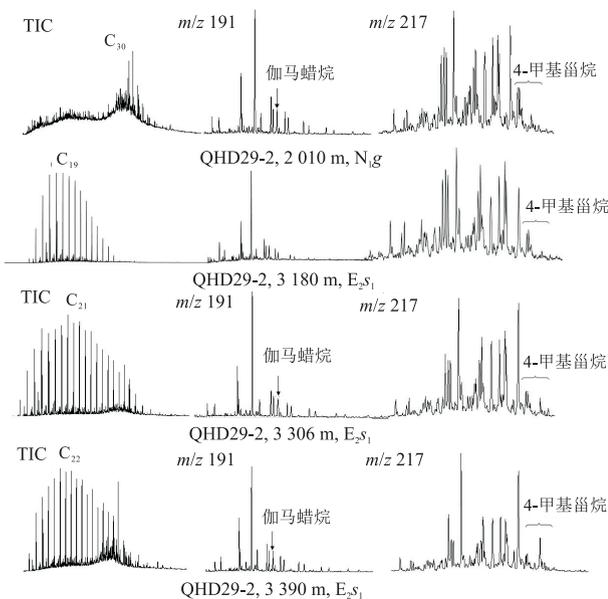


图3 渤海海域秦皇岛29-2油田原油饱和烃质量色谱
Fig.3 Gas chromatography-mass spectrometry of crude oils of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

油来自秦南凹陷沙三段烃源岩的观点略有不同^[28]。

3 油藏形成机制

3.1 蒸发分馏作用

蒸发分馏是气态物质从油藏中分离出来的复杂的动态过程,其形成的油气藏类型多样,但其发生的必要地质条件是在剥蚀作用或断裂活动下原生油气藏的封闭能力降低,从而导致油气藏中大量气体析出或大量外源气进入,之后气体携带低—中等分子量的烃类化合物沿运移通道向上运移,形成气顶或在异处形成新的油气藏。因此,经历过蒸发分馏作用的油气藏在纵向上具有独特的、规律性的地球化学特征。秦皇岛 29-2 原油地球化学特征与油气藏地质特征的响应关系表明,蒸发分馏作用机制是研究区原油纵向分布特征的主控因素。

3.1.1 蒸发分馏的地球化学证据

(1)成熟度特征。从成熟度参数 $T_s/(T_s+T_m)$ 、 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 来看,研究区原油从深到浅成熟度逐渐增大,且均为成熟油(图 4a-c),这与属于典型的蒸发分馏成因的南八仙油气田浅层原油成熟度较深层偏高相似^[29]。造成这种现象一方面是由于同一油藏中在分馏作用下低密度的高成熟油气向顶部聚集,高密度的低成熟度油向油藏下部聚集;另一方面可能是由于埋深更浅、成熟度较低沙一段烃源岩生成的油从深到浅混入量不断减少造成的。

根据研究区原油和烃源岩成熟度参数 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 得出原油相对对应烃源岩的 R_o 应为 0.71%~0.72%^[28]。根据 MPI-1 (甲基菲指数)推测西区浅层原油对应烃源岩的 R_o 应为 0.69%,深层为 0.84%~0.99%;东区浅层为 0.64%,深层为 1.02%~1.18%。根据 MPI-3 推测西区浅层原油对应烃源岩的 R_o 为 0.86%,深层为 1.01%~1.02%;东区浅层为 0.77%,深层为 0.98%~1.03%(表 1)。整体上浅层原油 3 种方法推测的 R_o 基本接近,而深层相差较远,考虑到沙一段低成熟度油对古近系油藏从下到上的混入作用,其对应烃源岩 $R_o \approx 1\%$,深、浅层原油对应的烃源岩 R_o 均未超过 1.2%,低于热裂解成因 $R_o = 1.3\%$ 的门限。因此,研究区气顶气系深层原油蒸发分馏作用的产物,与高温热解成因无关。

(2)族组成及饱和烃色谱特征。相同温压条件下,原油的不同组分溶解于气、液两相中的比例不同,饱和烃易溶于气相,而芳烃则易溶于油相^[30]。因此,饱和烃和芳烃差异溶解会导致自下而上的蒸发分馏过程中饱和烃含量和饱芳比会逐渐增大。研究区深层原油饱和烃含量 44.4%~68.4%、饱芳比 2.28~5.41,浅层原油饱和烃含量高达 73.7%~74.5%、饱芳比 6.08~6.41,饱和烃含量和饱芳比整体上呈现从深到浅逐渐增大的趋势(图 4d)。此外,原油自下而上主峰碳逐渐降低反映成熟度逐渐升高(图 3),浅层原油仅靠来自 $R_o \approx 0.7\%$ 的烃源

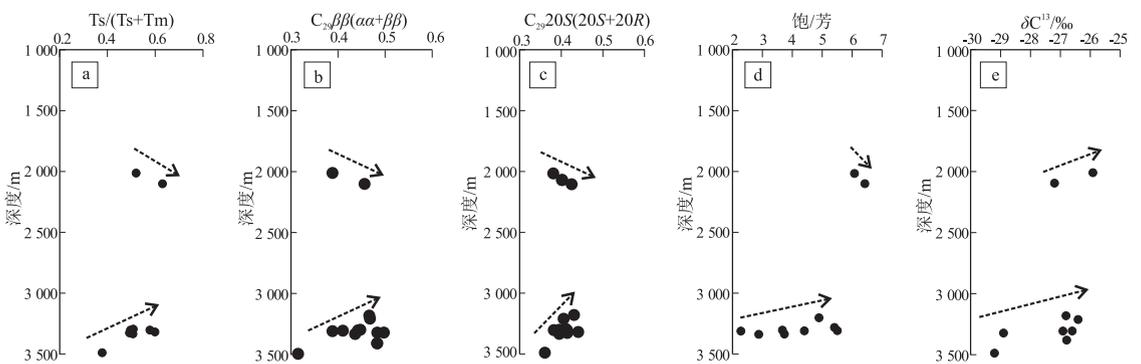


图 4 渤海海域秦皇岛 29-2 油田原油及油砂抽提物地球化学特征

Fig.4 Geochemical characteristics of crude oils and oil sandstone extracts of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

表 1 渤海海域秦皇岛 29-2 油田原油样品成熟度参数

Table 1 Maturity parameters of crude oils of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

位置	MPI-1	$R_{o1}/\%$	MPI-3	$R_{o3}/\%$	T_s/T_m	$C_{29} 20S/(20S+20R)$	$C_{29} \beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$
西区浅层	0.53	0.69	0.59	0.86	0.52	0.39	0.38
西区深层	0.78~1.03	0.84~0.99	1.11~1.14	1.01~1.02	0.49~0.58	0.39~0.44	0.38~0.41
东区浅层	0.45	0.64	0.31	0.77	0.63	0.46	0.42
东区深层	0.88~1.35	1.02~1.18	1.02~1.18	0.98~1.03	0.38~0.58	0.38~0.66	0.40~0.43

注:MPI-1 为甲基菲指数^[31]; $R_{o1} = (0.6MPI-1+0.37)/100$; MPI-3 为 $(3-+2-)/(9-+1-)$ 甲基菲; $R_{o3} = (0.3MPI-3+0.68)/100$ 。

岩生烃是难以达到近 75% 的饱和烃含量, 这些也反映了深、浅层原油受蒸发分馏的影响。

蒸发分馏作用由于原油重质组分长期向油藏底部沉淀, 易形成极性化合物(非烃+沥青质)含量较高的原油, 甚至形成沥青垫。秦皇岛 29-2 油藏底部有极性化合物含量达 44% 的原油(3 390 m), 其饱和烃色谱形态完整(图 3), 非常接近塔里木盆地牙哈、文留等油气藏沥青垫的 60%~90% 极性化合物含量。

(3) 全油碳同位素特征。基于重力分异原理, 重的物质“下沉”、轻的物质“上浮”, 蒸发分馏作用致使原油的全油与饱和烃的稳定碳同位素比其衍生的凝析油的全油与饱和烃轻^[1]。研究区深层原油全油碳同位素自下部轻质油的-29.2‰到上部凝析油的-26.4‰, 浅层轻质油为-27.2‰, 大体上从深到浅逐渐变重; 饱和烃碳同位素自下部轻质油的-30.0‰到上部凝析油的-26.8‰, 浅层轻质油为-27.6‰, 与全油碳同位素相似, 也是大体上从深到浅逐渐变重(图 4e)。

(4) 轻烃特征。THOMPSON 将关于“石油中芳香烃的分馏和凝析油的产生”的研究成果归纳成交会图(图 5), 纵座标为甲苯/正庚烷(Tol/nC_7)、横坐标为正庚烷/甲基环己烷($nC_7/MCYC_6$), 其中“蒸发分馏”用向量 A 表示^[1]。研究区原油基本沿蒸发分馏作用的演化曲线分布(图 5), 表明原油经历过不同程度的蒸发分馏作用。其中, 浅层气侵分馏程度高, 残留油中的轻芳香烃含量高, Tol/nC_7 为 4.9~6.9, 平均 5.9; 深层气侵分馏程度略低, Tol/nC_7 为 0.06~4.5, 平均 0.65。

3.1.2 蒸发分馏发生的地质条件

油藏区大规模的剥蚀事件往往被认为是蒸发分馏作用发生的重要原因^[2], 但地质分析表明研究区在油气成藏过程中及之后不存在大规模剥蚀事件。研究中对储层包裹体均一温度统计结果表明, 古近系油藏内样品均一温度具有双峰特征, 主要分布在 95~135 °C, 表明古近系内油藏至少存在 2 期成藏; 新近系油藏内样品均一温度主要分布在 75~90 °C, 具单峰特征, 指示新近系油藏可能具有单期成藏特征(图 6)。结合研究区埋藏史分析表明, 该油藏整体为晚期成藏, 其古近系内油藏成藏期均在约 4.5 Ma 至今; 新近系内油藏成藏期约为 2 Ma 至今(图 6)。而埋藏史分析表明, 油气田的主成藏期内(4.5 Ma 至今)并没有大规模的剥蚀事件发生(图 6)。进一步分析表明, 区内断裂活动导致的 CO_2 充注可能是引起蒸发分馏的主因。

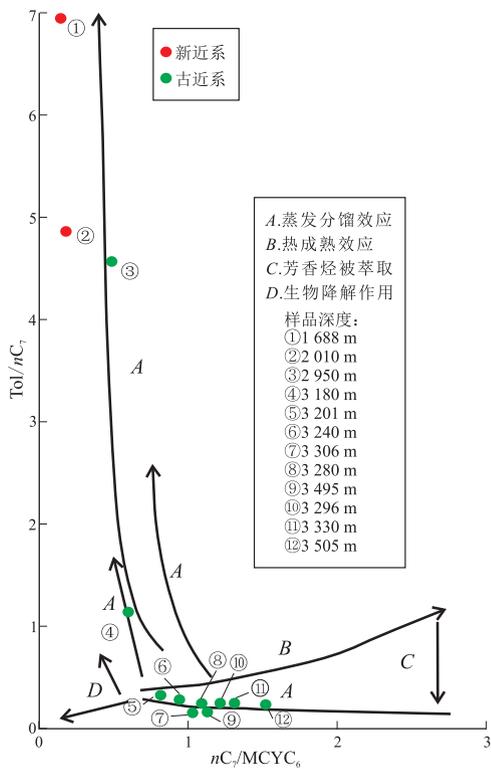


图5 渤海海域秦皇岛 29-2 油田原油次生变化模式
图版来自参考文献[1]。

Fig.5 Trend of secondary alteration of crude oils of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

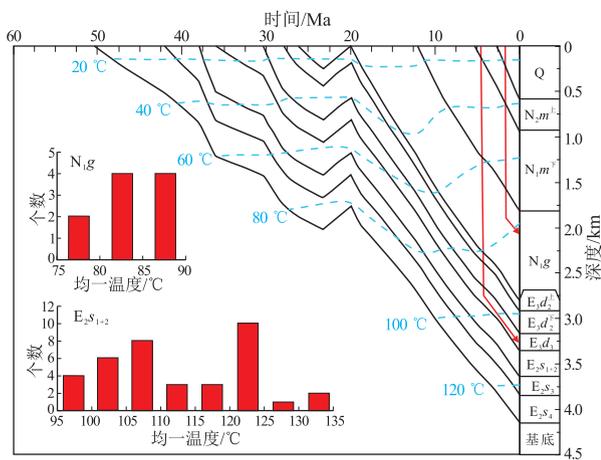


图6 渤海海域秦皇岛 29-2 油田埋藏史及成藏期
Fig.6 Burial history and pool-forming period of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

秦皇岛 29-2 油气田气顶气成分中含有 CO_2 , 其含量 43.93%~90.61%, 平均约 57.82%。本次选取 2 个气样对其中的 CO_2 进行碳同位素测定, 测得碳同位素分别为 -5.2‰ 和 -6.4‰, 处于无机成因 CO_2 的主要分布范围内 (-8‰~3‰)^[32], $^3He/^4He$ 比值分别为 6.21 和 5.49, R/Ra 比值分别为 4.44 和 3.92, $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值分别为 334.7 和 299.7, 具有明显的岩浆—幔源成因特征(表 2)。另外, 在沙一二

表 2 渤海海域秦皇岛 29-2 井天然气样品同位素组成
Table 2 Composition of natural gas isotopes of well QHD29-2 in the Bohai Sea area

深度/ m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}/\text{‰}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/Ra	He/%	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
3 301~3 308	-5.2	6.21	4.44	0.57	334.7
3 195~3 218	-6.4	5.49	3.92	0.87	299.7

段储层中发现 CO_2 气体包裹体与油气包裹体共生, 并且激光拉曼检测出 CO_2 气体包裹体中含有 CH_4 烃类气, 反映出两者同时期充注的特点, 结合成藏期沟通幔源的油源断裂 F1 的强烈活动(图 7), 可以推测断裂活动导致的幔源 CO_2 气体强烈气侵是引起蒸发分馏的主因。

3.2 生物降解作用

生物降解是研究区浅层原油变稠的主要原因, 一般而言, 埋深越浅生物降解作用越强烈, 其影响体现在原油的物理性质、化学性质、碳同位素等各个方面。浅层原油随着埋深变浅, 原油的密度、黏度越来越大(图 2a, b), 由于生物降解消耗了更多低分子量的饱和烃和芳烃, 因此, 沥青质和硫含量越来越大, 含蜡量则越来越小(图 2c-e)。浅层原油(2 010 m)油藏温度低于 $80\text{ }^\circ\text{C}$, 遭受了一定程度的生物降解作用, 色谱中显示轻组分基本消耗殆尽, 而色谱—质谱中则显示甾烷、藿烷系列依然保持完整, 根据生物降解等级划分标准可以将其归为 4~5 级(图 3)。生物降解稠油研究和原油细菌降解实验认为, 与同源正常原油相比, 被降解原油的烷烃富集重同位素^[33]。研究区浅层原油在蒸发分馏作用机制下, 普遍具有较高的饱和烃含量, 且组分较轻, 生物降解作用对于浅层原油的降解在一定程度上等同于对其饱和烃的降解, 因此其全油碳同位素和饱和烃碳同位素相对于未降解浅层原油急剧加重, 全油碳同位素正常浅层原油为 -27.2‰ , 而生物降解油则为 -25.9‰ (图 4e)。蒸发分馏作用导致

的饱和烃轻质组分含量高的原油晚期持续向浅层充注, 因此, 浅层原油生物降解程度低, 饱和烃含量高, 碳同位素变重幅度大。

4 油气成藏模式

前已述及, 秦皇岛 29-2 油气藏原油物性受控于蒸发分馏作用和生物降解作用, 查明这 2 种作用在油气成藏时期的先后, 对于深入认识该油气藏的成藏机制和分布规律具有重要意义。综合构造演化、烃源岩热成熟特征、成藏期分析, 可建立秦皇岛 29-2 油气藏的以下 4 个阶段的运聚成藏模式(图 7):

(1) 古近系沉积时期(65~23.3 Ma), 盆地拉张断陷, 秦南凹陷南洼烃源岩成熟度低, 深、浅层圈闭还未形成, 幔源物质上涌, 沿断裂 F1 上来的 CO_2 气体散失, 无油气聚集。

(2) 新近系馆陶组沉积时期与明化镇组沉积早中期(23.3~4.5 Ma), 盆地进入拗陷期, 部分沙三段烃源岩开始成熟排烃, 深层圈闭初步形成, 浅层圈闭还未形成, 但受断裂长期活动影响, CO_2 气体与早期较少的油气散失。

(3) 明化镇组沉积晚期(4.5~2 Ma), 沙一段烃源岩开始成熟, 部分沙三段烃源岩大规模排烃, 深层圈闭定型, 浅层圈闭初步形成, CO_2 气体与油气沿 F1 断裂活动性较强的东、西两侧同期注入深层圈闭, 并在活动性弱的中部地区保存下来形成以沙三段供烃的油气藏(图 1), 且 CO_2 气体对油藏初步进行蒸发分馏作用, 形成了稠油、轻质油、高 CO_2

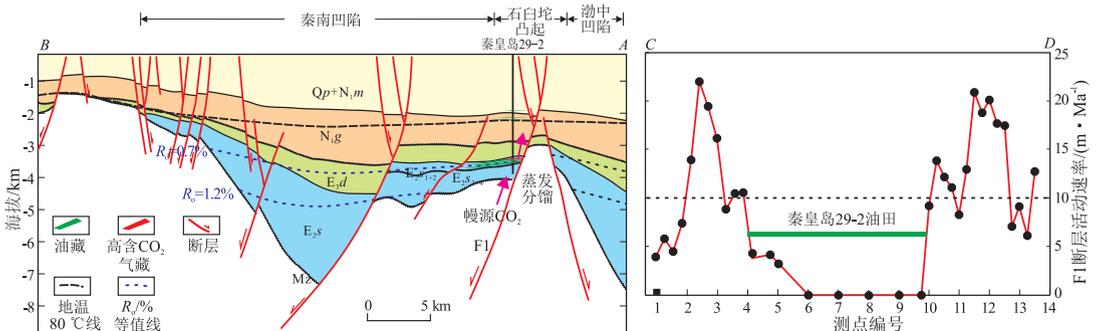


图 7 渤海海域秦皇岛 29-2 油田成藏模式(a)和断层 F1 活动速率(b)剖面位置见图 1。

Fig.7 Reservoir model (a) and displacement velocity of the fault F1 (b) of QHD29-2 oil field in the Bohai Sea area

含量烃类气组合的油藏,而浅层圈闭受断裂长期活动影响未成藏。

(4)平原组沉积时期(2 Ma 至今),沙一段烃源岩开始排烃,全部沙三段烃源岩大规模排烃且未进入生气阶段,深、浅层圈闭定型,CO₂气体与沙三段与沙一段混合供烃的油藏继续注入深层圈闭,受断裂活动影响早期的深层油气藏不断破坏调整至浅层圈闭成藏,CO₂气体对深层油藏持续进行蒸发分馏作用。因此,保存条件较好的深层圈闭形成特稠油、轻质油、凝析油和高 CO₂ 含量烃类气等多类型组合的油藏;而浅层圈闭先期接受 4.5~2 Ma 时期深层圈闭的轻质油和烃类气,但由于晚期派生断层发育保存条件差导致烃类气散失,浅层大部分油藏温度低于 80 °C,遭受生物降解而变稠,后期浅层稠油还持续接受深层圈闭调整而来的轻质油和凝析油的注入稀释,进而形成高饱和烃含量、轻烃相对完整,同时还遭受生物降解的稠油。

5 结论

(1)原油对比证实秦皇岛 29-2 古近系油藏与新近系油藏同源,但它们在轻烃组成、族组成和饱和烃色谱分布上存在显著差异,表明经历了强烈的蒸发分馏作用。结合该区烃源岩热演化、成藏期次和断裂活动史认为,幔源 CO₂ 气体侵入引起了该区蒸发分馏作用。

(2)蒸发分馏和生物降解作用联合控制着该油气藏的原油物性差异分布,从深到浅依次分布着特稠油、轻质油、凝析油和稠油,深、浅层油藏整体受控于前者,从深到浅原油物性逐渐变好,饱和烃含量、饱芳比逐渐增加,全油碳同位素及饱和烃碳同位素逐渐变重;浅层油藏同时受控于后者,造成饱和烃和轻芳香烃含量高与饱和烃色谱轻组分降解现象共存。

(3)2 种作用共存于同一油藏,既需要有已遭受蒸发分馏影响的先存深层油藏,也需要后成藏的浅层油藏遭到生物降解的同时,接受先存油藏的晚期持续充注。值得注意的是,如果浅层成藏时期过早或持续性较差,其轻烃组分和高饱和烃含量等蒸发分馏的直接证据则难以保存,原油的生物降解程度大幅提升,以至于掩盖蒸发分馏作用的存在。

参考文献:

[1] THOMPSON K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbon[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(2): 303-316.

[2] THOMPSON K F M. Fractionated aromatic petroleum and the generation of gas-condensates[J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(6): 573-590.

[3] DZOU L I P, HUGHES W B. Geochemistry of oils and condensates, K Field, offshore Taiwan: A case study in migration fractionation[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(4): 437-462.

[4] 马柯阳. 凝析油形成新模式: 原油蒸发分馏机制研究[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(6): 567-571.

MA Keyang. Study on petroleum evaporative fractionation: A new mechanism for the generation of condensate [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(6): 567-571.

[5] 马柯阳, 范璞. 塔北沙 18 井石炭系蒸发分馏成因凝析油确认的地球化学证据[J]. *科学通报*, 1995, 40(19): 1785-1787.

MA Keyang, FAN Pu, WANG Hongshan. Geochemical evidence for the recognition of the Carboniferous condensate by evaporative fractionation from Tabei Sha-18 well [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(5): 405-409.

[6] MEULBROEK P, CATHLES L, WHELAN J. Phase fractionation at South Eugene Island Block 330 [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(1/3): 223-239.

[7] 张水昌. 运移分馏作用: 凝析油和蜡质油形成的一种重要机制[J]. *科学通报*, 2000, 45(6): 667-670.

ZHANG Shuichang. The migration fractionation: An important mechanism in the formation of condensate and waxy oil [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(4): 1341-1344.

[8] MIDDLETON D, PARNELL J, CAREY P, et al. Reconstruction of fluid migration history Northwest Ireland using fluid inclusion studies [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69/70: 673-677.

[9] MASTERS W D, DZOU L I P, HOLBA A G, et al. Evidence for biodegradation and evaporative fractionation in West Sak, Kuparuk and Prudhoe Bay field areas, North Slope, Alaska [J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(3): 411-441.

[10] 朱扬明, 苏爱国, 梁狄刚, 等. 柴达木盆地北缘南八仙油气藏的蒸发分馏作用[J]. *石油学报*, 2003, 24(4): 31-35.

ZHU Yangming, SU Aiguo, LIANG Digang, et al. Evaporative fractionation of oil and gas reservoir in Nanbaxian area of northern Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(4): 31-35.

[11] 苏爱国, 朱扬明, 梁狄刚, 等. 青海柴达木盆地南八仙油气田油源与成藏机理[J]. *地球化学*, 2003, 32(4): 393-399.

SU Aiguo, ZHU Yangming, LIANG Digang, et al. Source of oils and mechanism of reservoir formation of the Nanbaxian oil and gas field, Qaidam Basin, Qinghai Province, China [J]. *Geochimica*, 2003, 32(4): 393-399.

[12] 傅宁, 李友川, 陈桂华, 等. 东海西湖凹陷油气“蒸发分馏”成藏机制[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(2): 39-42.

FU Ning, LI Youchuan, CHEN Guihua, et al. Pooling mechanisms of “evaporating fractionation” of oil and gas in the Xihu Depression, East China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(2): 39-42.

[13] 何文祥, 王培荣, 潘贤庄, 等. 莺-琼盆地原油的蒸发分馏作用[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(4): 52-54.

HE Wenxiang, WANG Peirong, PAN Xianzhuang, et al. Evapo-

- rative fractionation of crude oils in the Ying-Qiong Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(4): 52-54.
- [14] 蔡忠贤, 吴楠, 杨海军, 等. 轮南低凸起凝析气藏的蒸发分馏作用机制[J]. *天然气工业*, 2009, 29(4): 21-24.
- CAI Zhongxian, WU Nan, YANG Haijun, et al. Mechanism of evaporative fractionation in condensate gas reservoirs in Lunan low salient [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(4): 21-24.
- [15] 彼得斯 K E, 沃尔斯特 C C, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南 [M]. 张水昌, 李振西, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- PETER K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide [M]. ZHANG Shuichang, LI Zhenxi, transl. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [16] PETERS K E, MOLDOWAN J M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum [J]. *Organic geochemistry*, 1991, 17(1): 47-61.
- [17] 陈建平, 王兴谋, 高长海, 等. 东营凹陷林樊家地区稠油特征及成因机制[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(5): 8-11.
- CHEN Jianping, WANG Xingmou, GAO Changhai, et al. Heavy-oil properties and genetic mechanisms in Linfanjia of Dongying Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(5): 8-11.
- [18] 林军章, 冯云, 谭晓明, 等. 生物成因稠油与伴生气形成过程模拟研究: 以林樊家地区浅层气和稠油为例[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(2): 85-89.
- LIN Junzhang, FENG Yun, TAN Xiaoming, et al. A simulation experiment of formation of biodegraded heavy oil and associated gas: A case of shallow gas and heavy oil in Linfanjia area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(2): 85-89.
- [19] 李守军, 刘晓, 王延章, 等. 哈山地区稠油特征及成因分析[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(4): 29-32.
- LI Shoujun, LIU Xiao, WANG Yanzhang, et al. Heavy-oil properties and genesis in Hashan [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(4): 29-32.
- [20] 邱桂强, 李素梅, 庞雄奇, 等. 东营凹陷北部陡坡带稠油地球化学特征与成因[J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 854-862.
- QIU Guiqiang, LI Sumei, PANG Xiongqi, et al. Characteristics and genetic mechanisms of heavy oils on the north steep slope of the Dongying Depression in the Bohai Bay Basin, East China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 854-862.
- [21] 邓运华. 渤海油区稠油成因探讨[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 361-364.
- DENG Yunhua. A discussion on the origin of heavy oil in Bohai oil province [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(6): 361-364.
- [22] 郭永华, 周心怀, 李建平, 等. 渤海海域新近系稠油油藏原油特征及形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 375-380.
- GUO Yonghua, ZHOU Xinhua, LI Jianping, et al. Crude features and origins of the Neogene heavy oil reservoirs in the Bohai Bay [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 375-380.
- [23] 魏刚, 薛永安, 柴永波, 等. 秦南凹陷油气勘探思路创新与突破[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(3): 7-11.
- WEI Gang, XUE Yong'an, CHAI Yongbo, et al. Philosophy innovations and a breakthrough in petroleum exploration in Qinnan Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(3): 7-11.
- [24] 赖维成, 徐长贵, 王晓刚, 等. 秦南凹陷古近系层序地层和沉积体系研究及油气勘探方向探讨[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(5): 300-305.
- LAI Weicheng, XU Changgui, WANG Xiaogang, et al. A study on Paleogene sequence stratigraphy and sedimentary systems and a discussion on hydrocarbon exploration directions in Qinnan Depression [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2007, 19(5): 300-305.
- [25] 庄新兵, 邹华耀, 李楠, 等. 秦南凹陷烃源岩特征与油气勘探新领域[J]. *断块油气田*, 2011, 18(2): 146-149.
- ZHUANG Xinbing, ZOU Huayao, LI Nan, et al. Characteristics of source rock and new region of oil and gas exploration in Qinnan Sag [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(2): 146-149.
- [26] 包建平, 张功成, 朱俊章, 等. 渤中凹陷原油生物标志物特征与成因类型划分[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(1): 11-18.
- BAO Jianping, ZHANG Gongcheng, ZHU Junzhang, et al. Biomarker composition and origin classification of crude oil in Bozhong Sag, Bohai Sea. [J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 2002, 16(1): 11-18.
- [27] 杨永才, 李友川. 渤海湾盆地渤中凹陷烃源岩地球化学与分布特征[J]. *矿物岩石*, 2012, 32(4): 65-72.
- YANG Yongcai, LI Youchuan. The geochemical characteristics and distribution of source rocks of the Bozhong Sag in the Bohai Bay [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(4): 65-72.
- [28] 杨海风, 魏刚, 王德英, 等. 秦南凹陷秦皇岛 29-2 油气田原油来源及其勘探意义[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(6): 28-31.
- YANG Haifeng, WEI Gang, WANG Deying, et al. Oil sources and exploration significance of Qinhuangdao 29-2 oil-gas field [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(6): 28-31.
- [29] 颜永琛, 关平, 杨国军, 等. 南八仙油气田成藏机理再认识[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(5): 876-883.
- XIE Yongchen, GUAN Ping, YANG Guojun, et al. Reanalysis of reservoir accumulation mechanism in Nanbaxian oil-gas field [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(5): 876-883.
- [30] PRICE L C, WENGER L M, GING T, et al. Solubility of crude oil in methane as a function of pressure and temperature [J]. *Organic Geochemistry*, 1983, 4(3/4): 201-221.
- [31] RADKE M. Organic geochemistry of aromatic hydrocarbons [M] // BROOKS J, WELTE D, eds. *Advance in Petroleum Geochemistry*. London: Academic Press, 1987: 141-207.
- [32] 戴金星, 傅诚德, 关德范. 天然气地质研究新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- DAI Jinxing, FU Chengde, GUAN Defan. New development of nature gas geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [33] 刚文哲, 林壬子. 应用油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- GANG Wenzhe, LIN Renzi. Applied oil and gas geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.