

渤海海域莱州湾凹陷高硫稠油成因及其成藏模式

汤国民,王飞龙,王清斌,万琳,燕歌

[中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院,天津300452]

摘要:现今渤海海域仅在莱州湾凹陷发现了规模型高硫油田,其原油性质复杂,来源及成因认识不清。在大量实验数据分析的基础上,利用地球化学分析方法和盆地模拟手段对莱州湾凹陷各油田油气来源及成因做了详细研究,结果表明:①莱州湾凹陷主要发育了沙三段和沙四段两套有效的烃源岩,陡坡带和中央构造带上各构造原油主要来源于主洼沙四段烃源岩,缓坡带上各构造原油表现为主洼沙四段和南次洼沙四段双洼供烃的特征;②沙四段地层沉积时期存在水体分隔,南次洼水体更加咸化易形成富硫干酪根,其烃源岩分布范围控制着高硫油的分布范围,是高硫油形成的主控因素。而生物降解作用,一方面导致原油稠化是形成稠油的主要原因,另一方面使原油硫含量相对富集,是形成高硫油的重要因素;③垦利16-1油田具有晚期成藏的特点,形成了咸化湖盆早生、早排双洼供烃成藏模式,深、浅地层成藏模式不同,深部地层为典型不整合面侧向输导远源成藏模式。认为南次洼南部古近系地层和潜山优质储层是油气聚集的有利区带,可作为下一步油气勘探的有利方向。

关键词:油源;烃源岩;生物标志化合物;成藏模式;高硫稠油;莱州湾凹陷

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Genesis and accumulation models of sulfur-rich heavy oil in Laizhou Bay Sag, Bohai Sea

Tang Guomin, Wang Feilong, Wang Qingbin, Wan Lin, Yan Ge

(Exploration and Development Research Institute of Bohai Oil Field, Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300452, China)

Abstract: In Bohai Sea, large-scale high-sulfuric oilfields are only found in Laizhou Bay Sag. The crude oil properties in this area are complex, and the source and genesis of oil here are not clearly understood. We made a detailed study on the hydrocarbon sources and genesis of oilfields in Laizhou Bay Sag by means of geochemical analysis and basin simulation, and incorporating a large number of experimental data. The results show that (1) there are two sets of effective source rocks developed in the sag, namely the Es³ and Es⁴. Oils in the steep slope belt and central tectonic belt were derived from Es⁴ source rocks in the main sag, while oils in the gentle slope belt originated from the Es⁴ source rocks both in the main sag and in the south subsag. (2) During Es⁴ sedimentary period, the waters of Laizhou Bay Sag were not connected, so that the south subsag waters were prone to become saline to produce sulfur-rich kerogens. Thus, the distribution of Es⁴ source rocks in the south subsag controls the distribution of high-sulfuric oil, serving as the major controlling factor for generating high-sulfuric oil. In addition, microbial degradation can lead to the thickening of crude oil, and cause the relative enrichment of sulfur in crude oil. (3) Kenli 16-1 oilfield is characteristic of late-stage hydrocarbon accumulation, with a hydrocarbon accumulation model of saline lacustrine basins featuring early generation, early expulsion, and dual-sag hydrocarbon charge. Meanwhile, the accumulation model of deep reservoirs is a typical example of a distal source charge through long distance oil migration along unconformity laterals, different from that of the shallow reservoirs. The Palaeogene formations in the southern south subsag and high reservoir quality buried-hill formations are regarded as favorable plays for hydrocarbon accumulation, which can be targeted for further oil and gas exploration.

Key words: oil source, source rock, biomarker compound, accumulation model, high-sulfuric heavy oil, Laizhou Bay Sag

收稿日期:2018-02-23;修订日期:2018-12-08。

第一作者简介:汤国民,男,(1987—),工程师,石油地质综合研究及地球化学。E-mail: tgm610@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-002, 2016ZX05024-003-005)。

对于高硫油的研究起源于20世纪,在80年代引起石油地质学家的重大关注,至现今国外对高硫油的地球化学特征及成因已经做了一定研究^[1-3]。中国目前在济阳拗陷、冀中拗陷、东濮拗陷、江汉盆地和苏北盆地等盐湖盆地中发现了高硫油,对其成因和成藏机理做了大量研究,可将高硫的成因总结为以下4种^[4-10]: ① 原生成因,这类高硫油主要受母源条件控制,硫元素主要以有机硫的形式存在与富硫干酪根里,其中噻吩类化合物是较为普遍的含硫化合物,与原油中硫的含量关系密切; ② 热化学改造,目前烃源岩热演化程度对原油硫含量的影响尚不明确,但是在未熟油中硫多以硫醇和二硫化物等形式存在,在成熟油中多以相对稳定的噻吩化合物存在; ③ 次生变化,多以微生物降解作用为主,可以导致原油硫含量的提升,但很难造成大幅提升; ④ 硫酸盐热化学还原作用,简称TSR作用,此变化多发生在油藏形成后期,但是对油藏温度有较高要求,不同学者对温度下线认识各有不同,一般温度至少要不低于120℃,这种成因的高硫油现今多发现于塔里木油田。

目前渤海海域已发现的油田多为常规原油,高硫原油发现较少,仅在黄河口凹陷发现一定量高硫油,但规模不大,对其研究较少,局限于原油特征和运移方向的研究^[4],尚未对高硫油的成因及成藏做过研究。随

着垦利16-1大中型高硫油油田的成功发现,再次引起渤海海域对高硫油的重视,因此弄清垦利16-1高硫油的来源、成因及成藏模式对下一步渤海海域油气勘探具有重要的指导意义。

1 研究概况

莱州湾凹陷位于渤海海域南部,由郯庐断裂的东支和西支夹持,北部紧邻莱北低凸起,南部紧靠潍北凸起,凹陷整体为北断南超的构造样式^[11-13]。凹陷内部可分为2个洼陷和3个构造带,洼陷包括北部主洼和南次洼,构造带由北向南分别为北部陡坡带、中央构造带和南部缓坡带。勘探早期油气发现主要集中的北部陡坡带,发现了KL10-1大中型油气田,中央构造带也有零星发现,但未形成规模型油气田,2016年KL16-1-c井的成功钻探发现了大套油层,再次打开了莱州湾凹陷勘探的新局面(图1)。

从目前探井揭示的地层来看,整个凹陷自下而上沉积了11套地层,其中古近系包括孔店组(E_k)、沙四段(Es^4)、沙三段(Es^3)、沙二段(Es^2)、沙一段(Es^1)、东三段(Ed^3)和东二下段(Ed^{2L}),新近系包括馆陶组(Ng)、明化镇组下段(Nm^L)、明化镇组上段(Nm^U)以及第四纪平原组。莱州湾凹陷主要以陆相沉积为主,

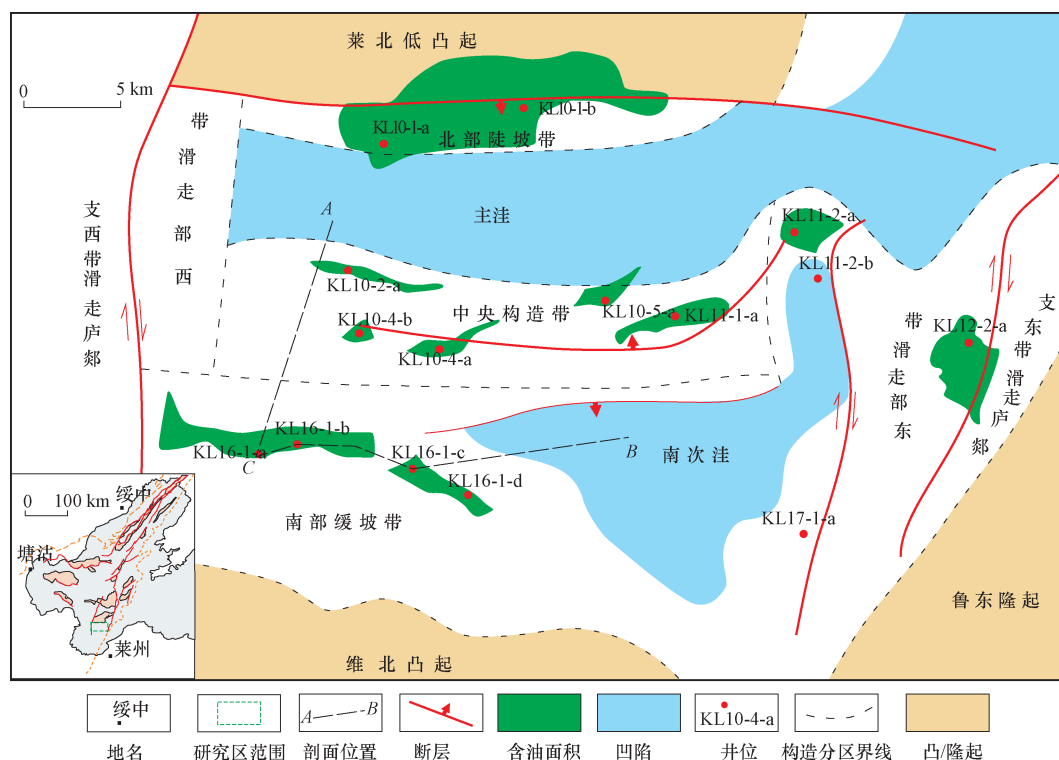


图1 莱州湾凹陷构造单元划分及勘探概况

Fig. 1 Division of structural units and exploration activities of the Laizhou Bay Sag

在沙河街组和东营组沉积时期,主要以湖泊相沉积为主,伴随有三角洲沉积,同时也是该地区烃源岩发育的主要时期,在馆陶组和明化镇组沉积时期则主要发育辫状河和曲流河沉积,发育了多套沉积砂体。

2 油源特征

2.1 原油基本性质

采用候读杰等(2011)^[14]原油性质的划分标准,莱州湾凹陷各构造已发现原油的性质分布广,原油密度为 $850.0 \sim 973.1 \text{ kg/m}^3$,平均值为 900 kg/m^3 ,从轻质油到重质油都有分布;原油粘度为 $6.5 \sim 2\,283.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,包括了普通原油和稠油;原油中的硫含量变化较大,为 $0.15\% \sim 3.00\%$,含硫量大于 1% 的高硫油主要集中在缓坡带上的垦利16-1油田,垦利11-2油田原油含硫量虽然也超过 1% 但未形成规模油藏,陡坡带和中央构造带上油田都为含硫量小于 1% 的低硫原油

展现出莱州凹陷各构造带原油性质的多样性、油气来源的广泛性和油气成藏的复杂性。

2.2 烃源岩特征

目前普遍认为渤海地区主要发育了沙四段、沙三段、沙一段和东三段4套烃源岩,但各套烃源岩品质和地球化学特征都存在巨大的差异性^[13,15]。利用莱州湾凹陷已钻遇烃源岩的实测数据,莱州湾凹陷烃源岩成熟度 R_o (镜质体反射率)大约在 $2\,100 \text{ m}$ 时达到 0.5% ,在 2850 m 时达到 0.7% (图2b)。结合盆模软件进一步分析得到各烃源岩层段 R_o 平面等值线图,莱州湾凹陷沙四段烃源岩成熟整体都达到 0.5% ,主洼和南次洼的主体部分都已达到 0.7% (图2a);沙三段烃源岩成熟度整体也都达到 0.5% ,主洼和南次洼的洼陷中心位置成熟度才到 0.5% (图2c);沙一段烃源岩整体埋深较浅,仅有主洼的东北部烃源岩成熟才达到 0.5% (图2d)。因此,认为莱州湾凹陷仅有沙四段和沙三段烃源岩成熟度达到生排烃阶段,可作为各构

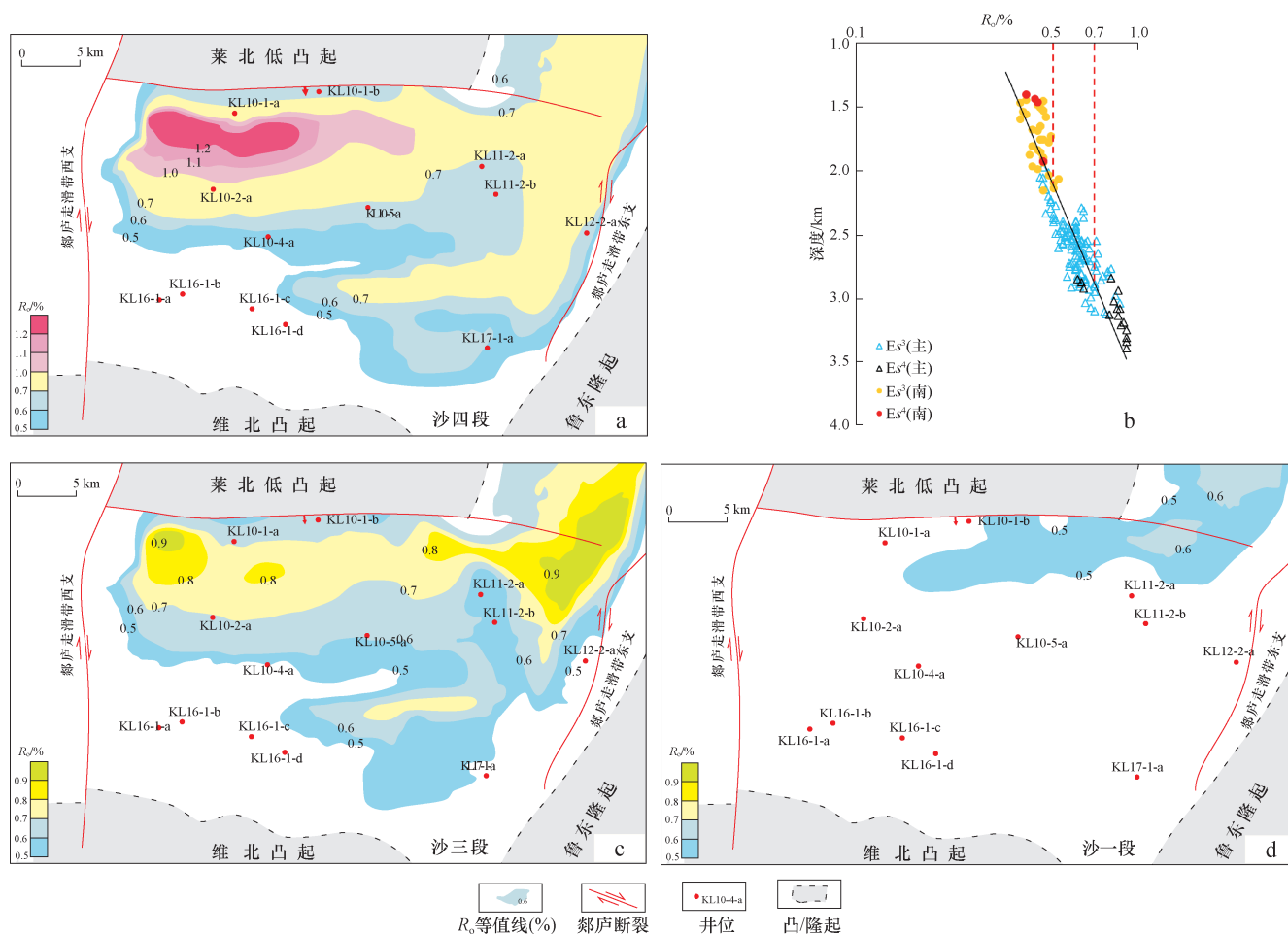


图2 莱州湾凹陷各套烃源岩成熟度特征

Fig. 2 Maturity characteristics of source rocks in the Laizhou Bay Sag

a. 沙四段烃源岩成熟度平面等值线; b. 烃源岩实测 R_o 数据; c. 沙三段烃源岩成熟度平面等值线; d. 沙一段烃源岩成熟度平面等值线

表 1 莱州湾凹陷有效烃源岩丰度和类型评价

Table 1 Evaluation of the abundance and kerogen types of effective source rocks in the Laizhou Bay Sag

注陷	层位	有机碳含量/%	生烃潜量/(mg · g ⁻¹)	有机质类型	评价
主注	沙三段	0.53 ~ 12.8/2.29	0.64 ~ 66.1/9.84	I - III	中等 - 优质
	沙四段	0.83 ~ 5.09/2.66	2.93 ~ 36.24/14.8	I - II ₁	好 - 优质
南注	沙三段	0.6 ~ 4.84/2.33	1.08 ~ 30.44/10.6	II ₁ - II ₂	好 - 优质
	沙四段	0.97 ~ 5/2.53	3.98 ~ 11.98/7.98	I - II ₁	好 - 优质

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

造带油气成藏的供烃源岩。

通过对莱州湾凹陷沙三和沙四段烃源岩有机质丰度和有机质类型数据分析(表 1),沙三段和沙四段都为好 - 优质烃源岩,结合各套烃源岩热演化程度,可认为仅有沙三段和沙四段烃源岩是莱州湾凹陷有效的供烃源岩。

2.3 油源分析

通过分析各油田饱和烃质量色谱,发现垦利 10 - 1/5 油田原油具有低伽马蜡烷,高 4 - 甲基甾烷的特征(图 3a,c),而垦利 16 - 1 油田原油为中 - 高伽马蜡烷的,中 - 低 4 - 甲基甾烷的特征,同时还存在 C₃₅ 升藿烷翘尾的特征(图 3d—g),进一步说明莱州湾凹陷南北构造油源存在巨大的差异性。

在大量数据筛选的基础上,优选出伽马蜡烷、4 - 甲基甾烷以及甾烷异构化参数有效的区分了研究区各油田的油气来源,莱州湾凹陷烃源岩甾烷异构化参数显示,沙三段和沙四段烃源岩都处于成熟阶段,且沙四段烃源岩成熟度相对较高(图 4a)。对比各油田原油甾烷异构化参数,原油成熟度与沙四段烃源岩成熟度相似,说明二者具有良好的亲缘关系(图 4b)。

利用伽马蜡烷和 4 - 甲基甾烷进一步划分,主注和南次洼沙三段烃源岩特征相似,伽马蜡烷和 4 - 甲基甾烷含量都较低(图 4c),各生标参数特征相似,说明沙三段沉积时期主注和南次洼水体连通,烃源岩非均质性相对较弱;而沙四段烃源岩则存在较大的差异性,南次洼沙四段烃源岩具有高伽马蜡烷、低 4 - 甲基甾烷的特征,主注沙四段烃源岩具有低伽马蜡烷、高 4 - 甲基甾烷的特征(图 4c),各生标参数差异较大。结合主注和南次洼古生物数据,在主注沙四段发现大量指示淡水环境的盘星藻,而在南次洼盘星藻相对很少,出现大量指示半咸水 - 咸水渤海藻、副渤海藻和德弗兰藻,说明沙地层沉积时期主注和南次洼水体连通性差,南次洼水体相对主注更加偏咸化环境。

对比各油田伽马蜡烷和 4 - 甲基甾烷参数,垦利

10 - 1/4/5/油田和垦利 12 - 2 油田中原油伽马蜡烷含量普遍较低,4 - 甲基甾烷含量较高,与主注沙四段烃源岩特征相同,而垦利 16 - 1 油田与垦利 12 - 2 油田存在两种不同的油源,一部分具有高伽马蜡烷、低 4 - 甲基甾烷的特征,另一部分具有低伽马蜡烷、较高 4 - 甲基甾烷的特点(图 4d)。

综上所述,莱州湾凹陷北部陡坡带和中央构造带原油以主注沙四段烃源岩供烃为主,混有主注沙三段烃源岩贡献,缓坡带垦利 16 - 1 油田原油则表现为主注沙四段和南次洼沙四段烃源岩混合供烃的特征。

3 高硫油稠油来源及成因

3.1 原生成因

前人研究认为沉积岩中硫的赋存形式包括以下 4 种:有机硫、黄铁矿硫、单质硫和硫酸盐矿物^[16]。有机硫主要包括干酪根中的硫元素和可溶抽提物中的硫醇、硫酚和硫醚等含硫化合物;硫酸盐矿物主要包括石膏、芒硝和重晶石等,而硫单质多以硫磺的形式存在,他们与黄铁矿的存在都是有利于高硫油的形成。

莱州湾凹陷现已发现的高硫油主要集中在垦利 16 - 1 油田,垦利 11 - 2 油田也有少量发现,结合前人研究^[17]和目前的探井成果来看,以钻遇的地层中并没有发现黄铁矿和硫单质,但是在垦利 11 - 2 构造沙四段中钻遇到盐构造,位于南次洼北部边缘带,对高硫油的形成有一定的影响,但是紧邻垦利 11 - 2 构造的垦利 12 - 2 油田和垦利 11 - 1 油田并未发现高硫油,因此,垦利 11 - 2 构造上的盐构造对高硫油的影响范围较为局限,难以解释垦利 16 - 1 油田高硫油的来源及成因,为厘清垦利 16 - 1 油田高硫的成因,做了如下研究。

傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT - ICR MS)是一种具有超高质量分辨能力和质量精确度的新型质谱技术,能够精确质量计算出对应分子中 C, H, O, N 和 S 元素组成。本次实验分析仪器为 Apex - Ultra9. 4T 型 FT - ICR MS(美国 Bruker 公司)(实验原理详见参考

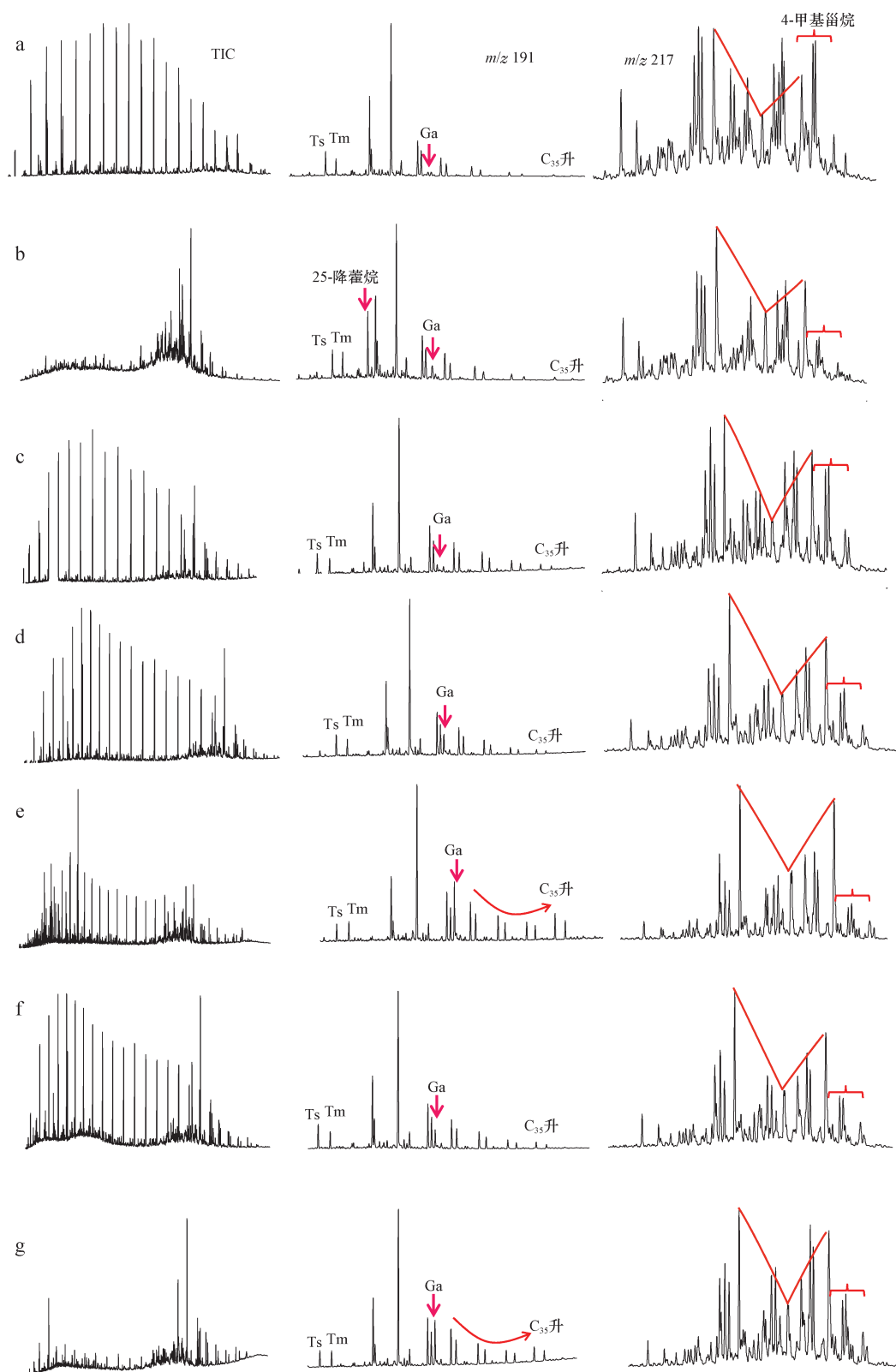


图3 莱州湾凹陷各油田原油饱和烃质量色谱

Fig. 3 Mass chromatograms of the saturated hydrocarbons for the Laizhou Bay Sag oilfields

a. KL10-1-b 井,埋深 2 569 ~ 2 586 m,沙三上段原油饱和和烃质,其硫含量为 0.2%;b. KL10-1-b 井,埋深 1 308 ~ 1 342 m,明化镇组下段原油饱和和烃质,其硫含量为 0.6%;c. KL10-5-a 井,埋深 1 599.5 m,东二下段原油饱和和烃质,其硫含量为 0.5%;d. KL16-1-d 井,埋深 1 685.09 ~ 1 716.4 m,沙三段原油饱和和烃质,其硫含量为 1.0%;e. KL16-1-c 井,埋深 1 331 m,沙二段原油饱和和烃质,其硫含量为 1.7%;f. KL16-1-b 井,埋深 1 105.7 m,沙三段原油饱和和烃质,其硫含量为 1.0%;g. KL16-1-a 井,埋深 932 ~ 937.5 m,馆陶组原油饱和和烃质,其硫含量为 2.9%

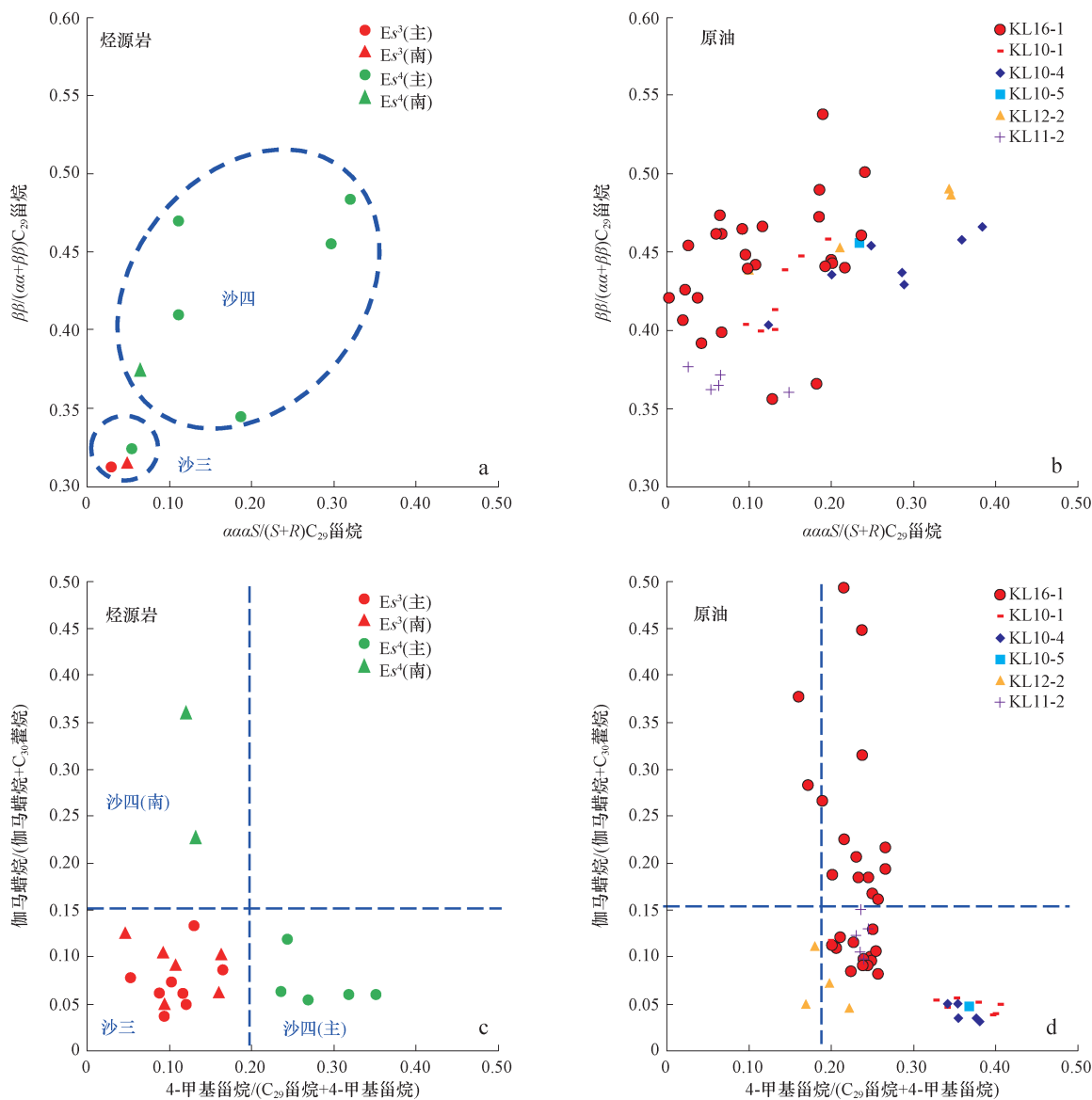


图4 莱州湾凹陷烃源岩和原油的生标参数关系

Fig. 4 Parametric relationship of biomarker compounds of oil and source rock samples from the Laizhou Bay Sag

a. 烃源岩 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha S/(S+R)$ 与 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 关系; b. 原油 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha S/(S+R)$ 与甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 关系; c. 烃源岩 4-甲基甾烷/(C_{29} 甾烷 + 4-甲基甾烷) 与伽马蜡烷/(伽马蜡烷 + C_{30} 藿烷) 关系; d. 原油 4-甲基甾烷/(C_{29} 甾烷 + 4-甲基甾烷) 与伽马蜡烷/(伽马蜡烷 + C_{30} 藿烷) 关系

文献[18]),选取垦利10-1油田一个低硫油和垦利16-1油田一个典型的高硫油进行硫化物鉴定。实验结果显示,原油中硫化物主要集中分布在 C_{30} 和 C_{45} 之间的大分子化合物之中,其中,低硫油中硫化物的含量整体较低,且含量相似(根据图5a中泡泡大小相似),连续成正态分布(图5a);高硫油中硫化物的含量较高,但是硫化物具有较高的专属性,主要集中在某些特定的化合物之中(图5b),具有原生成因高硫油的特点。

结合芳烃参数分析,研究发现原油中的硫含量与二苯并噻吩和甲基二苯并噻吩的含量有着正相关关系(图6a),原油含硫量越高,其噻吩含量相对越高,

同时原油中噻吩含量随伽马蜡烷含量的增加而增大(图6b),利用上述关系,从而建立原油芳烃与烃源岩芳烃之间的关系。图6c中主洼和南次洼沙三段烃源岩噻吩和伽马蜡烷含量相近,且含量都低,说明莱州湾凹陷沙三段沉积时期,水体相对连通,整体属于相对淡化的水体环境,但是沙四段烃源岩却具有较大的差异性,主洼展现出低伽马蜡烷、低噻吩含量的特征,而南次洼展现出高伽马蜡烷、高噻吩含量的特征(图6d),这与高硫油特征完全相符,说明:①沙四段沉积时期水体存在分割现象,南次洼水体相对更加闭塞,比主洼水体咸化,再次印证前文;②莱州湾凹陷高硫油来源南次洼沙四段烃源岩,其它各套烃源岩没有贡献;③咸化环

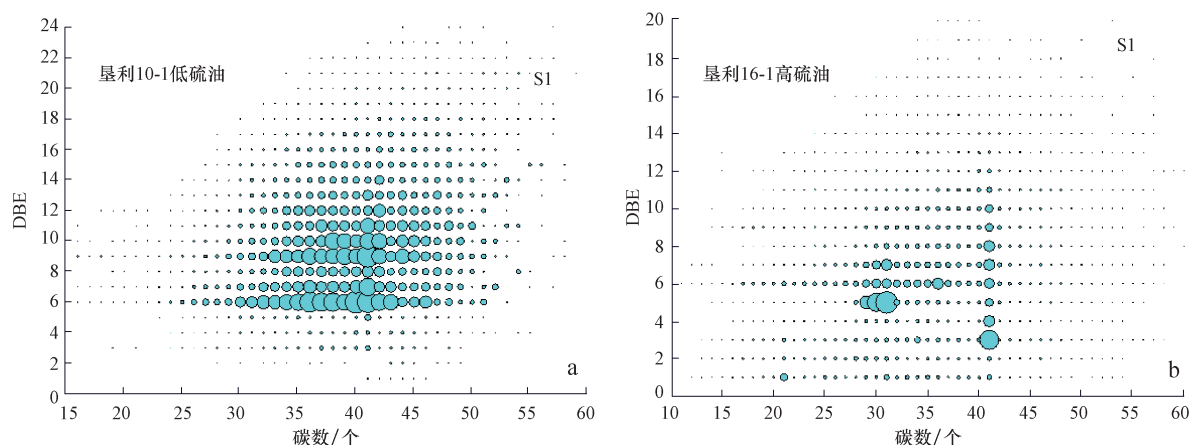


图5 原油有机含硫化合物缩合度和碳数分布对比

Fig. 5 Comparison of condensation degree and carbon number distribution of organic sulfur compounds in crude oils

a. 垦利10-1井低硫油特征; b. 垦利16-1井高硫油特征

[DBE(Double Bond Equivalent)为等效双键,表示分子中环和双键的数量,每种DBE对应不同碳原子数的一个化合物系列。S1代表一类硫化物,其相对丰度在有机硫化物中含量最高^[18]。]

境更容易形成富硫干酪根,为高硫油的形成提供物质基础。因此,南次洼沙四段富硫干酪根的形成是莱州湾凹陷高硫油形成的主控因素。

3.2 硫酸盐热化学还原作用

中央构造带上油气成藏期大约在8.6 Ma^[19],而垦利16-1油田成藏期更晚,大约从4 Ma开始,属于典型的晚期成藏,自新近系沉积时期,垦利16-1地区处于稳定沉积,未经历强烈构造运动,同时,现今实测油藏温度分布在45~90℃,远小于硫酸盐热化学反应(TSR)的最低温度120℃,说明后期TSR作用对高硫油的形成没有影响。

3.3 生物降解作用

通过统计莱州湾凹陷原油物性与原油的硫含量之间的关系,可以看出不论是低硫油还是高硫油,其含硫量与原油物性具有明显的线性关系,随着原油粘度和密度的增加硫含量相对富集(图7),而生物降解作用越强,原油粘度和密度都会随之增加,但原生低硫油中硫含量随生物降解作用很难超过1%(图3b,图7)。

由于垦利16-1油田油藏埋深较浅,原油粘度、密度较大(图7),同时质谱图上基线隆起,饱和烃大量缺失,显示原油遭受生物降解作用明显(图3e,g),未遭受或弱生物降解作用的原油硫含量大约为1%,具原生高硫油的特征,而遭受生物降解作用的原油硫含量明显增加,可达到2.9%,因此,说明生物降解作用一方面造成垦利16-1油田原油稠化,是形成稠油的主控因素,另一方面可导致其原油硫元素的相对富集

(图2b,图6)。

4 垦利16-1高硫油油田成藏模式

与传统生烃模式相比较,咸化环境形成的富硫干酪根具有生油高峰较早的特点^[20]。一般认为($S_1 + S_2$)/TOC(生烃潜量/有机碳含量)值的降低意味烃源岩已达到排烃门限并开始排出烃类,并以其拐点确定为排烃门限深度^[21]。从图2可以看出,南次洼沙四段烃源岩分布范围非常局限, R_o 大于0.7%的范围较小,结合地震资料解释凹陷沙四段最中心位置最大埋深约4500 m,整体成熟度相对较低。结合前文分析认为,莱州湾凹陷南次洼沙四段烃源岩属于咸化环境下形成的富硫干酪根,利用已钻进实测热解数据可以看出,南次洼烃源岩排烃门限深度较浅,大概在2000 m左右,比主洼排烃门限深度浅1000 m(图8b),同时其具有较高的地温梯度3.7℃/100 m,致使南次洼烃源岩排烃时间大大提前至30 Ma(主洼排烃时间约为34 Ma),表现出早生早排的特点。因此,南次洼有效烃源岩分布范围将增大,生烃能力增强,很大程度的提高了垦利16-1油田成藏的可能性。

从目前钻井情况来看,垦利16-1油田主要在潜山、沙四段、沙三段和馆陶组中发现油气。潜山面顶部发育了一套不整合面为深部油气侧向运移提供有利的运移通道,主洼沙四段烃源岩生成的油气一部分沿潜山面侧向运移在KL16-1-a井深部形成潜山油藏,另一部分通过多条深切烃源岩的油源断层的分流作用运移至浅部地层,利用馆陶组的砂体和底部的不整合

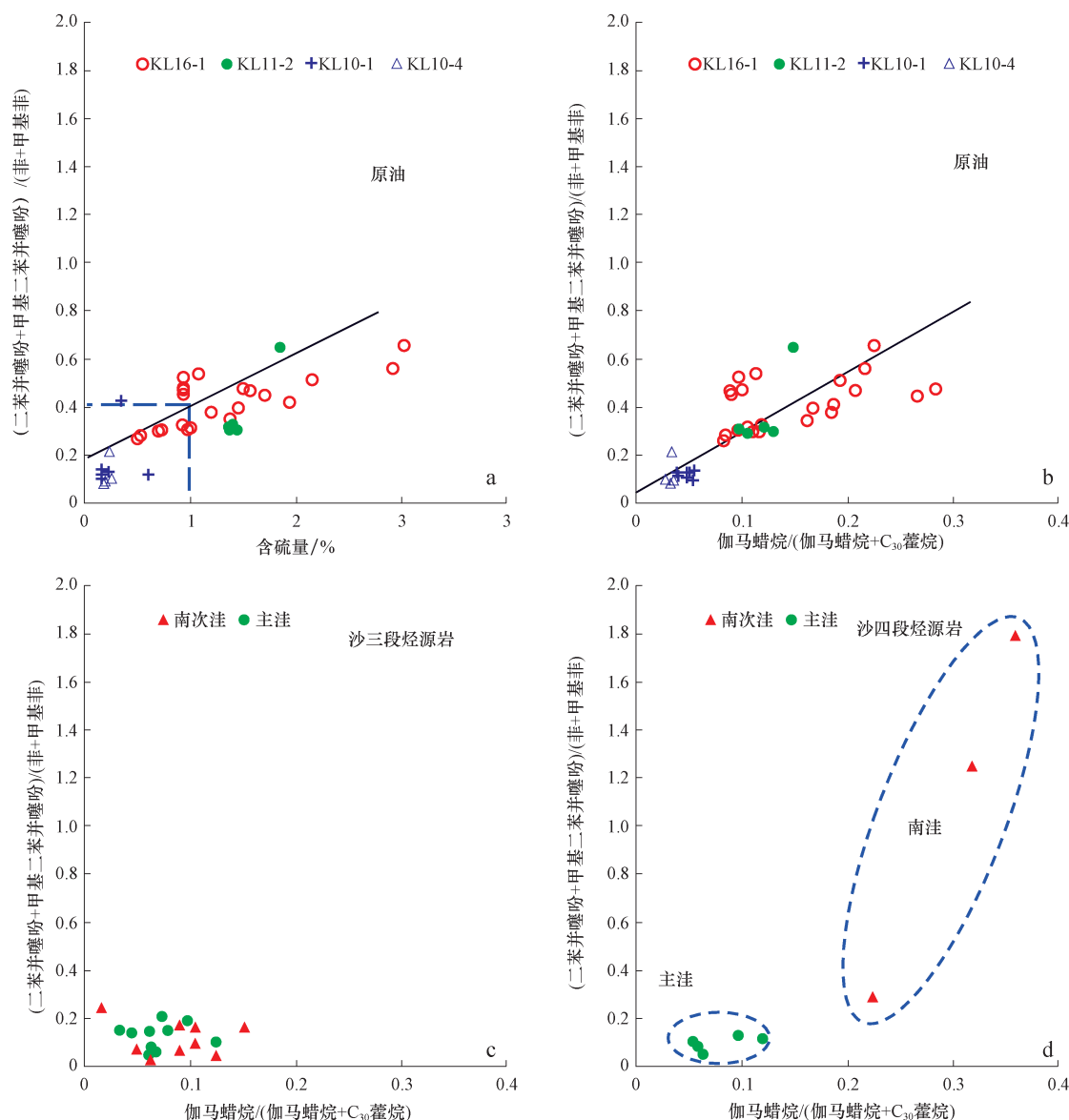


图6 莱州湾凹陷原油硫含量与烃源岩生标参数

Fig. 6 Sulfur content of crude oil and biomarker parameters of source rocks from the Laizhou Bay Sag

a. 原油中硫含量与噻吩类化合物关系; b. 原油中伽马蜡烷与噻吩类化合物关系; c. 沙三段烃源岩伽马蜡烷与噻吩类化合物关系; d. 沙四段烃源岩伽马蜡烷与噻吩类化合物关系

面侧向运移聚集成藏。南次洼排烃范围虽然扩大,但结合包裹体均一温度分析得到垦利16-1油田成藏期大概从4 Ma开始,具有晚期成藏的特点,KL16-1-d井以南次洼供烃为主形成潜山高硫油藏,浅层油藏由断层调整再分配,KL16-1-a井馆陶组油藏表现为高硫油的特征正是由于断层的再分配作用形成的,因此在垦利16-1油田形成了典型的双洼供烃模式(图8a)。

5 结论

1) 莱州湾凹陷主要发育了沙三段和沙四段两套

有效的烃源岩,是该凹陷油气成藏的主要来源。陡坡带和中央构造带上的油田以主洼沙四段烃源岩供烃为主,混有沙三段烃源岩贡献,而缓坡带上垦利16-1油田则为主洼沙四段和南次洼沙四段烃源岩混合供烃,其中高硫原油主要来源于南次洼沙四段烃源岩。

2) 莱州湾凹陷高硫油主要为原生高硫油,南次洼沙四段烃源岩沉积时期水体相对咸化有利于富硫干酪根的形成,控制着高硫油的形成,是高硫油形成的主要来源。油藏温度主要在45~90℃,适合微生物生存,生物降解作用是导致原油稠化形成稠油的主要原因,而生物降解在造成原油稠化的同时,也使原油中硫的含量相对富集,促使高硫油形成。

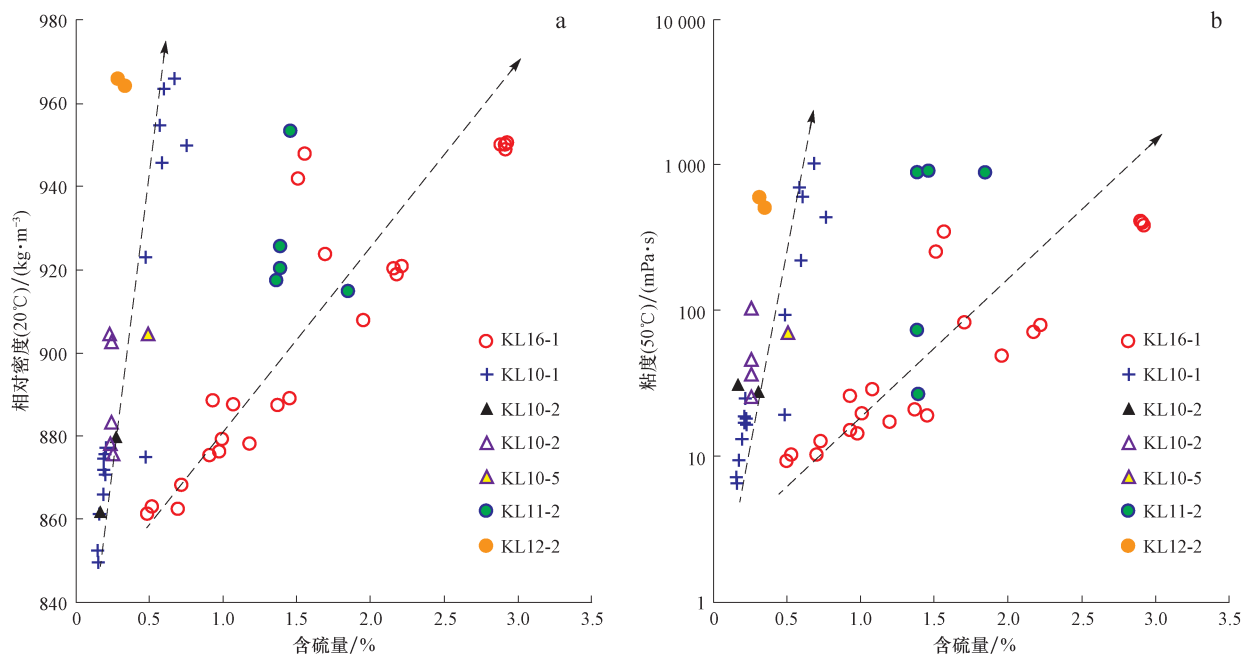


图7 莱州湾凹陷原油物性和含硫量之间的关系

Fig. 7 The relationship between the physical property and sulfur content of crude oils from the Laizhou Bay Sag

a. 原油中硫含量与密度关系; b. 原油中硫含量与粘度关系

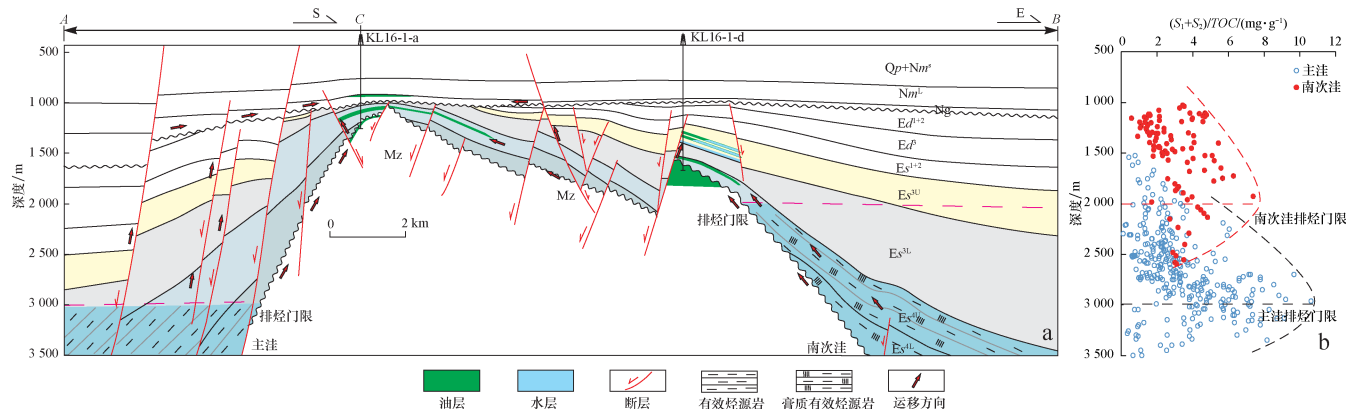


图8 莱州湾凹陷垦利16-1油田成藏模式(a)和莱州湾凹陷排烃模式(b)

Fig. 8 Diagram showing the accumulation model of Kenli 16-1 oilfield(a) and hydrocarbon expulsion model of the Laizhou Bay Sag(b)

3) 南次洼沙四段烃源岩属于咸化环境形成的富硫干酪根,具有早生早排的特点,在垦利16-1油田与主洼构成咸化湖盆早生早排双洼供烃成藏模式。垦利16-1油田新近系中的油藏主要为砂体、不整合面侧向输导,断裂垂向输导远源成藏模式,其潜山和古近系中的油藏主要为不整合面侧向输导远源成藏模式。因此,围绕南次洼沙四段烃源岩,古近系和潜山优质储层是高硫油聚集成藏有区带,南次洼南部缓坡带将是莱州湾凹陷高硫油下一步勘探的有利方向。

参考文献

- [1] Orr W L. Kerogen/asphaltene/ sulfur relationship in sulfur-rich monterey oils[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1-3): 499 -

516.

- [2] Damste J S, Leeuw J W. Analysis, structure and geochemical significance of organically-bound sulfur in the geosphere: State of the art and future research[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(4-6): 1077-1101.
- [3] Wakeham S G, Sinninghe Damste J S, Kohlen M E L, et al. Organic sulfur compounds during early diagenesis in Black Sea sediments[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1995, 59(3): 521-533.
- [4] 傅强, 刘彬彬, 夏庆龙, 等. 黄河口凹陷BZ35/36构造高硫原油特征及运移方向[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 37-45.

Fu Qiang, Liu Binbin, Xia Qinglong, et al. Characteristics and migration-accumulation directions of sulfur-rich oils in BZ35/36 structures in Huanghekou sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 37-45.

- [5] 宋一涛,廖永胜,王忠. 济阳坳陷盐湖沉积环境高硫稠油的特征及成因[J]. 石油学报,2007,28(6):52-58.
Song Yitao, Liao Yongsheng, Wang Zhong. Genesis and characteristics of sulfur-rich heavy oil in salt lake depositional environment of Jiyang depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 52-58.
- [6] 李素梅,张宝收,张海祖,等. 塔中原油超高二苯并噻吩硫特征及其控制因素[J]. 现代地质,2011,25(6):1108-1119.
Li Sumei, Zhang Baoshou, Zhang Haizu, et al. Geochemical characteristics and affecting factors of the unusually high dibenzothiophenes Oils in the Tazhong Uplift[J]. Geoscience, 2011, 25(6): 1108-1119.
- [7] 刘琼,何生. 江汉盆地西南缘原油中含硫化化合物的分布特征及其地球化学意义*[J]. 地质科技情报,2008,27(2):56-62.
Liu Qiong, He Sheng. Distribution characteristics and geochemical significance of organic sulfur compounds from crude oils in the southwestern Jianghan Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(2): 56-62.
- [8] 郑冰,高仁祥. 塔里木盆地原油碳硫同位素特征及油源对比[J]. 石油实验地质,2006,28(3):281-285.
Zheng Bing, Gao Renxiang. Characteristics of carbon and sulfur isotopes in crude oil and oil-source correlation in the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(3): 281-285.
- [9] 朱光有,费安国,赵杰,等. TSR成因H₂S的硫同位素分馏特征与机制[J]. 岩石学报,2014,30(12):3772-3784.
Zhu Guangyou, Fei Anguo, Zhao Jie, et al. Sulfur isotopic fractionation and mechanism for thermochemical sulfate reduction genetic H₂S[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(12): 3772-3784.
- [10] K. E. 彼得斯, C. C. 沃尔斯特, J. M. 莫尔多万. 生物标记化合物指南[M]. 北京:石油工业出版社,2011.
Peter K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [11] 王根照,牛成民,王亮,等. 莱州湾凹陷勘探突破的启示[J]. 石油天然气学报,2012,34(5):39-43.
Wang Genzhao, Niu Chengmin, Wang Liang, et al. Enlightenments of exploration breakthrough in Laihouwan Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(5): 39-43.
- [12] 牛成民. 渤海南部海域莱州湾凹陷构造演化与油气成藏[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):424-431.
Niu Chenmin. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation of Laizhouwan depression in southern Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 424-431.
- [13] 朱伟林,米立军,龚再升,等. 渤海海域油气成藏与勘探[M]. 科学出版社,2009.
Zhu Weilin, Mi Lijun, Gong Zaisheng, et al. Oil and gas accumulation and exploration in Bohai Sea[M]. Science Press, 2009.
- [14] 候读杰,冯子辉. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2011.
Hou Dujie, Feng Zihui. Petroleum geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [15] 孙景耀,刘松,王世民,等. 构造活动对莱州湾凹陷油气成藏的影响[J]. 中国海上油气,2006,18(5):299-303.
Sun Jingyao, Liu Song, Wang Shimin, et al. Tectonic impacts on hydrocarbon accumulation in Laizhouwan Say[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(5): 299-303.
- [16] 付小东,邱楠生,秦建中,等. 中上扬子区海相层系烃源岩硫含量分布与硫同位素组成特征[J]. 石油实验地质,2013,35(5):543-551.
Fu Xiaodong, Qiu Nansheng, Qin Jianzhong, et al. Content distribution and isotopic composition characteristics of sulfur in marine source rocks in Middle-Upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 543-551.
- [17] 余一欣,周心怀,汤良杰,等. 渤海海域莱州湾凹陷 KL11-2 地区盐构造特征[J]. 地质学报,2009,82(6):731-735.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Tang Liangjie, et al. Salt structural features in KL11-2 area of the Laizhouwan depression, offshore Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 82(6): 731-735.
- [18] 卢鸿,史权,马庆林,等. 傅里叶变换离子回旋共振质谱对中国高硫原油的分子组成表征[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):122-131.
Lu Hong, Shi Quan, Ma Qinglin, et al. Molecular characterization of sulfur compounds in some special sulfur-rich Chinese crude oils by FT-ICR MS[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(1): 122-131.
- [19] 王飞龙,牛成民,汤国民. 莱州湾凹陷中央构造带断层活动性及其控藏作用[J]. 大庆石油地质与开发,2017,36(6):1-9.
Wang Feilong, Niu Chengmin, Tang Guomin. Activities and reservoirs-controlling of faults in the central structure belt Laizhouwan Depression[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(6): 1-9.
- [20] 郭显令,熊敏,曾庆辉,等. 渤海湾盆地临南洼陷高硫干酪根油气生成模式研究[J]. 石油实验地质,2008,30(3):265-269.
Guo Xianling, Xiong Min, Zeng Qinhui, et al. Petroleum generation model of a sulfur-rich kerogen from the Linnan Sag, the Bohai Bay basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(3): 265-269.
- [21] 庞雄奇,李素梅,金之钧,等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2004,29(4):384-390.
Pang Xiongqi, Li Sumei, Jin Zhijun, et al. Geochemical evidences of hydrocarbon expulsion threshold and its application[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(4): 384-390.

(编辑 张玉银)