

文章编号:1009-9603(2023)03-0028-14

DOI:10.13673/j.pgrec.202301021

东营凹陷民丰地区沙四段下亚段烃源岩特征

李宇志¹, 周肖肖^{1,2}, 隋风贵³, 王学军⁴, 欧浩文¹, 闫海清¹, 韩柯¹, 王涛¹

(1. 中国石化胜利油田分公司 东辛采油厂, 山东 东营 257066; 2. 中国石化胜利石油管理局有限公司 博士后科研工作站, 山东 东营 257001; 3. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257001; 4. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 东营凹陷民丰地区在沙四段下亚段油气勘探中获重要突破,但其烃源岩生烃潜力、生物标志物特征及其环境意义以及膏盐岩对烃源岩成熟度的影响仍缺乏系统研究。基于岩石有机碳、热解、干酪根显微组分鉴定、饱和烃色谱-质谱等实验结果,结合地质条件,系统评价了沙四段下亚段烃源岩。研究结果表明:①烃源岩有机质以腐泥型的I和II₁型干酪根为主,生烃母质优质,盐间和扇间泥岩均具生烃能力,含有中等-优质烃源岩,可作为潜在页岩油气发育区;基于多元回归分析模型分岩性建立了TOC测井评价模型,其预测值与实测值吻合度高。②上部烃源岩相对下部具有高C₂₇重排甾烷/C₂₇规则甾烷、高规则甾烷/17 α -藿烷等特征;上部烃源岩多为盐间泥岩,沉积于咸水还原-强还原环境,下部烃源岩多为盐下扇间泥岩,为微咸水-淡水还原环境,二者以垂深4 180~4 200 m为界,均在古冲沟附近较为发育。③烃源岩处于成熟-高成熟阶段,上部、下部烃源岩大致以镜质组反射率等于1.0%为界,上部生油为主,下部有利于裂解生气;盐上地层(以砂砾岩储层为主)的地温梯度和烃源岩镜质组反射率明显大于盐下和无盐相应参数。

关键词: 盐湖相烃源岩;生烃潜力;生物标志物;热演化;民丰地区
中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Characteristics of source rock of Es₄^x in Minfeng area, Dongying Sag

LI Yuzhi¹, ZHOU Xiaoxiao^{1,2}, SUI Fenggui³, WANG Xuejun⁴, OU Haowen¹,

YAN Haiqing¹, HAN Ke¹, WANG Tao¹

(1. Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257066, China; 2. Postdoctoral Work Station, Shengli Petroleum Administrative Bureau Co., Ltd., SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China; 3. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China; 4. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: A major breakthrough in oil and gas exploration has been made in the Lower Submember of Member 4 of Shahejie Formation (Es₄^x) in the Minfeng area, Dongying Sag. However, the systematic research on the hydrocarbon generation potential, biomarker characteristics of source rock, and their environmental significance, as well as the impact of gypsum-salt rock on the maturity of the source rock is insufficient. According to the experimental results of rock organic carbon, pyrolysis, identification of kerogen macerals, and chromatography-mass spectrometry of saturated hydrocarbon, as well as the geological conditions, the Es₄^x source rocks are systematically evaluated. The research results show that: ①The organic matters of source rock are mainly sapropel-type I and II₁ kerogen with excellent hydrocarbon-generating parent materials. The inter-salt and inter-fan mud rocks could both generate hydrocarbon and are medium or excellent source rocks, which thus could be considered as a potential shale oil and gas development area; TOC log evaluation models of different lithology are established by multiple regression analysis, and the predicted values are consistent with the measured values. ②The upper source rocks have higher C₂₇ diasterane/C₂₇ regular sterane and regular sterane/17 α -hopane than the lower ones and are mainly inter-salt mud rock in a strong reduction environments with salt water. The

收稿日期:2023-01-20。

作者简介:李宇志(1973—),女,山东淄博人,高级工程师,博士,从事油气勘探开发研究工作。E-mail: liyuzhi169.slyt@sinopec.com。
通信作者:周肖肖(1988—),女,山东济宁人,工程师,博士。E-mail: t-zhouxiaoxiao.slyt@sinopec.com。

lower source rocks are mostly inter-fan mud rocks in a reduction environments with brackish water. The above two kinds of source rocks are bounded by a vertical depth of 4 180-4 200 m and are well developed near paleogullies. ③The source rocks are mature or highly mature. The upper and lower source rocks are bounded by a vitrinite reflectance of 1.0%. The upper source rocks mainly generate oil, while the lower ones are favorable for gas generation through splitting decomposition; the geothermal gradient and vitrinite reflectance of source rock above gypsum-salt rock (mainly glutenite reservoirs) are greater than those under or without gypsum-salt rock.

Key words: salt-lake source rock; hydrocarbon generation potential; biomarkers; thermal evolution; Minfeng area

东营凹陷已有多口井在沙四段下亚段砂砾岩储层中勘探获高产凝析油气^[1-2]。截至2020年,民丰盐家地区沙四段下亚段完钻井33口,其中10口井获工业油流气,展示了沙四段下亚段砂砾岩良好的油气勘探前景。以沙四段上亚段为目的层的丰页1-1HF井创下了国内页岩油初产最高记录,显示出民丰地区页岩油潜力巨大,沙四段下亚段作为含膏盐岩烃源岩层系,有望成为下一个非常规油气重点突破领域。因此,研究沙四段下亚段烃源岩不仅为砂砾岩凝析油气藏勘探方向提供依据,也为未来页岩油气勘探提供前瞻性地质认识。

沙四段下亚段为典型的盐湖相沉积,发育大套共生的盐岩和泥岩沉积,可作为优质生油岩^[3]。凝析油气也主要来自沙四段下亚段烃源岩^[4-5]。前人对东营凹陷沙四段下亚段盐湖相烃源岩进行过生烃评价^[6-7],但由于当时岩石样品以及地质资料较少,对民丰地区烃源岩评价不够精细,在膏盐岩对烃源岩成熟度的影响以及烃源岩生物标志物特征及其环境意义等方面也缺乏系统研究。因此,笔者基于总有机碳含量(*TOC*)、热解、饱和烃色谱-质谱、透射光-荧光干酪根显微组分鉴定和镜质组反射率(R_o)等实验结果,研究民丰地区沙四段下亚段烃源岩生烃潜力,分析膏盐岩对烃源岩成熟度的影响和烃源岩生物标志物特征及其环境意义,以为油气精细来源和深层油气勘探奠定基础。

1 区域地质概况

东营凹陷位于中国东部渤海湾盆地东南部,属于中、新生代断陷复合盆地,是一个不对称的半地堑湖相凹陷,具有北断南超、西断东超的不对称复式半地堑形态^[8-9]。民丰地区位于东营凹陷东北带的东部。东营凹陷在沙四段下亚段沉积时期处于裂谷盆地演化早期,气候干旱,湖水强烈蒸发导致湖盆水体范围缩小且盐度增加^[7, 10-14]。重力作用使得湖水自下而上形成卤水、咸水、微咸水的分层现象^[15]。随着卤水浓度逐步提高且达到饱和,便会有盐类结晶析出。盐湖湖盆底层处于缺氧、强还原和高盐环境,使得有机质能够很好地保存下来^[16]。民丰地区沙四段

下亚段边界断层附近水深较大,作为沉积中心油源条件优越,大量陆源碎屑物质被季节性洪水搬运而来并沉积于陈南断层下降盘,形成了大规模近岸水下扇砂砾岩体^[17];而在洪水停滞期,则沉积了厚层膏盐岩以及与其互层且具有较高有机质丰度的泥岩,可形成良好的生储盖配置关系和圈闭条件,隐蔽岩性油气藏发育潜力较大^[18](图1—图2)。

以开始钻遇膏盐岩或与膏盐岩同期的地层作为沙四段下亚段的顶界面,膏盐岩沉积多位于沙四段下亚段的中上部,包括盐层、石膏层和盐膏层,其单层厚度约为0.5~16 m;与膏盐岩呈互层韵律分布的深灰色泥岩,其单层厚度多小于10 m,包括纯泥岩、泥质膏盐岩、含膏(盐)泥岩和膏(盐)质泥岩,本文将这类泥岩称为盐间泥岩。民丰地区北部靠近陈家庄凸起,沙四段下亚段多发育巨厚的砂岩、砾岩等碎屑岩沉积,碎屑岩间夹层泥岩则被称为扇间泥岩。对于钻遇沙四段下亚段膏盐岩的井,砂砾岩及扇间泥岩多分布于中下部;对于未钻遇沙四段下亚段膏盐岩的井,大套砂砾岩及少量扇间泥岩在整个沙四段下亚段均有分布。

2 烃源岩评价

2.1 生烃潜力评价

TOC、热解参数(残留烃 S_1 、热解烃 S_2 、最高热解峰温 T_{max} 、氢指数 HI 等)和干酪根显微组分鉴定是常用的评价烃源岩生烃潜力的方法^[19-21]。*TOC*、生烃潜力 S_1+S_2 等参数用于判断有机质丰度,显微组分鉴定是基于干酪根的结构和颜色等确定显微组分含量,从而明确烃源岩母质来源和干酪根类型。

考虑到与盐湖相泥岩伴生的岩石岩性存在差异,为了精细评价,将盐湖相烃源岩划分为盐间泥岩和扇间泥岩2种类型。盐间泥岩 TOC 值为0.35%~2.0%; S_1 值为0.11~3.27 mg/g; HI 值为44~154 mg/g。扇间泥岩 TOC 值为0.25%~2.33%; S_1 值为0.07~1.13 mg/g; HI 值为14~147 mg/g。二者 TOC 值差别较小,既含有中等-优质烃源岩,也含有差烃源岩(图3)。盐间泥岩和扇间泥岩的 T_{max} 值分别为425~455和435~474 °C,指示两者分别处于

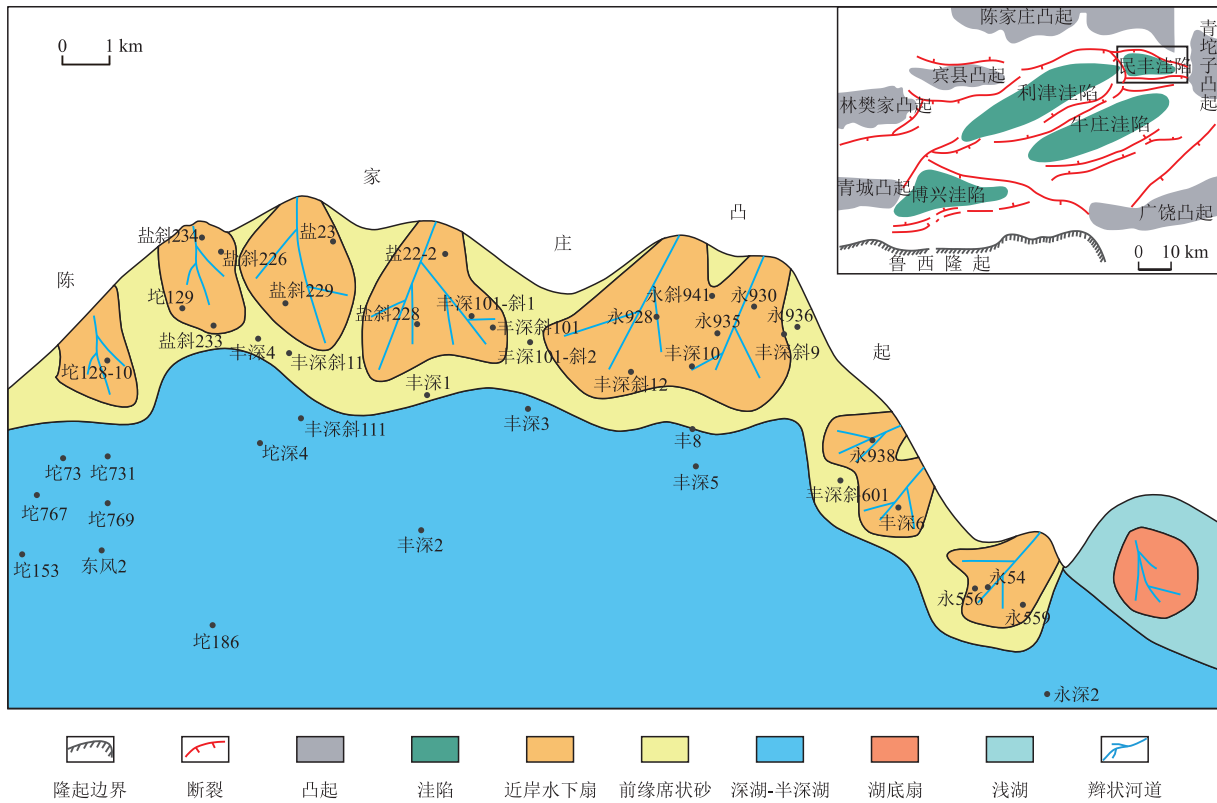


图1 东营凹陷民丰地区沙四段下亚段沉积相

Fig.1 Sedimentary facies of Es_4^s in Minfeng area, Dongying Depression

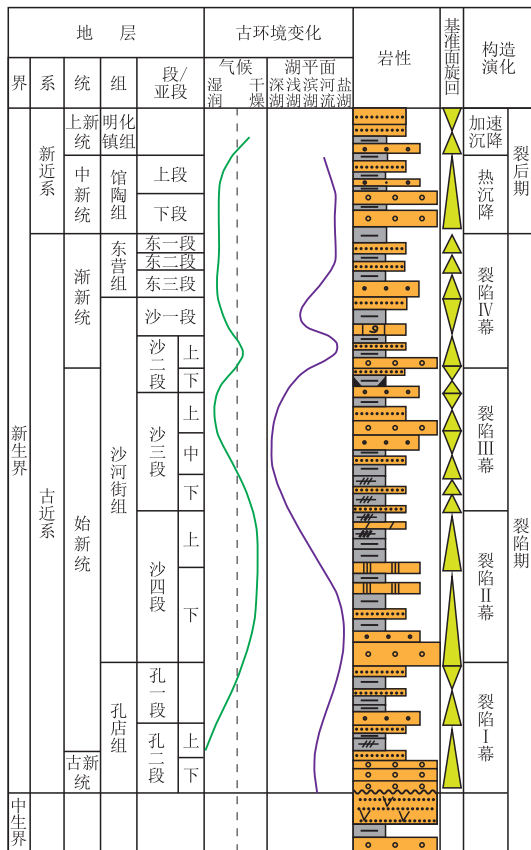


图2 东营凹陷地层综合柱状图 (据文献[10]修改)

Fig.2 Comprehensive stratigraphic histogram of Dongying Sag (Modified according to reference [10])

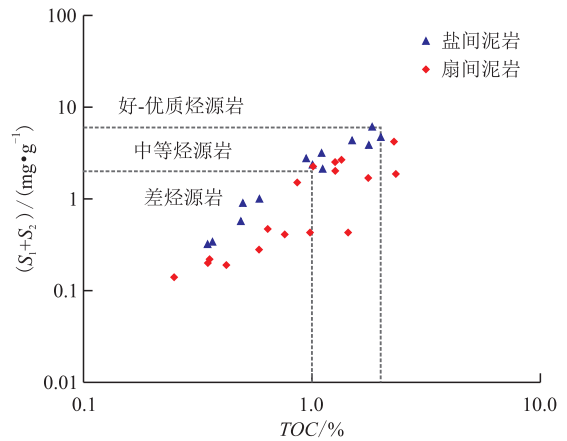


图3 民丰地区沙四段下亚段烃源岩 $S_1 + S_2$ 与 TOC 关系 (划分标准基于文献[20])

Fig.3 Relationships between Es_4^s source rock $S_1 + S_2$ and TOC in Minfeng area (Classification based on reference [20])

成熟和成熟-高熟阶段^[20]。盐间泥岩的 S_1, S_2 和 HI 值略大于扇间泥岩, 指示其具有较高的生烃潜力, 这可能与其成熟度较低 (T_{max} 较小) 有关^[22-23]。二者显微组分均以腐泥组 (含量为 56.7% ~ 97.0%) 为主, 含少量壳质组 (含量为 6.7% ~ 32.7%) 和镜质组 (含量为 2.7% ~ 16.7%), 无惰质组, 指示母质为腐泥型的 I 和 II₁ 型干酪根 (表 1)。总体而言, 沙四段下亚段烃源岩有机质丰度高 (TOC 值多大于 1%), 母质类型好, 处于成熟-高成熟阶段, 可动烃含量较高 (S_1 值多

数大于1 mg/g,最高为3.27 mg/g),为有效烃源岩,可作为潜在页岩油气发育区。

2.2 测井评价模型

TOC是页岩油评价的重要指标之一,合理预测TOC是评价页岩有机质丰度和生烃能力的关键^[24]。民丰地区沙四段下亚段烃源岩富含石膏和石盐等矿物,导致岩石的自然伽马(GR)和体积密度(DEN)降低,声波时差(AC)和电阻率(R_t)增大,不能用常规ΔlgR_t法预测烃源岩TOC^[25-26]。考虑到膏(盐)成分含量(或泥质含量)不同对测井曲线影响不同,因此分岩性研究了测井曲线对TOC的影响。具体流程如下:①以标准层法将测井曲线标准化,这里以丰深2井作为标准井,以沙四段下亚段顶部大套厚层膏盐岩作为标准层;没有膏盐岩的井,参照临井膏盐岩标准层。②在测井数据标准化的基础上提取不同含膏(盐)泥岩和纯泥岩的测井响应值。③在DEN, AC, 泥质含量(ΔGR), 补偿中子密度(CNL)、电阻率对数(logR_t)等测井曲线中选取对TOC有影响的测井曲线,基于Excel程序中的多元回归分析模型,建立不同岩性泥岩的TOC与测井曲线之间的响应模式,即测井评价模型。

盐间泥岩测井响应特征复杂,受烃源岩中膏(盐)成分含量和泥质含量共同控制。对于盐间泥岩来说,以ΔGR区分岩性,ΔGR越大,岩石中的泥质含

量越高,膏(盐)成分含量越低。ΔGR的计算公式为:

$$\Delta GR = (GR - GR_{SC}) / (GR_M - GR_{SC}) \quad (1)$$

当ΔGR<0.6时,对应的岩性主要为泥质膏盐岩和膏(盐)质泥岩,烃源岩测井响应特征受膏(盐)成分含量控制,利用多元回归模型得到的TOC测井评价模型为:

$$TOC_p = 9.42 - 0.040AC - 3.29DEN + 0.161 \log R_t + 0.065CNL + 1.049\Delta GR + 0.021GR \quad (2)$$

当ΔGR≥0.6时,对应的岩性以含膏(盐)泥岩和纯泥岩为主,烃源岩测井响应特征受泥质含量控制,利用多元回归模型得到的TOC测井评价模型为:

$$TOC_p = -8.97 + 0.000143AC + 2.53DEN + 0.982 \log R_t + 0.111503CNL - 2.855\Delta GR + 0.041934GR \quad (3)$$

扇间泥岩测井评价模型为:

$$TOC_p = 3.801668 + 0.037398AC - 3.02772DEN + 0.020893GR + 0.420667 \log R_t + 0.002913CNL \quad (4)$$

为检验模型的准确性,建立实测TOC值与预测TOC值的相关性。由图4可知,对于盐间泥岩,当ΔGR<0.6,相关系数为0.879;当ΔGR≥0.6,相关系数可达0.745;对于扇间泥岩,相关系数为0.832。选取烃源岩发育且实测值较多的丰深2井和丰深1井对比实测TOC值和预测TOC值,发现二者吻合较好,

表1 民丰地区沙四段下亚段干酪根显微组分含量及R_o数据
Table1 Kerogen maceral contents and R_o values of Es₄ in Minfeng area

井号	位置	岩性	深度/m	R _o /%	腐泥组含量/%	腐殖组含量/%	镜质组含量/%	惰质组含量/%	干酪根类型指数	母质类型
丰深1	上部	盐间泥岩	4 024.3	0.84	73.3	16.7	10.0	0	74.2	II ₁
丰深1	上部	盐间泥岩	4 025.8	0.87	72.0	17.3	10.7	0	72.7	II ₁
丰深1	上部	盐间泥岩	4 027.5	0.83	83.7	12.7	3.7	0	87.3	I
丰深2	上部	盐间泥岩	3 971.7	0.87	87.7	8.3	4.0	0	88.8	I
丰8	上部	盐间泥岩	3 816.2	0.85	79.3	16.7	4.0	0	84.7	I
丰8	上部	盐间泥岩	3 943.6	0.75	79.3	16.0	4.7	0	83.8	I
丰深10	上部	扇间泥岩	3 916.7	0.93	91.7	0	8.3	0	85.4	I
丰深10	上部	扇间泥岩	3 917.6	0.93	89.7	0	10.3	0	81.9	I
丰深10	上部	扇间泥岩	3 966.1	0.71	94.0	0	6.0	0	89.5	I
丰深斜11	上部	扇间泥岩	4 327.5	0.89	91.7	0	8.3	0	85.4	I
丰深斜11	上部	扇间泥岩	4 329.2	1.02	86.7	0	13.3	0	76.7	II ₁
坨深4	下部	扇间泥岩	4 734.9	1.24	83.3	0	16.7	0	70.8	II ₁
坨深4	下部	扇间泥岩	4 739.8	1.21	56.7	32.7	10.7	0	65.0	II ₁
丰深2	下部	盐间泥岩	4 300.5	0.90	90.7	6.7	2.7	0	92.0	I
丰深2	下部	盐间泥岩	4 499.5	1.13	97.0	0	3.0	0	94.8	I
丰深3	下部	扇间泥岩	4 770.3	1.43	90.0	7.3	2.7	0	91.7	I
丰8	下部	扇间泥岩	4 183.7	0.88	71.7	20.0	8.3	0	75.4	II ₁
丰8	下部	扇间泥岩	4 186.3	0.91	69.0	21.7	9.3	0	72.8	II ₁
丰8	下部	扇间泥岩	4 201.0	0.92	84.0	9.3	6.7	0	83.7	I

说明建立的测井评价模型是可靠的(图5)。

根据测井评价模型得到沙四段下亚段泥岩 TOC 数据,并计算其平均值,绘制民丰地区沙四段下亚段泥岩平均 TOC 等值线分布图(图6)。TOC 等值线分布趋势与沙四段下亚段顶面构造形态基本一致, TOC 值都大于 0.5%,大部分大于 1.0%,说明沙四段下亚段烃源岩 (TOC>0.5% 的泥岩) 在民丰地区广泛分布。TOC 高值区位于民丰地区北部沙四段下亚段顶面埋深较大处, TOC 均值大于 2%, 向东和南方向逐渐减小, 烃源岩品质变差。丰深 10 井 TOC 均值最大, 为 2.35%。分析认为, 沙四段下亚段顶部在民丰地区北部埋深最大, 为盐湖相沉积中心, 藻类勃发和强还原环境有利于有机质的富集和保存, 从而形成 TOC 高值区。

3 烃源岩沉积环境及其展布

3.1 烃源岩生物标志物特征及其环境意义

沙四段下亚段饱和烃气相色谱-质谱图在垂向上存在差异, 上部烃源岩与下部相比, 具有高 C₂₇ 重排甾烷/C₂₇ 规则甾烷、高规则甾烷/17α-藿烷、高奥利

烷指数等特征, 说明两者地球化学特征存在差异。为了进一步研究母质来源及沉积环境的不同, 也为了对沙四段原油进行更为精细的油源对比, 笔者大致以 C₂₇ 重排甾烷/C₂₇ 规则甾烷值为 0.7 为界, 对应垂深为 4 180 ~ 4 200 m, 将沙四段下亚段分为上部和下部进行分析。

3.1.1 规则甾烷和姥鲛烷/nC₁₇与植烷/nC₁₈

C₂₇, C₂₈ 和 C₂₉ 规则甾烷相对丰度的三元组成图有助于分析沉积环境^[27-29]。由图 7a 和图 8 可见, 沙四段下亚段上部烃源岩 C₂₇ 规则甾烷分布范围大, 整体为中等-高丰度 C₂₇、低丰度 C₂₈ 和低-中等丰度 C₂₉ 规则甾烷, 母质来源主要为浮游生物、藻类和细菌。下部烃源岩具有相似分布特征, 但 C₂₇ 规则甾烷含量较低, 指示母质来源以浮游生物和细菌为主, 含少量陆源植物。姥鲛烷/nC₁₇ (Pr/nC₁₇) 与植烷/nC₁₈ (Ph/nC₁₈) 是反映有机质输入、沉积环境和成熟度的有效参数^[30-33]。沙四段下亚段下部烃源岩 Pr/nC₁₇ 与 Ph/nC₁₈ 均值分别为 0.66 和 0.68。上部烃源岩的均值更大, 分别为 0.95 和 1.29, 说明两者成烃母质主要为藻类有机质, 沉积于还原环境, 但上部相比下部烃源岩沉积环境还原性更强(图 7b)。

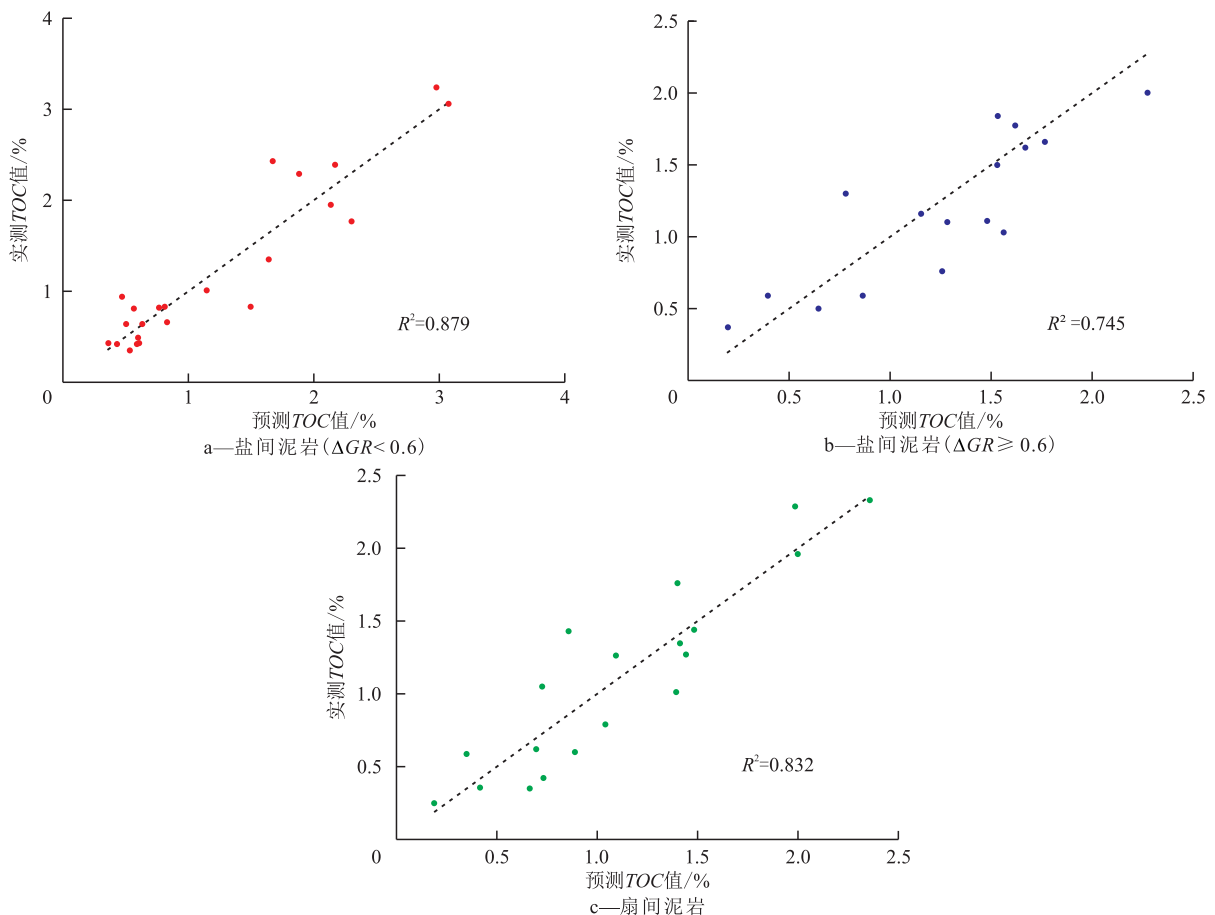


图4 实测 TOC 值和预测 TOC 值的相关性

Fig.4 Correlation between measured and predicted TOC values

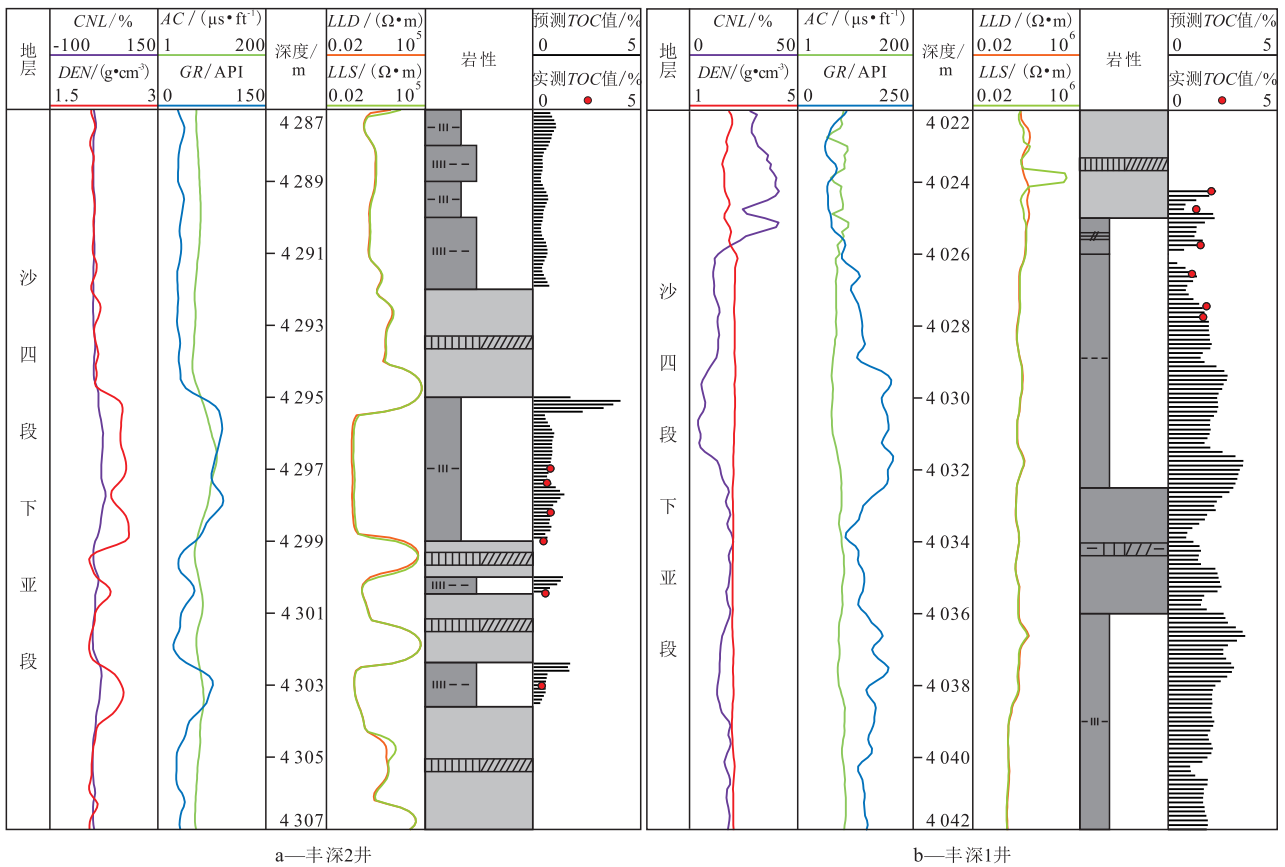


图5 TOC单井预测

Fig.5 Single well prediction of TOC

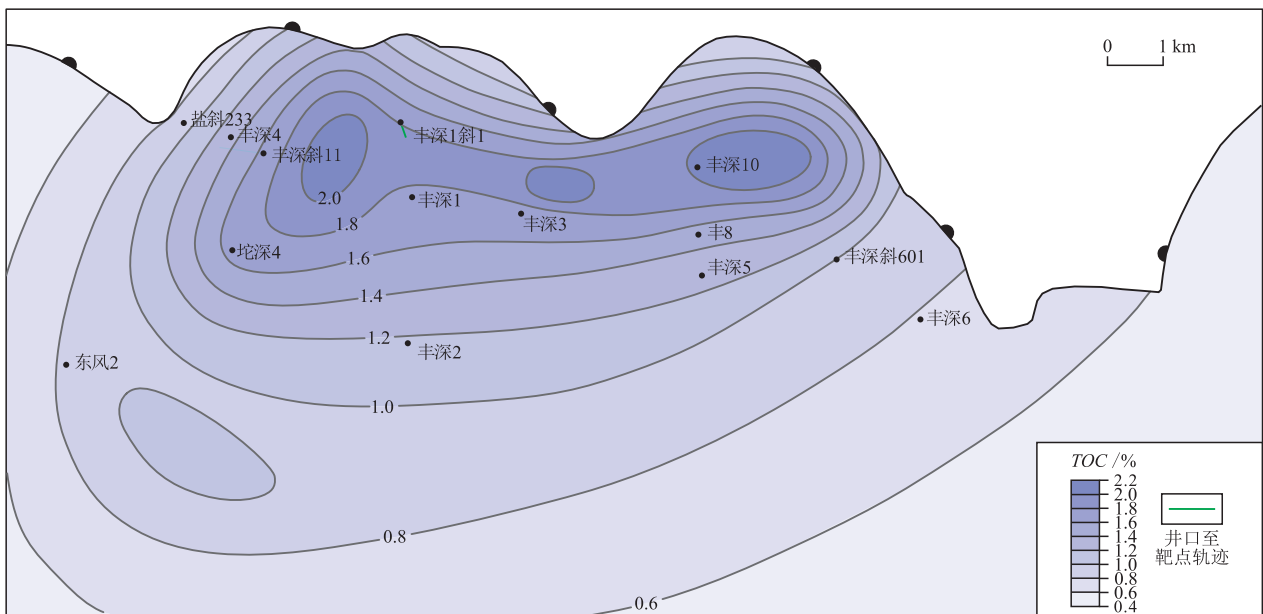


图6 民丰地区沙四段下亚段泥岩平均TOC等值线分布图

Fig.6 Distribution of average TOC contour line of Es₄^x mud rock in Minfeng area

3.1.2 规则甾烷/17α-藿烷和C₂₇重排甾烷/C₂₇甾烷

规则甾烷/17α-藿烷能反映真核生物(藻类和高等植物)与原核生物(细菌)对烃源岩的贡献。高比值(≥1)指示有机质主要来源于浮游生物和/或底栖藻类^[34]。反之,低含量规则甾烷和低规则甾烷/17α-

藿烷比值更多地指示陆生的或经微生物改造的有机质^[21]。沙四段下亚段上部烃源岩规则甾烷/17α-藿烷比值为0.51 ~ 16.84,均值为3.98,明显大于下部烃源岩(均值为0.56),指示上部烃源岩母质输入以浮游生物和/或底栖藻类为主(图7c)。高C₂₇重排甾

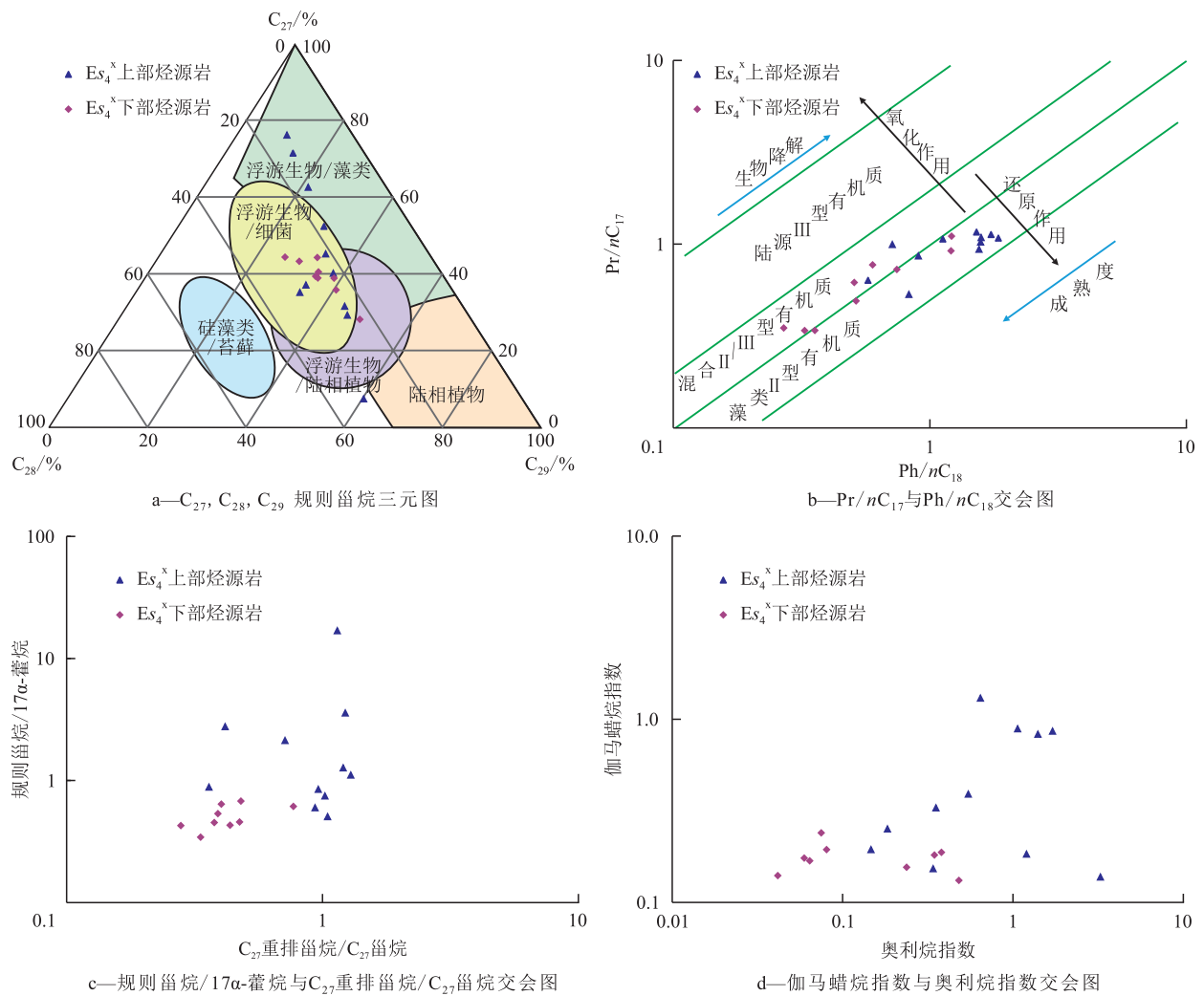


图7 民丰地区沙四段下亚段烃源岩生物标志物参数 (a和b图版据文献[27])

Fig.7 Biomarker parameters of Es₄^x source rock in Minfeng area (a and b chart are modified according to references [27])

烷/C₂₇甾烷值代表原油来源于富黏土矿物的烃源岩^[30],也可以是由高成熟度^[35]和/或严重生物降解造成的^[36]。沙四段下亚段上部烃源岩C₂₇重排甾烷/C₂₇甾烷值为0.42 ~ 1.29,均值为0.97,明显高于下部烃源岩(均值约为0.45)(图7c和图8)。由于上部烃源岩的成熟度小于下部,且处于成熟阶段,所以上部烃源岩高C₂₇重排甾烷/C₂₇甾烷值可能与其富黏土矿物所致。

3.1.3 伽马蜡烷指数和奥利烷指数

丰富的伽马蜡烷指示沉积物在沉积期存在分层水体,也可能是不同盐度的分层,通常代表强还原、高盐环境^[30]。伽马蜡烷丰度常用伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/C₃₀藿烷)来表征。奥利烷主要来源于陆相高等植物,即被子植物^[30]。奥利烷丰度通常由奥利烷指数(奥利烷/C₃₀藿烷)表征。高丰度的奥利烷通常与古近纪一新近纪陆相有机质的大量输入有关。

由图7d可知,沙四段下亚段上部烃源岩的伽马蜡烷指数为0.14 ~ 1.30,均值为0.55,高于下部烃源

岩(均值约为0.20),表明其水体盐度较高,与盐湖相沉积环境基本一致。上部烃源岩的奥利烷指数为0.15 ~ 3.29,均值为1.17;下部奥利烷指数为0.04 ~ 0.48,均值为0.22,明显低于上部烃源岩。从奥利烷指数来看,沉积于咸水环境的上部烃源岩比沉积于微咸水-淡水的下部烃源岩陆相有机质输入更多,这与传统认识不符合。沙四段沉积期间,许多陆源碎屑物质随间歇性洪水注入湖中,使沙四段烃源岩母质含有陆相有机质^[17],但上部烃源岩陆相植物贡献高于下部的可能性较小。前人研究指出奥利烷含量除了受控于陆相有机质的贡献外,还受环境影响,咸水比淡水环境更有利于奥利烷保存^[37]。因此,含少量陆相有机质的上部烃源岩由于奥利烷的保存环境极佳导致其指数高;下部烃源岩尽管母质来源中含有被子植物,但由于保存条件较差而损失奥利烷。

综上所述,沙四段下亚段上部烃源岩多为盐间泥岩,少量为分布于无盐区的扇间泥岩,为咸水还

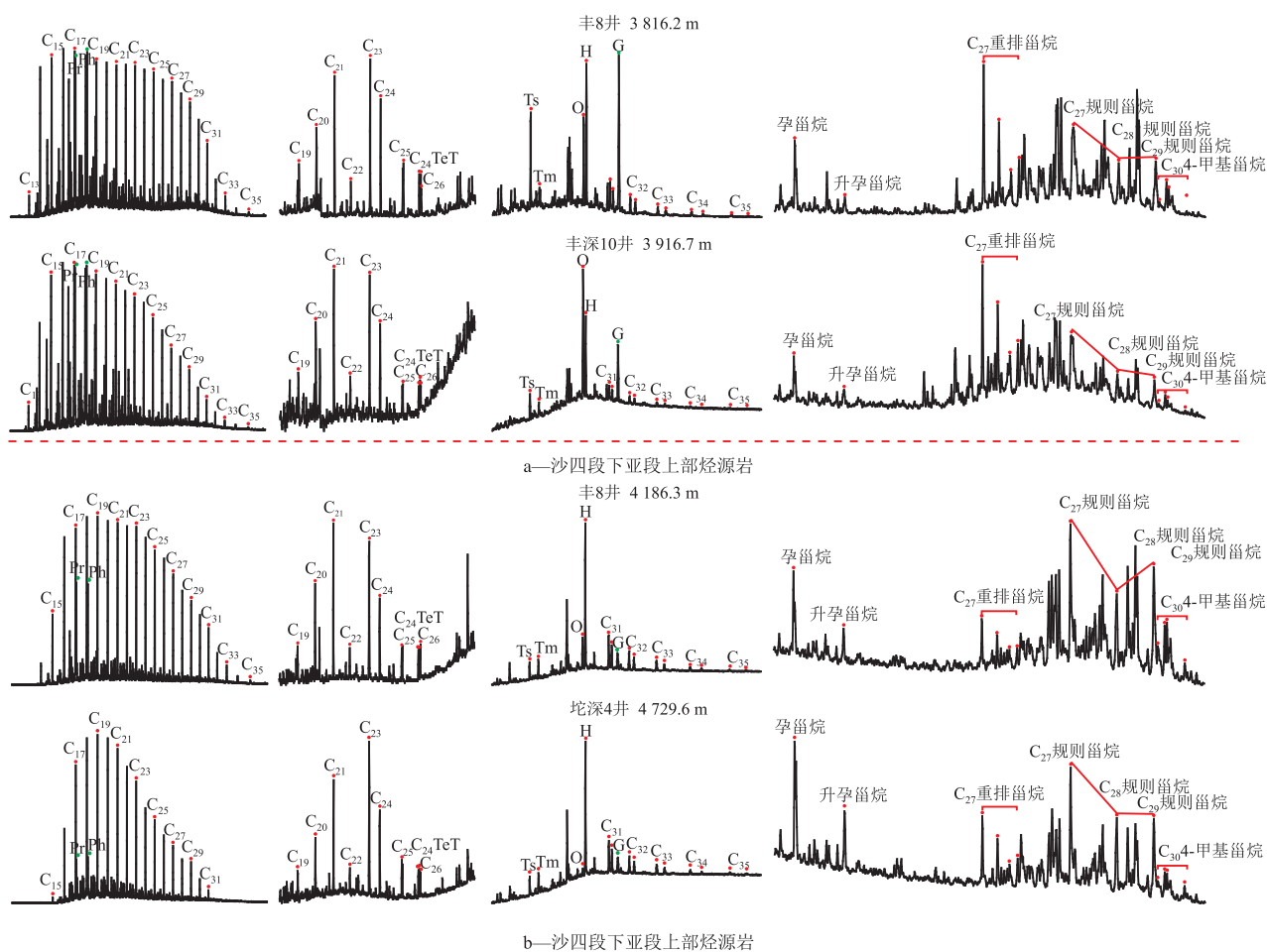


图8 民丰地区沙四段下亚段上部和下部烃源岩饱和烃色谱-质谱图

Fig.8 Chromatography-mass spectroscopy of saturated hydrocarbon in Upper and Lower Es₄^x source rocks in Minfeng area

原-强还原环境,母质来源以浮游生物、藻类和细菌为主,含少量陆源高等植物;下部烃源岩多为分布于膏盐岩之下的扇间泥岩,少量为盐间泥岩,沉积于微咸水-淡水还原环境,母质来源以浮游生物和细菌为主,含少量陆源高等植物。由于砂砾岩为后期季节性洪水搬运而来,堆积于早期还原条件下沉积的泥岩中,形成扇间泥岩,因此,扇间泥岩与陆源碎屑关系不大,这也与前面得出的盐间泥岩和扇间泥岩有机质丰度差别较小的评价结果一致。

3.2 烃源岩展布

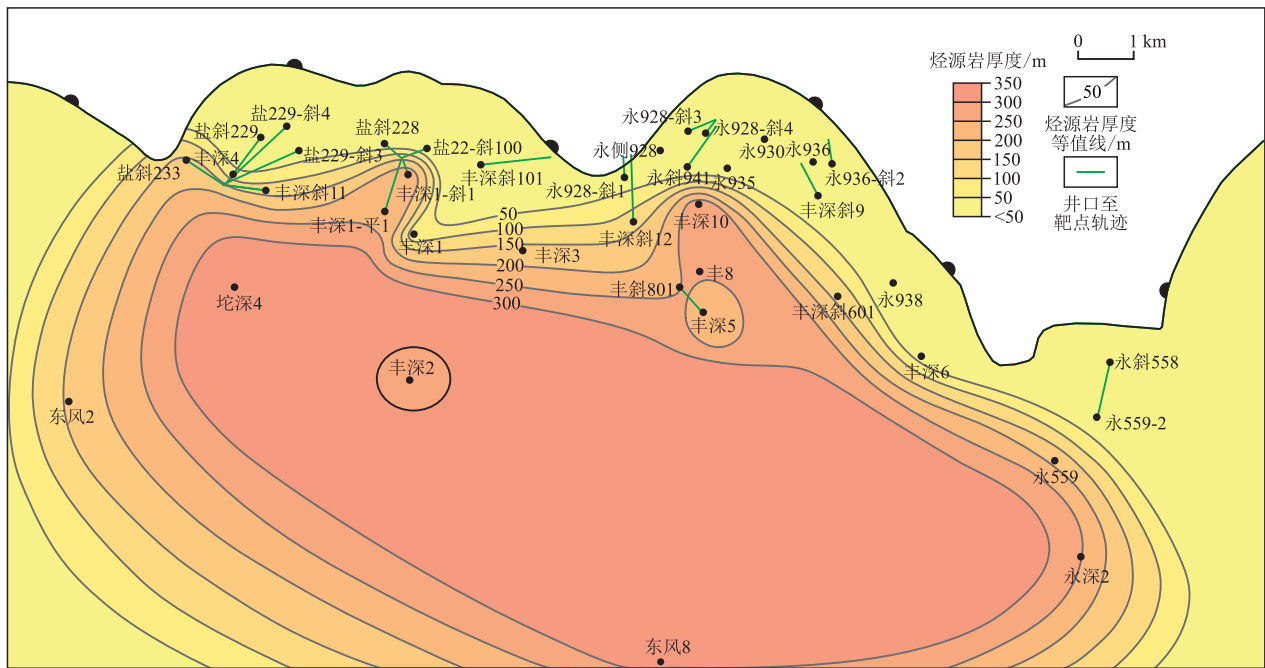
靠近陈家庄凸起,近岸水下扇在重力的作用下沿着断面运移并沉积下来,所以,越靠近凸起处,砂泥比越大,泥岩厚度越小。根据民丰地区不同单井沙四段下亚段上部和下部 TOC>0.5%的泥岩厚度,绘制了相应的烃源岩平面厚度分布图,由图9可以看出,上部烃源岩厚度分布范围较大,为0~350 m,丰深4、丰深1和丰8等井区发育的古冲沟附近由于埋深较大,除了沉积砂砾岩外,也是烃源岩厚度高值区;远离陈家庄凸起的坨深4、永深2和丰深2等井附近受构造影响小,沉积较为完整,烃源岩厚度也

较大(>250 m)。下部烃源岩在靠近陈家庄凸起地区厚度较小(<100 m)或不发育,其高值区同样多集中在丰深4、丰深1和丰8等井区发育的古冲沟附近;丰深2井附近为沙四段下亚段沉积早期的沉积中心,由于远离物源区,基本不沉积砂砾岩,所以下部烃源岩厚度明显增大(>700 m)。

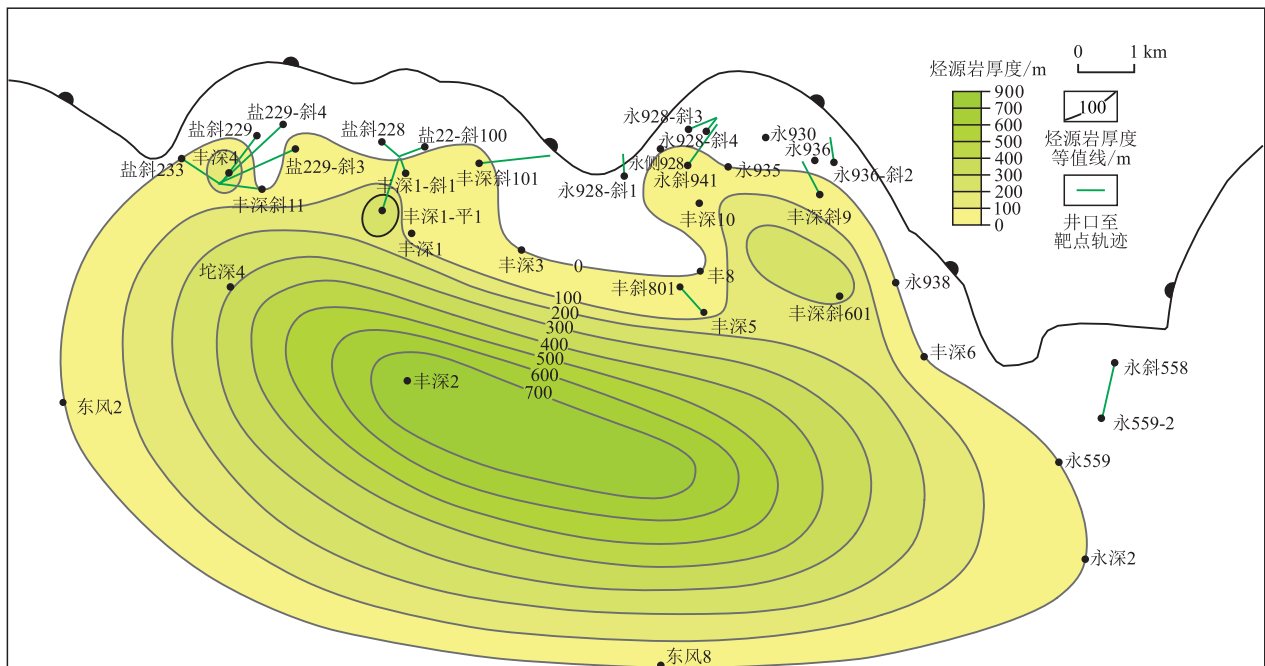
4 烃源岩热演化分析

4.1 烃源岩成熟度

温度和时间是油气生成过程中至关重要的一对因素,其中温度的影响是最主要的^[38-40]。前人研究表明,沉积盆地中膏盐岩热导率是一般砂泥岩的2~3倍^[41-42],更有利于深部热量向浅部传递。因此,理论上膏盐岩之下(盐下)地层温度要低于无膏盐岩(无盐)区同一垂深地层温度,而膏盐岩之上(盐上)地层温度要高于无盐区同一垂深的地层温度。基于岩性数据以及沙四段烃源岩(以泥岩为主)与膏盐岩的关系,将沙四段烃源岩分为盐下、盐上、膏盐岩之间(盐间)以及无盐烃源岩。烃源岩R_o随垂深的变化(图



a—沙四段下亚段上部烃源岩厚度分布



b—沙四段下亚段下部烃源岩厚度分布

图9 民丰地区沙四段下亚段烃源岩厚度等值线分布

Fig.9 Thickness distribution of $E_{s_4}^x$ source rocks in Minfeng area

10a)显示,3 500 m以下盐上、盐间和盐下烃源岩 R_o 的变化率分别为0.153%/hm,0.077%/hm和0.065%/hm,三者呈逐渐降低趋势;3 500 m以上地层也表现为同一垂深盐上烃源岩 R_o 大于无盐烃源岩的特点,说明膏盐岩较高的热导率导致 R_o 随垂深变化率为盐下最低,盐间其次,盐上最高以及无盐烃源岩低于盐上烃源岩。根据 R_o 随垂深变化,得出沙四段下亚段上部、下部烃源岩的 R_o 界限约为1.0%,说明二者除

了沉积环境存在差异外,成熟度也不同。

基于民丰地区沙四段47口井的73个实测温度,研究了盐上、盐下和无盐地层温度(测试段以砂砾岩储层为主)随垂深的变化,并拟合了两者的关系。由于盐间或盐上地层温度数据较少,合在一块研究。由图10b可以看出,无盐、盐间或盐上、盐下地层温度与垂深都具有线性关系,地温梯度分别约为3.63、4.90和3.09 °C/hm。因此,盐间或盐上地层的

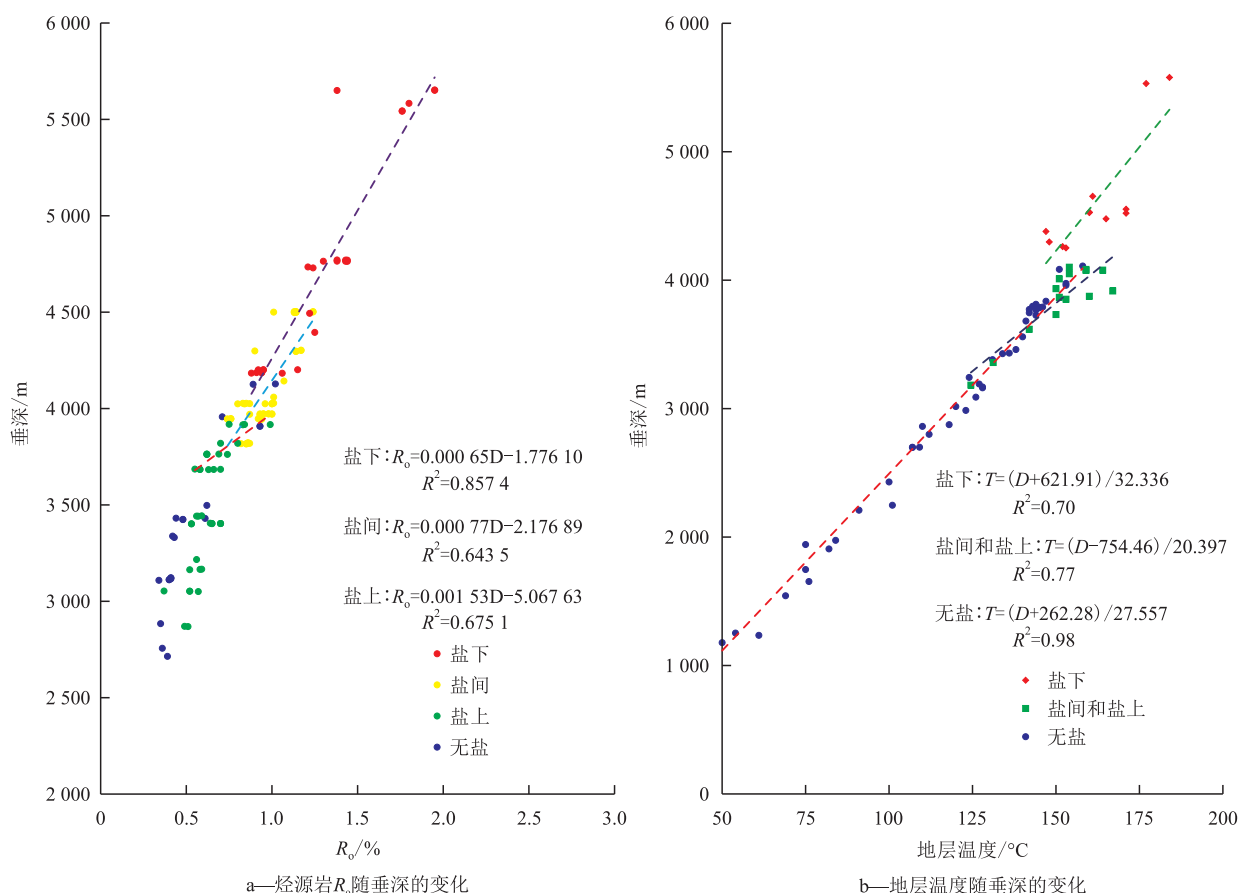


图 10 民丰地区沙四段烃源岩 R_o 和地层温度随垂深的变化
 Fig.10 Variation of R_o and formation temperature with vertical depth of Es_4 source rocks in Minfeng area

梯度最高,其次为无盐地层,盐下地层最低。这是由于膏盐岩热导率明显大于砂泥岩,导致深部热量向浅部传递,反映了膏盐岩对温度场的影响。

4.2 烃源岩热演化史

基于单井地质数据(地层分层和岩性数据)和古热流数据,利用美国PRA公司开发的BasinMod石油系统软件模拟了丰深2井的埋藏史和热史(图11)。为了使模拟结果更准确,利用累加方法得到沙四段下亚段膏盐岩和泥岩厚度,且不影响热史分析^[42]。大地热流值参照前人对渤海湾盆地热史的研究成果^[43-44],东营组沉积末期剥蚀厚度同样参考前人研究成果^[45]。基于Easy% R_o 动力学模型进行盆地模拟^[46-47],再利用实测 R_o 值校正模型。丰深2井沙四段下亚段上部烃源岩的底在沙四段—沙二段沉积时期快速埋藏,沙三段沉积早期进入生油门限(R_o 约为0.5%),沙二段沉积时期(距今37.8 Ma)进入生油高峰期(R_o 为0.7%~1.0%),东营组沉积时期(距今28.5 Ma)为生油晚期(R_o 为1.0%~1.3%),但至今未达到生气阶段($R_o > 1.3%$)。沙四段下亚段下部烃源岩的底在沙四段上亚段沉积晚期(约43 Ma)开始生油,沙三段中亚段沉积早期(距今40 Ma)达到生油

高峰,随后快速沉积,在沙二段沉积末期(距今36.5 Ma)进入生油晚期,东营组沉积早期(距今32 Ma)开始生气($R_o > 1.3%$),现处于生气阶段。

5 油气勘探指导意义

综合分析认为沙四段下亚段可能存在以下有利油气勘探区:①在民丰地区北部,烃源岩TOC值多大于1.5%,上部、下部烃源岩厚度均较大。若该区砂砾岩较为发育,则可形成砂砾岩油气藏;若有利页岩岩相类型发育,则可作为潜在页岩油气勘探区。②在民丰地区南部,靠近丰深2井附近的烃源岩TOC值多大于0.7%。该区由于远离砂砾岩沉积而且断层不发育,不利于常规砂砾岩油气藏的勘探,但这种特点有利于非常规油气的储集和保存。该区上部烃源岩厚度大,有机质丰度较高,在有利页岩岩相类型发育区可作为潜在页岩油勘探区;下部烃源岩厚度和埋深大、成熟度高,有利于生成天然气,在有利页岩岩相类型发育带可作为潜在页岩气勘探区。沙四段下亚段膏盐岩厚度大于300 m^[48],较厚的膏盐岩盖层封闭油气既有利于形成异常高压,为成藏提

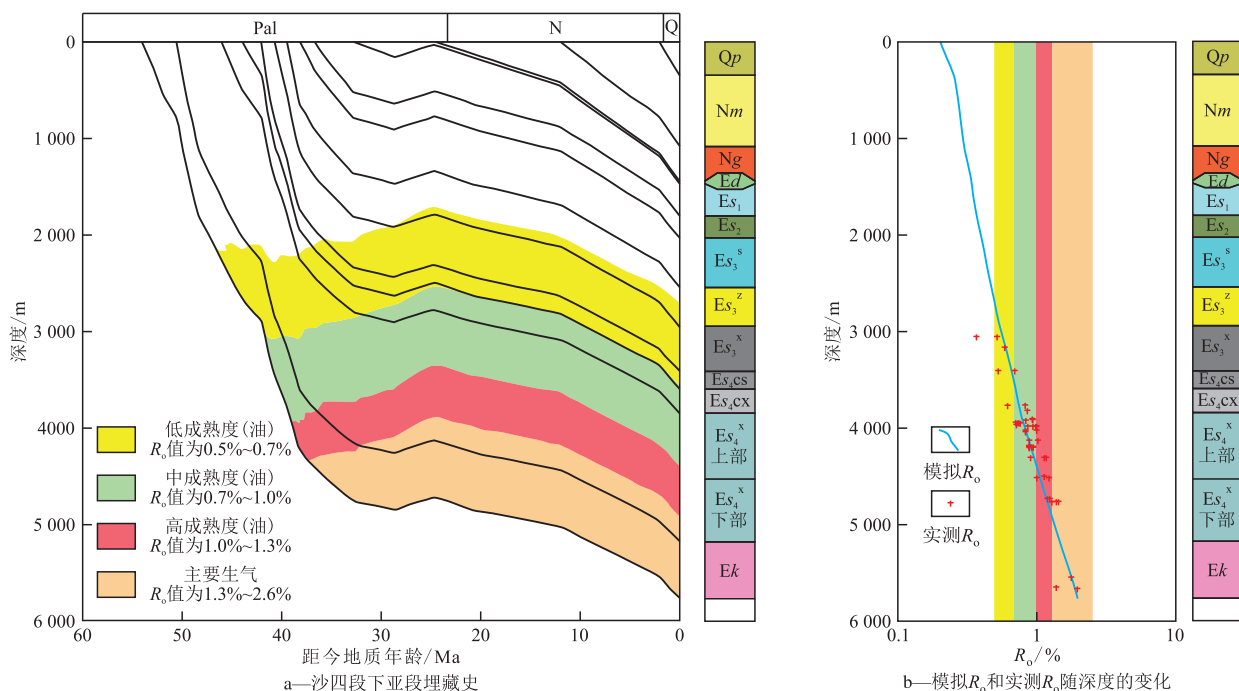


图11 民丰地区丰深2井沙四段下亚段埋藏史和热演化史
Fig.11 Burial history-thermal history of Es₄^x source rocks of Well FS2 in Minfeng area

供动力,又有助于油气保存,但对钻井及开采技术有一定要求。

烃源岩比上部相应生烃阶段时间早约2~8 Ma,现处于生油晚期和生气阶段。

6 结论

东营凹陷民丰地区沙四段下亚段盐湖相烃源岩有机质丰度高(*TOC*值多大于1%),有机质类型好(I和II₁型干酪根),母质来源为浮游生物/藻类有机质,沉积于还原-强还原环境,含有中等-优质烃源岩。基于建立的不同岩性*TOC*测井评价模型研究了民丰地区烃源岩*TOC*展布特征,全区*TOC*值均大于0.5%,在北部较高,是中等-优质烃源岩有利发育区,为盐湖相强还原环境下藻类勃发和有机质富集及保存的结果。

根据C₂₇重排甾烷/C₂₇规则甾烷、高规则甾烷/17α-藿烷等生物标志物特征参数,以垂深4180~4200 m为界,将沙四段下亚段烃源岩分为上部和下部。上部烃源岩与下部相比,具有高C₂₇重排甾烷/C₂₇规则甾烷、高规则甾烷/17α-藿烷、高奥利烷指数和高伽马蜡烷指数的特征,指示二者沉积环境、母质来源、水体盐度等略有差异,但都以还原环境为主。

烃源岩整体处于成熟-高成熟阶段。上部烃源岩R₀值多小于1.0%,下部多大于1.0%。盐上烃源岩的地温梯度和成熟度明显大于盐下和无盐烃源岩,地温梯度差可达1.8 °C/hm,R₀变化率差为0.088%/hm。上部烃源岩在沙三段沉积时期进入生油门限,沙一段沉积末期进入生油高峰,以生油为主。下部

符号解释

- AC——声波时差,μs/ft;
- CNL——补偿中子测井;
- DEN——体积密度,g/cm³;
- GR——自然伽马,API;
- GR_M——纯泥岩自然伽马,API;
- GR_{SG}——纯石膏或纯盐自然伽马,API;
- ΔGR——泥质含量;
- R_t——电阻率,Ω·m;
- TOC_p——预测总有机碳含量,%。

参考文献

[1] 乔荣臻,陈中红,李趁义,等. 东营凹陷古近系沙河街组深层油气相态及成藏模式[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 374-390.
QIAO Rongzhen, CHEN Zhonghong, LI Chenyi, et al. Petroleum phase states and accumulation models of the deep Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Depression, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44 (3): 374-390.

[2] 李延钧,宋国奇,李文涛,等. 济阳拗陷东营凹陷北带丰深1井区深层沙四下古油藏与天然气成因[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2):173-179.
LI Yanjun, SONG Guoqi, LI Wentao, et al. A fossil oil-reservoir and the gas origin in the Lower Sha-4 Member of the well

- fengshen-1 area, the north Dongying Zone of the Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(2): 173-179.
- [3] ZHOU X X. Origin and source of deep oils in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin: Insights from geochemical and geological analyses [C]. 21st International Sedimentological Congress, 2022, Beijing.
- [4] 王永诗, 陈涛, 张鹏飞, 等. 济阳拗陷古近系轻质原油藏勘探潜力与方向[J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1 605-1 614.
WANG Yongshi, CHEN Tao, ZHANG Pengfei, et al. Exploration potential and direction of Palaeogene light crude oil reservoirs in Jiyang Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(12): 1 605-1 614.
- [5] 丁飞, 蔡进功, 隋风贵, 等. 东营凹陷深层烃源岩生物标志物特征及其意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 192-198.
DING Fei, CAI Jingong, SUI Fenggui, et al. Characteristics of biomarker and its implications of deep source rocks from northern Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 192-198.
- [6] 高阳. 东营凹陷北部沙四段下亚段盐湖相烃源岩特征及展布[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(1): 10-15.
GAO Yang. Characteristics and distribution of salt lake source rocks from Lower Submember of 4th Member of Shahejie Formation, north Dongying Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(1): 10-15.
- [7] 高阳. 利用测井信息评价盐湖相烃源岩[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 730-737.
GAO Yang. Salt lake source rock evaluation by logging data [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 730-737.
- [8] 牛子铖, 王永诗, 王学军, 等. 东营凹陷南坡东段不同含硫量原油特征及高硫原油成因分析[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(5): 15-27.
NIU Zicheng, WANG Yongshi, WANG Xuejun, et al. Characteristics of crude oil with different sulfur content and genesis analysis of high-sulfur crude oil in eastern section of southern slope of Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(5): 15-27.
- [9] 巩建强, 杨怀宇, 王文彬, 等. 东营凹陷王家岗地区孔店组油气运移模式[J]. *断块油气田*, 2022, 29(3): 325-330.
GONG Jianqiang, YANG Huaiyu, WANG Wenbin, et al. Hydrocarbon migration model in Kongdian Formation of Wangjiagang area, Dongying Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(3): 325-330.
- [10] FENG Y L, LI S T, LU Y C. Sequence stratigraphy and architectural variability in Late Eocene lacustrine strata of the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 295(15): 1-26.
- [11] 张棣, 马云麒, 李兴意, 等. 托素湖湖水蒸发过程中析盐及其pH值的变化规律研究[J]. *盐湖研究*, 2022, 30(1): 46-56.
ZHANG Li, MA Yunqi, LI Xingyi, et al. Journal of salt lake research regularity of salt separation and the variation of PH values in the process of evaporation in Tuosu lake water [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, 30(1): 46-56.
- [12] 宋国奇, 刘鑫金, 刘惠民. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体成岩圈闭成因及主控因素[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(6): 37-41.
SONG Guoqi, LIU Xinjin, LIU Huimin. Study on genetic mechanism and controlling factors of conglomerate diagenesis trap in northern Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(6): 37-41.
- [13] 刘鑫金, 宋国奇, 刘惠民, 等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩油藏类型及序列模式[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(5): 20-23.
LIU Xinjin, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Study of conglomerate reservoir types and distribution in north slope zone, Dongying Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(5): 20-23.
- [14] 王淑萍, 徐守余, 董春梅, 等. 东营凹陷民丰洼陷北带沙四下亚段深层天然气储层成岩作用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(6): 1 747-1 759.
WANG Shuping, XU Shouyu, DONG Chunmei, et al. Diagenesis characteristics of deep natural gas reservoirs in Es₄^x in the north zone of Minfeng Sag in Dongying Depression [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(6): 1 747-1 759.
- [15] 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生代咸水湖相烃源岩和原油生物标志物组合特征[J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 119-123.
ZHANG Zhihuan, YANG Fan, LI Dongming. Biomarker assemblage characteristics of source rocks and associated crude oils in saline lake facies of Cenozoic in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 119-123.
- [16] 张枝焕, 杨藩, 方朝亮. 我国第三系咸化湖相有机质组成及环境意义[J]. *西安石油学院学报: 自然科学版*, 2002, 17(6): 16-20.
ZHANG Zhihuan, YANG Fan, FANG Zhaoliang. Geochemical characteristic and environment of organic matter of saline lakes in Tertiary, China [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 2002, 17(6): 16-20.
- [17] 隋风贵, 操应长, 刘惠民, 等. 东营凹陷北带东部古近系近岸水下扇储集物性演化及其油气成藏模式[J]. *地质学报*, 2010, 84(2): 246-256.
SUI Fenggui, CAO Yingchang, LIU Huimin, et al. Physical properties evolution and hydrocarbon accumulation of paleogene nearshore subaqueous fan in the eastern north margin of the Dongying Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(2): 246-256.
- [18] 宋明水, 茆书巍, 林会喜, 等. 断陷湖盆湖底扇砂岩体沉积特征及主控因素分析——以东营凹陷民丰地区沙三段中亚段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(3): 1-13.
SONG Mingshui, MAO Shuwei, LIN Huixi, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fan sand bodies in faulted basin: A case study of Middle Es₃ in Minfeng area, Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(3): 1-13.
- [19] WANG Q, HAO F, XU C G, et al. Geochemical characterization of QHD29 oils on the eastern margin of Shijiutuo uplift, Bohai Sea, China: Insights from biomarker and stable carbon iso-

- tope analysis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 64: 266-275.
- [20] HAO F, ZHOU X H, ZHU Y M, et al. Mechanisms of petroleum accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay Basin, China. Part 1: Origin and occurrence of crude oils [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1 528-1 542.
- [21] TISSOT B P, WELTE D H. *Petroleum formation and occurrence, second revised and enlarged ed* [M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [22] 陈治军, 张春明, 贺永红, 等. 银额盆地古生界过成熟烃源岩特征及其地球化学意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 682-695.
CHEN Zhijun, ZHANG Chunming, HE Yonghong, et al. Characteristics and geochemical indication of over-mature source rocks in the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 682-695.
- [23] CHEN X Y, HAO F, GUO L X, et al. Origin of petroleum accumulation in the Chaheji-gaojiapu structural belt of the Baxian Sag, Bohai Bay Basin, China: Insights from biomarker and geological analyse [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 93: 1-13.
- [24] 赵琳洁, 陆建林, 王保华, 等. 基于不同岩性的总有机碳分段预测方法——以东营凹陷始新统沙河街组三段下亚段为例[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 721-727.
ZHAO Linjie, LU Jianlin, WANG Baohua, et al. Segmented prediction of TOC based on lithology: a case study of the lower sub-member of the third member of the Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 721-727.
- [25] PASSEY Q R, CREANEY S, KULLA J B. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74 (5): 1 777-1 794.
- [26] 胡慧婷, 卢双舫, 刘超, 等. 测井资料计算源岩有机碳含量模型对比及分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(6): 1 199-1 205.
HU Huiting, LU Shuangfang, LIU Chao, et al. Models for calculating organic carbon content from logging information: comparison and analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29 (6): 1 199-1 205.
- [27] ZHOU X X, GAO G, LU X X, et al. Petroleum source and accumulation of WZ12 oils in the Weixi'nan sag, south China sea, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 681-698.
- [28] RIBOULLEAU A, SCHNYDER J, RIQUIER L, et al. Environmental change during the early cretaceous in the purbeck-type durlston bay section (dorset, southern England): a biomarker approach [J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38 (11): 1 804 - 1 823.
- [29] WANG L C, WANG C S, LI Y L, et al. Organic geochemistry of potential source rocks in the Tertiary Dingqinghu Formation, Nima Basin, Central Tibet [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2011, 34(1): 67-85.
- [30] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOVAN J M. The biomarker guide, biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [31] SHANMUGAM G. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69 (8): 1 241-1 254.
- [32] HAO F, ZHOU X H, ZHU Y M, et al. Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42 (4): 323-339.
- [33] SONG J L, LITTKER R, MAQUIL R, et al. Organic facies variability in the Posidonia black shale from Luxembourg: implications for thermal maturation and depositional environment [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 410: 316-336.
- [34] MOLDOVAN J M, SEIFERT W K, GALLEGOS E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69 (8): 1 255-1 268.
- [35] SEIFERT W K, MOLDOVAN J M. Applications of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(1): 77-95.
- [36] SEIFERT W K, MOLDOVAN J M. The effect of biodegradation on steranes and terpanes in crude oils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(1): 111-126.
- [37] MURRAY A P, SUMMONS R E, BOREHAM C J, et al. Biomarker and n-alkane isotope profiles for Tertiary oils: relationship to source rock depositional setting [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(3/5): 521-542.
- [38] MELLO U T, KARNER G D, ANDERSON R N. Role of salt in restraining the maturation of subsalt source rocks [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(7): 697-716.
- [39] 卓勤功, 赵孟军, 李勇, 等. 库车前陆盆地古近系岩盐对烃源岩生气高峰期的迟缓作用及其意义[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(12): 1 903-1 912.
ZHUO Qingong, ZHAO Mengjun, LI Yong, et al. The delay of Paleogene evaporate on the gas generation peak of source rocks and its significance in Kuqa Foreland Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(12): 1 903-1 912.
- [40] 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): 1 109-1 124.
LI Lei, LI Sumei, ZHANG Hong'an, et al. Characteristics and formation mechanisms for the saline lacustrine oil in the west slope of the Dongpu Sag [J]. *Geoscience*, 2018, 32(6): 1 109-1 124.
- [41] 陈湘飞, 李素梅, 张洪安, 等. 东濮凹陷膏盐岩对烃源岩成烃演化的控制作用及其石油地质意义[J]. *现代地质*, 2018, 32 (6): 1 125-1 136.
CHEN Xiangfei, LI Sumei, ZHANG Hong'an, et al. Controlling effects of gypsum-salt on hydrocarbon generation of source rocks in Dongpu Sag and its significance on petroleum geology

- [J]. *Geoscience*, 2018, 32(6): 1 125-1 136.
- [42] 吴海, 赵孟军, 卓勤功, 等. 膏盐岩对地层温度及烃源岩热演化的影响定量分析-以塔里木库车前陆盆地为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 550-558.
- WU Hai, ZHAO Mengjun, ZHUO Qingong, et al. Quantitative analysis of the effect of salt on geothermal temperature and source rock evolution: A case study of Kuqa foreland basin, Western China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 550-558.
- [43] 彭波, 邹华耀. 渤海盆地现今岩石圈热结构及新生代构造-热演化史[J]. *现代地质*, 2013, 27(6): 1 399-1 406.
- PENG Bo, ZOU Huayao. Present-day geothermal structure of lithosphere and the Cenozoic tectono-thermal evolution of Bohai Basin [J]. *Geoscience*, 2013, 27(6): 1 399-1 406.
- [44] 胡圣标, 张容燕, 罗毓晖, 等. 渤海盆地热历史及构造-热演化特征[J]. *地球物理学报*, 1999, 42(6): 748-755.
- HU Shengbiao, ZHANG Rongyan, LUO Yuhui, et al. Thermal history and tectonic-thermal evolution of Bohai Basin, East China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(6): 748-755.
- [45] 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): 1 255-1 264.
- JIANG Youlu, SU Shengmin, LIU Hua, et al. Differences in hydrocarbon accumulation stages and main controlling factors in the Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1 255-1 264.
- [46] 韩杨, 高先志, 周飞, 等. 柴达木盆地北缘腹部侏罗系烃源岩热演化特征及其对油气成藏影响[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(3): 358-369.
- HAN Yang, GAO Xianzhi, ZHOU Fei, et al. Thermal evolution of Jurassic source rocks and their impact on hydrocarbon accumulation in the northern margin of Qaidam Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(3): 358-369.
- [47] 郑见超, 李斌, 吴海燕, 等. 基于盆地模拟技术的烃源岩热演化史及油气关系研究——以塔里木盆地玉尔吐斯组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(5): 39-49.
- ZHENG Jianchao, LI Bin, WU Haiyan, et al. Study on the thermal history of the source rock and its relationship with hydrocarbon accumulation based on the basin modeling technology: a case of the Yuertusi Formation of Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(5): 39-49.
- [48] 周肖肖. 民丰地区沙四下亚段烃源岩生成油气相态演化研究[R]. 胜利油田博士后科研课题中期报告, 2023: 1-125.
- ZHOU Xiaoxiao. Study on phase evolution of hydrocarbon generation from source rock of Es₄^x in Minfeng area [R]. Mid-term report of Postdoctoral Research Project of Shengli Oilfield, 2023: 1-125.

编辑 林璐

“济阳坳陷古近系陆相断陷盆地页岩油富集机理及勘探技术” 入选“2022年度地质科技重要进展”

中国地质学会近日公布2022年度中国“地质科技重要进展、地质找矿重大成果”,由中国石化胜利油田分公司完成的“济阳坳陷古近系陆相断陷盆地页岩油富集机理及勘探技术”入选“2022年度地质科技重要进展”。这是胜利油田首次获此殊荣。

与北美海相页岩油相比,胜利油田济阳坳陷陆相页岩油发育时间较为“年轻”,平均埋深为3 000 m至5 000 m,局部埋深达5 500 m,大部分主力烃源岩的镜质体反射率(R_o)介于0.7%~0.9%,具有烃源岩成熟度低、油藏埋藏深、地层高温高压的特点。业内普遍认为,只有 R_o 值大于0.9%的中高成熟度烃源岩层系中的页岩油才有商业开发价值,因此济阳坳陷陆相断陷盆地页岩油勘探开发面临着较大的挑战。

科研人员研究发现,济阳坳陷古近系页岩属于“咸化环境烃源岩”,这种水体环境下形成的烃源岩有机质保存较好,在相对低的温压条件下可以生成大量石油,从而揭示了 R_o 值在0.7%左右的页岩油即富集可动的内在机理。同时,科研人员建立了陆相断陷盆地页岩岩相划分方案,明确了无机孔缝是济阳坳陷古近系页岩的主要储集空间,建立了页岩含油量量化表征方法等。基于以上新认识,科研人员又创建了页岩油“储集性、含油性、可动性、可压性”评价体系,形成了“地质-工程甜点”预测及“组合缝网压裂”增产技术。在一系列创新技术的有效指导下,济阳坳陷陆相断陷盆地页岩油的勘探工作取得战略性重大突破。2022年胜利油田新增页岩油控制地质储量1.13亿吨,预测地质储量10.37亿吨,展现了济阳坳陷陆相断陷盆地页岩油广阔的勘探开发前景。