

辽河坳陷大民屯凹陷沙河街组四段页岩油 富集资源潜力评价

卢双舫¹, 陈国辉¹, 王 民¹, 李进步¹, 王 新¹, 单俊峰², 胡英杰², 毛俊莉²

[1. 中国石油大学(华东) 非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油 辽河油田公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010]

摘要:页岩油具有高密度、高粘度以及低孔、低渗的特征, 开采难度较大, 因此对资源丰度相对较高、开采难度相对较小的富集资源进行评价十分必要。利用热解烃 S_1 与有机碳含量(TOC)的“三分性”关系确定 TOC 大于4%为靶区页岩油富集资源划分标准。热解烃 S_1 存在轻、重烃损失现象, 在利用其进行资源评价前, 需进行轻烃、重烃恢复。通过对比分析, 发现抽提后页岩样品的裂解烃 S_2 普遍降低, 说明 S_2 中包括一部分残留烃, 而该部分残留烃在氯仿抽提过程中已被去除。利用抽提前、后 S_2 的差值 ΔS_2 对 S_1 进行重烃恢复, 重烃恢复系数随成熟度的增大而增大。假设页岩在排烃过程中轻烃和重烃等比例排出, 利用生烃动力学原理对页岩生成各烃类组分比例进行评价, 进而根据该比例对 S_1 进行轻烃恢复, 轻烃恢复系数随着成熟度的增大呈先减小后增大的趋势。在测井评价页岩有机质非均质性(TOC 和 S_1) 的基础上, 对富集资源进行划分, 并利用 S_1 的轻烃、重烃恢复结果, 对页岩油富集资源进行资源评价。渤海湾盆地辽河坳陷大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 亚段页岩油富集资源量约为 2.2×10^8 t。

关键词:页岩油; 轻烃、重烃校正; 大民屯凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member 4 of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression

Lu Shuangfang¹, Chen Guohui¹, Wang Min¹, Li Jinbu¹, Wang Xin¹, Shan Junfeng²,
Hu Yingjie², Mao Junli²

[1. Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China]

Abstract: Recovery efficiency of shale oil is low due to high density, high viscosity, low porosity and low permeability, and it is necessary to evaluate the resource potential of the enriched resources that are high in resource abundance and low in exploitation difficulty. TOC over 4% is taken as the criteria for classification of enriched shale oil resource according to the triple-division relationship between S_1 and TOC . Because of the light and heavy hydrocarbon loss in S_1 , S_1 should be corrected before it is used to evaluate the resource potential. Comparative analysis shows that S_2 decreases when the shale sample is extracted by chloroform, indicating that there are some residual hydrocarbons in S_2 but they have been eliminated by extracting process. The distinction ΔS_2 is used to correct the heavy hydrocarbon of S_1 , and the correction coefficient increases with the increase of maturity. Assuming that the light and heavy hydrocarbons expel at the same rate during the hydrocarbon expulsion process, the ratio calculated with hydrocarbon generation kinetics theory is used to correct the light hydrocarbon of S_1 . With the increase of maturity, the correction coefficient of light hydrocarbons first decreases and then increases. On the basis of evaluating the organic heterogeneity by logging, the enriched shale oil resource is classified, and its potential is evaluated by using the corrected S_1 . The potential enriched shale oil resource is about 2.2×10^8 t in $E_2s^{4(2)}$ sub-member in the Damintun Sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin.

Key words: shale oil, light and heavy hydrocarbon correction, Damintun Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期: 2015-07-15; 修订日期: 2015-12-05。

第一作者简介: 卢双舫(1962—), 男, 博士、博士生导师, 油气地球化学与非常规油气勘探。E-mail: lushuangfang@upc.edu.cn。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(15CX06013A); 研究生创新工程项目(YCX2015002); 国家自然科学基金项目(41330313, 41172134); 中国石油科技创新基金项目(2011D-5006-0101)。

能源需求的日益攀升和常规油气资源的不断消耗,使油气供需矛盾日益突出,非常规能源越来越受到人们的重视。页岩气勘探、开发首先在北美取得了巨大成功^[1-3],全球范围内掀起了页岩气勘探、开发热潮^[4-6]。受页岩气开发的启示及天然气价格降低的调控作用,投资者开展了页岩油的勘探与开发^[7-9]。中国的页岩油气资源潜力巨大,初步预测可采页岩油资源量约为 $(30 \sim 60) \times 10^8 \text{ t}$ ^[10]。渤海湾盆地辽河拗陷早在20世纪70年代就在辽河油区兴隆台油田兴8井发现了泥岩裂缝油藏,但由于油质较稠,产能较差,未能引起石油工作者的重视。近年来,不断在泥岩地层中发现良好的油气显示。2001年,大民屯凹陷S224井在沙河街组四段二亚段($E_2s^{4(2)}$)的泥页岩段压裂试油,日产油16.2 t,2010年5月至2011年7月累计产油3 126.4 t,产气73 805 m³,此外,在大民屯凹陷内对137口探井的资料进行复查,其中50多口井在泥页岩地层具有良好的油气显示。

由于页岩储层具有低孔、低渗的特征,加上油相对气具有密度大、黏度大,难以流动的特征^[11-12],因此页岩油的开发难度极大,资源丰度较高的富集资源应为勘探开发的首选目标。对于页岩油资源富集程度的评价,首先需要建立富集资源评价标准。目前,对于页岩油富集资源评价标准的报道较少,前期研究中根据含油性与总有机碳的“三分性”关系将页岩油资源分为三级^[13],其中的Ⅱ级和Ⅲ级资源富集程度较低,对于页岩油的勘探开发意义不大,而Ⅰ级资源富集程度较高,是勘探开发的首选目标。因此本次研究将Ⅰ级资

源评价标准作为富集资源评价标准。

前人在对页岩油进行资源评价的过程中,通常用热解烃(S_1)代表残留烃含量^[14-16],但由于实验的原因, S_1 缺失相当一部分轻烃和重烃,无法代表页岩中的全部残留烃含量^[14,17]。缺失的轻烃和重烃对于页岩油资源评价具有重要意义,同时轻烃含量对于提高页岩油的流动性具有重要意义,因此有必要对 S_1 进行轻烃和重烃的补偿校正。对于重烃校正,根据前人^[18]的方法,通过对抽提前、后裂解烃(S_2)进行对比,利用其差值对重烃进行校正;对于轻烃校正,张林晔^[17]等人曾利用液氮对刚取出的岩心进行冷冻处理,然后将冷冻的样品放置于室温,检测放置不同时间时的 S_1 值,根据其损失率对 S_1 的轻烃进行恢复,但岩样从井底上升至地表的过程中,已经损失大量轻烃,此部分轻烃无法恢复。本次研究采用组分化学动力学方法对生烃过程中各碳数组分的含量进行计算,结合重烃恢复结果对轻烃进行恢复。

本文通过对靶区泥页岩有机地球化学数据进行分析,建立页岩油富集资源评价标准,利用测井方法对泥页岩中有机质分布非均质性进行评价,在对残留烃进行重烃校正和轻烃补偿的基础上,对大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 页岩油富集资源潜力进行评价。

1 地质概况

大民屯凹陷在构造上位于渤海湾盆地辽河拗陷东北部(图1),平面上呈不规则三角形,南宽北窄,四周

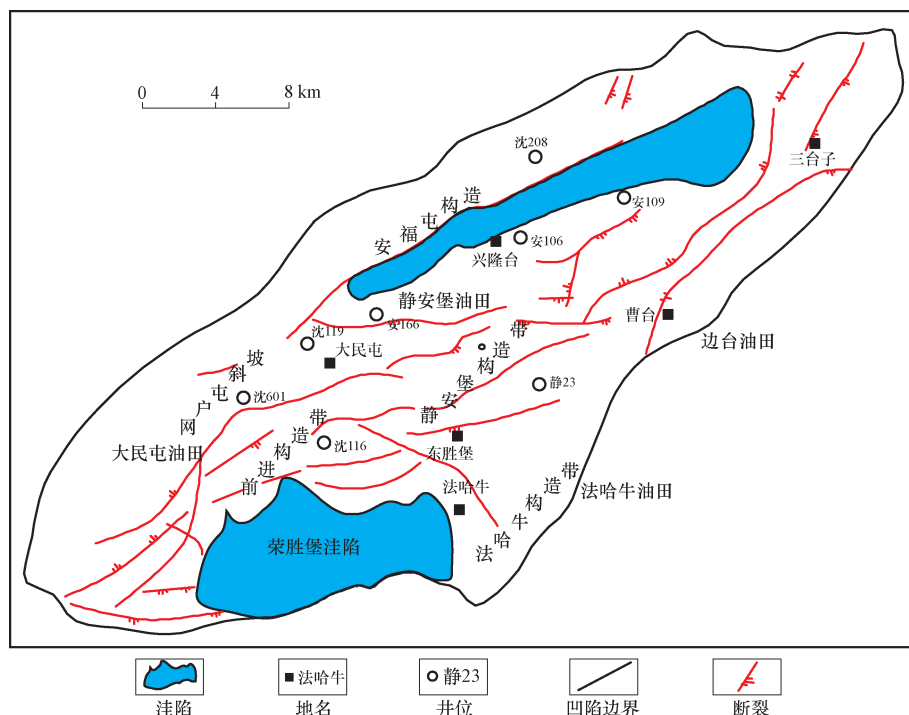


图1 大民屯凹陷构造单元划分

Fig. 1 Structural unit division of the Damintun Sag

为边界断层所限^[19-20]。面积约为 800 km²。截止 2008 年底,探明石油地质储量 3.24×10^8 t, 累计天然气探明储量(气层气) 226.2×10^8 m³, 是我国东部著名的“小而肥”含油凹陷,也是闻名于世的高蜡高凝油生产基地。

2 实验及结果

2.1 实验仪器

有机碳含量测试采用美国利柯公司的 CS230 碳硫分析仪;热解实验采用 Rock-Eval 6 热解仪;氯仿沥青“A”测试采用 YS-全自动多功能抽提仪;镜质组反射率测试采用 UMSP-50 显微光度计。

2.2 实验结果

地球化学实验分析结果表明,大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 油页岩有机质丰度极高,总有机碳含量(TOC)分布在 1.18% ~ 16.99%,平均可达 7.16%,氯仿沥青“A”含量分布在 0.028% ~ 1.70%,平均可达 0.49%, $S_1 + S_2$ 分布在 2.45 ~ 85.84 mg/g,平均可达 41.07 mg/g,主体部分属于好烃源岩或极好烃源岩级别。 $T_{max} - HI$ (热解峰温-氢指数)图版显示,有机质类型以 I 型为主,极少部分表现为 II₁ 型和 III₂ 型。镜质体反射率(R_o)主体部分在 0.5% ~ 1.0%,表明成熟度处在生油阶段(图 2)。从有机质的丰度、类型和成熟度来看,大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 泥页岩具有良好的生油能力且正处于大量生油阶段,是本区的主要生油岩之一,因其生油量巨

大,可在大量排油形成油藏的同时,仍有大量原油原地滞留,为页岩油藏的形成提供物质基础。

将泥页岩样品粉碎至 100 目,分成两份,对其中一份样品直接进行热解实验,测得热解烃 S_1 和裂解烃 S_2 ,实际上 S_2 既包括残留于岩样中的重质烃又包括干酪根裂解烃。对另一份样品进行氯仿抽提,对抽提后的岩样进行热解,测得裂解烃 S'_2 ,由于氯仿抽提过程去除了样品中的残留油,因此 S'_2 不包括残留于岩样中的重质烃,仅包括干酪根裂解烃,因此, S'_2 普遍低于 S_2 (图 3)。

对 A17 井泥页岩样品进行 Rock-Eval 和 PY-GC 实验,有机质生成各组分烃类累积转化率结果如图 4 所示,样品 TOC 为 11.28%, S_1 为 0.13 mg/g, S_2 为 55.04 mg/g。

3 讨论

3.1 泥页岩有机质非均质性测井评价

泥页岩 TOC 和 S_1 是页岩油资源评价中的重要参数。受构造变动、气候变化、沉积充填等所导致的沉积环境变迁的影响,有机质的发育与分布存在明显的非均质性。受样品分析周期、费用、数量的制约,实测数据总是难以达到精细描述泥页岩有机质分布非均质性的需求。不过,由于有机质的发育特征对众多测井响应(如声波、电阻、中子、密度、伽马等)都有明显的影响^[21-23],使得利用测井资料来评价泥页岩有机非均质性成为可能。近年来,以 $\Delta \log R$ 模型为代表的测井地化技术在常规与非常规油气勘探中对源岩 TOC 非均

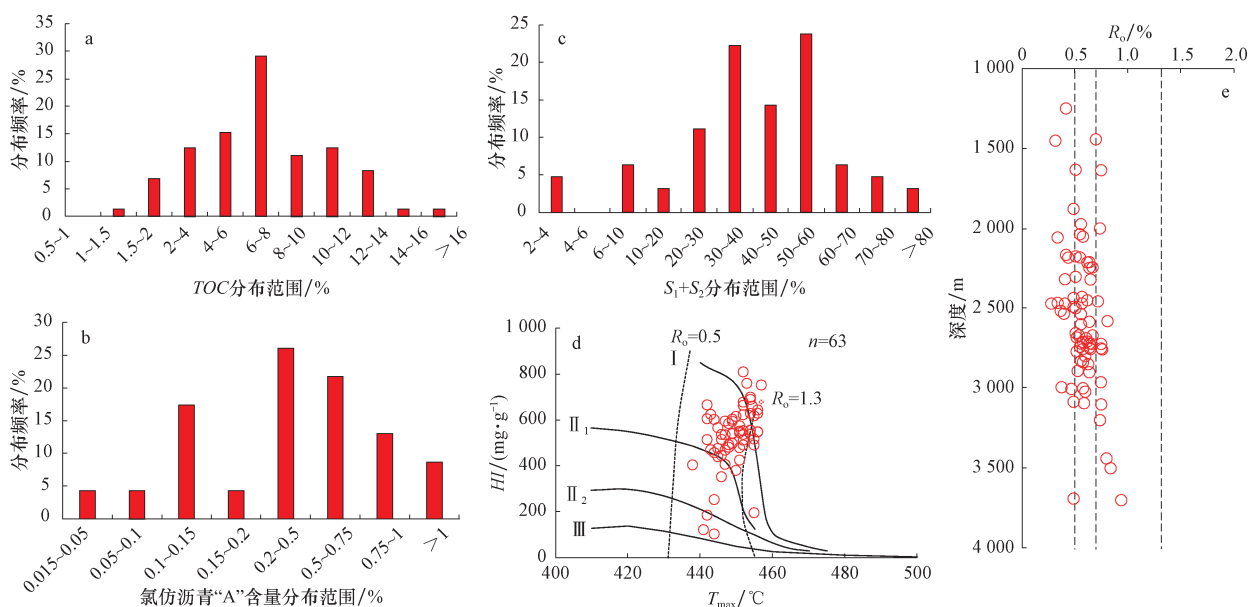


图 2 大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 泥页岩有机质特征

Fig. 2 Organic matter characteristics of the $E_2s^{4(2)}$ shale in the Damintun Sag

a. TOC 分布频率直方图; b. 氯仿沥青“A”含量分布频率直方图; c. 生烃势分布频率直方图; d. 有机质类型划分; e. 成熟度-深度关系

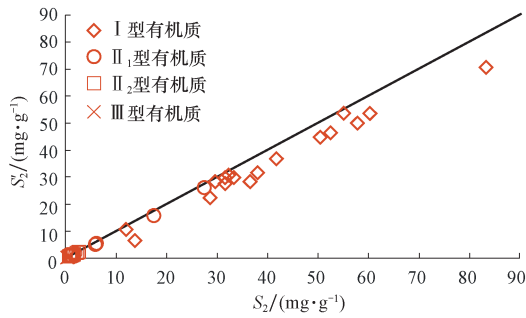


图3 大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 泥页岩抽提前、后热解实验 S_2 对比

Fig. 3 Comparison of S_2 before and after extraction of shale in the $E_2s^{4(2)}$ in the Damintun Sag

质性的评价方面得到了较为广泛、成功的探索和应用^[24-27]。然而, TOC 显然不如 S_1 能够更为直观地反映泥页岩的含油量。理论上, S_1 含量的变化同样会引起相应的测井响应, 这也使得利用测井资料直观评价泥页岩中的含油性成为了可能。

本次采用改进的 $\Delta \log R$ 模型^[28-29] 对 S352 井、S224 井、A64 井和 A1 井建立 TOC 评价测井模型, 同时对 S352 井、S224 井和 A64 井建立 S_1 评价测井模型, 将模型在全区内进行推广应用。

3.2 页岩油富集段划分

泥页岩低孔、低渗的特征决定着页岩油资源开发难度较大, 并非所有资源都可以被有效开采, 只有聚集程度较高的富集资源可能被有效开采, 因此, 需要对页岩油富集资源进行有针对性的评价。目前, 关于分级评价标准及依据的报道较少, 虽然国内学者^[30-33] 曾尝试提出过页岩气的分级标准, 但对页岩油并不适用。早期研究中, 在总结了我国东部大部分陆相盆地的页岩含油性规律的基础上, 依据 S_1 与 TOC 关系的“三分性”原则建立页岩油资源分级的评价标准^[13], 整体上 S_1 随 TOC 的增大而增大, 但当 TOC 达到一定值时, S_1 不再随 TOC 的增大而变化, 即含油达到饱和, 此时对于页岩油开发最为有利, 将此时 TOC 作为页岩油资源

富集段划分标准。本文按照此原理, 将 TOC 大于 4% 作为富集段划分标准(图 5)。

对页岩油藏进行开发时需要进行水利压裂, 页岩层系过薄不利于压裂技术的实施, 由于水力压裂波范围通常为 30 m, 因此本文将厚度大于 30 m, 且泥页岩厚度超过 2/3 (以泥页岩为主体) 的地层作为泥页岩有效层系。在泥页岩有效层系内, 如果泥页岩中 TOC 大于 4% 的部分超过 2/3, 则将该段作为页岩油资源富集段。在对泥页岩有机非均质性进行测井评价的基础上, 对靶区内页岩油资源富集段进行划分。

3.3 泥页岩含油性参数校正

在对页岩油资源进行评价时一般采用 S_1 这一参数进行计算。 S_1 为热解实验升温过程中 300 °C 以前热蒸发出来的、已经存在于源岩中的烃类产物。然而, 部分已存在于泥页岩中的重质烃类产物沸点远高于 300 °C, 加之干酪根对烃类具有吸附、溶胀作用, 使泥页岩中的残留烃无法在 300 °C 之前被完全热蒸发出来, 因此一部分残留烃无法作为 S_1 被检测, 而是在 300 °C 之后被当做 S_2 检测^[14,18]。另外, 在岩心从井底到达地面的过程中、岩心在岩心库中长时间放置以及实验前对样品的粉碎过程中, 泥页岩中的气态烃 (C_{1-5}) 和轻质液态烃 (C_{6-13}) 已经损失殆尽^[14,17]。因此, 采用热解分析得到的 S_1 并不能代表地下岩石中残留烃量。地下泥页岩中的原油应该包括以下三部分: ①实测 S_1 ; ②热解分析前已经损失的小分子烃类; ③被作为 S_2 检测的重质残留烃。所以对页岩油资源潜力进行评价时需要将 S_1 进行重烃校正和轻烃补偿。

对于 S_1 的重烃校正, 本次研究对抽提前、后岩样热解所得的 S_2 进行对比, S_2 与 S'_2 之差 (ΔS_2) 即为 S_1 所未检测到的那部分重质残留烃含量, 即 S_1 的重烃损失量, ΔS_2 与 S_1 的比值即为 S_1 的重烃恢复系数 K_H [公式(1)]。通过对大民屯凹陷和四川盆地实验数据进行分析, 发现 S_1 的重烃恢复系数 k_H 随着 T_{max} (成熟度) 的增大而降低(图 6), 原因在于随着成熟度的增

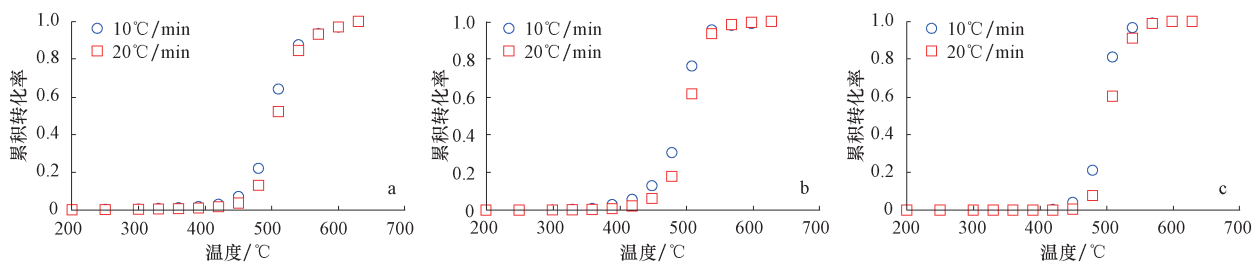
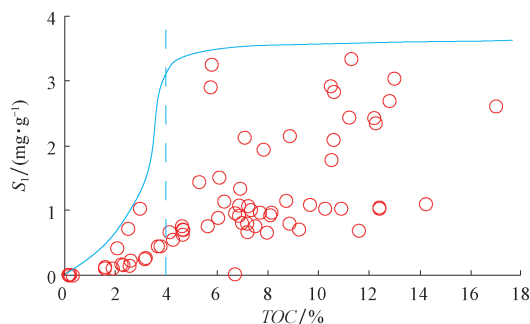
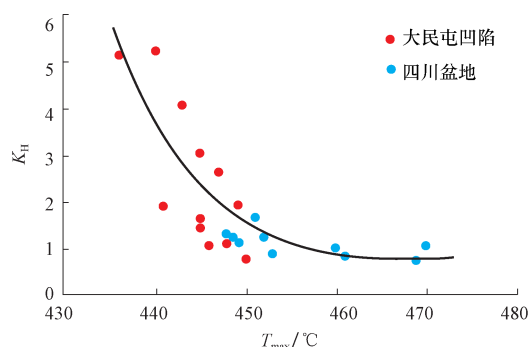


图4 大民屯凹陷 A17 井 $E_2s^{4(2)}$ 泥页岩 PY-GC 实验累积转化率

Fig. 4 Cumulative conversion rate measured by PY-GC experiment of the $E_2s^{4(2)}$ shale in Well A17 in the Damintun Sag

a. 干酪根生成 C_{1-5} 累积转化率; b. 干酪根生成 C_{6-13} 累积转化率; c. 干酪根生成 C_{14+} 累积转化率

图5 大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 页岩油资源富集段划分标准Fig. 5 Criteria for classification of enriched shale oil resource in the $E_2s^{4(2)}$ in the Damintun Sag图6 大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 泥页岩 S_1 重烃恢复系数(K_H)Fig. 6 Heavy hydrocarbon correction coefficient of the $E_2s^{4(2)}$ shale in the Damintun Sag

高,泥页岩所生成的原油油质变轻,重质组分变少,重烃的损失随之变小。

$$K_H = \frac{\Delta S_2}{S_1} = \frac{S_2 - S'_2}{S_1} \quad (1)$$

式中: K_H 为泥页岩重烃恢复系数,无量纲; ΔS_2 为 S_2 与 S'_2 之差,mg/g; S_1, S_2, S'_2 分别为抽提前泥页岩热解烃、裂解烃和抽提后泥页岩裂解烃含量,mg/g。

前人对轻烃补偿校正的研究较少,且认识并不相同。如 Cools^[34] 认为轻烃大部分损失掉了,约占 35% (C_{14-}/C_{5+}); Hunt^[35] 认为原油中约有 30% 的轻烃;张林晔^[17] 认为约有一半的残留烃在岩心静置及分析测试过程中损失。本次研究假设所生成的油气中各组分比例与残留油气中各组分比例近似相等,干酪根生成油气经过初次裂解和二次裂解两部分反应,根据化学动力学原理^[36] 对干酪根初次裂解过程以及原油二次裂解过程进行化学动力学标定,得到各个反应的化学动力学参数(图 7)。另外,用大庆轻质油进行金管实验所得的成气过程近似表征 C_{6-13} 裂解成气过程^[37],利用饱和烃和芳烃裂解成气过程近似表征 C_{14+} 裂解成气过程^[38]。对化学动力学参数进行地质应用,结合 Easy R_o 模型^[39-40] 计算出不同 R_o 时各个油气组分产率的比例,进而得到不同 R_o 时的轻烃恢复系数

($K_L = C_{6-13}/C_{14+}$), K_L 约在 60% ~ 100% (图 8)。轻烃的补偿校正系数 (K_L) 受成熟度和有机质类型双重影响。

前人对钻井取心后立即用液氮冷冻的岩心进行分析,认为渤南洼陷 $E_2s^{3(F)}$ (沙河街组三段下亚段) 泥页岩 S_1 轻烃损失量约为 $S_{1\text{实测}}$ 值的一半^[17],相比之下,前人研究所求得的恢复系数偏低,原因在于其在恢复过程中认为钻井取心后立即用液氮冷冻的岩心没有轻烃损失。

由上述 S_1 重烃校正和轻烃补偿的方法可得到原始残留烃量 S_1^0 :

$$S_1^0 = S_{1\text{实测}} + S_{1\text{实测}}K_H + K_L(S_{1\text{实测}} + S_{1\text{实测}}K_H) \quad (2)$$

式中: S_1^0 为 S_1 经轻烃、重烃恢复后得到的原始残油量,mg/g; $S_{1\text{实测}}$ 为抽提前测得的热解烃含量,mg/g; K_H 为 S_1 重烃恢复系数,无量纲; K_L 为轻烃恢复系数。

3.4 页岩油富集资源潜力评价

根据上述所建立的 S_1 重烃校正和轻烃补偿方案,对 S_1 的评价结果进行恢复校正,校正后的 S_1 即可表征单位质量岩石中含油量。根据测井评价所划分的页

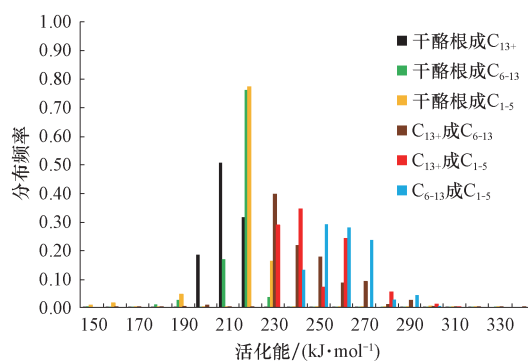
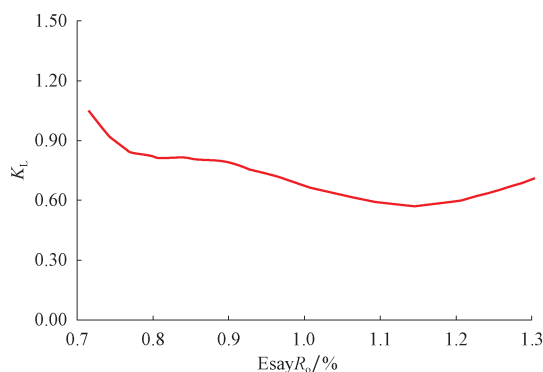


图7 大民屯凹陷 A17 井活化能分布直方图

Fig. 7 Activation energy distribution histogram of Well A17 in the Damintun Sag

图8 大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 泥页岩 S_1 轻烃恢复系数(K_L)Fig. 8 Light hydrocarbon correction coefficient of the $E_2s^{4(2)}$ shale in the Damintun Sag

页岩油资源富集段范围,利用体积法对靶区页岩油富集段内的资源强度进行评价,靶区富集段页岩油资源强度分布在 $(120 \sim 360) \times 10^4 \text{ t/km}^2$,资源量约为 $2.2 \times 10^8 \text{ t}$ 。

4 结论

1) 大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ TOC 平均达到 7.16%, 氯仿沥青“A”含量平均可达 0.49%, $S_1 + S_2$ 平均可达 41.07 mg/g, 有机质丰度主体达到好烃源岩或极好烃源岩级别, 有机质类型以 I 型为主, R_o 主体分布在 0.5% ~ 1.0%, 处于生油阶段。从地球化学特征来看, 具备页岩油成藏的物质基础。

2) 根据 S_1 与 TOC“三分性”关系, 将 TOC 大于 4% 作为靶区页岩油富集段划分标准, 对靶区有机质非均质性 (TOC 和 S_1) 进行测井评价, 结合富集段划分标准对靶区页岩油富集段进行划分。

3) 利用 S_1 作为含油性参数对页岩油进行资源潜力评价时, 需对 S_1 进行重烃校正和轻烃补偿。对于重烃校正, 根据抽提前、后岩样热解所得 S_2 和 S'_2 差值 ΔS_2 进行恢复, 重烃校正系数 (K_H) 随成熟度的增加而降低; 对于轻烃补偿, 根据有机质生成油气中轻烃组分占重烃组分的比例进行恢复, 轻烃补偿系数 (K_L) 随成熟度的增大呈先降低后增大的趋势。

4) 靶区页岩油富集段内资源量约为 $2.2 \times 10^8 \text{ t}$ 。

参 考 文 献

- [1] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale - gas systems; The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG bulletin, 2007, 91(4): 475 - 499.
- [2] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin; Application of an integrated formation evaluation[J]. AAPG bulletin, 2008, 92(1): 87 - 125.
- [3] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin; issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523 - 533.
- [4] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征, 重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129 - 145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129 - 145.
- [5] Badics B, Vető I. Source rocks and petroleum systems in the Hungarian part of the Pannonian Basin; The potential for shale gas and shale oil plays[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 31(1): 53 - 69.
- [6] Horsfield B, Schulz H M. Shale gas exploration and exploitation[J]. Marine and petroleum geology, 2012, 31(1): 1 - 2.
- [7] Kinley T J, Cook L W, Breyer J A, et al. Hydrocarbon potential of the Barnett Shale (Mississippian), Delaware Basin, west Texas and southeastern New Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(8): 967 - 991.
- [8] Kuhn P P, di Primio R, Hill R, et al. Three-dimensional modeling study of the low-permeability petroleum system of the Bakken Formation[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(10): 1867 - 1897.
- [9] Kirschbaum M A, Mercier T J. Controls on the deposition and preservation of the Cretaceous Mowry Shale and Frontier Formation and equivalents, Rocky Mountain region, Colorado, Utah, and Wyoming[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(6): 899 - 921.
- [10] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制, 地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14 - 26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 15 - 27.
- [11] Jarvie, Daniel M. Shale Resource Systems for Oil and Gas; Part 1-Shale-gas Resource Systems. (2012): 69 - 87.
- [12] Jarvie, Daniel M. Shale resource systems for oil and gas; Part 2-Shale-oil resource systems. (2012): 89 - 119.
- [13] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249 - 256.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources; Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 268 - 276.
- [14] Jarvie D M, Jarvie B M, Weldon W D, et al. Components and processes impacting production success from unconventional shale resource systems[J]. Energy & Fuels, 2012, 20(1): 295 - 300.
- [15] 宋国奇, 张林晔, 卢双舫, 等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 221 - 228.
Song Guoqi, Zhang Linye, Lu Shuangfang, et al. Resource evaluation method for shale oil and its application[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 221 - 228.
- [16] 武晓玲, 高波, 叶欣, 等. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 455 - 462.
Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin, et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 455 - 462.
- [17] 张林晔, 李政, 李钜源, 等. 东营凹陷古近系泥页岩中存在可供开采的油气资源[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 1 - 13.
Zhang Linye, Li Zheng, Li Juyuan, et al. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the palaeogene shale of Dongying depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 1 - 13.
- [18] 王安桥, 郑保明. 热解色谱分析参数的校正[J]. 石油实验地质, 1987, 9(4): 342 - 350.
Wang Anqiao, Zheng Baoming. Calibration of analytic parameters for pyrolytic chromatography [J]. Experimental Petroleum Geology, 1987, 9(4): 342 - 350.
- [19] 谢文彦, 姜建群, 张占文, 等. 大民屯凹陷油气系统研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 38 - 42.
Xie Wenyan, Jiang Jianqun, Zhang Zhanwen, et al. The petroleum system in the damingtun sag, Liaohe oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 38 - 42.
- [20] 史建南. 大民屯凹陷油气性质与成藏机理研究[M]. 中国地质大

- 学,2004.
- Shi Jiannan. Study on Hydrocarbon Characteristics and Accumulation Mechanism in Damintun Depression [M]. China University of Geosciences, 2004.
- [21] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [22] Herron, Susan L., and Louis Le Tendre. Wireline Source-Rock Evaluation in the Paris Basin: Chapter 5. (1990): 57-71.
- [23] 黄文彪, 邓守伟, 卢双舫, 等. 泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青山口组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 704-711.
- Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 704-711.
- [24] Passey Q R, Bohacs K M, Esch W L, et al. From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir-Geologic and Petrophysical Characterization of Unconventional Shale-Gas Reservoirs [J]. 2010.
- [25] Coope D F, Quinn T H, Frost E, et al. A rock model for shale gas and its application using magnetic resonance and conventional LWD logs [C] // SPWLA 50th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2009.
- [26] Quirein J A, Murphy E E, Praznik G, et al. A Comparison of Core and Well Log Data to Evaluate Porosity, TOC, and Hydrocarbon Volume in the Eagle Ford Shale [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [27] Witkowski J M, Galford J E, Quirein J A, et al. Predicting pyrite and total organic carbon from well logs for enhancing shale reservoir interpretation [C] // SPE Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [28] 刘超, 卢双舫, 黄文彪, 等. $\Delta\log R$ 技术改进及其在烃源岩评价中的应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(3): 27-31.
- Liu Chao, Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, et al. Improvement of $\Delta\log R$ and its application in source rocks evaluation [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2011, 30(3): 27-31.
- [29] 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): 1199-1206.
- 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): 1199-1206.
- [30] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [31] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳拗陷古近系陆相页岩油产量的影响因素 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 463-471.
- Song Guoqi, Xu Xingyou, Li Zheng, et al. Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang depression [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 463-471.
- [32] 柳波, 吕延防, 冉清昌, 等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 280-285.
- Liu Bo, Lü Yanfang, Ran Qingchang, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.
- [33] 程克明, 王世谦, 董大忠, 等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 40-44.
- Cheng Keming, Wang Shiqian, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi formation, the Upper Yangtze region [J]. Natural gas industry, 2009, 29(5): 40-44.
- [34] Cooles G P, Mackenzie A S, Quigley T M. Calculation of petroleum masses generated and expelled from source rocks [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1): 235-245.
- [35] Hunt J M, Huc A Y, Whelan J K. Generation of light hydrocarbons in sedimentary rocks [J]. Nature, 1980, 288: 688-690.
- [36] 卢双舫. 有机质的成烃动力学理论及其应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 62-74.
- Lu Shuangfang. Kinetics theory of hydrocarbon generation from organic matter and its application [M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 1996: 62-74.
- [37] 卢双舫, 李冬, 王跃文, 等. 倾油性有机质生成轻质油的评价方法及其应用 [J]. 石油学报, 2007, 28(5): 63-71.
- Lu Shuangfang, Li Dong, Wang Yuewen, et al. Resource evaluation method for generating condensate oil and light oil from sapropelic organic matter and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 63-71.
- [38] 卢双舫, 付晓泰, 陈昕, 等. 原油族组分成气的化学动力学模型及其标定 [J]. 地质学报, 1997, 71(4): 367-373.
- Lu Shuangfang, Fu Xiaotai, Chen Xin, et al. Chemical kinetic models of generation of gas by various groups in crude oil and their calibration [C]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 71(4): 367-373.
- [39] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [40] Burnham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(10): 2649-2657.

(编辑 张玉银)