

doi: 10.13745/j.esf.2016.01.006

辽河西部凹陷沙河街组页岩油聚集条件及资源计算

葛明娜¹, 张金川^{2,3}, 包书景¹, 任收麦¹, 唐 玄^{2,3}, 杨 超^{2,3}

1. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100029
2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083
3. 国土资源部页岩气资源战略评价重点实验室, 北京 100083

GE Mingna¹, ZHANG Jinchuan^{2,3}, BAO Shujing¹, REN Shoumai¹, TANG Xuan^{2,3}, YANG Chao^{2,3}

1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China
2. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
3. Key Laboratory of Shale Gas Exploration and Evaluation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China

GE Mingna, ZHANG Jinchuan, BAO Shujing, et al. Shale oil accumulation conditions and resource calculation of the Shahejie Formation in the Western sag, Liaohe. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 064-073

Abstract: To identify shale oil exploration potential of Shahejie Formation from Liaohe west sag and the controlling factors of shale oil, focused on Es₃ Formation, combined with seismic and logging data, based on an emphasis on organic-rich shale hydrocarbon potential, reservoir property and oil-bearing assessment by the FIB-SEM, automatic helium porosity determination and BET-BJH tests, the shale oil resource calculation methods of Es₃ are analyzed. The results show that, (1) the organic carbon content has a range of 1.0%–8.54% with a main value of 2.15%; R_o ranges from 0.32% to 1.57% with a main value of 0.65%, corresponding to the oil window; (2) six kinds of micropores developed in the shale such as inter-granular pores, grain pore and micro-fracture. They are dominated by mesopores with diameter between 3.9 and 20 nm; (3) Es₃ Formation has 1 industrial oil flow, 2 oil-enriched layers and 16 oil spots; (4) the methods-unit calculation method of shale oil resource was analyzed by probability and statistics, analogy, weight assignment principle and in unit division-step calculation-cumulative sum manner. It is concluded that Es₃ Formation has a good exploration prospect and should be selected as an area with abundant organic matter, moderate thermal evolution, high porosity-permeability and oiliness. In contrast, formations with too low thermal evolution or too high content of clay, will be avoided.

Key words: Liaohe west sag; Shahejie Formation; shale oil; oil-bearing; unit calculation method; exploration prospect

摘 要:为查明辽河拗陷西部凹陷页岩油勘探潜力,明确页岩油富集控制因素,分析了沙三段页岩油成藏条件。以沙三段泥页岩为研究对象,通过 FIB-SEM、自动氦孔隙度测定及 BET-BJH 等测试手段,结合地震、测井资料,以富有机质泥页岩生烃潜力、储集性能及含油性评价为重点,对辽河西部凹陷沙河街组页岩油资源计算方法进行探讨。分析结果表明:(1)TOC 含量 1.0%~8.54%,众值为 2.15%;R_o 为 0.32%~1.57%,众值为 0.65%,处于生油窗内;(2)泥页岩发育粒间孔、粒内孔和微裂缝等 6 种微孔缝类型,其中微孔以 3.9~20 nm 的中孔为主;(3)西部凹陷沙三段发现工业油流 1 处,富含油 2 层,油斑 16 层,具有较好的含油性;(4)结合概率统计、类比法、权重赋值等手段,利用单元划分—分步计算—累加求和原理,初步探讨了页岩油资源计算方法——单元算法。通过方法试用,认为沙三段具有较好的页岩油成藏条件和勘探前景。在辽河拗陷页岩油勘探实践中,宜将有机碳含量高、成熟度适中、孔渗性好及含油率高的区域作为有利选区优先领域,尽量避免热演化程度低、黏土矿物含量高的区域。

关键词:西部凹陷;沙河街组;页岩油;含油率;单元算法;勘探前景

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)01-0064-10

收稿日期:2015-09-16;修回日期:2015-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41272167)

作者简介:葛明娜(1988—),女,助理工程师,主要从事非常规油气地质研究。E-mail:gm80127@sina.cn

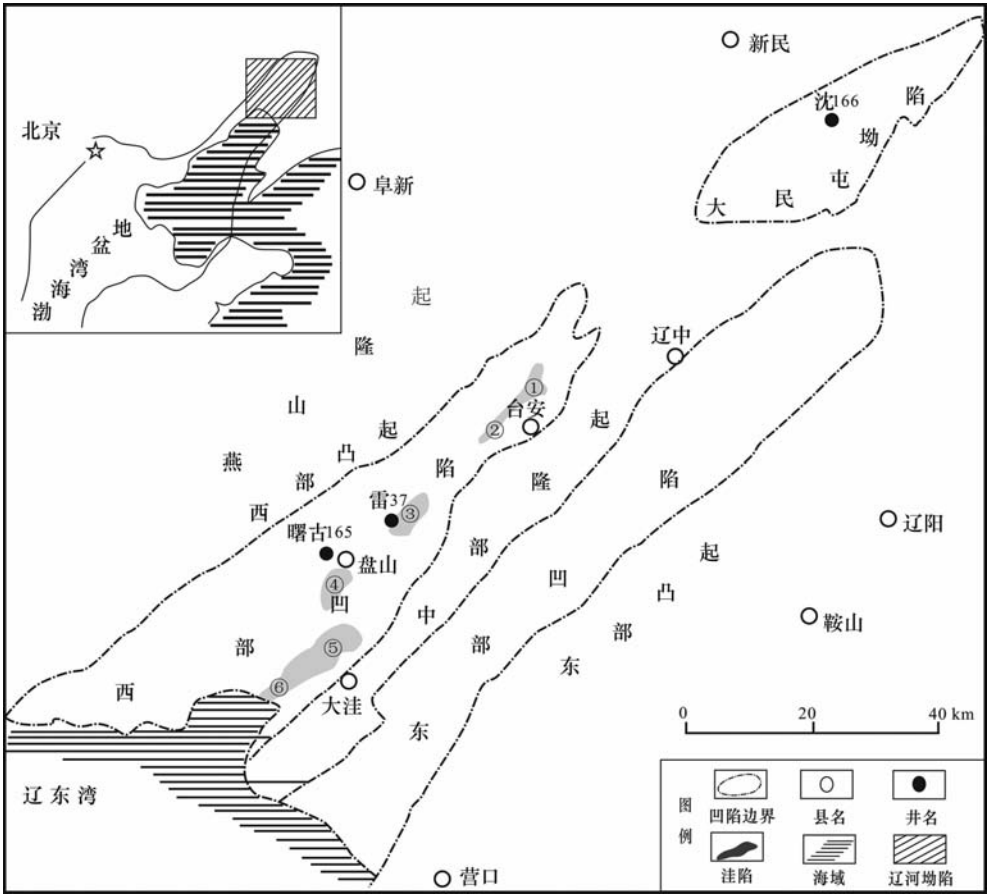
近年来,非常规油气资源的勘探开发越来越受到各国关注,尤其在北美国家已成为勘探开发的重点领域^[1]。继页岩气成功开发之后,页岩油也成为关注的热点,Bakken^[2]和 Eagle Ford^[3]是美国发现的最大的页岩油区块,加拿大的阿尔伯达盆地也是重要的页岩油勘探开发领域^[4]。我国页岩油资源丰富,主要发育在中新生代陆相页岩层系中,目前已在南襄盆地泌阳凹陷(BYHF-1井,水平分段压裂,日产油8~10 t^[5];泌页2HF井大型压裂后获高产工业油流,平均日产油23 m³,最高日产油28 m³)、泌阳凹陷安深1井获产4 m³/d^[6]以及渤海湾盆地济阳凹陷(BY1井)等多个区域发现良好的页岩油气显示。

辽河油田最早开展页岩油气中美合作研究。西部凹陷是辽河拗陷最大的富油凹陷。研究区曙古165井在沙三段泥岩中获工业油流,日产油14.4 m³,累产油24.0 m³;在近300 m泥岩层段发现2套50 m厚的富含油层;在115 m厚油页岩夹粉砂岩层段发

现油斑16层,气测值20%~100%,证实该区具有良好的页岩油勘探前景。目前,辽河西部凹陷在页岩油方面研究薄弱,对页岩油聚集条件、赋存方式以及资源计算方法认识欠缺。根据页岩油资源计算现状,结合油田资料情况,有必要进一步明确页岩油的资源计算方法和资源前景,为辽河西部凹陷页岩油的勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地的东北角,是在前中生代复杂基底上发育起来的中、新生代大陆裂谷拗陷,包括三凸起和三凹陷。在复杂的基底结构基础上,辽河拗陷经历“拱张、裂陷和拗陷”演化阶段^[7]。其中西部凹陷古近系陆上分布面积约2 560 km²,形成了牛心坨、陈家、台安、盘山、清水及鸳鸯沟6个生油洼陷(图1)。从凹陷的地质结构上分析,属于较为典型的箕状凹陷,可分为斜坡



①~⑥依次代表牛心坨、台安、陈家、盘山、清水和鸳鸯沟洼陷。

图1 辽河拗陷构造分区图

Fig. 1 Tectonic divisions of Liaohe Depression

带、中央隆起带、洼陷带、陡坡带 4 个不同的构造区带。

西部凹陷发育多种沉积类型。沙三段时期,泥页岩主要发育在深湖和半深湖沉积环境。其中,牛心坨洼陷和台安洼陷主要为扇三角洲沉积环境,牛心坨洼陷为扇三角洲前缘沉积,台安洼陷泥岩主要为扇三角洲前缘和前扇三角洲沉积,其他 4 个洼陷主要发育深湖-半深湖相沉积。

西部凹陷自下而上先后沉积了房身泡组、沙河街组和东营组^[8]。沙三段湖盆处于剧烈沉降阶段,湖盆继续深陷、扩张,有效泥页岩厚度和面积较大,最厚可达 200 m 以上,沉积中心主要位于盘山洼陷和清水洼陷,其他洼陷厚度小于 50 m。沙三段有效泥页岩深度为 2 000~4 000 m,埋深适中,有利于页岩油保存(图 2);西部凹陷古近系整体是“东断西超或东断西翘”的被断层复杂化了的复式半地堑断陷,呈现南正北逆断层特征^[9]。凹陷断裂主要为台安一大洼断裂和南部的阶梯断层。具有较好的生储条件和封闭性,常规和非常规油气资源丰富,是油气勘探的重点区域。

2 样品和实验

实验样品选取的是辽河拗陷西部凹陷 6 个洼陷的 19 口井 212 块沙三段泥页岩岩心样品。其中牛心坨一台安洼陷 4 口井 32 块样品,陈家洼陷 4 口井 58 块样品,盘山洼陷 3 口井 25 块样品,清水洼陷 6 口井 80 块样品,鸳鸯沟洼陷 2 口井 17 块样品。

在前期有机地球化学数据的基础上,进行了岩矿分析、储集物性和含油率(W)测定。其中氩离子抛光-扫描电镜(FIB-SEM)实验采用的是 FEIQuant200F 场发射扫描电镜,FIB 分辨率 5 nm,二次电子图像分辨率 1.2 nm,放大倍数达 25×10⁶ 倍,可进行致密储层微孔隙和裂缝的三维可视化;泥页岩孔隙度和渗透率分析采用压汞法,针对(超)低孔、低渗样品进行测定;为定性一半定量描述泥页岩样品的微孔隙特征,采用静态低温氮气全自动吸附仪(Quadasorb SI)进行孔隙结构和孔径分析。另外对 10 块泥页岩样品利用 SHER-44L1 仪器进行低温干馏法含油率测定。

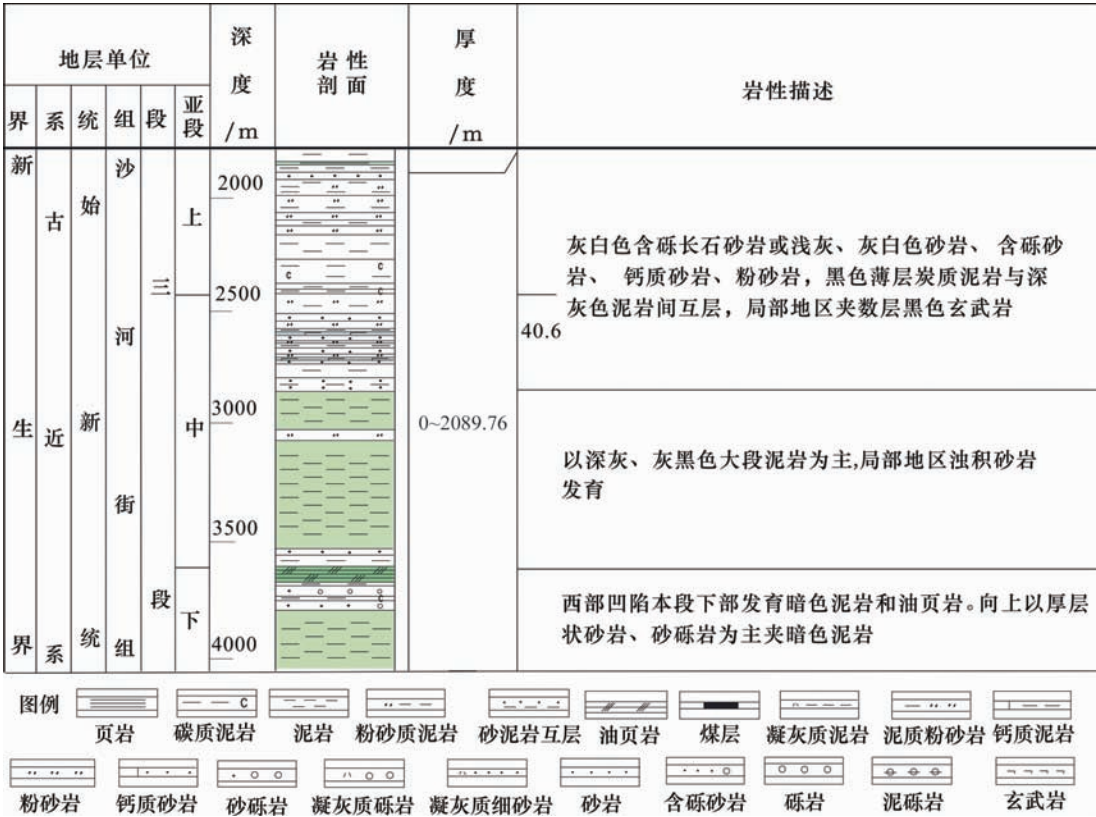


图 2 辽河西部凹陷沙三段地层柱状图
Fig. 2 Formations histogram of Es₃, Liaohe west sag

3 研究区沙三段泥页岩地球化学特征

针对 212 块泥页岩样品进行有机地球化学特征统计,沙三段干酪根以黄色—棕黄色腐泥无定型组最为丰富,含有少量的镜质组和惰质组,壳质组不发育,有机质偏腐泥型(图 3);有机碳含量主要分布在 0.5%~3.5%之间。其中陈家洼陷、盘山洼陷和清水洼陷有机碳含量大于 2.0%,属于富有机质泥页岩;牛心坨洼陷、台安洼陷和鸳鸯沟洼陷有机碳含量普遍低于 1.0%;样品热演化程度较低,镜质体反射率普遍小于 1.0%。其中,清水洼陷和陈家洼陷处于低成熟阶段,其他洼陷成熟度普遍小于 0.5%。

4 沙三段泥页岩储集特征

4.1 矿物组成

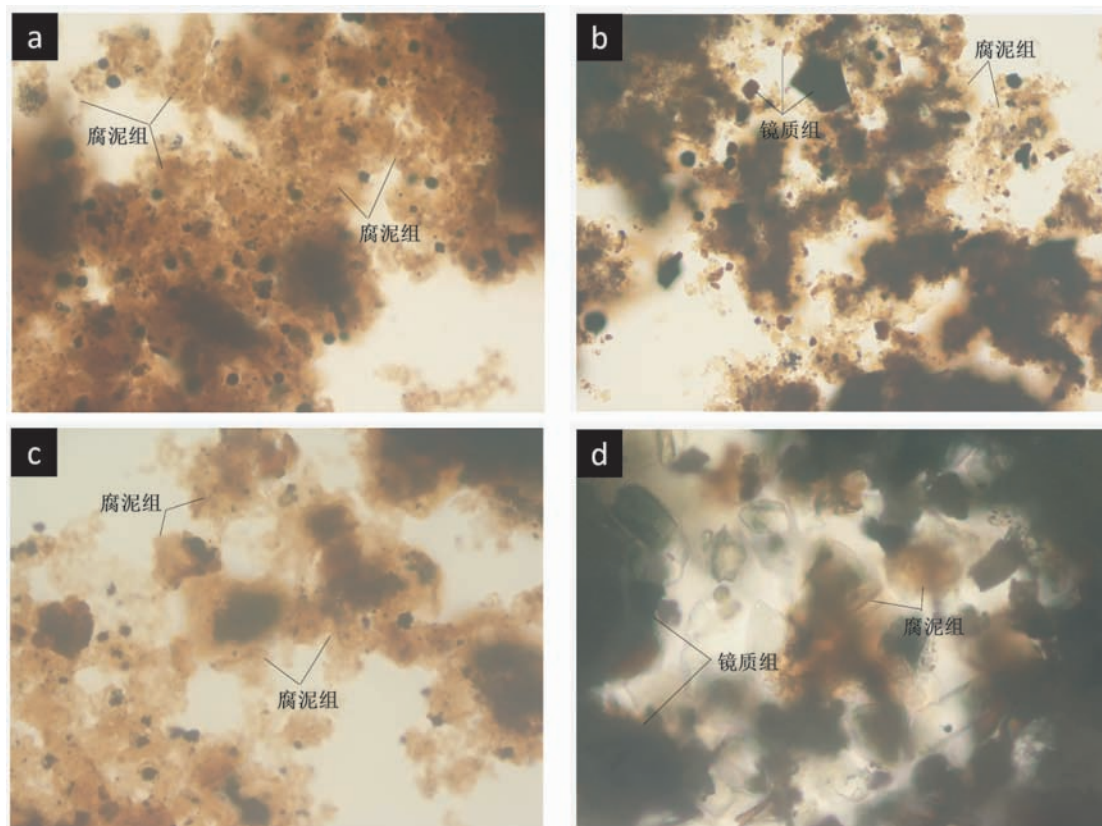
沙三段泥页岩矿物成分主要分为 3 部分:石英、

长石为主的硅酸盐矿物,方解石、白云石为主的碳酸盐岩矿物和伊利石、蒙脱石、高岭石为主的黏土矿物^[10]。其中黏土矿物含量较高,均值大于 55%,以伊利石、蒙脱石为主,脆性矿物含量为 27.4%~58.1%,以石英、长石为主(图 4)。

4.2 储集空间与孔隙结构

辽河西部凹陷沙河街组泥页岩黏土矿物含量较高,其储集空间以黏土矿物层间微孔为主(图 5e),占比 33%~68%。此外还包括有机质孔隙(图 5a)、金红石粒内孔(图 5b)、黄铁矿晶间孔^[11](图 5c)、有机质与无机矿物粒间孔(图 5d)以及成岩微裂缝(图 5f)等 5 种微孔缝类型。

吸附/脱附实验表明,泥页岩微孔隙存在磁滞回线,属于 IV 回线类型^[12],孔隙结构多为“平板—狭缝孔”,孔径 3.9~5.2 nm,中孔较发育^[13](图 6)。泥页岩有效孔隙度介于 0.8%~12.7%,渗透率为 $(0.004\ 2\sim0.267\ 3)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,属于超低孔、超低渗泥页岩储层(表 1)。



a—冷 97,3 654 m,灰黑色泥岩,棕黄色腐泥无定型组,含黄铁矿;b—雷 37,2 166.5 m,褐灰色泥岩,黄色腐泥组,褐色—黑色镜质组,含黄铁矿;c—曙 90,2 797 m,褐灰色泥岩,黄色腐泥组;d—牛 18,3 521.7 m,灰色泥岩,棕黄色腐泥组,黑色镜质组,含杂质。

图 3 辽河西部凹陷沙三段泥页岩显微组分

Fig. 3 The maceral composition of Es₃ shale in Liaohe west sag

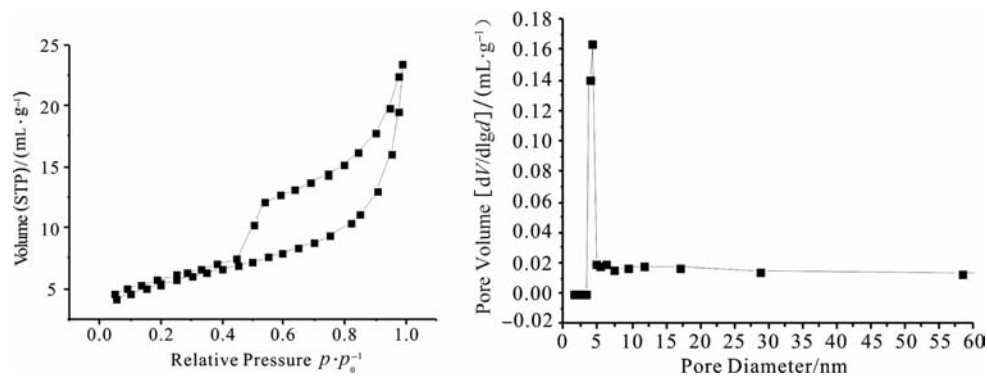


图6 雷37井泥页岩样品低温氮气吸/脱附等温线

Fig.6 Low temperature nitrogen adsorption-desorption isotherms of Lei37 well shale samples

表1 辽河西部凹陷部分样品孔渗分析测试结果

Table 1 The porosity and permeability test results of Es₃ shale samples in Liaohe west sag

序号	资料来源	地区	岩心描述	长度 /m	岩石密度 /(g·cm ⁻³)	有效孔隙度 /%	渗透率 /(10 ⁻³ μm ²)	层位
1	本文	欢南7	深灰色泥岩	2.5	2.47	1.9	0.004 8	Es ₃ ²
2	本文	欢南7	深灰色泥岩	2.5	2.51	2.3	0.006 7	Es ₃ ²
3	本文	雷36	黑色泥岩	2.5	2.26	13.3	0.015 7	Es ₃ ³
4	本文	冷94	灰色泥岩	2.5	2.28	12.7	0.078 2	Es ₃
5	本文	冷94	黑色泥岩	2.5	2.32	8.2	0.016 1	Es ₃
6	本文	冷97	褐灰色泥岩	2.5	2.32	9.5	0.015 8	Es ₃ ²
7	本文	冷97	灰色泥岩	2.5	2.40	2.7	0.267 3	Es ₃ ³
8	本文	双202	黑色泥岩	2.5	2.85	2.5	0.008 3	Es ₂
9	本文	双202	黑色泥岩	2.5	2.59	0.8	0.004 2	Es ₃ ²
10	本文	双202	黑色泥岩	2.5	2.58	3.3	0.010 1	Es ₃ ²

5 含油率

含油率是表征页岩含油性的核心参数。根据页岩油形成机理,富有机质页岩含油率取决于生烃量和排烃量^[14]。生烃量受有机质的类型、有机碳含量和热演化程度控制;排烃量主要受排烃门限控制,在相同的生烃条件下,邻层突破压力大,排烃门限高,

则泥页岩含油率高^[15]。

含油率实验表明,沙三段介于0.14%~1.23%,达到我国陆相页岩含油率工业标准,清水洼陷和陈家洼陷为含油率高值区。此外,对含油率(W)影响参数相关性进行分析。结果表明,含油率与有机碳含量、氯仿沥青“A”呈较好的线性正相关,相关系数 $R^2=0.719\ 9$ 和 $0.723\ 2$ (图7),主要因为有机质是生烃物质基础,其丰度的高低决定生油能力的大小;

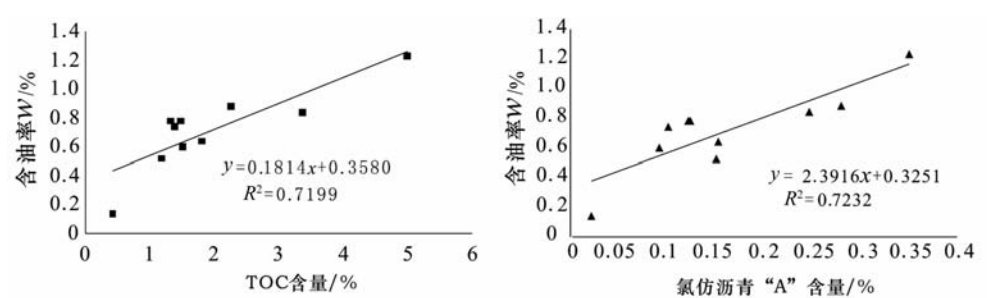


图7 W与TOC、氯仿沥青“A”含量之间的关系

Fig.7 The relationships between the W, TOC and chloroform bitumen“A”

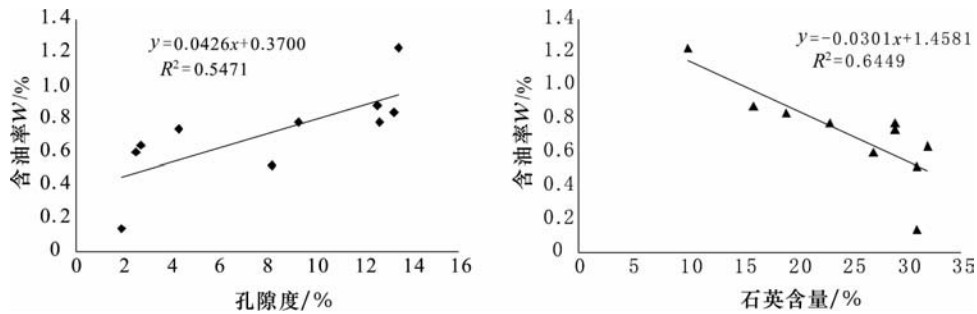


图 8 含油率与孔隙度、石英含量相关性分析
Fig. 8 The relationships between the W, porosity and quartz

含油率与孔隙度呈线性正相关, $R^2=0.6449$ (图 8),主要是根据页岩油聚集机理,页岩油主要以游离态赋存于泥页岩裂缝和微孔隙中,其次以溶解态存在,吸附态目前研究尚少^[16];含油率与石英含量呈线性负相关, $R^2=0.5471$ (图 8),主要是由泥页岩的矿物成分决定的,两者相关性不明显,不排除由于样本数量较少而出现个别异常值影响了关系表征。

6 页岩油资源计算方法与应用

6.1 页岩油资源计算方法

目前,针对页岩油的资源计算方法常用的是有机地球化学法和概率体积法^[17]。

6.1.1 有机地球化学法

可动油资源计算是页岩油研究的重点和难点^[18]。有机地球化学法采用有机地球化学手段,可对可动油资源进行评价。目前,可动油资源量的获取方法主要有体积法-氯仿沥青“A”法、体积法-热解“S₁”法和实测法。前两种方法通过氯仿沥青“A”和“S₁”轻烃恢复、重烃校正等手段进行计算^[19],后者通过可动油模拟实验,并与核磁共振分析相结合的方法进行测定^[20-22]。

氯仿沥青“A”法可表示为

$$Q_{油}=100 \cdot S \cdot H \cdot \rho \cdot k \tag{1}$$

式中: $Q_{油}$ 为页岩油可动油资源量, 10^4 t; S 为有利页岩层段分布面积, km^2 ; H 为有利页岩层段内页岩厚度,m; ρ 为页岩密度, t/m^3 ; k 为可动烃系数,百分比。

热解“S₁”法可表示为

$$Q_{油(可动)}=Q_{油(原地)}-S \times H \times \rho \times K \times S_1 (10^4 t) \times 10^{-1} \times K_{吸} \times TOC \tag{2}$$

式中: S_1 为热解 S₁ 参数(mg/g); K 为 S₁ 校正系数

(包括轻烃和重烃); $K_{吸}$ 为热解“S₁”吸附系数;TOC为有机碳含量,%。

此方法数据获得方便,易于操作。但由于氯仿沥青“A”法抽提过程中,非烃类可溶物质含在其中,计算结果通常比实际值偏大;此外在轻烃恢复及重烃校正过程中存在区域差异,恢复系数因地制宜,可靠性不够。

6.1.2 概率体积法

依据概率体积法基本原理,页岩油地质资源量为页岩总质量与单位质量页岩所含液态烃的概率乘积^[23],可表示为

$$Q_o=100 \cdot S_p \cdot H_p \cdot \rho_p \cdot w_p \tag{3}$$

式中: Q_o 为页岩油地质资源量, 10^4 t; S_p 为含油页岩分布概率面积, km^2 ; H_p 为有效页岩概率厚度,m; ρ_p 为页岩概率密度, t/m^3 ; w_p 为页岩概率含油率(质量分数); p 代表通过蒙特卡洛等方法计算的某种条件下的概率。

此方法目前评价对象通常为生油单元,对计算单元涉及较少,且含油率数据获取困难,推广应用欠缺。

6.1.3 单元法页岩油资源量计算方法

(1)方法原理。我国的页岩油主要分布在地质条件变化较快的陆相地层中,参数的不均一性成了准确计算页岩油资源量的主要影响因素。本文重点探讨的单元算法是在概率体积法基础上,引入微积分原理,采用地质条件参数相对均一的自然“单元”概念,通过对评价单元烃源岩条件分析,划分出生油单元;结合沉积亚相、构造、保存等因素研究,确定出多个有效评价单元,即计算单元;通过采取对不同计算单元分别计算、累积求和的方式,计算出评价单元的资源量(图 9)。

(2)方法分析。资源等级归一处理是单元算法的核心,以其中的一个计算单元为参考计算单元,

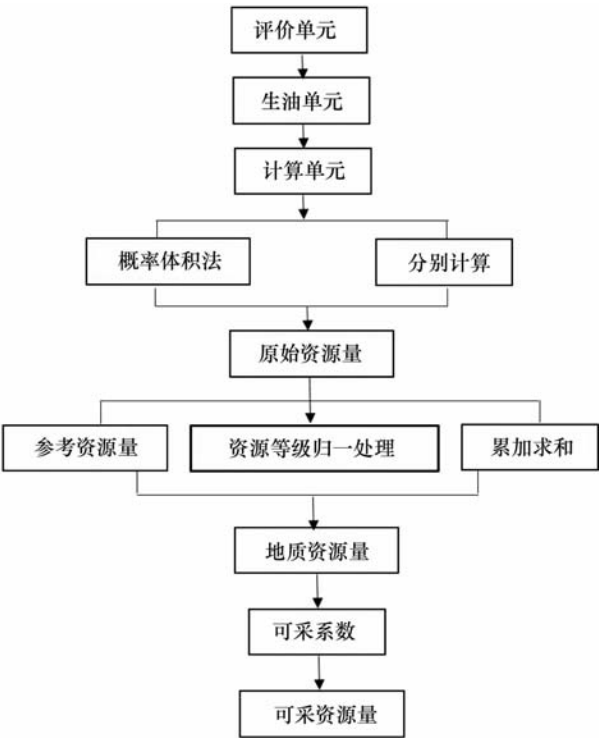


图9 页岩油资源单元计算法流程

Fig. 9 The unit calculation process of shale oil resource

其资源量称为参考资源量。目的是通过对其他计算单元的原始资源量可信度分析,划为与参考资源量同资源等级下的资源量。

参考计算单元需满足以下条件:①油气勘探开发程度高;②参与资源计算的地质参数齐全且地质条件优越;③参与资源计算的地质数据丰富且获取方式可信度高^[24]。

(3)评价步骤。资源等级归一处理需考虑勘查程度和地质条件两个因素。具体步骤如下。

第一步,根据勘探程度和地质条件对可信度贡献,建立不同的分级和取值标准^[25](表2)。

第二步,根据不同因素对资源量的可信程度,赋予权重,进行计算单元打分。

权重可设为1,各可信度计算参数权重建议如下:①地质条件及参数齐全程度,是影响资源计算可信度的关键因素,权重设为0.4。含油率和泥页岩厚度为资源计算的关键参数,占权重比例较大,其他参数比例相当。其中,含油率权重设为0.25,泥页岩厚度(m)权重设为0.25,沉积环境权重设为0.1,TOC含量权重设为0.1,R_o权重设为0.1,保存条件权重设为0.1,参数个数权重设为0.1。②核心参数数据情况,是影响资源计算可信度的

重要因素,权重设为0.3。4个参数均为影响可信度的关键因素,数据情况仅从统计学角度考虑,权重比例相当,各设为0.25。③勘探开发程度,主要包括计算单元钻探程度、地球物理勘探程度及油气发现程度等,是影响资源计算可信度的重要因素,权重设为0.3。

第三步,通过对不同计算单元与参考计算单元分数比值确定归一系数,各计算单元资源量即为原始资源量与归一系数的乘积。

依据单元计算法基本原理,页岩油地质资源量可表示为

$$Q_o = \sum_{i=1}^n Q_i ;$$
$$Q_i = Q_{原始} \cdot k ;$$
$$Q_{原始} = 100 \cdot S_p \cdot H_p \cdot \rho_p \cdot w_p。$$

式中:k为计算单元原始地质资源量可信度分值/参考计算单元地质资源量可信度分值;Q_i为计算单元页岩油地质资源量,10⁴t;Q_{原始}为计算单元页岩油原始地质资源量,10⁴t;k为归一系数,量纲为1。

6.2 方法应用

根据单元计算法原理,评价单元为辽河西部凹陷。借鉴前人研究成果,牛心坨、台安、陈家、盘山、清水及鸳鸯沟6个生油洼陷为6个生油单元。通过以上对西部凹陷6个生油单元的地质条件分析,西部凹陷沙三段满足条件的有5个计算单元。其中陈家洼陷分布2个,盘山洼陷分布1个,清水洼陷分布2个(图10)。

利用概率体积法,对5个计算单元P50概率条件下的原始资源量进行计算,结果表明:沙三段原始地质资源量为6 220.9×10⁴t。其中计算单元1原始资源量为797.55×10⁴t,计算单元2原始资源量为877.31×10⁴t,计算单元3原始资源量为1 595.10×10⁴t,计算单元4原始资源量为717.80×10⁴t,计算单元5原始资源量为2 233.14×10⁴t。

通过对5个计算单元的资源计算可信度参数进行分析与对比,选取计算单元5为参考计算单元,其资源量为参考资源量。根据可信度分析方法,5个计算单元的归一系数依次为0.99,0.95,0.87,0.96,1.0,资源等级归一处理后的沙三段地质资源量为5 938.88×10⁴t,其中沙三上、中、下亚段地质资源量分别为1 141.90×10⁴t、2 933.99×10⁴t、1 862.99×10⁴t。因此,西部凹陷沙三段地质条件优越,具备良好的页岩油勘探前景。

表 2 资源计算参数与可信度取值标准表

Table 2 Resource calculation parameters and credibility values standard

级别			一级	二级	三级	四级
分值			100~75	75~50	50~25	25~0
地质条件 及参数齐 全程度	核心参数	含油率/%	>0.2	0.2~0.1	0.1~0.05	<0.05
	A	泥页岩厚度/m	>30	30~10	10~6	<6
	重要参数 B	沉积环境	深水陆棚相	其他海相	海陆过渡相	陆相
		TOC 含量/%	>2	2~1.5	1.5~1.0	<1.0
		R _o /%	1.2~0.5	2~1.2	>2	<0.5
		保存条件	好	较好	一般	差
以上参数个数		6	A 齐全,B>3	A 齐全,B>2	A 不全	
核心参数 数据情况	含油率 /%	数据丰富程度	丰富	较丰富	贫乏	无
		获取方式	实测法	地球化学法/测井分析法	其他方法	
	泥页岩 厚度/m	数据丰富程度	丰富	较丰富	贫乏	无
		级别	含气泥页岩厚度或有效厚度		泥页岩厚度	
	勘探开发程度		高	中-低		无

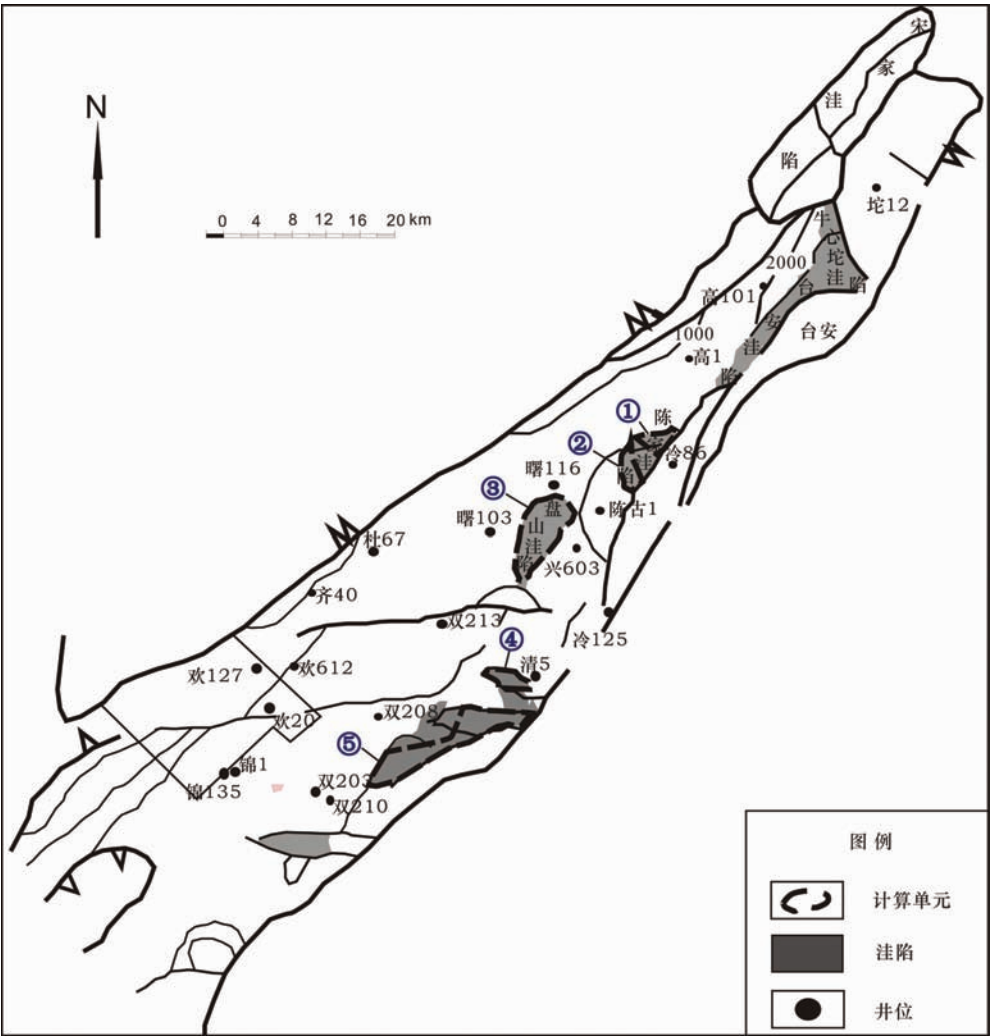


图 10 辽河西部凹陷沙三段页岩油计算单元划分图

Fig. 10 Shale oil calculation unit divisions of Liaohe west sag

7 结论

(1)辽河西部凹陷沙三段陆相泥页岩有机质剪度高,热演化程度偏低,显微组分腐泥组含量丰富,含少量镜质组和惰质组,主要为Ⅱ₁型干酪根。

(2)沙三段岩石组分以黏土页岩为主,含量近60%;储集空间主要为黏土矿物层间微孔,孔隙度较低,储层较为致密。

(3)沙三段泥页岩含油率较高,与TOC、氯仿沥青“A”含量具有较好的正相关性,与孔隙度呈正相关,与石英含量负相关。

(4)从单元划分的角度,初步探讨了页岩油资源计算方法——单元算法。对方法原理、计算流程以及评价参数进行了厘定;通过资源计算参数分级和权重赋值等方式,进行资源等级归一处理,将不同计算单元资源量化为同级资源标准。

(5)利用单元算法对辽河拗陷西部凹陷沙三段的页岩油资源进行计算,地质资源量为 $5\,938.88 \times 10^4 \text{ t}$,其中沙三上、中、下亚段地质资源量分别为 $1\,141.90 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $2\,933.99 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $1\,862.99 \times 10^4 \text{ t}$,具有良好的勘探前景。其中陈家洼陷和清水洼陷地质条件优越,是页岩油勘探的有利区域。

资料收集和样品采集得到了辽河油田勘探开发研究院领导和同行的大力支持。丁文龙教授和李勇博士在稿件创作过程中提供指导和帮助,特此感谢。

参考文献

- [1] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 11-16.
- [2] Berman S. The Bakken attraction[M]//Pike B, Haines L, Beaubouef B. Bakken Shale, the Play Book. Houston, Texas: Hart Energy Publishing, 2008: 92-94.
- [3] Slatt R M, O'Brien N R, Romero A M, et al. Eagle Ford condensed section and its oil and gas storage and flow potential[C]//AAPG Annual Convention and Exhibition. Long Beach, California: AAPG, 2012: 22-25.
- [4] Beating The Index. The Alberta Basin oil play[EB/OL]. (2011-02-07)[2015-09-06]. <http://www.beatingtheindex.com/the-alberta-bakken-oil-play-and-the-players-in-southern-alberta/>.
- [5] 吕明久,付代国,何斌,等. 泌阳凹陷深凹区页岩油勘探实践[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(3): 85-87.
- [6] 方锡贤,王光鹏,梁华伟,等. 气测录井资料在安深1井页岩油气评价中的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(5): 34-37.
- [7] 李三忠,索艳慧,戴黎明,等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 65-79.
- [8] 谢玉华,朱筱敏,赵坤. 辽河西部凹陷古近系层序地层格架[J]. 科技导报, 2010, 28(6): 58-64.
- [9] 张震,鲍志东,童亨茂,等. 辽河断陷西部凹陷沙三段沉积相及相模式[J]. 高校地质学报, 2009, 15(3): 387-397.
- [10] 刘树根,马文辛, Luba J, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [11] 黄振凯,陈建平,薛海涛,等. 松辽盆地白垩系青山口组泥页岩孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 58-65.
- [12] Liu X J, Xiong J, Liang L X, et al. Investigation of pore structure and fractal characteristics of organic rich Yanchang formation shale in central China by nitrogen adsorption/desorption analysis[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 62-72.
- [13] Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. Fuel, 2013, 103: 606-616.
- [14] 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.
- [15] 梁世君,黄志龙,柳波,等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 588-594.
- [16] 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): 14-25.
- [17] 朱华,姜文利,边瑞康,等. 页岩气资源评价方法体系及其应用:以川西拗陷为例[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 130-134.
- [18] 陈志海. 特低渗油藏储层微孔喉分布特征与可动油评价:以十屋油田营城组油藏为例[J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 657-662.
- [19] 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.
- [20] 孙庆和,何玺,林海. 特低渗透油藏可动油的测量及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(6): 35-37.
- [21] 杨正明,姜汉桥,李树铁,等. 低渗气藏微观孔隙结构特征参数研究:以苏里格和迪那低渗气藏为例[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(6): 108-110.
- [22] 杨县超,张林,李江,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田储层微观孔隙结构特征[J]. 地质科技情报, 2009, 28(3): 73-76.
- [23] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 184-191.
- [24] 陈新军,包书景,侯杰谈,等. 页岩气资源评价方法与关键参数探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 566-570.
- [25] 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.