

文章编号:1009-9603(2019)01-0129-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.01.014

陆相断陷盆地页岩油资源潜力评价

——以东营凹陷沙三段下亚段为例

朱日房^{1,2,3}, 张林晔^{1,4}, 李 政^{1,2,3}, 王 茹^{1,2}, 张守春^{1,2,3}, 张 蕾^{1,2,3}

(1. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2. 国家能源局页岩油研发中心胜利油田分室, 山东 东营 257015; 3. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 山东 东营 257015; 4. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:页岩油资源潜力分析是页岩油勘探实践最重要的基础工作之一, 可动资源量是最直接的资源潜力衡量指标。在借鉴页岩油资源评价和页岩油可动性等已有研究成果的基础上, 分别应用氯仿沥青“A”参数法和热解参数法计算东营凹陷沙三段下亚段页岩油资源量和可动资源量。结果表明, 2种方法的计算结果基本一致, 页岩油资源量分别为 11.39×10^8 和 11.57×10^8 t。平面上, 页岩油资源主要分布在各次级洼陷带, 资源丰度为 $100 \times 10^4 \sim 250 \times 10^4$ t/km²。纵向上, 页岩油资源主要分布在埋深 3 000~3 500 m, 资源量为 7.01×10^8 t, 其次分布在 3 500~4 000 m, 资源量为 4.37×10^8 t; 从页岩油可动资源量来看, 两者接近, 分别为 0.75×10^8 和 0.73×10^8 t, 但深部页岩油具有较高可动率。利津洼陷带具有较高的页岩油资源丰度和可动率, 页岩油资源潜力大, 为有利的页岩油勘探区。

关键词:陆相断陷盆地; 页岩油; 资源评价; 沙三段下亚段; 东营凹陷

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Evaluation of shale oil resource potential in continental rift basin: A case study of Lower Es₃ Member in Dongying Sag

ZHU Rifang^{1,2,3}, ZHANG Linye^{1,4}, LI Zheng^{1,2,3}, WANG Ru^{1,2}, ZHANG Shouchun^{1,2,3}, ZHANG Lei^{1,2,3}

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. Shengli Oilfield Branch, State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 4. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710069, China)

Abstract: Shale oil resource potential analysis is one of the most important basic works in shale oil exploration practice. Recoverable oil resource is the most direct index of resource potential evaluation. Based on the existing research results of shale oil resources evaluation and the recovery of shale oil, the total resources and recoverable resources of the shale oil in Lower Es₃ Member in Dongying Sag were calculated by the chloroform asphalt “A” method and the pyrolysis parameter method respectively. The calculation results show that the calculation results obtained by the two methods are basically consistent, which are 1 139 million tons and 1 157 million tons respectively. The shale oil resources are mainly distributed horizontally in the central zone of the subsags, which the abundance of the resources is between 1 million and 2.5 million t/km². Vertically, the shale oil resources are mainly occurred at the depth from 3 000 m to 3 500 m with 701 million tons shale oil resources, followed occurred at the depth from 3 500 to 4 000 m, which is 437 million tons shale oil resources. However, the amount of recoverable resources of shale oil are roughly equivalent at those two deep segments, which is 75 million tons and 73 million tons respectively. Shale oil located deeply has a higher recoverable rate. Lijin Subsag has high shale oil resource

收稿日期: 2018-08-27。

作者简介: 朱日房(1974—), 男, 广东河源人, 高级工程师, 从事油气地球化学研究。联系电话: (0546)8715354, E-mail: zhurifang2005@163.com。

基金项目: 国家“973”计划“中国东部古近系陆相页岩油富集机理与分布规律”子课题“陆相页岩油资源潜力与分布规律”(2014CB239105), 国家科技重大专项“济阳坳陷页岩油勘探开发目标评价”(2017ZX05049-004), 国家自然科学基金项目“湖相页岩油可动性基本地质条件研究”(41372129), 。

abundance and recovery mobility, high shale oil resource potential, and is a favorable area for shale oil exploration.

Key words: continental rift basin; shale oil; resource evaluation; Lower Es₃ Member; Dongying Sag

北美页岩油勘探开发成果极大地激励了中国页岩油的勘探研究,中国东部新生代断陷湖盆发育多套陆相富有机质泥页岩,并有多口探井发现了页岩油气流,显示出良好的勘探前景^[1-7]。近10 a来,许多研究者在页岩的含油性^[8-13]、储集性及流动性方面进行了探索^[14-18]。页岩油资源潜力评价从最初以滞留油为主的原地资源量评价发展为以游离油为主要赋存方式的游离油量评价^[19-21]。由于页岩油资源评价技术的不断进步、方法不断完善,以及对页岩中油气赋存机理认识的加深,必然对页岩油的资源潜力评价提出更高的要求。页岩油资源潜力评价研究仍然是目前页岩油勘探实践中重要的研究内容之一。为此,根据近几年页岩含油性定量分析等方面的进展,以东营凹陷沙三段下亚段为例,探讨陆相断陷盆地页岩油资源潜力评价。

1 地质概况

东营凹陷位于济阳拗陷东南部,其东接青坨子凸起,南部与鲁西隆起、广饶凸起呈超覆接触,西与惠民凹陷毗邻,北与陈家庄凸起和滨县凸起相邻,东西长度约为90 km,南北宽度约为62 km,总面积为5 850 km²(图1)。从大地构造区划分上,东营凹陷属于中国东部渤海湾盆地的一个次级构造单元,是在古生界基岩古地形背景上,经构造运动发育形成的中、新生代断陷-拗陷盆地;由于基岩起伏以及中央隆起带的分隔,凹陷内又分为4个次级洼陷,它们既是盆地的沉积中心,也是富含有机质泥页岩发育区。凹陷内主要发育沙四段上亚段和沙三段下亚段2套成熟生烃的泥页岩^[22],在110口井中的泥页岩段发现油气显示,试油37口井,14口井获得了

工业油气流,其中对河54井沙三段下亚段泥页岩发育段试油,日产油量为91.4 t/d^[23],累积产油量为27 896 t,显示出良好的页岩油勘探前景。

2 页岩油资源潜力评价方法

2.1 页岩油资源量计算方法

页岩油资源潜力评价方法主要分为动态法和静态法2大类。动态法主要根据页岩油在开发过程中的动态资料,通过一定的数学模型定量计算资源量。静态法主要应用静态参数计算资源量,按计算方式的不同细分为统计法、类比法和成因法3种。统计法需要大量典型样本,适用于中-高勘探程度阶段;类比法需要有可类比的刻度区,一般适用于低勘探程度区;成因法重视物质平衡原理的应用,更多是确定性评价,适用于盆地勘探的各个阶段。目前由于缺少系统的页岩油开采动态资料和典型样本,难以应用动态法和统计法,同时中国东部陆相盆地的地质情况与北美具有较大差别,难以直接将北美成熟页岩油开采区作为中国页岩油资源潜力评价类比刻度区。因此,成因法是中国页岩油资源潜力评价最常用的方法。

体积法是成因法中最常用的一种方法,其计算页岩油资源量的原理简单明确,将泥页岩的质量(页岩体积与密度乘积)与泥页岩中页岩油含量相乘即可获得页岩油资源量,其计算式为:

$$Q_{\text{资源量}} = Shpa \times 10^{-2} \quad (1)$$

计算页岩油资源量所需的参数主要包括泥页岩的面积、有效厚度、密度和页岩油含量。泥页岩的面积和有效厚度主要通过页岩厚度等值线图获取,密度由实测密度剖面获取。由于页岩油主要以游离油的形式赋存于泥页岩中,因此,泥页岩中的页岩油含量用游离油量来近似代替,而游离油量的定量分析是页岩油资源量计算中的难点之一。

2.2 滞留油量与吸附油量计算方法

游离油量的定量分析主要有2种方法,一种是孔隙度和含油饱和度法,另一种是地化参数法。对于常规砂岩储层来说,孔隙度和含油饱和度法表征游离油量简单明确,然而对于非均质性强、孔隙结构复杂、以纳米孔为主的泥页岩来说,其孔隙度和含油饱和度的测量非常困难,数据点少,难以用于宏观的页岩油资源量计算;因此,地化参数法成为

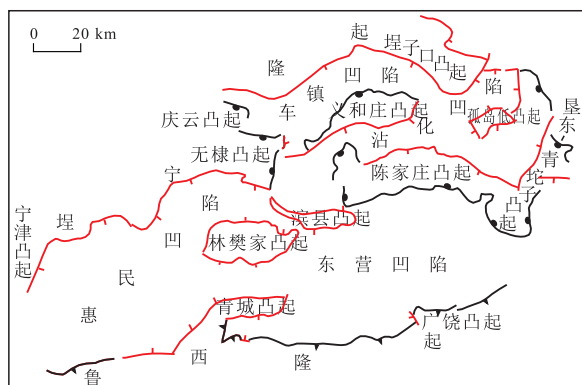


图1 东营凹陷区域构造位置

Fig.1 Regional tectonic location of Dongying Sag

最常用的游离油量定量分析方法。

应用地化参数法很难直接获取游离油量和吸附油量,但能够确定页岩中的滞留油量和岩石对油的吸附潜量。在饱和吸附时,页岩对油的吸附潜量近似于页岩的吸附量,页岩中的滞留油量与页岩的吸附潜量之间的差值即为页岩的游离油量。

表征页岩滞留油量最常用的参数为氯仿沥青“A”含量和热解参数,相应的计算式分别为:

$$Q_a = K_a A \quad (2)$$

$$Q_s = 10^{-1} \times [K_{s1}(S_1 + S_2) + S_1 + K_{s2}S_2] \quad (3)$$

页岩对油的吸附能力与岩石的结构、矿物组分和有机质丰度、类型及演化程度等因素密切相关^[22-28]。不同的矿物组分对油的吸附能力明显不同,有机质对油的吸附能力远大于无机矿物对油的吸附能力^[27-28],不同类型的有机质以及热演化程度不同的有机质对油的吸附能力也有明显区别^[24]。孔隙结构影响无机矿物与油的接触面积,从而影响无机矿物对油的吸附能力^[25]。因此,可以分别计算干酪根及不同孔隙度条件下各矿物组分的吸附潜量来表征整个岩石对油的吸附能力,同时,在计算无机矿物吸附潜量时加入与孔隙结构有关的泥页岩比表面积相关系数。页岩对油吸附潜量的计算式为:

$$S_p = p_o x_o + \gamma \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (4)$$

其中

$$\gamma = \frac{S}{S_o} = \left(\frac{\phi}{\phi_o} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

在获取滞留油量和页岩对油的吸附潜量后,就可以计算页岩的吸附油量和游离油量。当页岩中滞留油量小于页岩对油的吸附潜量时,为欠饱和吸附,吸附油量就等于滞留油量,此时没有游离油;当页岩中滞留油量大于或等于页岩对油的吸附潜量时,为饱和吸附,吸附油量就等于页岩对油吸附潜量,游离油量则为滞留油量与吸附油量的差值。

2.3 可动油资源量计算方法

可动油主要指在地层条件下,采用一定的工程措施能够采出的原油。可动油资源量对页岩油的勘探开发具有重要意义,是页岩油资源潜力最直接的衡量指标。可动油资源量表达式为:

$$Q_{\text{可动油资源量}} = Q_{\text{资源量}} E_r \quad (6)$$

页岩油可动率与泥页岩的骨架、原油、地层水性质等有关,还与地层流体压力有关,岩石骨架、原油和水的压缩性越大、地层流体压力越高、能量越

大,页岩油可动率就越高。

3 东营凹陷沙三段下亚段页岩油资源潜力评价

3.1 页岩油地质条件

东营凹陷沙三段下亚段为半咸水沉积,主要为灰色、灰褐色页岩与深灰色泥岩组成的不等厚互层,其厚度一般为100~300 m。地化分析资料表明,研究区沙三段下亚段总有机碳含量(TOC)分布范围较宽,为0.5%~18.6%,平均值为4.9%;氯仿沥青“A”含量为0.11%~2.94%,平均值为0.92%;有机质类型以I型干酪根为主,少部分为II₁型干酪根,埋深为1 500~4 000 m,各洼陷内基本上处于成熟生烃阶段。沙三段下亚段泥页岩有机质丰度高、类型好、主体处于成熟生烃阶段,是一套生烃潜力大、分布稳定的主力烃源岩。

3.2 页岩油资源潜力评价参数

3.2.1 页岩含油性分级

湖相泥页岩的含油性在平面上和纵向上均具有很强的非均质性,页岩含油性分级描述能有效地消除页岩非均质性的影响^[29-31]。按照页岩含油性参数(TOC、氯仿沥青“A”含量和 S_1)及其相关性,结合东营凹陷沙三段下亚段烃源岩具体特征,将页岩含油性分为I、II和III共3个级别。具体划分方案见表1。

表1 东营凹陷页岩含油性分级划分方案
Table1 Division scheme for the oil-bearing abundance of shale in Dongying Sag

级别	参 数 特 征			备 注
	TOC/%	氯仿沥青“A”含量/%	S_1 /(mg·g ⁻¹)	
I级	>2.0	>0.5	>2.0	优质页岩
II级	0.5~2.0	0.1~0.5	0.5~2.0	普通页岩
III级	<0.5	<0.1	<0.5	无效页岩

采用系统取心井与测井曲线相结合,应用改进的 $\Delta \log R$ 模型^[32]建立TOC、氯仿沥青“A”含量和 S_1 的解释模型,进而计算页岩含油性参数。根据计算结果和表1划分方案,可以对研究区各单井的页岩含油性进行分级、统计各级厚度及含油性参数,编制各级的厚度等值线和地化参数等值线(图2,图3)。从图2可以看出,东营凹陷I级页岩的厚度中心为各洼陷中心,厚度均在150 m以上,其中利津、民丰达到200 m;各含油性参数也具有类似的分布特征,利津洼陷中心处TOC、氯仿沥青“A”含量和 S_1 值分别为6.0%、1.2%和5.0 mg/g,博兴洼陷中心处分

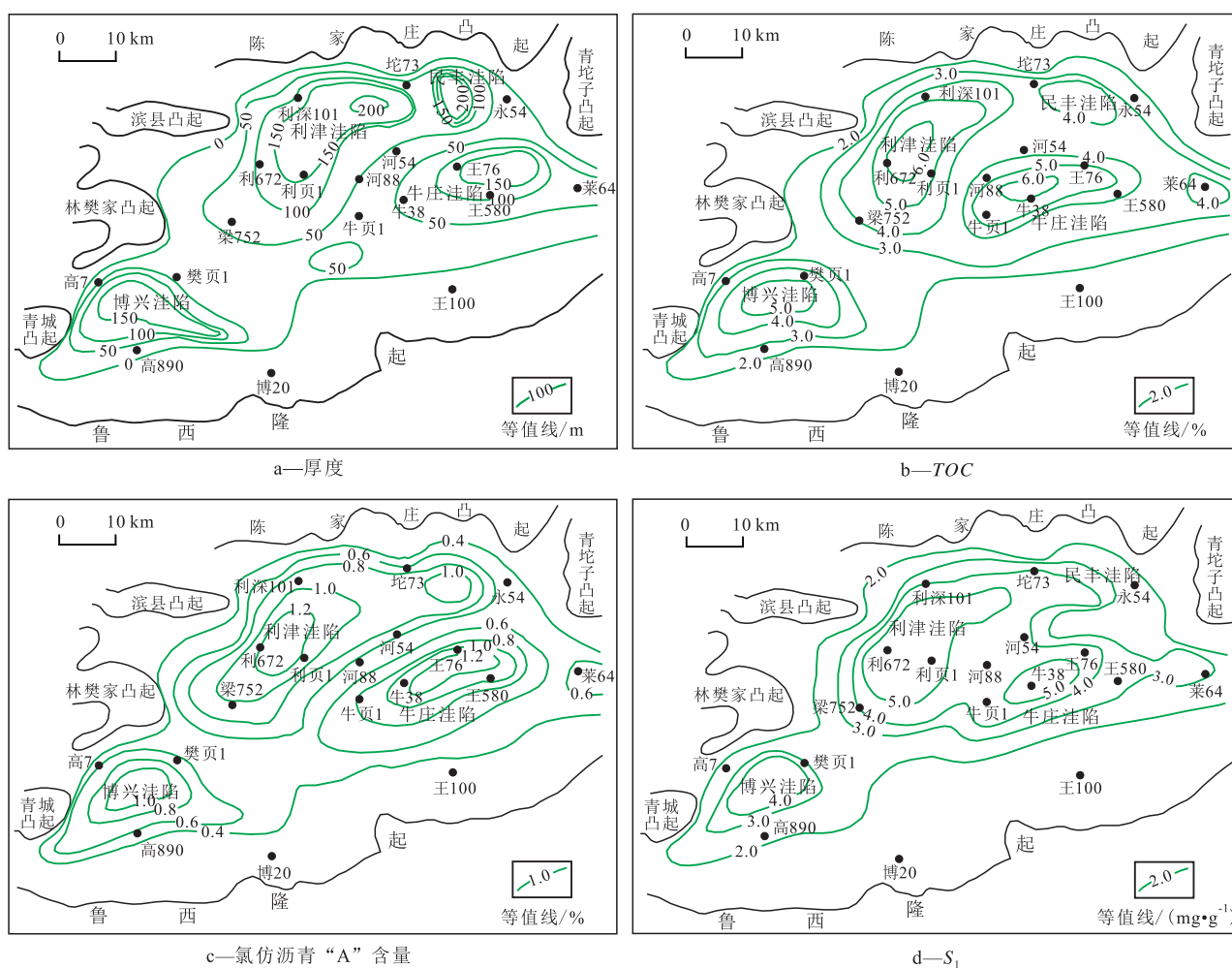


图2 东营凹陷沙三段下亚段 I 级页岩含油性参数等值线分布

Fig.2 Contour map of oil content parameters of Grade I shale of Lower Es₃ Member in Dongying Sag

别为 5.0%, 1.0% 和 4.0 mg/g, 民丰洼陷中心处分别为 4.0%, 1.0% 和 4.0 mg/g。II 级页岩与 I 级页岩具有相似的特征, 牛庄、利津洼陷中心页岩厚度达到了 200 m, 博兴、民丰洼陷为 100 m, 各洼陷中心的 TOC、氯仿沥青“A”含量和 S_1 值分别为 2.0%, 0.4% 和 2.0 mg/g。

3.2.2 页岩密度

根据实测的密度资料(图4)发现, 东营凹陷泥页岩密度表现出随埋深增加、压实程度增强而增大的特征, 但在不同埋深段密度随埋深的变化曲线呈不同的斜率。在同一埋深下, 烃源岩密度与 TOC 呈一定程度的负相关关系, 即 TOC 越高, 密度越小。由此, 泥页岩的密度可以由不同 TOC 在不同埋深下的密度-埋深关系曲线(图4)来获取。

3.2.3 轻烃恢复系数及重烃比例系数

轻烃恢复系数及重烃比例系数采用文献[8]的资料, 各系数随埋深的增加而增大。在主要的生油窗范围内, 东营凹陷氯仿沥青“A”恢复系数为 1.0~

1.5, 热解轻烃散失系数为 0.1~0.4, 热解 S_2 中重烃比例系数则为 0.1~0.8^[8]。

3.2.4 页岩油吸附潜量

根据东营凹陷沙三段下亚段实际样品的地化资料、岩矿资料和物性资料, 以及不同组分对油的吸附能力, 应用(4)式就可计算不同样品对油的吸附潜量。在生油窗范围内, 东营凹陷沙三段下亚段干酪根对油的单位 TOC 吸附潜量为 50~120 mg/g^[28], 无机矿物中粘土矿物、石英、碳酸盐和黄铁矿对油的吸附潜量分别为 18.0, 3.0, 1.8 和 10.0 mg/g^[25], 泥页岩的初始孔隙度为 50%, 现今孔隙度为 5%~15%。东营凹陷沙三段下亚段页岩油吸附潜量计算结果(图5)表明, 东营凹陷沙三段下亚段泥页岩在主要生烃初始阶段页岩油单位 TOC 吸附潜量为 200~300 mg/g, 略大于国外的 200 mg/g^[29], 与应用 A/TOC 确定的 230 mg/g 结果较一致^[19,28]。在埋深为 4 000 m 左右, 页岩油单位 TOC 吸附潜量约为 100~150 mg/g。

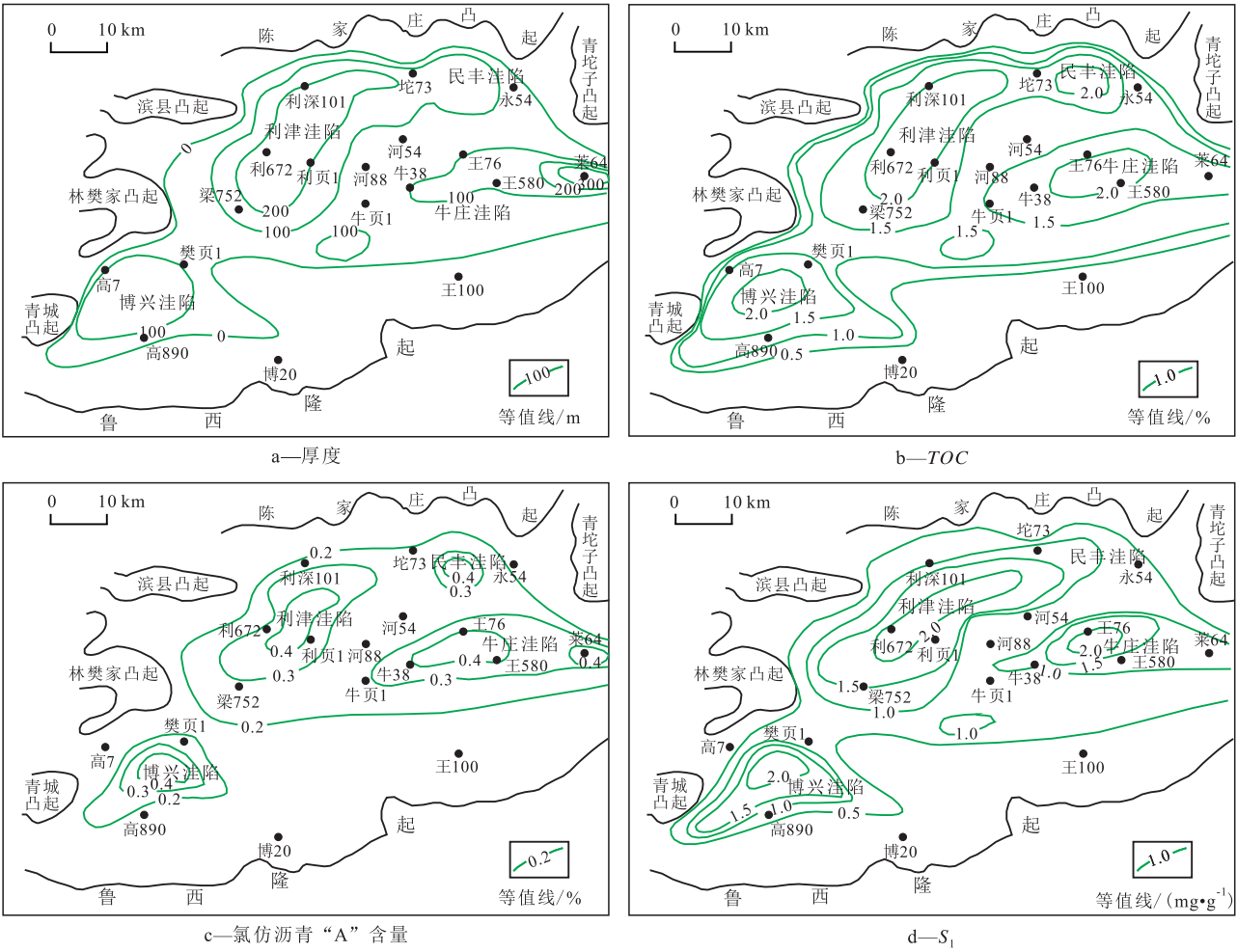


图3 东营凹陷沙三段下亚段Ⅱ级页岩含油性参数等值线分布

Fig.3 Contour map of oil content parameters of Grade II shale of Lower Es₃ Member in Dongying Sag

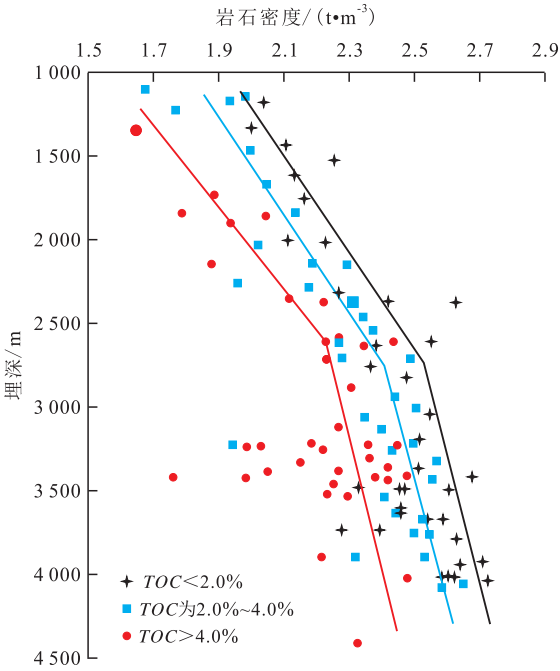


图4 东营凹陷泥页岩密度随深度变化曲线

Fig.4 Variation curves of shale density with depth in Dongying Sag

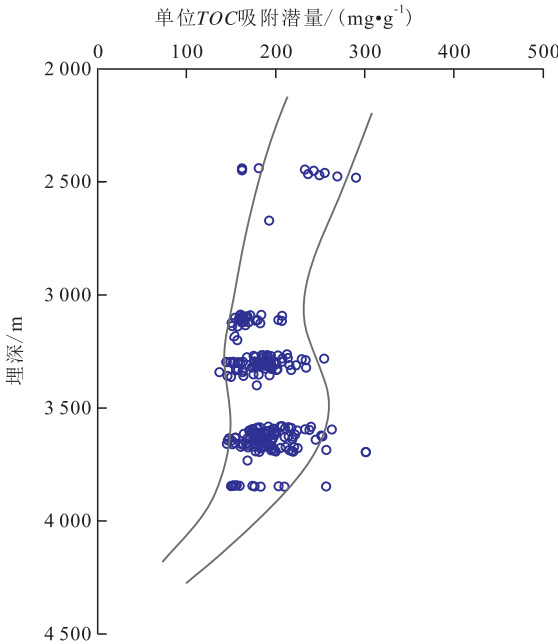


图5 东营凹陷沙三段下亚段页岩油吸附潜量演化剖面

Fig.5 Evolution of adsorption oil capacity of shale in Lower Es₃ Member in Dongying Sag

3.3 页岩油资源潜力及分布特征

在确定不同深度下的氯仿沥青“A”轻烃恢复系数、热解轻烃散失系数、热解 S_2 中重烃比例系数、页岩油吸附潜量以及泥页岩密度等参数后,根据研究区不同级别的泥页岩总有机碳含量、氯仿沥青“A”含量、 S_1 、有效厚度、埋深等参数,计算济阳坳陷不同级别泥页岩的滞留油量和游离油量。计算过程中,为求精确,将不同级别泥页岩分布区在平面上均分为 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 的网格区,分别应用氯仿沥青“A”参数法和热解参数法计算各网格区的滞留油量和游离油量,所有网格的滞留油量之和为总滞留油量,游离油量之和为总页岩油量即页岩油资源量。

研究结果表明,2种方法的计算结果(表2)非常接近,采用氯仿沥青“A”参数法和热解参数法,东营凹陷沙三段下亚段总滞留油量分别为 65.44×10^8 和 $64.26\times 10^8\text{ t}$;页岩油资源量分别为 11.39×10^8 和 $11.57\times 10^8\text{ t}$ 。其中利津洼陷页岩油最丰富,资源量超过 $6.00\times 10^8\text{ t}$,占比超过50%,其次为牛庄洼陷。应用张林晔等建立的“弹性驱动+溶解气驱动可动油率曲线”^[28]作为页岩油可动率来计算页岩油可动资源量,得到东营凹陷沙三段下亚段页岩油可动资源量为 $1.50\times 10^8\text{ t}$ 。

表2 东营凹陷沙三段下亚段页岩油资源量计算结果

Table2 Calculation results of shale oil resources of Lower Es₃ Member in Dongying Sag

地区	氯仿沥青“A”参数法		热解参数法		计算面积/km ²
	滞留油量/ 10^8 t	页岩油资源量/ 10^8 t	滞留油量/ 10^8 t	页岩油资源量/ 10^8 t	
民丰洼陷	6.32	1.36	6.10	1.18	274.00
利津洼陷	32.43	6.06	32.10	6.59	932.25
博兴洼陷	9.62	1.25	9.74	1.65	458.25
牛庄洼陷	17.07	2.72	16.32	2.15	744.25
东营凹陷	65.44	11.39	64.26	11.57	2 408.75

从东营凹陷沙三段下亚段页岩油资源丰度的平面分布特征看(图6),其页岩油资源量主要分布在各洼陷带,从洼陷中心向边部逐渐减少,洼陷中心的资源丰度以利津洼陷最高,可达 $250\times 10^4\text{ t/km}^2$,其次是牛庄洼陷和博兴洼陷,分别为 150×10^4 和 $100\times 10^4\text{ t/km}^2$,民丰洼陷最低。纵向上,埋深为 $3\ 000\sim 3\ 500\text{ m}$ 最高,为 $7.01\times 10^8\text{ t}$,明显高于埋深为 $3\ 500\sim 4\ 000\text{ m}$ 的 $4.37\times 10^8\text{ t}$;可动油资源量则2个埋深段相当, $3\ 000\sim 3\ 500\text{ m}$ 为 $0.75\times 10^8\text{ t}$,可动率为10.75%, $3\ 500\sim 4\ 000\text{ m}$ 为 $0.73\times 10^8\text{ t}$,可动率为16.70%,反映出深部页岩具有更高的可动油资源量。从页岩油资源丰度和埋深大于 $3\ 500\text{ m}$ 页岩分

布范围叠合图发现(图6),利津洼陷的洼陷带沙三段下亚段页岩主体埋深大于 $3\ 500\text{ m}$,具有高页岩油资源丰度和高可动率特征,是沙三段下亚段有利的页岩油勘探区。

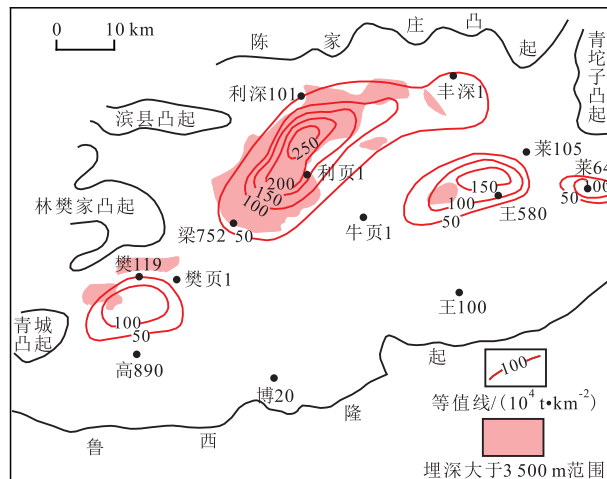


图6 东营凹陷沙三段下亚段页岩油资源丰度等值线分布

Fig.6 Contour map of shale oil abundance of Lower Es₃ Member in Dongying Sag

4 结论

应用体积法能很好地计算陆相断陷盆地页岩油资源量,其中滞留油定量分析可以选用氯仿沥青“A”参数法或热解参数法,2种方法计算的滞留油量有较好的一致性,具有较高的可信度。吸附油量可以通过吸附潜量进行估算,页岩中各组分的吸附潜量通过一定的模型能很好地表征页岩的吸附能力,进而进行页岩油资源量的计算。

东营凹陷沙三段下亚段页岩油主要分布在各洼陷中心,资源丰度最高可达 $250\times 10^4\text{ t/km}^2$,主要分布在埋深为 $3\ 000\sim 3\ 500\text{ m}$,但在 $3\ 500\sim 4\ 000\text{ m}$ 具有更高的可动页岩油资源丰度。利津洼陷带沙三段下亚段页岩油资源丰度和可动率均相对较高,为研究区沙三段下亚段页岩油有利的勘探区。

符号解释:

$Q_{\text{资源量}}$ ——页岩油资源量, 10^8 t ; S ——泥页岩面积, km^2 ;
 h ——泥页岩有效厚度, m ; ρ ——泥页岩密度, t/m^3 ; a ——泥页岩中页岩油含量, t/t ; Q_a ——利用氯仿沥青“A”含量计算的滞留油质量分数,%; K_a ——氯仿沥青“A”轻烃恢复系数;
 A ——氯仿沥青“A”测量值,%; Q_s ——利用热解参数计算的滞留油质量分数,%; K_{s1} ——热解轻烃散失系数; S_1, S_2 ——热解轻量, mg/g ; K_{s2} ——热解 S_2 中重烃比例系数; S_p ——页岩油吸附潜量, mg/g ; p_o ——有机质在泥页岩中所占比例;

x_0 ——有机质吸附潜量, mg/g; γ ——泥页岩比表面积相关系数; p_i ——第 i 种矿物在泥页岩中所占比例; x_i ——第 i 种矿物的吸附潜量, mg/g; S_0, S ——孔隙压实前和压实后的比表面积, m^2/g ; ϕ, ϕ_0 ——泥页岩现今孔隙度和初始孔隙度; $Q_{\text{可动油资源量}}$ ——可动油资源量, 10^8 t ; E_r ——页岩油可动率, %。

参考文献

- [1] 董冬, 杨申铨, 项希勇, 等. 济阳坳陷的泥质岩类油气藏[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 15-22.
DONG Dong, YANG Shenbiao, XIANG Xiyong, et al. Muddy hydrocarbon reservoirs in Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 15-22.
- [2] 张善文, 张林晔, 李政, 等. 济阳坳陷古近系页岩油气形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 1-5.
ZHANG Shanwen, ZHANG Linye, LI Zheng, et al. Formation conditions of Palaeogene shale oil and gas in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 1-5.
- [3] 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.
- [4] 杨傲然, 贾艳雨, 谭静娟, 等. 南阳凹陷陆相页岩油形成条件及勘探潜力分析[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(3): 8-11.
YANG Aoran, JIA Yanyu, TAN Jingjuan, et al. Research on continental shale oil forming conditions and exploration potential analysis in Nanyang depression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(3): 8-11.
- [5] 孙焕泉. 济阳坳陷页岩油勘探实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(4): 1-14.
SUN Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 1-14.
- [6] 王勇, 宋国奇, 刘惠民, 等. 济阳坳陷页岩油富集主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 20-25.
WANG Yong, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Main control factors of enrichment characteristics of shale oil in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 20-25.
- [7] 宁方兴. 济阳坳陷不同类型页岩油差异性分析[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 6-9, 14.
NING Fangxing. Difference analysis on different types of shale oils in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 6-9, 14.
- [8] 朱日房, 张林晔, 李钜源, 等. 页岩滞留液态烃的定量评价[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 13-18.
ZHU Rifang, ZHANG Linye, LI Juyuan, et al. Quantitative evaluation of residual liquid hydrocarbons in shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 13-18.
- [9] 薛海涛, 田善思, 王伟明, 等. 页岩油资源评价关键参数——含油率的校正[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 15-22.
XUE Haitao, TIAN Shansi, WANG Weiming, et al. Correction of oil content—one key parameter in shale oil resource assessment[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 15-22.
- [10] 余涛, 卢双舫, 李俊乾, 等. 东营凹陷页岩油游离资源有利区预测[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 16-21.
YU Tao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Prediction for favorable area of shale oil free resources in Dongying Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(1): 16-21.
- [11] 薛海涛, 田善思, 卢双舫, 等. 页岩油资源定量评价中关键参数的选取与校正——以松辽盆地北部青山口组为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 70-78.
XUE Haitao, TIAN Shansi, LU Shuangfang, et al. Selection and verification of key parameters in the quantitative evaluation of shale oil: A case study at the Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 70-78.
- [12] 钱门辉, 蒋启贵, 黎茂稳, 等. 湖相页岩不同赋存状态的可溶有机质定量表征[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 278-286.
QIAN Menhui, JIANG Qigui, LI Maowen, et al. Quantitative characterization of extractable organic matter in lacustrine shale with different occurrences[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 278-286.
- [13] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842-849.
JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 842-849.
- [14] 李钜源. 渤海湾盆地东营凹陷古近系泥页岩孔隙特征及孔隙度演化规律[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 566-574.
LI Juyuan. Pore characteristics and their evolution in Paleogene mud shales, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 566-574.
- [15] LI T, JIANG Z, LI Z, et al. Continental shale pore structure characteristics and their controlling factors: A case study from the lower third member of the Shahejie Formation, Zhanhua Sag, Eastern China[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017, 45: 670-692.
- [16] LI T, JIANG Z, XU C, et al. Effect of pore structure on shale oil accumulation in the lower third member of the Shahejie formation, Zhanhua Sag, eastern China: Evidence from gas adsorption and nuclear magnetic resonance[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 88: 932-949.
- [17] 朱日房, 张林晔, 李钜源, 等. 渤海湾盆地东营凹陷泥页岩有机储集空间研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 352-356.
ZHU Rifang, ZHANG Linye, LI Juyuan, et al. Organic matter reservoir space of shale in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(4): 352-356.
- [18] 黄睿哲, 姜振学, 高之业, 等. 页岩储层组构特征对自发渗吸的影响[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 111-115.
HUANG Ruizhe, JIANG Zhenxue, GAO Zhiye, et al. Effect of composition and structural characteristics on spontaneous imbibition of shale reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 111-115.

- ciency, 2017, 24(1): 111-115.
- [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.
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.
- [20] 卢双舫, 陈国辉, 王民, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 8-14.
LU Shuangfang, CHEN Guohui, WANG Min, et al. Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member4 of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 8-14.
- [21] 陈小慧. 页岩油赋存状态与资源量评价方法研究进展[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(3): 136-144.
CHEN Xiaohui. Advances in the research on the occurrence state and resources assessment of shale oil[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(3): 136-144.
- [22] 刘庆. 东营凹陷樊页1井沙河街组烃源岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 40-45, 52.
LIU Qing. Element geochemical characteristics of source rocks in the Shahejie Formation in Well Fangye-1, Dongying sag and their geological significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 40-45, 52.
- [23] 刘惠民, 孙善勇, 操应长, 等. 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相特征及其分布模式[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 1-10.
LIU Huimin, SUN Shanyong, CAO Yingchang, et al. Lithofacies characteristics and distribution model of fine-grained sedimentary rock in the lower Es₃ member, Dongying sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 1-10.
- [24] 颜永何, 邹艳荣, 屈振亚, 等. 东营凹陷沙四段烃源岩留-排烃量的实验研究[J]. 地球化学, 2015, 44(1): 79-86.
YAN Yonghe, ZOU Yanrong, QU Zhenya, et al. Experimental study on hydrocarbon retention-expulsion of Es₄ formation source rock in the Dongying Depression[J]. Geochimica, 2015, 44(1): 79-86.
- [25] LI Zheng, ZOU Yanrong, XU Xingyou, et al. Adsorption of mudstone source rock for shale oil-Experiments, model and a case study[J]. Organic Geochemistry, 2016, 92: 55-62.
- [26] ZOU Yanrong, SUN Jianan, LI Zheng, et al. Evaluating shale oil in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China, using the over-saturation zone method[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 161: 291-301.
- [27] 张林晔, 包友书, 李钜源, 等. 湖相页岩中矿物和干酪根留油能力实验研究[J]. 石油实验地质, 2015, 37(6): 776-780.
ZHANG Linye, BAO Youshu, LI Juyuan, et al. Hydrocarbon and crude oil adsorption abilities of minerals and kerogens in lacustrine shales[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 776-780.
- [28] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 陆相盆地页岩油气地质研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 146-154.
ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Geological research and practice of shale oil and gas in continental basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017: 146-154.
- [29] PEPPER Andrew S, CORVI Peter J. Simple kinetic models of petroleum formation, Part III: Modelling an open system[J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(4): 417-452.
- [30] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part2-Shale-oil resource systems[J]. AAPG Memoir 97, 2012: 89-119.
- [31] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文. 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. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [32] 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): 199-205.
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): 199-205.

编辑 刘北羿