

湖相页岩油有利甜点区优选方法及应用 ——以渤海湾盆地东营凹陷沙河街组为例

张鹏飞^{1,2}, 卢双舫², 李俊乾², 薛海涛², 李文鏢², 张宇², 王思远², 冯文俊²

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要: 页岩油有利目标区既是页岩油资源甜点区、物性甜点区, 又是工程甜点区, 因此寻找表征页岩油资源甜点、物性甜点及工程甜点的主地质参数, 是建立页岩油有利区优选方法的关键。建立了一种基于主地质参数的页岩油有利区优选综合定量评价方法: ①以游离油量、渗透率和杨氏模量为主地质参数并作为评价指标, 建立权重评价函数; ②以主地质参数权重评价乘积构建综合权重因子, 确定页岩油勘探开发有利层、低效层和无效层综合权重因子分布范围; ③确定页岩油勘探开发有利层系及有利区分布。将该方法应用于渤海湾盆地东营凹陷, 评价了 27 口井沙河街组三段下亚段和沙河街组四段上亚段页岩油层系综合权重因子, 预测出页岩油勘探开发有利层系及有利区分布范围, 研究结果对东营凹陷页岩油勘探开发具有一定的参考意义。

关键词: 主地质参数; 游离油量; 渗透率; 杨氏模量; 页岩油有利区; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.3 **文献标识码:** A

Identification method of sweet spot zone in lacustrine shale oil reservoir and its application: A case study of the Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Zhang Pengfei^{1,2}, Lu Shuangfang², Li Junqian², Xue Haitao², Li Wenbiao², Zhang Yu², Wang Siyuan², Feng Wenjun²

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: The favorable target zone of shale oil reservoir is the overlapping area of resource sweet spot, physical property sweet spot and engineering sweet spot. To find out the primary geological parameters that may be applied to characterize the three kinds of sweet spots is the key to identifying favorable shale oil target zones. In the study, we propose a comprehensive quantitative method to identify favorable shale oil target zones based on major geologic parameters. First, the primary geological parameters including free oil content, permeability and Young modulus are chosen to establish a weighting evaluation function. Second, a comprehensive weighting factor is constructed by using the weighting evaluation value of primary geological parameters, to define the distribution of comprehensive weighting factors of the favorable, low-efficiency and ineffective layers in shale oil exploration. Third, the favorable target layers and zones of shale oil is thereby mapped. The method has been successfully applied to evaluate the comprehensive weighting factors of the shale oil sequence in 27 wells in the lower sub-member of the 3rd member (E_s^{3L}) and the upper sub-member of the 4th member (E_s^{4U}) of the Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, and to map favorable layers and zones for shale oil exploration. The result is of certain referential meaning to the exploration and development of shale oil in the Dongying Sag.

Key words: primary geological parameter, free oil content, permeability, Young modulus, favorable target zone of shale oil, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期: 2018-11-29; 修订日期: 2019-08-02。

第一作者简介: 张鹏飞(1990—), 男, 博士、讲师, 非常规油气成因机理与分布预测。E-mail: zhangpengfei@upc.edu.cn

通讯作者简介: 卢双舫(1962—), 男, 博士、教授, 油气地质学、地球化学以及非常规油气地质学。E-mail: lushuangfang@upc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41602131, 41672130)。

近年来,中国页岩气发展迅速,业已形成以四川盆地涪陵页岩气田为代表的众多页岩气勘探开发示范区,而页岩油勘探在南襄盆地泌阳凹陷和渤海湾盆地济阳拗陷亦有所突破。然而,中国页岩油藏地质条件复杂,泥页岩非均质性强,发育于多种沉积相带^[1-2],导致页岩油地质甜点(包括资源甜点和物性甜点)和工程甜点等分布不均匀,因此优选页岩油有利区,对页岩油有效勘探开发具有重要意义。页岩油有利区既是资源甜点区、物性甜点区,又是工程甜点区。国内外学者采用不同方法进行页岩油有利目标区优选,如综合信息叠合法^[2-9]和多层次模糊综合评判法^[10]等。在勘探初期,这些方法行之有效,特别是综合信息叠合法被广泛应用于页岩油有利区优选,通过分析影响页岩油富集成藏地质特征的多个参数,如有机质丰度、类型、成熟度、含油量、脆性矿物含量、泥页岩厚度、埋深等,能够较好的优选出页岩油勘探开发远景区。然而,由于评价指标众多,各参数间相互影响,影响了最终的评价效果。此外,页岩油资源富集区不一定是储层高渗区或易压裂区,页岩油富集区往往粘土矿物、有机质等含量较高,导致泥页岩脆性下降,难以有效压裂,同时高粘土含量导致泥页岩渗透率性变差^[11]。因此,简单的多信息综合叠合可能难以精确刻画页岩油有利区分布,尤其是页岩油纵向有利层系分布。本文针对东营凹陷页岩油有利目标区优选,建立了一种基于主地质参数^[12]的定量化的综合评价方法。以决定页岩油资源、物性及工程甜点的主地质参数作为评价指标,构建综合权重因子,确定页岩油勘探开发有利层系分布范围,从而优选出页岩油勘探开发有利靶区。

1 评价方法

1.1 主地质参数优选

页岩油有利靶区既是页岩油资源甜点区、物性甜点区,又是工程甜点区。因此,解决页岩油有利靶区优选问题的关键即为寻找能表征页岩油资源、物性和工程甜点的主地质参数。制约页岩油勘探开发成效的关键不是页岩中蕴含的石油总量,而是在其中蕴含的多少可动用油量^[13-14]。游离态页岩油含量,即游离油量为理论最大可动用油量,可直接表征页岩油的富集程度,是表征资源甜点的主地质参数。渗透率控制着页岩中油气的渗流特性,是决定储层优劣的关键参数。渗透率较好的反映了泥页岩储层的渗透性,可作为表征页岩物性甜点的主地质参数。

制约页岩油可采性的关键因素之一为页岩储层的

可压裂改造性^[1]。泥页岩力学特性控制着压裂改造过程中裂缝的起裂、扩展、延伸和展布形态,杨氏模量越高、泊松比越低可压裂性越好^[15]。东营凹陷泥页岩力学特性测试结果揭示泊松比分布较为集中,变化较小,集中分布于0.2附近,不同样品间杨氏模型差异较大,是影响岩石力学特征的主要因素(图1)。因此,杨氏模量可直接反映东营凹陷泥页岩可压裂性,其值越高可压裂性越好。泥页岩储层力学特性(杨氏模量)表征了泥页岩储层的可压裂性,可用来表征工程甜点。因此,游离油量、渗透率和力学特性对页岩油有利区具有直接控制作用,其他地质参数则通过影响这些主地质参数而间接的影响页岩油有利区。

主地质参数优选使得过去复杂的、多参数的综合信息评价体系得以简化,大大降低了有利靶区优选的工作量。例如,游离油量是有机质丰度、类型、成熟度、排烃效率、矿物组成、地质构造等多种地质因素综合作用的结果^[16],根据实测(或测井预测)游离油量可直接找出页岩油资源甜点,无需分析有机质丰度、类型等一系列地质因素。

1.2 确定主地质参数权重评价

主地质参数权重评价确定是有利区优选的关键环节,而地质参数平面及纵向非均质性使得泥页岩不同部分地质参数值不同,其对应的权重评价亦不相同。泥页岩游离油量越高、渗透率越高、可压裂性(杨氏模量)越好,越有利于页岩油开采。基于这一认识,根据研究区主地质参数分布范围,将最大值对应的评价值设定为10,并以最大值将主地质参数进行归一化处理,以此获得主地质参数权重评价。其中游离油量和杨氏模量以最大值进行线性归一化,为了消除对数负值,渗透率则采用对数极差归一化。

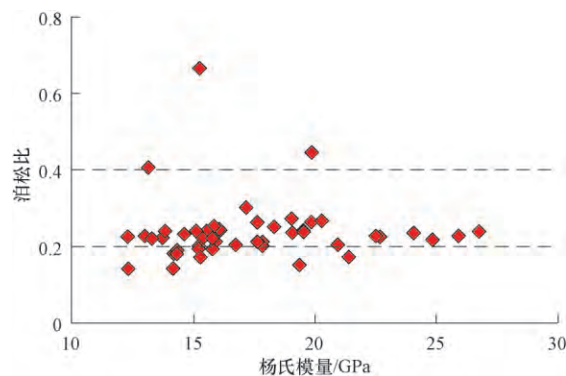


图1 东营凹陷泥页岩杨氏模量与泊松比分布

Fig. 1 Young's modulus and Poisson's ratio distributions of shales in the Dongying Sag

$$U_1 = \frac{10S_{1m}}{S_{1m,max}} \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{10(\lg k - \lg k_{min})}{\lg k_{max} - \lg k_{min}} \quad (2)$$

$$U_3 = \frac{10E}{E_{max}} \quad (3)$$

式中: U_1 为游离油量权重评价价值; S_{1m} 为泥页岩游离油量, mg/g; $S_{1m,max}$ 为研究区泥页岩游离油量最大值, mg/g。 U_2 为渗透率权重评价价值, $\lg k$ 为泥页岩渗透率对数; $\lg k_{max}$ 为研究区泥页岩渗透率对数最大值; $\lg k_{min}$ 为研究区泥页岩渗透率对数最小值。 U_3 为杨氏模量权重评价价值, E 为泥页岩杨氏模量, GPa; E_{max} 为研究区泥页岩储层杨氏模量最大值, GPa。为了使得每个主地质参数均能够对有利靶区优选具有决定权, 本文定义综合权重因子(U) 为3个主地质参数权重评价价值乘积:

$$U = U_1 U_2 U_3 \quad (4)$$

2 东营凹陷页岩油有利区优选

2.1 研究区概括

东营凹陷位于渤海湾盆地东南部, 属于济阳拗陷

的一个次级构造单元, 北以陈家庄凸起与沾化凹陷相邻, 西以林樊家、滨县等凸起与惠民凹陷相接, 南邻鲁西隆起区, 面积约为 5 850 km², 是在华北地台太古界和古生界基底上发育的中、新生代断陷—坳陷叠合盆地^[7]。凹陷北部北东向和近东西向边界断裂控制了整个凹陷的沉积与构造演化, 形成了东营凹陷“北断南超、北深南浅”的箕状构造格局, 凹陷内部发育多个次级洼陷, 包括利津、牛庄、博兴和民丰洼陷(图2)。东营凹陷泥页岩主要发育于古近系沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)(E_s^{4u})、沙三下亚段(E_s^{3l})和沙一段(E_s^1)。其中沙四上亚段和沙三下亚段泥页岩沉积厚度大(100~400 m), 有机质丰度高(1%~5%), 类型好, 以腐泥型—混合型为主, 且已进入低熟—成熟演化阶段(R_o 0.42%~0.64%), 具有形成大量页岩油的物质基础^[18-20]。东营凹陷油气勘探显示古近系泥页岩频繁出现气测异常和油气显示, 其中已有10余口井获得工业油气流, 展现了东营凹陷页岩油巨大的勘探潜力^[7]。因此, 进行页岩油有利靶区优选研究, 对于东营凹陷页岩油勘探具有一定的指导意义。

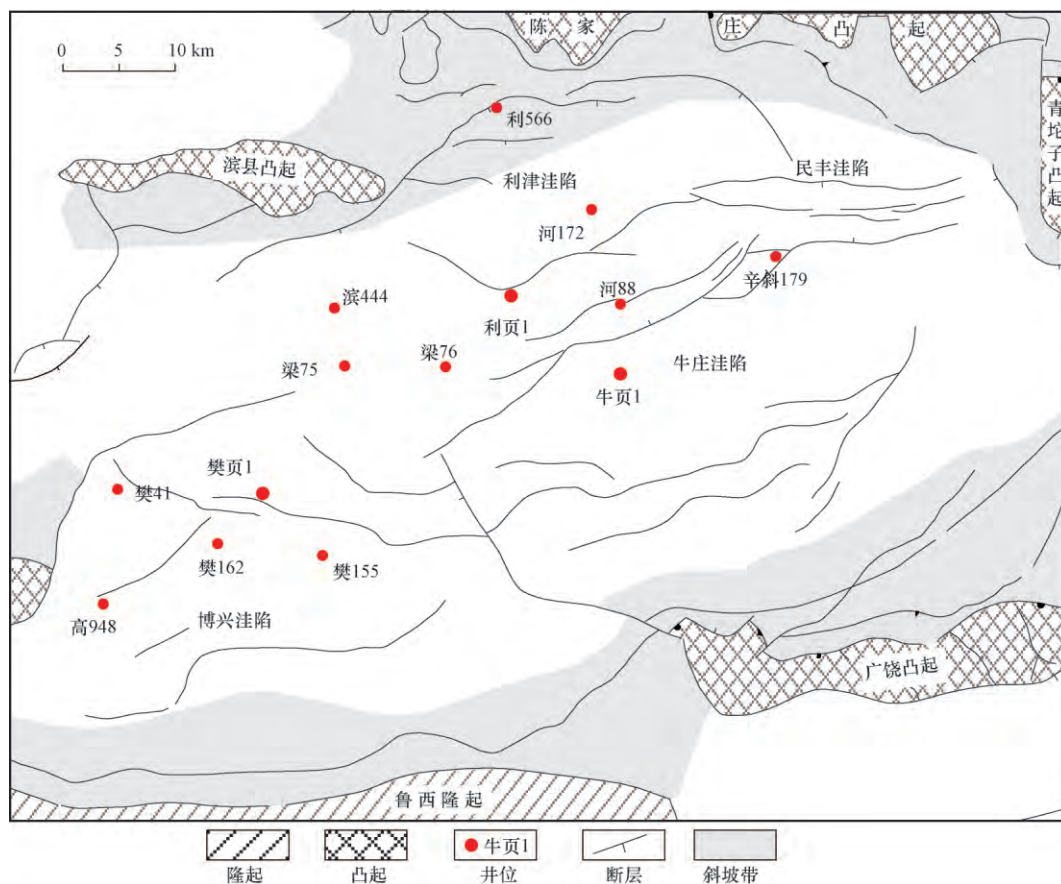


图2 东营凹陷构造单元及井位分布

Fig. 2 Structural unit and well locations of the Dongying Sag

2.2 确定主地质参数评价值

2.2.1 游离油量

泥页岩有机质丰度越高,页岩含油量越大,但有机质吸附油量越大^[21]。国外学者根据页岩油勘探实践,提出了简单有效的评价页岩吸附油含量的油饱和度指数法(即 S_1/TOC 法)^[22]。根据研究区泥页岩 $100 \times S_1/TOC$ 变化和排烃门限,确定了东营凹陷页岩吸附油量为 $1 \text{ mg/g}/TOC$ ^[23]。因此,根据泥页岩总含油量(S_1)和有机碳含量(TOC)即可定量评价其游离油含量。

泥页岩游离油量分布与其有机非均质性密切相关,而实测地化参数(TOC 和 S_1)受样品数量、取样深度、实验成本等因素限制,难以有效精确表征泥页岩纵向连续游离油量分布。由于有机质具有显著的测井响应,同时测井资料具有连续性和较高分辨率的特性,因此可利用测井信息获取连续、精确的泥页岩地球化学参数(TOC, S_1 等)。借助测井信息的连续性,应用改进的 $\Delta \lg R$ 模型^[23-24]基于东营凹陷典型页岩油探井樊页1井、利页1井和牛页1井详细的地化参数,分别建立了博兴、利津和牛庄洼陷 TOC 和 S_1 测井定量评价模型。模型计算值与实测值具有很好的一致性,进而区域推广应用,对研究区27口井进行连续 TOC 和 S_1 测井评价(图3—图5)。根据 TOC 和 S_1 测井评价结果,获取了博兴、利津和牛庄洼陷27口井沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩游离油量纵向连续分布。计算结果显示,研究区27口井沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩游离油量分布在 $0 \sim 17.86 \text{ mg/g}$,平均值为 1.82 mg/g ,最大游离油量为 17.86 mg/g 。

2.2.2 渗透率

渗透率是一个难以直接通过测井曲线方法获取的岩石物理参数,其值大小不仅与孔隙度相关,还与孔隙结构、岩石结构及构造等特征密切相关。而在测井评价中孔隙度是最常见的岩石物理参数,相比于不同样品间渗透率数量级的差异,孔隙度相对差异较小,更容易应用测井曲线实现精确预测。水力流动单元是指具有相似渗流特征的储集岩体,不同水力流动单元具有不同的岩石物理特征^[25]。水力流动单元的提出有效解决了孔隙度与渗透率相关性差的问题,通过对储层水力流动单元划分,分别建立不同流动单元内的孔隙度与渗透率相关性方程,可有效提高泥页岩储层渗透率预测精度^[26-27]。因此,基于东营凹陷樊页1井、利页1井和牛页1井孔隙度、渗

透率实测数据,应用BP神经网络和水力流动单元建立了泥页岩储层渗透率测井预测模型^[28]。计算结果显示,渗透率预测值与实测值变化趋势一致,能够较好地刻画泥页岩渗透率纵向分布特征(图3—图5)。应用渗透率测井预测模型定量评价了博兴、利津和牛庄洼陷27口井沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩渗透率纵向分布。泥页岩渗透率分布在 $(0.00085 \sim 177.01) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $1.90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其最大值对数为2.248,最小值对数为-3.070。

2.2.3 杨氏模量

根据弹性波动理论,岩石杨氏模量计算公式如下:

$$E = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5)$$

式中: E 为岩石杨氏模量, GPa; V_p 为岩石纵波速度, $\text{m}/\mu\text{s}$; V_s 为岩石横波速度, $\text{m}/\mu\text{s}$; ρ 为岩石密度, g/cm^3 。岩石纵波速度及密度可以分别由声波时差和密度测井获取。由于研究区缺少横波测井资料,横波速度(时差)由纵波时差、中子孔隙度、地层真电阻率和自然伽马测井采用多元非线性模型预测:

$$DTS = 122.010 + 0.829DTC + 0.05CNL \cdot RT - 0.375GR \quad (6)$$

式中: DTS 为横波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; DTC 为纵波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; CNL 为中子孔隙度, %; RT 为地层真电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; GR 为自然伽马, API。根据公式(5)和(6)采用测井资料定量评价了东营凹陷27口井沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩杨氏模量纵向分布,泥页岩杨氏模量分布在 $9.65 \sim 55 \text{ GPa}$,平均值为 23.40 GPa ,最大值为 55 GPa 。杨氏模量评价结果较好的反映了东营凹陷泥页岩纵向可压裂性分布特征,其值大小与有机质含量呈负相关,随着围压的增加而增加,与泥页岩力学特性实验结果具有很好的一致性^[1](图3—图5)。

2.3 页岩油有利区优选

2.3.1 综合权重因子及有利层系分布

基于游离油量、渗透率及杨氏模量权重评价,计算了东营凹陷27口井沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩综合权重因子。结果显示,综合权重因子在平面上表现出强非均质性,利津洼陷综合权重因子最高,介于 $0 \sim 871.71$,平均值为 51.90 ,主要分布在 $20 \sim 80$ 范围内(图6a);牛庄洼陷次之,介于 $0 \sim 139.68$,平均值为 20.22 ,主要分布在 $0 \sim 40$ (图6b);博兴洼陷综合权重因子最低,介于 $0 \sim 108.1$,平均值为 9.73 ,集中分布在小于 20 (图6c)。根据东营凹陷综合权重因子分布,将

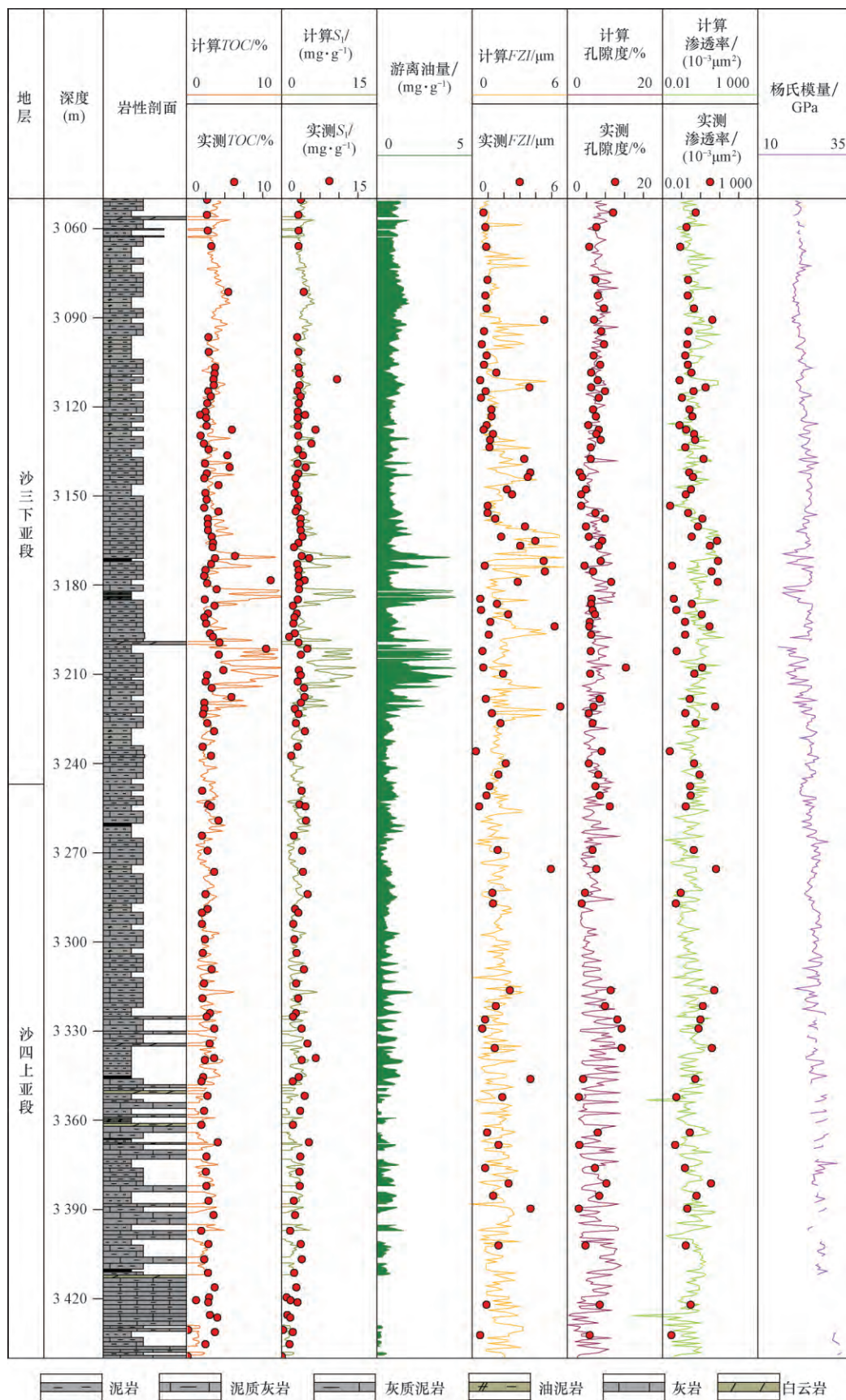


图 3 东营凹陷樊页 1 井沙河街组主地质参数分布

Fig. 3 The distribution of primary geological parameters of the Shahejie Formation in Well Fanyel, Dongying Sag

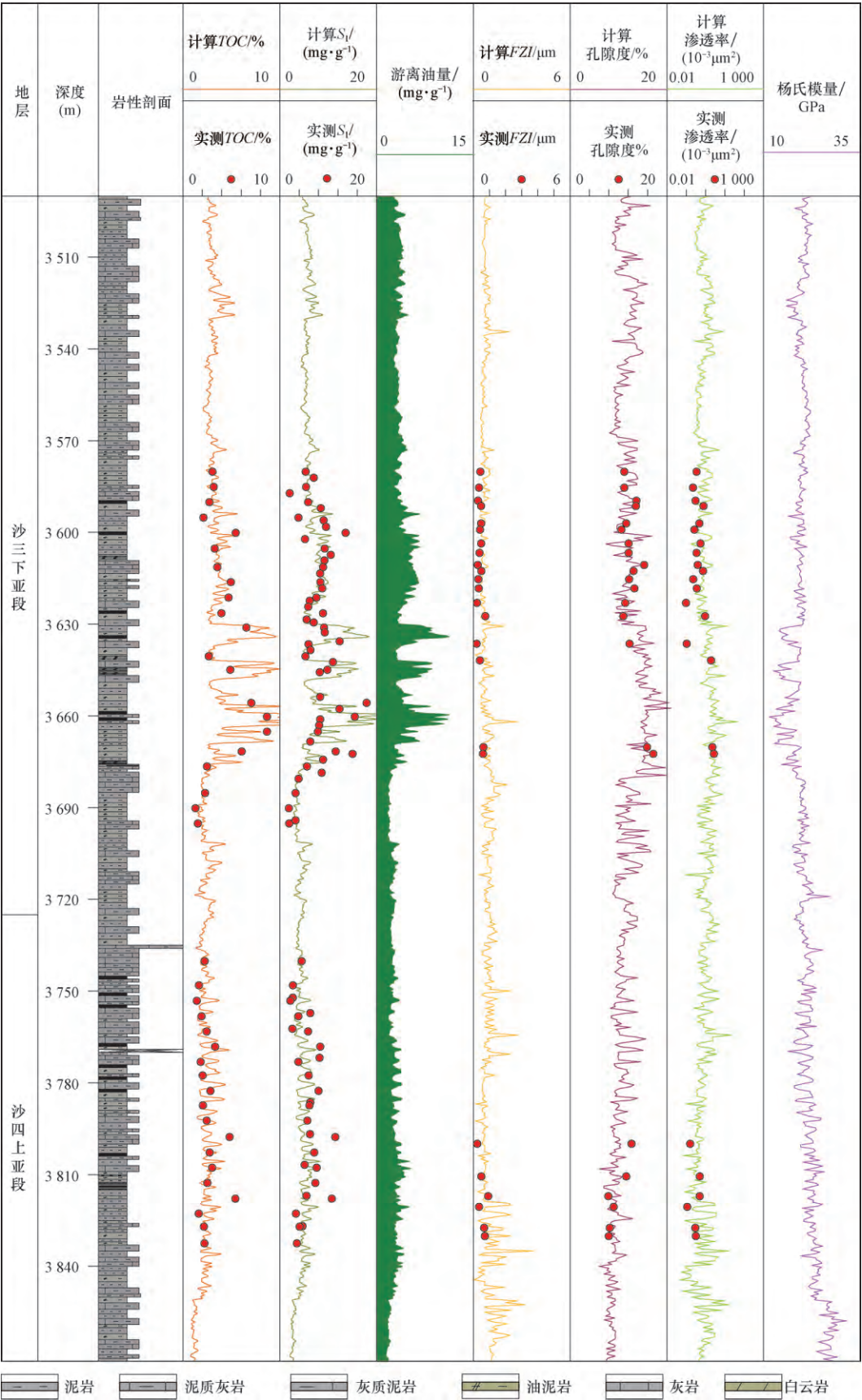


图 4 东营凹陷利页 1 井沙河街组主地质参数分布

Fig.4 The distribution of primary geological parameters of the Shahejie Formation in Well Liye1,Dongying Sag

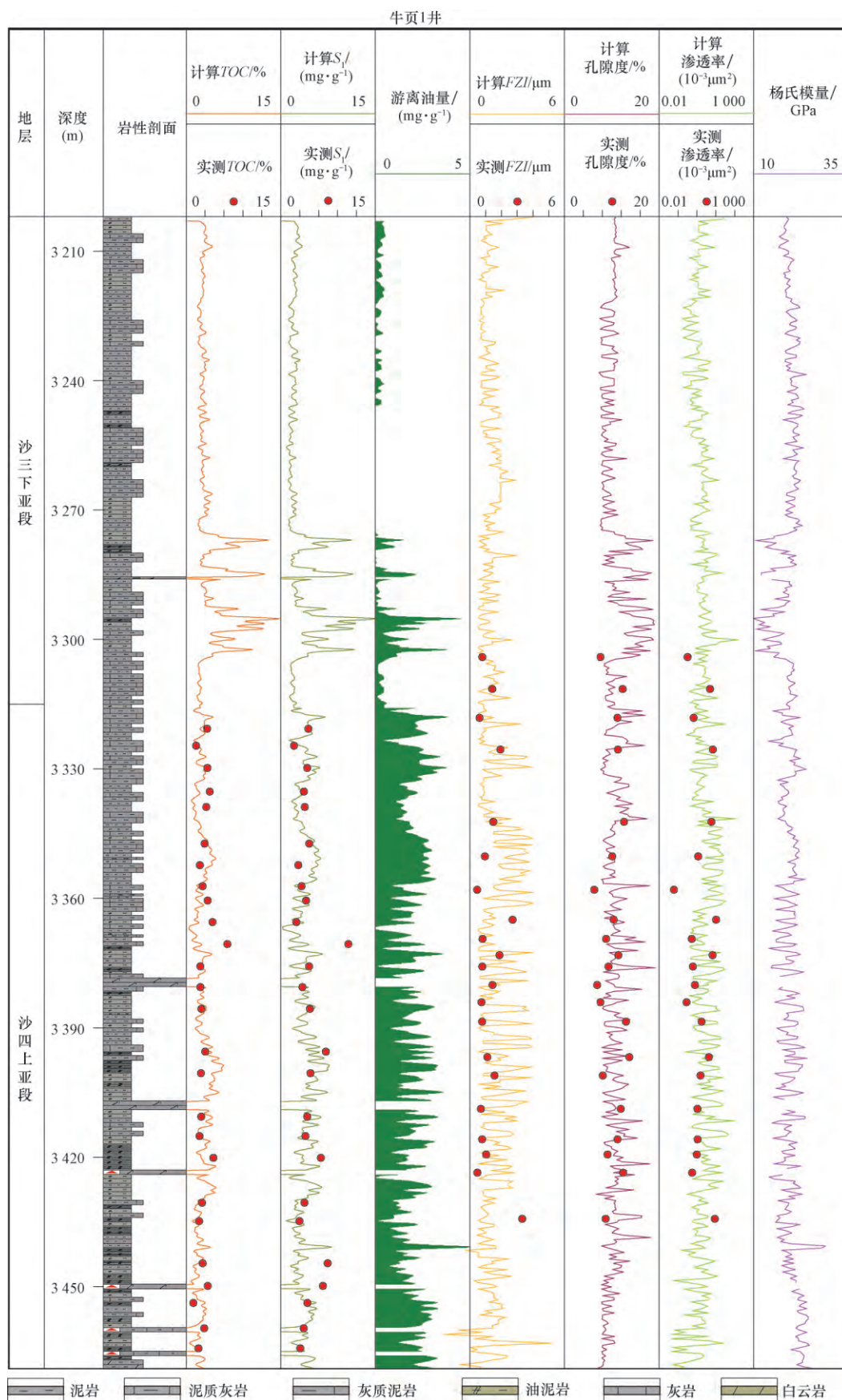


图 5 东营凹陷牛页 1 井沙河街组主地质参数分布

Fig. 5 The distribution of primary geological parameters of the Shahejie Formation in Well Niuye1, Dongying Sag

其分为 3 级: 页岩油勘探开发有利层($U \geq 40$)、低效层($20 \leq U < 40$)和无效层($U < 20$)。其中有利层是指综合权重因子最高,较高游离油量、渗透率和杨氏模量分布层段,最有利于页岩油富集、流动和压裂改造,为近期最有利的页岩油勘探开发层段;低效层段指综合权重因子较低,页岩游离油量、渗透率和杨氏模量较低层段,较不利于页岩开发,为页岩油开发远景层段,而无效层段综合权重因子最低,页岩油无法有效开发。页岩油勘探开发有利层主要分布于利津洼陷,牛庄洼陷仅分布在部分层段,博兴洼陷分布极少,低效层主要分布在牛庄洼陷,利津洼陷次之,而博兴洼陷主要分布无效层。

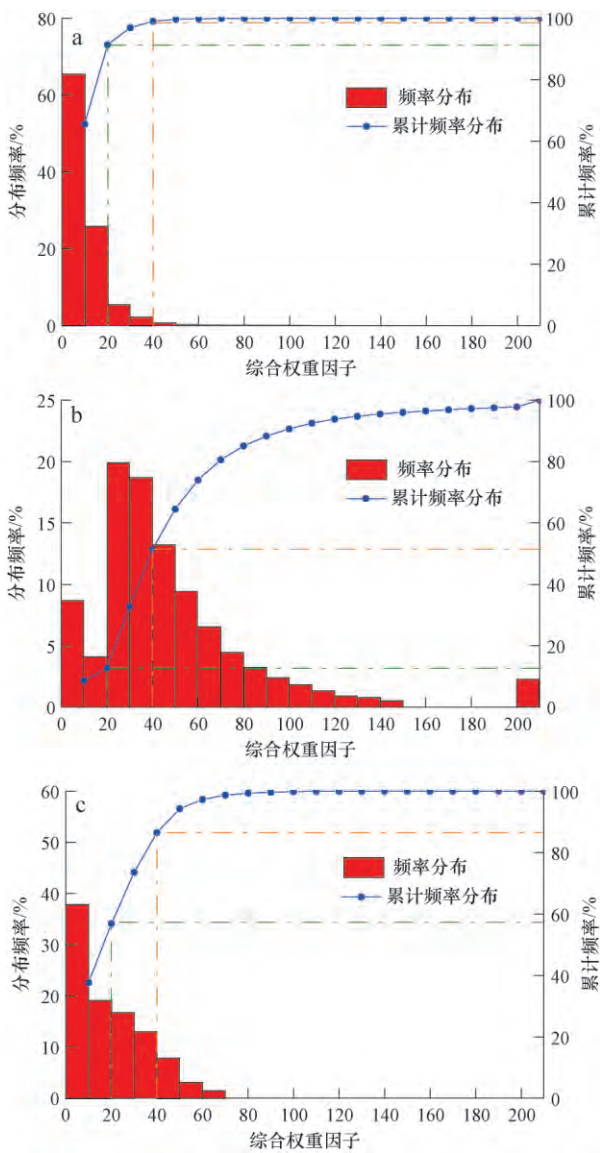


图 6 东营凹陷综合权重因子频率分布

Fig. 6 Frequency distributions of comprehensive weighting factors of the Dongying Sag
a. 博兴洼陷; b. 利津洼陷; c. 牛庄洼陷

本文研究借鉴泥页岩层系含义^[29]定义了页岩油勘探开发有利层系,其指连续厚度大于 30 m,以有利层为主,连续低效层(或/和无效层)不超过 2 m,且总厚度不超过整体三分之一的泥页岩层系。结果表明,东营凹陷泥页岩有利层系主要分布在利津洼陷,其中滨 444 井最厚,有利层系累计厚度达到 251.5 m,利页 1 井最薄,累计厚度为 42.10 m,累计厚度平均值达到 146.90 m(表 1)。页岩油有利层系主要分布在沙三下亚段,利津洼陷累计厚度达到 1 219.792 m,沙四上亚段相对较少,累计厚度达到 396.134 m。

东营凹陷页岩油有利层系单井纵向分布特征显示(图 7),沙三下亚段有利层系主要取决于页岩游离油量,几乎均分布在低效和无效夹层较少高游离油量层段。如利页 1 井,其综合权重因子最高值分布在 3 629 ~ 3 669 m,而有利层系则分布在 3 595.2 ~ 3 637.3 m,位于综合权重因子相对较高层段。与沙三下亚段相比,沙四上亚段有利层系除受游离油量影响外,还受到渗透率和杨氏模量影响,如滨 444 井

表 1 东营凹陷沙河街组页岩油有利开发层系分布

Table 1 Distribution of the favorable target layers for shale oil exploitation in the Shahejie Formation, Dongying Sag

Dongying Sag				
层位	井号	顶深/m	底深/m	厚度/m
沙三下亚段	滨 444	3 059.000	3 256.510	197.510
	滨 437	3 407.625	3 549.250	141.625
	梁 75	3 201.000	3 259.250	58.250
	梁 75	3 289.000	3 320.000	31.000
	梁 752	3 331.875	3 388.000	56.125
	梁 760	3 357.200	3 433.600	76.400
	梁 760	3 436.500	3 480.000	43.500
	利 566	2 453.625	2 538.625	85.000
	利 566	2 573.125	2 610.000	36.875
	河 172	3 388.021	3 452.083	64.062
	河 172	3 466.097	3 553.382	87.285
	河 172	3 555.684	3 595.223	39.539
	梁 76	3 494.000	3 656.125	162.125
	滨 666	2 775.206	2 806.637	31.431
沙四上亚段	利 79	3 294.275	3 361.240	66.965
	利页 1	3 595.200	3 637.300	42.100
	滨 444	3 256.510	3 274.000	17.490
	滨 444	3 278.000	3 314.500	36.500
	滨 437	3 595.375	3 680.000	84.625
	梁 75	3 320.000	3 413.625	93.625
	梁 760	3 496.900	3 564.100	67.200
	滨 666	2 888.317	2 985.011	96.694

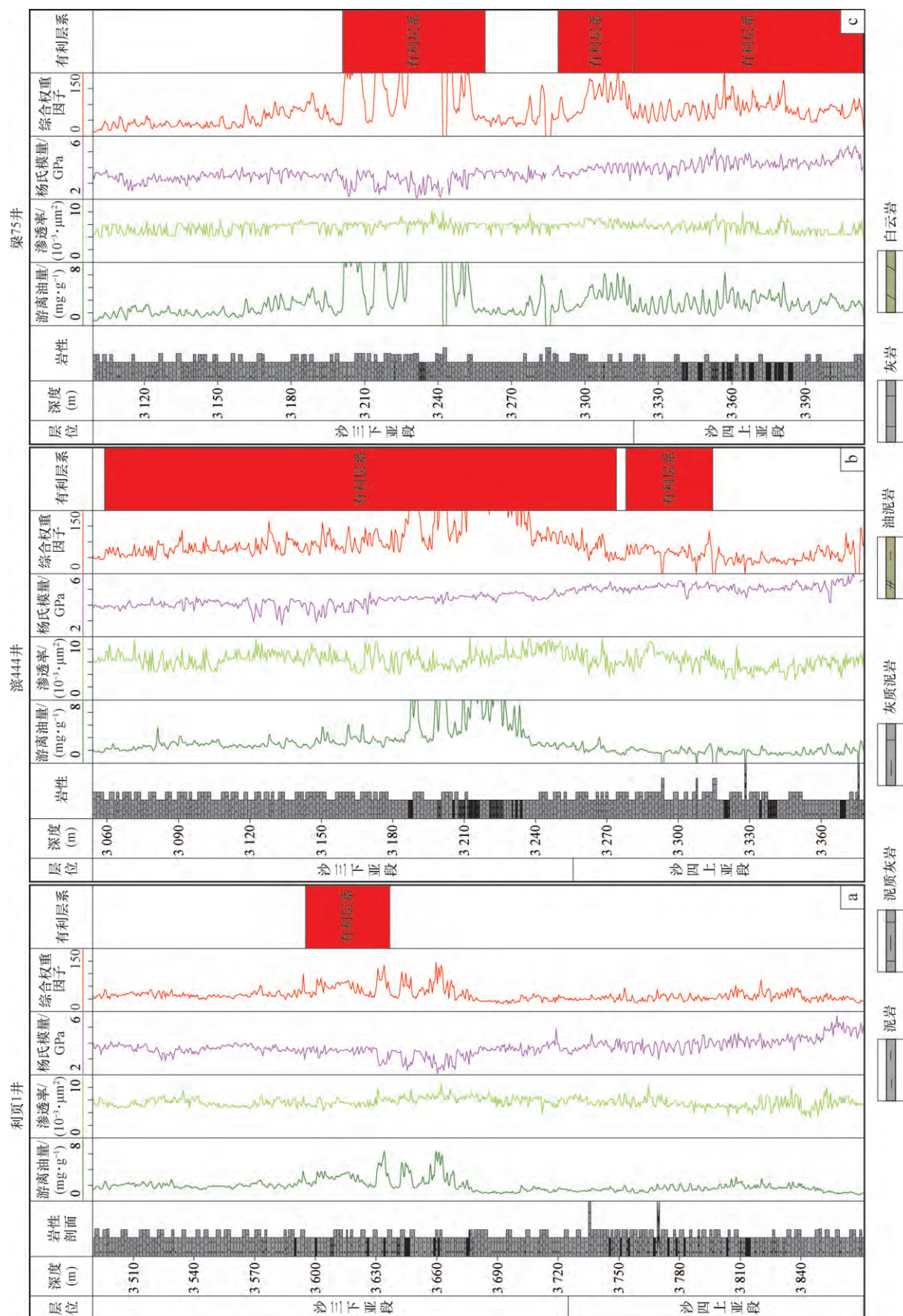


图7 东营凹陷利页1井(a)、滨444井(b)和梁75井(c)沙河街组页岩油有利层系分布

Fig. 7 Distribution of the favorable target layers for shale oil exploitation in the Shahejie Formation in Wells Liye1(a), Bin444(b) and Liang75(c), Dongying Sag

3 278 ~ 3 314.5 m 和梁 75 井 3 320 ~ 3 413.625 m, 高渗透率和杨氏模量亦可使得相对较低游离油量层段成为有利层系。

2.3.2 页岩油有利靶区

有利层系越厚, 页岩油勘探开发越有利, 有利层系分布区即为页岩油勘探开发有利区。沙三下亚段有利层系等厚图揭示, 东营凹陷沙三下亚段有利靶区主要分布在利津洼陷南部和北部, 分别以滨 444 井-梁 76 井(有利区 I) 和河 172 井(有利区 II) 为中心形成 2 个页岩油勘探开发有利靶区(图 8)。有利区 I 平均有利层系厚度为 142m, 面积为 291.50km², 游离资源量约为 7.75×10^8 t。有利区 II 有利层系平均厚度达到 156m, 面积为 168.88km², 游离资源量约为 4.38×10^8 t。沙四上亚段有利靶区主要分布在利津洼陷西南部(有利区 III) 和南部(有利区 IV) (图 9)。有利区 III 以梁 75 井为中心, 面积为 274.88km², 游离资源量约为 2.46×10^8 t, 有利区 IV 包括梁 760 井, 面积为 145.21km², 游离资源量约为 1.48×10^8 t。

3 结论

1) 游离油量是表征页岩油资源甜点的主地质参数, 渗透率可作为表征物性甜点的主地质参数, 杨氏模量可用来表征工程甜点。建立了一种基于主地质参数的页岩油有利靶区优选定量评价方法, 以主地质参数权重评价构建综合权重因子, 确定页岩油勘探开发有利层综合权重因子及有利层系分布范围, 最终确定页岩油勘探开发有利区。

2) 东营凹陷页岩油有利层系主要分布在利津洼陷, 沙三下亚段有利层系分布主要受控于游离油量, 几乎均分布在高游离油量层段。沙四上亚段有利层系除受游离油量影响外, 还受到渗透率和杨氏模量控制, 高渗透率和杨氏模量可使相对较低游离油量层段成为有利层系。

3) 东营凹陷沙三下亚段页岩油有利靶区主要分布在利津洼陷南部和北部, 分别以滨 444 井-梁 76 井和河 172 井为中心; 沙四上亚段有利靶区主要分布在利津洼陷西南部和南部, 分别以梁 75 井和梁 760 井位中心, 研究结果对东营凹陷页岩油勘探开发具有一定的参考意义。

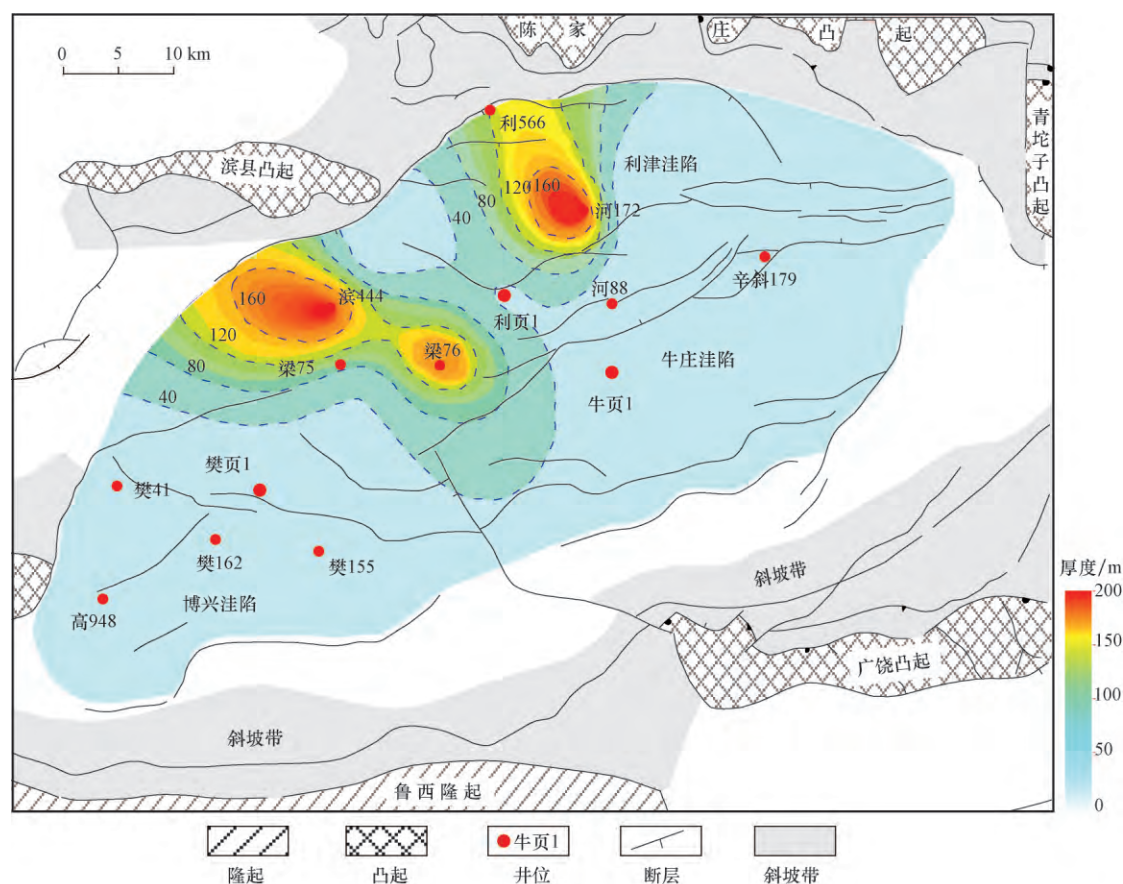


图 8 东营凹陷沙三下亚段有利区分布

Fig. 8 Map of favorable target zones for shale oil exploitation in the Es^{3L}, Dongying Sag

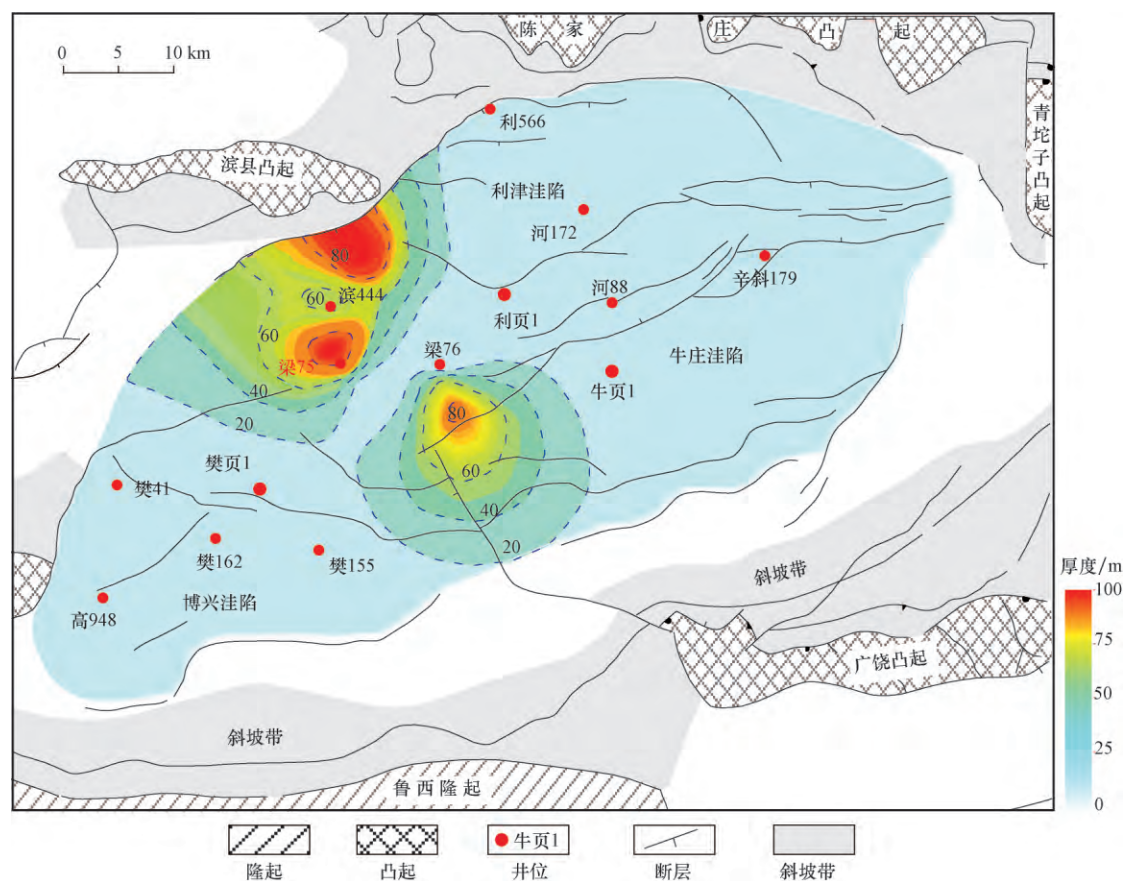


图9 东营凹陷沙四上亚段有利区分布

Fig. 9 Map of favorable target zones for shale oil exploitation in the Es^{4u}, Dongying Sag

参考文献

- [1] 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): 14-26.
- [2] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩油分类与评价 [J]. 地质前缘, 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.
- [3] Liu Chenlin, Wang Ziling, Guo Zeqing, et al. Enrichment and distribution of shale oil in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, Northeast China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86(5): 751-770.
- [4] 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.
- [5] 尉菲菲,张金川,张鹏,等. 辽河凹陷东部凹陷沙三段页岩油气成藏地质条件 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1405-1413.
Wei Feifei, Zhang Jinchuan, Zhang Peng, et al. Accumulation conditions of shale oil and gas in member 3 of the Shahejie Formation in the Eastern Sag of Liaohe Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1405-1413.
- [6] 宁方兴,王学军,郝雪峰,等. 济阳坳陷页岩油甜点评价方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 11-16.
Ning Fangxing, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, et al. Evaluation method of shale oil sweetspots in Jiyang Depression [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 11-16.
- [7] 李志明,陶国亮,黎茂稳,等. 渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷 L69 井古近系沙三下亚段取心段页岩油勘探有利层段 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 236-247.
Li Zhiming, Tao Guoliang, Li Maowen, et al. Favorable interval for shale oil prospecting in coring Well L69 in the Paleogene Es3L in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 236-247.
- [8] 李士超,张金友,公繁浩,等. 松辽盆地北部上白垩统青山口组泥岩特征及页岩油有利区优选 [J]. 地质通报, 2017, 36(4): 654-663.
Li Shichao, Zhang Jinyou, Gong Haofan, et al. The characteristics of mudstones of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 654-663.
- [9] 林拓,苑坤,陈江华,等. 阿尔及利亚页岩油气资源潜力分析 [J]. 中国矿业, 2017, 26(S1): 33-38.
Lin Tuo, Yuan Kun, Chen Jianghua, et al. An analysis of shale gas

- and oil resource potential for Algeria [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S1): 33 – 38.
- [10] 陈晓智, 陈桂华, 肖钢, 等. 北美 TMS 页岩油地质评价及勘探有利区预测 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 77 – 72.
Chen Xiaozhi, Chen Guihua, Xiao Gang, et al. Geological evaluation prediction of favorable exploration zones of TMS shale oil in North America [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 77 – 72.
- [11] Li Junqian, Lu Shuangfang, Xue Haitao, et al. Quantitative evaluation on the elastic property of oil-bearing mudstone/shale from a Chinese continental basin [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2015, 33(6): 851 – 868.
- [12] 李俊乾, 刘大猛, 姚艳斌, 等. 基于主地质参数的煤层气有利开发区优选及应用 [J]. 现代地质, 2014, 25(3): 653 – 658.
Li Junqian, Liu Dameng, Yao Yanbin, et al. A method for targeting favorable coalbed methane development area based on primary geological parameters and its application [J]. Geoscience, 2014, 25(3): 653 – 658.
- [13] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势 [J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309 – 1322.
Lu Shuangfang, Xue Haitao, Wang Min, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1309 – 1322.
- [14] Li Junqian, Lu Shuangfang, Cai Jianchao, et al. Adsorbed and free oil in lacustrine nanoporous shale: A theoretical model and a case study [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(12): 12247 – 12258.
- [15] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素 [J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184 – 196.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liao Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184 – 196.
- [16] 葛明娜, 张金川, 李婉君, 等. 辽河西部凹陷页岩油气富集主控因素 [J]. 石油地质与工程, 2015, 29(5): 46 – 49.
Ge Mingna, Zhang Jinchuan, Li Wanjun, et al. Main controlling factors analysis of shale oil and gas accumulation in west sag of Liaohe Depression [J]. Petroleum geology and Engineering, 2015, 19(5): 46 – 49.
- [17] 王永诗, 李政, 巩建强, 等. 济阳凹陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例 [J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83 – 91.
Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Discussion on evaluation method of shale oil and gas in Jiyang Depression: A case study on Luoqia area in Zhanhua Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 83 – 91.
- [18] 包友书, 张林晔, 张金功, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油可动性影响因素 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 408 – 414.
Bao Youshu, Zhang Linye, Zhang Jingong, et al. Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 408 – 414.
- [19] 张林晔, 包友书, 李钜源, 等. 湖相页岩油可动性——以渤海湾盆地济阳凹陷东营凹陷为例 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 641 – 649.
Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Mobility of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 641 – 649.
- [20] Zhang Liuping, Bai Guoping, Zhao Yingquan. Data-processing and recognition of seepage and microseepage anomalies of acid-extractable hydrocarbons in the south slope of the Dongying depression, eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57(2): 385 – 402.
- [21] Li Junqian, Lu Shuangfang, Xie Liujuan, et al. Modeling of hydrocarbon adsorption on continental oil shale: A case study on n-alkane [J]. Fuel, 2017, 206(5): 603 – 613.
- [22] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2 Shale-oil resource systems [J]. AAPG Memoir, 2012, 97: 89 – 119.
- [23] 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.
- [24] 黄文彪, 邓守伟, 卢双舫, 等. 泥页岩有机质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.
- [25] Hearn C L, Ebanks W J, Tye R S, et al. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog draw field, Wyoming [J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36(8): 1335 – 1344.
- [26] 焦翠华, 徐朝晖. 基于流动单元的渗透率预测方法 [J]. 测井技术, 2006, 30(4): 317 – 319, 384.
Jiao Cuihua, Xu Zhaohui. An approach to permeability prediction based on flow zone index [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(4): 317 – 319, 384.
- [27] Nooruddin H A, Hossain M. Modified Kozeny-Carmen correlation for enhanced hydraulic flow unit characterization [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 80: 107 – 115.
- [28] Zhang Pengfei, Lu Shuangfang, Li Junqian, et al. Permeability evaluation on oil-window shale based on hydraulic flow unit: A new approach [J]. Advance in Geo-Energy Research, 2018, 2(1): 1 – 13.
- [29] 陈方文, 赵红琴, 王淑萍, 等. 渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷沙一下亚段页岩油可动量评价 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 593 – 601.
Chen Fangwen, Zhao Hongqin, Wang Shuping, et al. Evaluation of movable shale oil reserves in the Es^{1L} of the Raoyang sag, Jizhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 593 – 601.

(编辑 张亚雄)