

引用格式: 王欣, 韩建强, 咎灵, 等. 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩油测井评价研究[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 364-372.
WANG Xin, HAN Jianqiang, ZAN Ling, et al. Logging evaluation of shale oil in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 364-372.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.006

苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩油测井评价研究

王欣¹, 韩建强², 咎灵¹, 李小龙¹, 彭兴平¹

(1. 中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏 南京 210019;
2. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:如何利用常规测井资料对储层含油性、储集性及可压性进行有效评价, 是苏北页岩油规模化开发亟需解决的生产难题。利用常规测井资料与岩心实验资料, 采用最优化、拟合、正反演数值模拟等数学手段, 建立起总有机碳含量、有效孔隙度、层理缝密度、矿物组份含量等参数的计算模型, 对页岩沉积构造和岩相进行分类研究。研究表明: 溱潼凹陷阜宁组二段(以下简称阜二段)泥页岩以富有机质层状或纹层状泥岩、富有机质块状泥岩为主, 有利岩相为富有机质层状或纹层状泥岩, 有利岩相纵向上与非有利岩相交互出现。采用文中所导出的模型识别的“甜点”层段与采用特殊测井分析的层段位置具有良好的一致性, 且现场应用效果良好。该方法和技术已应用于苏北盆地页岩油储层地质工程“甜点”段的选定工作, 对苏北页岩油效益开发具有重要意义。

关键词: 苏北盆地; 页岩油; 常规测井; 岩相; 地质工程“甜点”段

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Logging evaluation of shale oil in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin

WANG Xin¹, HAN Jianqiang², ZAN Ling¹, LI Xiaolong¹, PENG Xingping¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China;
2. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The efficient evaluation of the oil properties, capabilities, and compressibility of reservoirs using conventional logging data is essential for the large-scale development of shale oil in northern Jiangsu. Utilizing conventional logging data alongside core experiment data, this study develops a robust model to calculate several critical reservoir characteristics. These include total organic carbon content, effective porosity, bedding fracture density, and mineral composition content. The model employs a variety of mathematical methodologies such as physical concept analysis, optimization, fitting, and both forward and backward numerical simulations. Furthermore, this research classifies the sedimentary structure and lithofacies of the reservoir. Results indicate that the shale within the second member of Funing Formation in Qintong Sag predominantly consists of organic-rich layered/laminated mudstone and block mudstone. Among these, the layered or laminated mudstone represents the favorable lithofacies, intersecting vertically with non-favorable rock types. The “sweet spot” layers identified by the model correlate well with the layers analyzed using specialized logging techniques, and field applications have yielded positive outcomes. This technology has been successfully applied in identifying geological and engineering “sweet spots” within the shale oil reservoirs of the Subei Basin, offering significant guidance for the strategic development of shale oil in the region.

Keywords: Subei Basin; shale oil; conventional logging; lithofacies; geological & engineering “sweet spots”

收稿日期: 2023-08-15。

第一作者简介: 王欣(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地球物理测井解释及方法研究工作。地址: 江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼, 邮政编码: 210019。E-mail: 359505531@qq.com

基金项目: 中国石化科技部项目“溱潼凹陷低TOC陆相页岩油勘探开发关键技术”(P23190); 中国石化科技部项目“苏北盆地页岩油地质工程一体化关键技术研究”(P21112)。

近年来,随着苏北盆地陆相页岩油勘探的重大突破^[1],苏北页岩油资源已步入规模化开采阶段,高效选定页岩油储层地质工程“甜点”段,是苏北页岩油效益开发的关键。实践表明:开展地质工程一体化综合研究和提高效益是陆相页岩油开发的发展方向^[2-3]。其中,卢双舫等^[4]认为由丰富的测井资料来建立、由实验室分析资料来标定评价页岩有机非均质性和无机非均质性的模型具有可行性和有效性,可以有效服务于识别页岩油的“甜点”。陈桂华等^[5]提出了页岩油气纵向综合“甜点”的识别流程及量化评价方法。姚东华等^[6]基于高精度岩石物理实验和常规测井资料,建立了页岩油综合“甜点”测井评价方法。刘国强等^[7]基于新技术资料的目标化处理成果所精细揭示的页岩油宏观结构特征与微观结构特征,提出了微观结构与宏观结构相融合的页岩油“甜点”评价方法。匡立春等^[8]研究页岩油表征的关键参数及方法,优选出页岩TOC(总有机碳含量)、总孔隙度、含油量、游离油量和有效厚度5个关键参数的确定方法及分级评价标准。李国欣等^[9]认为高TOC含量页岩岩相是陆相页岩油的源岩基础,但不是产量的主控因素,有利岩相以及良好的源储配置关系是陆相页岩油产量的主控因素。李宁等^[10]以元素扫描、二维核磁共振和微电阻率成像等测井新技术为核心,构建了页岩油测井识别和定量评价新技术体系。李宁等^[11]认为松辽盆地古龙页岩油储层测井评价的关键是优势岩性岩相及其空间叠置关系识别与表征。在页岩储层地质工程参数的表征评价(矿物含量^[12]、岩相^[13]、有机碳含量^[14]、含油饱和度^[15]、脆性^[16]、裂缝^[17]等)和多性研究^[18-22]方面,前人做了大量研究工作^[23-28]。这些方法和技术的提出及应用对提高页岩油的开采效率具有重要的价值。

以上研究工作都不同程度上依赖于电成像、二维核磁、岩性扫描和声波扫描等特殊测井系列。特殊测井虽然能够较为直观地对储层做出定性解释,但相对常规测井成本较高,难以规模化应用,且苏北地区老井普遍缺乏特殊测井资料。利用常规测井(如:自然伽马、自然电位、电阻率、补偿声波、测井中子、测井密度等)资料对储层的地质工程“甜点”段进行有效选定,不仅可以有效降低新井投资成本,还可以利用老井资料进行战略选区规划。这对苏北页岩油资源的规模化效益开发具有重要现实意义。因此,提出利用常规测井系列成果和岩心实验分析数

据,通过物理概念分析,采用最优化、拟合、数值模拟等数学方法,建立起两者之间的经验关系,对页岩油储层参数进行计算,进而对其地质工程“甜点”段进行评价。研究成果为苏北页岩油“甜点”区段选定、射孔压裂方案设计、开发层系优选及井网部署等工作提供了必要技术支撑。

1 储层参数计算

溱潼凹陷属于区域拉张背景下形成的新生代陆相断陷湖盆,阜宁组二段(以下简称阜二段)形成于半深湖—深湖沉积环境,发育一套细粒—极细粒暗色泥页岩。泥页岩具有厚度大、热演化程度适中、矿物组成均匀等地质特征。泥页岩厚度大,深凹带厚度普遍大于200 m,最大厚度超过450 m。阜二段TOC介于0.5%~2.5%,平均1.6%。热演化程度适中, R_o (镜质体反射率)介于0.5%~1.1%。由长英质、黏土质、碳酸盐矿物组成,比例为4:3:3,脆性矿物含量较高(66%)。

优选测井系列齐全、岩心资料丰富的QY1井建立储层参数模型。QY1井是苏北盆地溱潼凹陷页岩油重点探井,测井系列齐全,包括电成像、声波扫描、岩性扫描、介电扫描、二维核磁等特殊测井系列及自然伽马、自然电位、电阻率、补偿声波、测井中子、测井密度等常规测井系列,且阜二段全段取心,岩心分析内容丰富,涵盖了有机地球化学(元素、有机碳含量、岩石热解等)、岩石学(薄片、全岩、氩离子抛光扫描电镜等)、岩石物性(脉冲渗透率、孔隙度、岩石电阻率、粒度等)、流体性质(PVT、水质、全烃组分等,PVT为高压物性)、岩石力学性质(单轴或三轴抗压强度)等分析项目。下文基于QY1井常规测井资料与岩心分析资料,建立溱潼凹陷阜二段页岩油储层关键参数计算模型。

1.1 总有机碳含量计算

TOC是有机质丰度的重要表征参数,有机质丰度不仅影响生烃强度,同时也影响着有机质孔隙的发育以及吸附油气的含量,通常高有机质丰度的页岩具有高的生烃潜力特征。用 TOC_{core} (岩心总有机碳含量)分别与常规测井曲线AC(测井声波时差)、CNL(测井中子)、DEN(测井密度)、RT(深感应电阻率)进行线性回归分析,相关系数分别为0.37、0.42、

0.43、0.41、0.26。

分析发现:TOC_{core}与AC、CNL、DEN等单参数测井数据相关性较差,相关系数最大为0.43。为提高计算精度,考虑岩性、物性、电性对TOC数值大小的影响,同时利用GR(自然伽马)、DEN、RT多参数对TOC_{core}进行回归分析,得到以下公式:

$$\omega(\text{TOC}_{\log})=0.045G_{\text{GR}}-0.361D_{\text{DEN}}+1.419\log 10R_{\text{RT}}-4.52 \quad (1)$$

式中: $\omega(\text{TOC}_{\log})$ 为多参数测井解释总有机碳含量,%; G_{GR} 为自然伽马,单位API; D_{DEN} 为测井密度,单位 g/cm^3 ; R_{RT} 为深感应电阻率,单位 $\Omega\cdot\text{m}$ 。

分析发现:TOC_{core}与其GR、DEN、RT建立的多参数计算模型(TOC_{log})相关性较好,相关系数为0.87。因此,GR反映岩性,GR值约束下的DEN和RT值可以较好地反映储层总有机碳含量值(图1)。

1.2 有效孔隙度计算

有效孔隙度是表征储层储集性特征的重要参数。用POR_{core}(岩心有效孔隙度)分别与常规测井曲线AC、CNL、DEN、RT、GR进行线性回归分析,相关系数分别为0.13、0.13、0.07、0.25、0.39。

分析发现:POR_{core}与AC、CNL、DEN等单参数测井数据相关性较差,相关系数最大为0.39。为提高计算精度,考虑岩性、物性对POR数值大小的影响,同时利用GR、AC多参数对POR_{core}进行回归分析,得到以下公式:

$$P(\text{POR}_{\log})=0.065G_{\text{GR}}+0.036A_{\text{AC}}-10.202 \quad (2)$$

式中: $P(\text{POR}_{\log})$ 为多参数测井解释有效孔隙度,%;

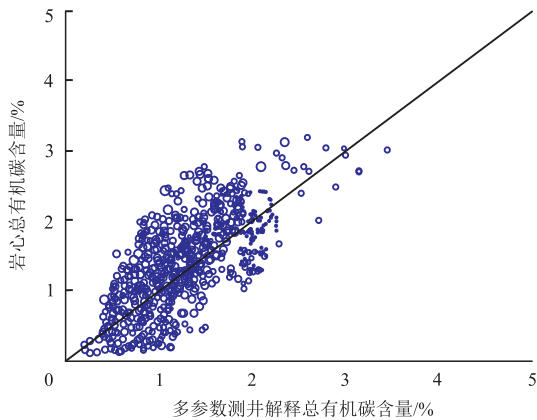


图1 岩心总有机碳含量与测井计算总有机碳含量交会图
Fig. 1 Crossplot of core analysis values and logging calculation values for total organic carbon content

A_{AC} 为测井声波时差,单位 $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

分析发现:POR_{core}与GR、AC建立的多参数计算模型(POR_{log})相关性较好,相关系数为0.85。GR反映岩性,GR值约束下的AC值可以较好地反映储层孔隙度值(图2)。

1.3 层理缝密度计算

优质页岩油储层通常层理缝较为发育。用BDEN_{core}(岩心分析层理缝密度)分别与常规测井曲线GR、AC、CNL、DEN、RFOC(测井八侧向电阻率)进行相关性分析,相关系数分别为0.13、0.23、0.19、0.27、0.71。

分析发现:BDEN_{core}与RFOC单参数测井数据相关性相对较好,相关系数为0.71。RFOC探测深度最浅,对层理缝密度具有一定响应敏感性。为进一步提高计算精度,借鉴地震分层中波阻抗概念,同时利用RFOC、DEN、AC多参数对BDEN_{core}进行回归分析,得到以下公式:

$$Z=D_{\text{DEN}}/A_{\text{AC}} \quad (3)$$

$$B(\text{BDEN}_{\log})=3\ 424.885\log 10R_{\text{RFOC}}+0.003Z-2\ 320.193 \quad (4)$$

式(3)一式(4)中: Z 为测井波阻抗,单位 $(\text{g}/\text{cm}^3)\cdot(\text{m}/\text{s})$; $B(\text{BDEN}_{\log})$ 为多参数测井解释层理缝密度,单位条/m; R_{RFOC} 为测井八侧向电阻率,单位 $\Omega\cdot\text{m}$ 。

分析发现:BDEN_{core}与RFOC、 Z 建立的多参数计算模型(BDEN_{log})相关性较好,相关系数为0.88。基于层理缝密度的计算结果,可以将沉积构造划分为

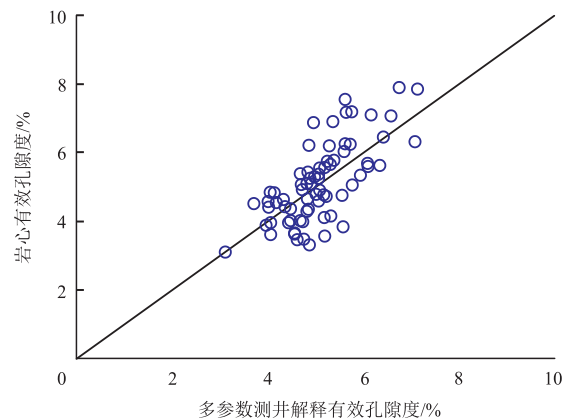


图2 岩心分析有效孔隙度与测井计算有效孔隙度交会图
Fig. 2 Crossplot of core analysis values and logging calculation values for effective porosity

纹层状(层理缝密度不低于2 000 条/m)、层状(层理缝密度不低于500 条/m,小于2 000 条/m)、块状(层理缝密度小于500 条/m)3种类型(图3)。

1.4 矿物组分含量计算

泥页岩黏土与脆性矿物含量是确定页岩油有效储层下限标准及测井储层分类标准的重要参数。斯伦贝谢依靠其仪器优势,根据LithoScanner(岩性扫描)测井提供精确的元素及矿物含量,结合高分辨率的FMI(地层微电阻率扫描成像)图像,对页岩储层在纵向上进行精细的岩石类型划分。受限于仪器分辨率限制,国内常规测井评价方法对岩石进行系统分类划分难度较大。矿物粒度较细,构成矿物元素的种类较复杂,为了尽量降低由此带来的误差,采用最优化方法,基于QY1井全岩分析实验数据,

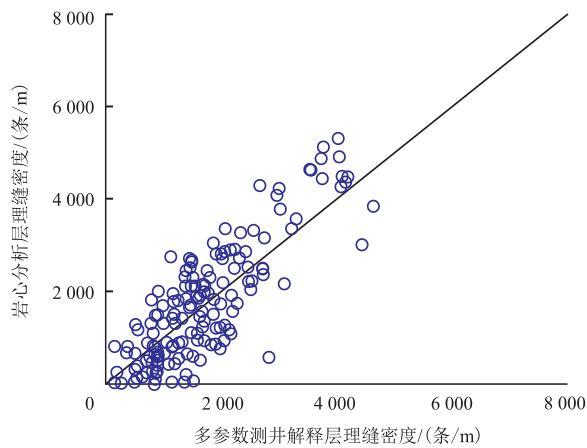


图3 岩心分析层理缝密度与测井计算层理缝密度交会图

Fig. 3 Crossplot of core analysis values and logging calculation values for layered fracture density

与测量井段的GR、RT、AC、DEN、CNL等测井数据进行全局最优化分析,分别建立矿物组分的计算模型(表1)。

基于矿物组分含量的计算结果,对脆性指数可以进行进一步研究。

2 地质工程“甜点”段评价

在储层参数计算模型的基础上,对溱潼凹陷阜二段储层的岩相进行分类,进而优选出地质工程“甜点”段。

2.1 岩相分析

按照岩性类型、沉积构造类型及有机质含量大小,将溱潼凹陷阜二段储层岩相分为6类:富有机质层状或纹层状泥岩、富有机质层状或纹层状含灰质泥岩、富有机质块状泥岩、富有机质块状含灰质泥岩、层状或纹层状泥岩、层状或纹层状含灰质泥岩(表2)。

2.2 “甜点”段选取

研究发现,溱潼凹陷阜二段泥页岩以富有机质层状或纹层状泥岩、富有机质块状泥岩为主。有利岩相为富有机质层状或纹层状泥岩,有利岩相纵向上与非有利岩相交互出现。苏北页岩油开发实践发现,岩相是苏北页岩油储层地质工程“甜点”段的重要指征,通常选取有利岩相富有机质层状或纹层状泥岩作为地质工程“甜点”段进行压裂评价且效果较好。溱潼凹陷阜二段页岩油储层测井评价分类标准见表3。

表1 矿物组分含量计算模型

Table 1 Calculation model for mineral composition content

矿物组分	含量计算公式
石英	$Q_{\text{ua}} = -0.085C_{\text{GR}} - 0.197R_{\text{RT}} - 0.138A_{\text{AC}} + 4.623D_{\text{DEN}} + 0.303C_{\text{CNL}} + 79.715$
长石	$F_{\text{el}} = 0.151G_{\text{GR}} - 0.094R_{\text{RT}} - 0.112A_{\text{AC}} - 9.377D_{\text{DEN}} - 0.198C_{\text{CNL}} + 56.555$
方解石	$C_{\text{al}} = -0.427G_{\text{GR}} - 0.177R_{\text{RT}} + 0.157A_{\text{AC}} + 66.105D_{\text{DEN}} - 0.225C_{\text{CNL}} - 150.178$
白云石	$D_{\text{ol}} = 0.162G_{\text{GR}} + 0.833R_{\text{RT}} - 0.045A_{\text{AC}} - 4.66D_{\text{DEN}} + 0.882C_{\text{CNL}} - 6.373$
黄铁矿	$P_{\text{yr}} = 0.009G_{\text{GR}} - 0.039R_{\text{RT}} + 0.025A_{\text{AC}} - 4.677D_{\text{DEN}} - 0.126C_{\text{CNL}} + 9.621$
黏土	$C_{\text{ls}} = 0.191G_{\text{GR}} - 0.326R_{\text{RT}} + 0.114A_{\text{AC}} - 42.77D_{\text{DEN}} - 0.636C_{\text{CNL}} + 110.66$

注: Q_{ua} 为石英含量,%; F_{el} 为长石含量,%; C_{al} 为方解石含量,%; D_{ol} 为白云石含量,%; P_{yr} 为黄铁矿含量,%; C_{ls} 为黏土含量,%。

表2 苏北盆地溱潼凹陷阜二段主要岩相类型
Table 2 Main lithofacies types in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin

岩相类型	总有机碳含量/%	沉积构造类型	岩性类型
富有机质层状或纹层状泥岩	≥0.7	层状或纹层状	泥岩
富有机质层状或纹层状含灰质泥岩	≥0.7	层状或纹层状	含灰质泥岩
富有机质块状泥岩	≥0.7	块状	泥岩
富有机质块状含灰质泥岩	≥0.7	块状	含灰质泥岩
层状或纹层状泥岩	<0.7	层状或纹层状	泥岩
层状或纹层状含灰质泥岩	<0.7	层状或纹层状	含灰质泥岩

表3 苏北盆地溱潼凹陷阜二段页岩油储层测井评价分类标准
Table 3 Classification criteria for logging evaluation of shale oil reservoirs in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin

储层类型	电性			含油性		储集性	可压性		岩相
	自然伽马/API	深感应电阻率/($\Omega \cdot m$)	测井声波时差/($\mu s/m$)	总有机碳含量/%	原始含油饱和度/%	孔隙度/%	层理缝密度/(条/m)	脆性/%	
I类层	≥95	≥20	≥215	≥0.7	≥45	≥3	≥500	≥60	富有机质层状或纹层状(含灰质)泥岩
II类层	≥75	≥15	≥205	≥0.7	≥20	≥2	≥0	≥50	富有机质块状(含灰质)泥岩
III类层	≥45	≥5	≥195	≥0	≥0	≥1	≥500	≥45	层状或纹层状(含灰质)泥岩

2.3 适用性评价

为评价上述基于常规测井资料评价“甜点”段做法的适用性,以QY1井为例,同时采用2种评价“甜点”段的方法进行对比分析。

方法一是综合QY1井阜二段电成像、元素扫描、二维核磁、介电扫描、声波扫描等特殊测井和常规测井资料(图4),共解释I类层69.3 m/18层,II类层92.4 m/21层,III类层189.4 m/19层,优选出2段(3 770~3 894 m、3 925~4 025 m)共224 m压裂“甜点”段。

方法二是仅基于QY1井常规测井资料,对其岩性、TOC、物性、裂缝、岩相等进行综合研究,评价出该井的地质工程“甜点”段为有利岩相富有机质层状或纹层状泥岩(图5),优选出2段(3 768~3 890 m、3 933~4 035 m)共224 m压裂“甜点”段。

对比研究发现,2种方法优选出的地质工程“甜点”段具有良好的一致性,表明基于常规测井资料建立的地质工程“甜点”段评价方法具有良好适用性。

2.4 应用效果评价

为进一步评价常规测井“甜点”段评价标准的应用效果,对苏北盆地溱潼凹陷另一口探井H201X井阜二段页岩储层地质参数进行计算,优选页岩油地质工程“甜点”段(3 972~4 221 m)共249 m进行压裂投产(图6)。

截至2024年1月1日,H201X井日产量21.6 t,累计产油量11 880 t。油嘴4 mm,套压18.71 MPa,氯根14 326 mg/L,液温57.6 °C(图7)。

矿场实践显示:基于常规测井资料建立的页岩油储层地质工程“甜点”段评价方法应用效果良好,能够指导页岩油储层压裂设计。

3 结论

利用常规测井资料对页岩储层含油性、储集性、可压性等方面的地质参数进行有效评价,指导页岩油储层地质工程“甜点”段选定工作,主要得出以下结论:

1) 页岩油储层关键地质参数通常与单一测井参数相关性较差,与物理概念分析后的多测井参数相关性较好。其中,总有机碳含量与伽马、电阻率、密度的相关性较好,有效孔隙度与伽马、声波时差的相关性较好,层理缝密度与八侧向电阻率、密度及声

波时差的相关性较好。

2) 岩相是苏北页岩油储层地质工程“甜点”段的重要指标。苏北盆地溱潼凹陷泥页岩的主要岩相为富有机质层状或纹层状泥岩、富有机质块状泥岩。其有利岩相为富有机质层状或纹层状泥岩,纵向上

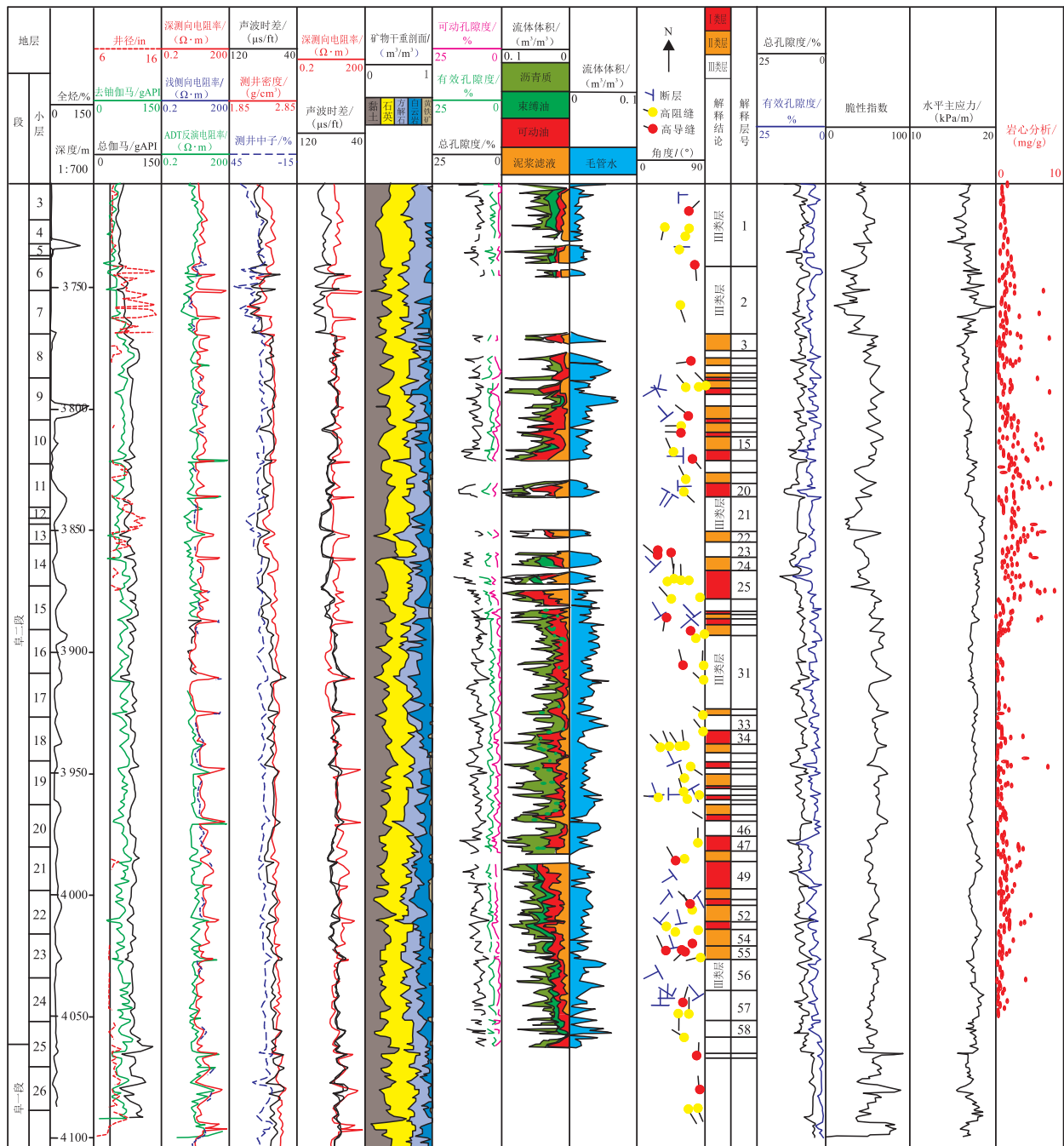


图4 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段QY1井综合测井解释(“甜点”段评价方法一:基于特殊测井和常规测井)
Fig. 4 Comprehensive logging interpretation of Well-QY1 in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin (Evaluation method 1 for “sweet spot” section: Based on special logging and conventional logging)

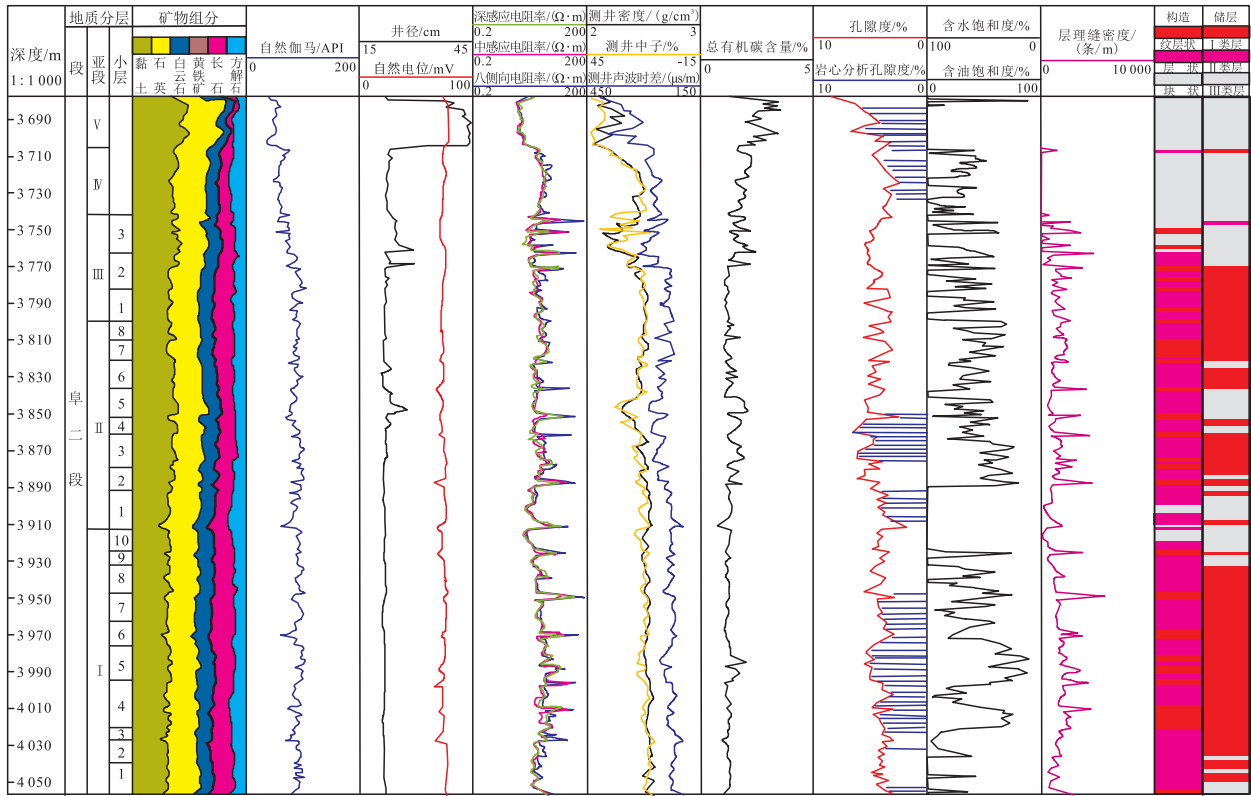


图5 苏北盆地溱潼凹陷阜二段QY1井综合测井解释(“甜点”段评价方法二:仅基于常规测井)

Fig. 5 Comprehensive logging interpretation of Well-QY1 in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin (Evaluation method 2 for “sweet spot” section 2: Based solely on conventional logging)

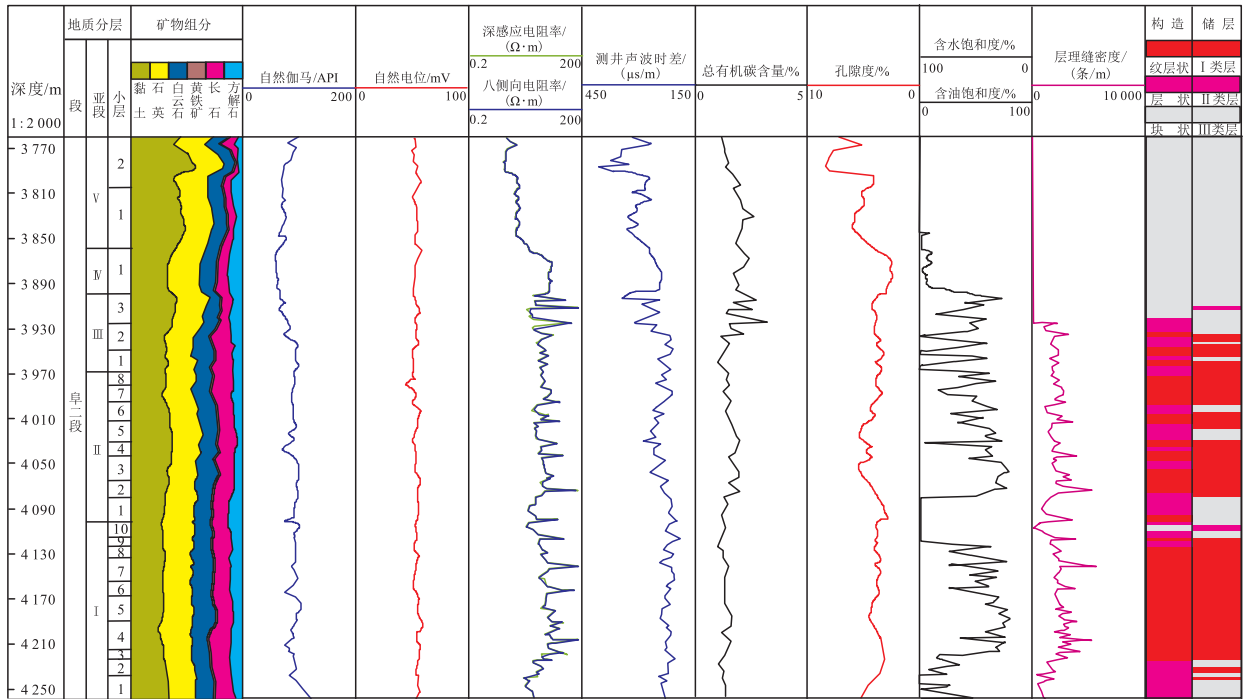


图6 苏北盆地溱潼凹陷阜二段H201X井综合测井解释(“甜点”段评价方法二:基于常规测井)

Fig. 6 Comprehensive logging interpretation of Well-H201X in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin (Evaluation method 2 for “sweet spot” section: Based on conventional logging)

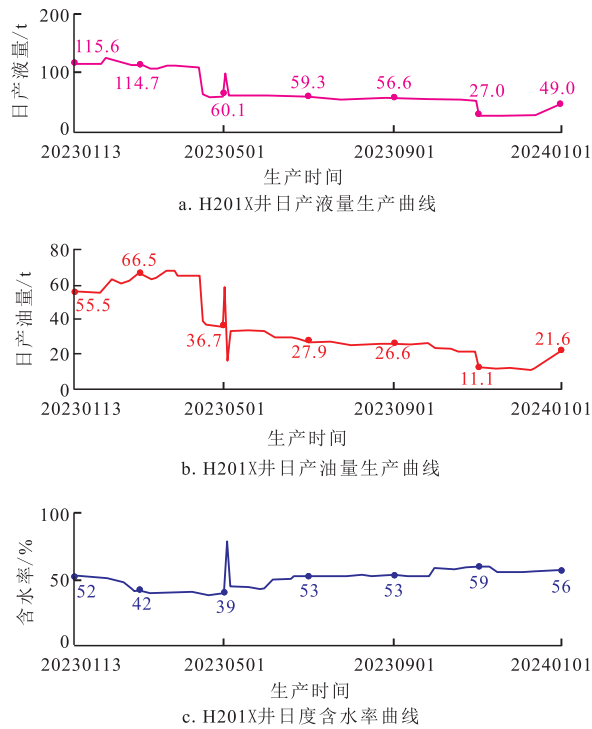


图7 苏北盆地溱潼凹陷阜二段H201X井日度生产曲线
(生产井段:3 972~4 221 m)

Fig. 7 Daily production curve of Well-H201X in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin
(Production well section: 3 972~4 221 m)

有利岩相与非有利岩相交交互出现。

3) 利用常规测井曲线进行有效储层参数评价技术,与特殊测井吻合度高,不仅可以大大降低特殊测井成本,而且优选的“甜点”段试油效果好。生产实践证明:该技术在苏北盆地具有良好的应用前景与经济效益。

参考文献

[1] 云露,何希鹏,花彩霞,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力[J].石油学报,2023,44(1):176-187.
YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong sag of Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 176-187.

[2] 李阳,赵清民,吕琦,等.中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J].石油勘探与开发,2022,49(5):955-964.
LI Yang, ZHAO Qingmin, LYU Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 955-964.

[3] 石玉江,张凤生,李庆峰,等.页岩油全生命周期测井技术发展及方向[J].测井技术,2022,46(6):643-650.
SHI Yujiang, ZHANG Fengsheng, LI Qingfeng, et al. Progress

and development direction of logging technology for shale oil life cycle[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(6): 643-650.

[4] 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.

[5] 陈桂华,白玉湖,陈晓智,等.页岩油气纵向综合甜点识别新方法及其定量评价[J].石油学报,2016,37(11):1337-1342.
CHEN Guihua, BAI Yuhu, CHEN Xiaozhi, et al. A new identification method for the longitudinal integrated shale oil/gas sweet spot and its quantitative evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1337-1342.

[6] 姚东华,周立宏,王文革,等.页岩油综合甜点测井评价——以沧东凹陷孔店组二段为例[J].石油学报,2022,43(7):912-924.
YAO Donghua, ZHOU Lihong, WANG Wenge, et al. Logging evaluation of composite sweet spots for shale oil: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(7): 912-924.

[7] 刘国强,赵先然,袁超,等.陆相页岩油宏观结构测井评价及其甜点优选[J].中国石油勘探,2023,28(1):120-134.
LIU Guoqiang, ZHAO Xianran, YUAN Chao, et al. Logging evaluation of macro-structure of continental shale oil reservoir and sweet spots selection[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 120-134.

[8] 匡立春,侯连华,杨智,等.陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J].石油学报,2021,42(1):1-14.
KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 1-14.

[9] 李国欣,刘国强,候雨庭,等.陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方法[J].石油学报,2021,42(11):1405-1416.
LI Guoxin, LIU Guoqiang, HOU Yuting, et al. Optimization method of favorable lithofacies and fracturing parameter for continental shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1405-1416.

[10] 李宁,冯周,武宏亮,等.中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展[J].石油学报,2023,44(1):28-44.
LI Ning, FENG Zhou, WU Hongliang, et al. New advances in methods and technologies for well logging evaluation of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 28-44.

[11] 李宁,闫伟林,武宏亮,等.松辽盆地古龙页岩油测井评价技术现状、问题及对策[J].大庆石油地质与开发,2020,39(3):117-128.
LI Ning, YAN Weilin, WU Hongliang, et al. Current situation, problems and countermeasures of the well-logging evaluation technology for Gulong shale oil[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 117-128.

[12] 樊云峰,安纪星,岳爱忠,等.基于地层元素测井的页岩油储层评价[J].测井技术,2022,46(5):563-571.
FAN Yunfeng, AN Jixing, YUE Aizhong, et al. Evaluation of shale oil reservoir based on formation element logging[J]. Well

- Logging Technology, 2022, 46(5): 563-571.
- [13] 李红斌,王贵文,王松,等.基于Kohonen神经网络的页岩油相测井识别方法——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J].沉积学报,2022,40(3):626-640.
LI Hongbin, WANG Guiwen, WANG Song, et al. Shale oil lithofacies identification by Kohonen neural network method: The case of the Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(3): 626-640.
- [14] 路菁,李军,武清钊,等.页岩油气储层有机碳含量测井评价方法研究及应用[J].科学技术与工程,2016,16(6):143-147.
LU Jing, LI Jun, WU Qingzhao, et al. A study and an application on logging evaluation method of TOC in shale oil and gas reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(6): 143-147.
- [15] 李潮流,闫伟林,武宏亮,等.富黏土页岩储集层含油饱和度计算方法——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段为例[J].石油勘探与开发,2022,49(6):1168-1178.
LI Chaoliu, YAN Weilin, WU Hongliang, et al. Calculation of oil saturation in clay-rich shale reservoirs: A case study of Qing 1 Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1168-1178.
- [16] 高辉,张晓,何梦卿,等.基于测井数据体的页岩油储层可压裂性评价研究[J].地球物理学进展,2018,33(2):603-612.
GAO Hui, ZHANG Xiao, HE Mengqing, et al. Study on evaluation of shale oil reservoir fracability based on well logging data volume[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 603-612.
- [17] 唐小梅,曾联波,岳锋,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩油储层裂缝特征及常规测井识别方法[J].石油天然气学报,2012,34(6):95-99.
TANG Xiaomei, ZENG Lianbo, YUE Feng, et al. Fracture characterization and identification by conventional logs of shale reservoirs in Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(6): 95-99.
- [18] 严锡.泌阳凹陷核三段泥页岩储层含油性评价[J].石油地质与工程,2023,37(4):25-28.
YAN Xi. Oil-bearing evaluation of shale reservoir in He-3 member of Biyang Sag[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(4): 25-28.
- [19] 张晋言,孙建孟.利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标[J].测井技术,2012,36(2):146-153.
ZHANG Jinyan, SUN Jianmeng. Log evaluation on shale hydrocarbon reservoir[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 146-153.
- [20] 郑建东,王春燕,章华兵,等.松辽盆地古龙页岩油储层七性参数和富集层测井评价方法[J].大庆石油地质与开发,2021,40(5):87-97.
ZHENG Jiandong, WANG Chunyan, ZHANG Huabing, et al. Logging evaluating methods of seven property parameters and enriched layers for Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 87-97.
- [21] 蒋云箭,刘惠民,柴春艳,等.济阳拗陷页岩油测井评价[J].油气地质与采收率,2023,30(1):21-34.
JIANG Yunjian, LIU Huimin, CHAI Chunyan, et al. Logging evaluation of shale oil in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 21-34.
- [22] 李霞,周灿灿,赵杰,等.泥页岩油藏测井评价新方法——以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例[J].中国石油勘探,2014,19(3):57-65.
LI Xia, ZHOU Cancan, ZHAO Jie, et al. New logging evaluation method for shale reservoirs: Taking Qingshankou Formation in Gulong Sag of Songliao Basin for instance[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 57-65.
- [23] 唐鑫萍,许泓,曹宇畅,等.三水盆地布二段灰岩夹层型页岩油地质特征[J].石油地质与工程,2022,36(2):42-48.
TANG Xinping, XU Hong, CAO Yuchang, et al. Geological characteristics of limestone interbedded shale oil in Bu 2 member of Sanshui Basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(2): 42-48.
- [24] 王世禄.松辽盆地古龙页岩油水平井压裂施工参数优化[J].石油地质与工程,2023,37(5):94-99.
WANG Shilu. Optimization of fracturing construction parameters for Gulong shale oil with horizontal wells in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(5): 94-99.
- [25] 彭紫燕,谢斐,王炜肖,等.页岩储层压裂裂缝形态描述及流动模拟方法研究现状[J].石油地质与工程,2023,37(5):120-126.
PENG Ziyang, XIE Fei, WANG Weixiao, et al. Research status of fracture morphology description and flow simulation method in shale reservoirs[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(5): 120-126.
- [26] 王俊超,陶先高,李佳琦,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组“上甜点段”页岩裂缝发育主控因素及评价[J].中国海上油气,2022,34(6):80-92.
WANG Junchao, TAO Xiangao, LI Jiaqi, et al. Main controlling factors and evaluation of “upper dessert section” shale fracture development in Lucaogou Formation, Jimsar sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 80-92.
- [27] 张雪龄,谷军恒,叶强,等.分子模拟技术在页岩油气吸附和流动特性研究中的应用进展[J].中国海上油气,2023,35(3):103-115.
ZHANG Xueling, GU Junheng, YE Qiang, et al. Application progress of molecular simulation technology in the study of adsorption and flow characteristics of shale oil and gas[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(3): 103-115.
- [28] 林腊梅,程付启,刘骏锐,等.济阳拗陷渤南洼陷沙一段页岩油资源潜力评价[J].中国海上油气,2022,34(4):85-96.
LIN Lamei, CHENG Fuqi, LIU Junrui, et al. Evaluation of shale oil resource potential in the Es1 Member in Bonan sag, Jiyang depression[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 85-96.