

吴健,张恒荣,胡向阳,等. 北部湾盆地稠油储层流体识别问题探讨. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):1054-1067.  
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230065.

Wu Jian, Zhang Hengrong, Hu Xiangyang, et al. Discussion on Fluid Identification of Heavy Oil Reservoir in Beibu Gulf Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (3):1054-1067. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230065.

# 北部湾盆地稠油储层流体识别问题探讨

吴 健,张恒荣,胡向阳,刘土亮,张 恒

中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东 湛江 524057

**摘要:**南海西部北部湾盆地的稠油油藏分布在涠西南凹陷和乌石凹陷,主要以普通稠油和特稠油为主。此类稠油埋深范围较广,从浅层到中深层均有发现,物性较好,呈中—高孔渗和高阻特征,但常规气测往往仅有总烃和甲烷,气测值很低且无异常显示,录井岩屑在大部分区域未见任何荧光和含油显示,给地层流体识别带来很大困难。为此,针对本区不同类型的稠油进行分类并开展测、录井特征分析;在此基础上,以随钻测井曲线结合壁心含油性为主要手段,以气测图版和壁心三维定量荧光识别为辅助,提出了一套稠油快速识别方法。利用取样过程中对井下地层流体性质的监测和岩石热解分析结果,指出稠油本身典型的烃组分构成造就了其独特的气测特征;同时,认为强亲水的岩石润湿性以及沥青质稠油与砂岩骨架颗粒之间特殊的粘附性是造成部分稠油储层岩屑无荧光和含油显示的主要原因,壁心和取样流体的三维定量荧光能够真实反映地层流体的性质。

**关键词:**稠油储层;重烃组分;润湿性;沥青粘附性;荧光录井;井下流体分析;北部湾盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230065

中图分类号:TE51

文献标志码:A

## Discussion on Fluid Identification of Heavy Oil Reservoir in Beibu Gulf Basin

Wu Jian, Zhang Hengrong, Hu Xiangyang, Liu Tuliang, Zhang Heng

Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd, Zhanjiang 524057, Guangdong, China

**Abstract:** The heavy oil reservoirs in Beibu Gulf basin of the western South China sea are mainly distributed in Weixinan sag and Wushi sag, It is mainly composed of ordinary heavy oil and extra heavy oil. This type of heavy oil has a wide burial depth unit and can be discovered from shallow to middle-deep layers, with good physical properties and characteristics of medium high porosity, permeability, and high resistivity. However, conventional gas logging often only includes total hydrocarbons and methane, the gas measurement value is very low and there is no abnormal display, no fluorescence or oil bearing indication is found in most areas during cutting logging, which brings great difficulties to formation fluid

收稿日期:2023-03-21

作者简介:吴健(1983—),男,高级工程师,主要从事测井综合解释、储层参数研究、储量评价和岩石物理研究,  
E-mail: wujian1@cnooc.com.cn

基金项目:中国海洋石油集团公司“十四五”重大专项(KJGG2022-0301)

Supported by the Major Special Project of China National Offshore Oil Corporation During the 14th Five Year Plan (KJGG2022-0301)

identification. Therefore, classification and logging characteristics analysis are conducted for different types of heavy oil in this area. On this basis, a fast identification method for heavy oil is proposed by combining logging curves while drilling with the oil content of the wall core as the main means, supplemented by gas logging maps and three-dimensional quantitative fluorescence recognition of the wall core. By utilizing the monitoring of fluid properties in underground formations and the results of rock pyrolysis analysis during the sampling process, it is pointed out that the typical hydrocarbon composition of heavy oil itself creates its unique gas logging characteristics. Meanwhile, the analysis suggests that the strong hydrophilicity of rock wettability and the special adhesion between asphaltene heavy oil and sandstone skeleton particles are the main reasons for the lack of fluorescence and oil content display in some heavy oil reservoir cuttings. It is also pointed out that the three-dimensional quantitative fluorescence of the wall core and sampling fluid can truly reflect the properties of the formation fluid.

**Key words:** heavy oil reservoir; heavy hydrocarbon component; wettability; bitumen adhesion; fluorescence logging; downhole fluid analysis; Beibu Gulf basin

## 0 引言

随着南海西部海域油气勘探工作的持续推进和力度的不断加大,近些年来在北部湾盆地发现了越来越多的稠油储层,从流体性质来看主要以普通稠油和特稠油为主,其埋深范围较广,在浅层和中深层均有分布,物性较好,呈中—高孔渗和高阻特征。与通常典型的稠油层不同,本区有相当数量的稠油储层气测无任何异常,组分仅有总烃和甲烷,重组分基本看不到,岩屑直照、丙酮滴照均无荧光显示,录井含油无显示。而且,该类储层常分布在地质设计的非目的层,往往在钻进途中钻遇,一般只有电阻率和自然伽马曲线,没有孔隙度测井曲线,因此给地层流体识别带来很大困难,测井解释极易漏掉该类稠油储层。

目前,不同国家都有各自针对稠油油藏的分类标准<sup>[1-2]</sup>。国内普遍以原油黏度为第一指标,相对密度为第二指标,将稠油细分为普通稠油、特稠油和超稠油<sup>[3]</sup>。关于稠油的地质成因机制,已有大量研究指出稠油主要由生物降解作用和地下水流动过程中的水洗作用以及氧化作用等造成<sup>[4-6]</sup>。曹志壮<sup>[7]</sup>阐述了对稠油气测显示规律的认识,并利用全烃数据与地质荧光级别的气测交会图版来定性识别稠油、气和水层。总体上,该方法适用于气测和录井含油显示较明显的稠油储层识别,但由于本区有大量稠油储层无荧光和含油显示,因此该方法不适用。曹鹏飞等<sup>[8]</sup>总结了珠江口盆地阳江凹陷稠油层现场地质录井的特征和识别方法。车晓峰等<sup>[9]</sup>和郑玉朝

等<sup>[10]</sup>提出了利用地化录井参数和岩石热解录井开展现场定量评价稠油的方法。王佳凡等<sup>[11]</sup>根据稠油储层泥浆侵入较浅的特征,利用深、浅双侧向电阻率的幅度差做交会图来定性判别稠油储层。该方法可用在泥浆浸泡等待时间较长的非低孔渗致密储层段的电缆测井评价中,但对于海上油田广泛采用的随钻测井则不适用。田鑫等<sup>[12]</sup>利用二维核磁共振测井从两个纬度上展现不同扩散系数和弛豫时间的流体信息,进而有效识别稠油信号。此方法对仪器和现场采集方式都有较高的要求,需要特殊的反演处理,且目前应用数量过少,所得成果代表性有限且时效性较低,因此难以大范围推广使用。综上所述,目前已有针对稠油储层评价的方法大都具有地区经验性,适用于特定地区、稠油特征的流体识别和储层评价,因此从应用角度存在一定局限性,并非适用于所有地区。

北部湾盆地稠油储层的常规测井和气测特征与部分其他油田已发表文献中的稠油特征相似。文献中对各区稠油的普遍描述为,录井岩屑从性状看有明显粘连性黑色稠油充填,油味重且沾手,荧光直照无荧光,但滴照均有较强显示,含油为油斑—油浸,岩屑三维定量荧光图谱显示为重质油,依据这些特征可及时发现稠油储层;而本区很多稠油储层岩屑从各方面均看不到含油的痕迹,岩屑直照、丙酮滴照均无荧光显示,与邻近不含油的纯水层砂岩无异,但壁心荧光直照为暗黄色,荧光面积可高达50%~70%,且部分岩样可见原油外渗,含油显示以油斑—油浸为主。针对北部湾盆地部分区块稠油储层评价

中面临的新问题,在实践中总结出了一套行之有效的地层流体识别方法。本文利用有限的常规测井曲线并结合钻速特征,可有效发现潜在的稠油储层。在此基础上,加测补偿中子、密度曲线以证实储层物性,加测井壁取心以证实储层含油性,并进一步开展测压取样或地层测试以证实储层的流体性质。同时,对稠油储层的烃组分特征和岩石润湿性的差异展开分析,对气测无异常和岩屑含油无显示的原因进行探讨,并指出壁心或取样流体更能够有效反映稠油储层的真实特性,应予以高度重视。最后,利用区域气测比值图版、岩石热解图谱以及壁心三维定量荧光等方法,综合开展地层流体辅助识别,由此建立一套针对本区稠油储层的综合快速流体识别和评价方法。

## 1 北部湾盆地稠油储层特征

北部湾盆地稠油油藏主要分布于含油气盆地的边缘斜坡地带以及边缘隆起倾没带。以涠西南凹陷为例(图1),稠油主要分布在北部隆起带、南部隆起

带和斜阳斜坡带,大部分稠油埋藏深小于2700 m,储层胶结疏松,成岩作用低,物性较好。根据压汞曲线特征,可将本区稠油储层分为两类:Ⅰ类储层和Ⅱ类储层(图2a),二者在储层微观孔隙结构上有显著差异。Ⅰ类储层为优质储层,在本区占绝大多数,岩性以细砂岩为主,粉砂岩次之,孔喉半径分布单峰特征明显,小于0.1 μm的无效微孔隙占比很低,中一大孔喉对渗透率贡献起着决定性作用(图2b),孔喉分选性、连通性好,原始粒间孔保存较好,颗粒接触以线-点为主(图3a);从Ⅰ类储层岩心核磁 $t_2$ (横向弛豫时间)谱(图3b)特征来看,低于33 ms的束缚流体很少,以可动流体占绝对优势,属于典型的高孔高渗储层。Ⅱ类储层则以砂砾岩和灰质中-细砂岩为主,岩石颗粒分选性较差,孔隙局部较发育,分布不均,整体孔隙连通性一般,局部存在裂缝可对孔隙结构和渗透性有所改善,多呈点状孔喉产出,微一小毛细孔喉较发育,有效孔喉分选性较差,储层非均质性强(图3c);从Ⅱ类储层岩心核磁 $t_2$ 谱(图3d)特征来看, $t_2$ 谱为典型的双峰分布,束缚流体含量较高,

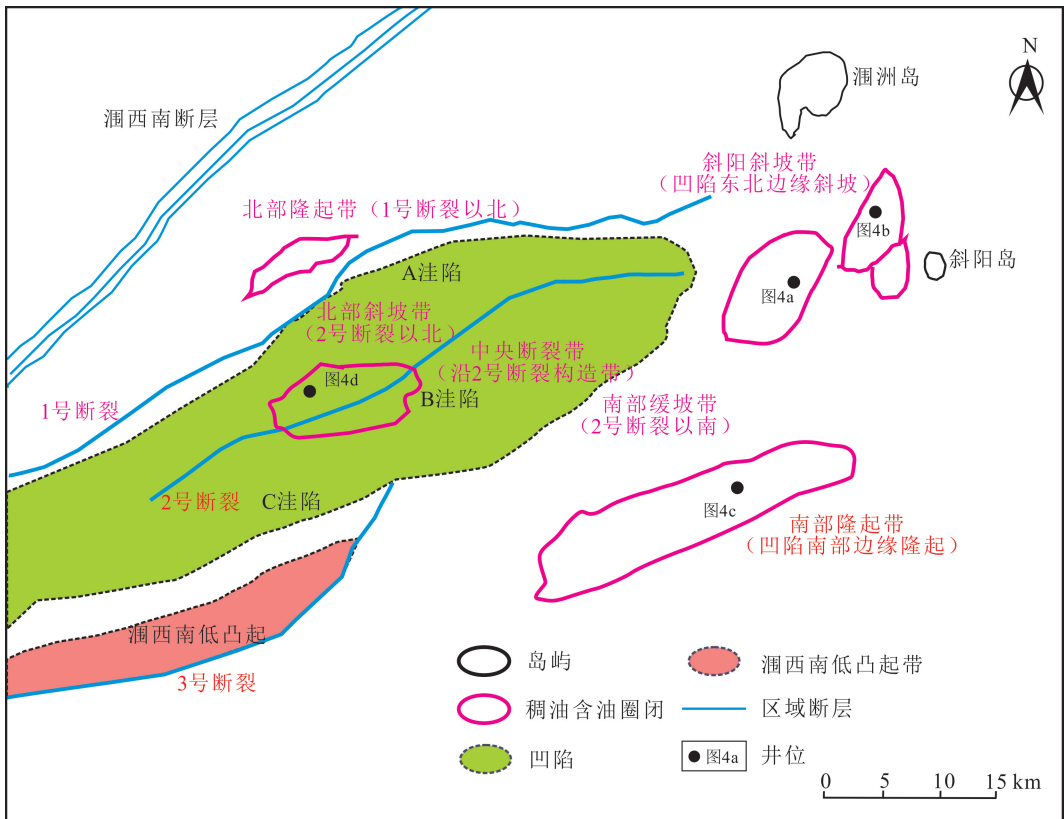


图1 涠西南凹陷平面构造图

Fig.1 Structure map of Weixinan sag

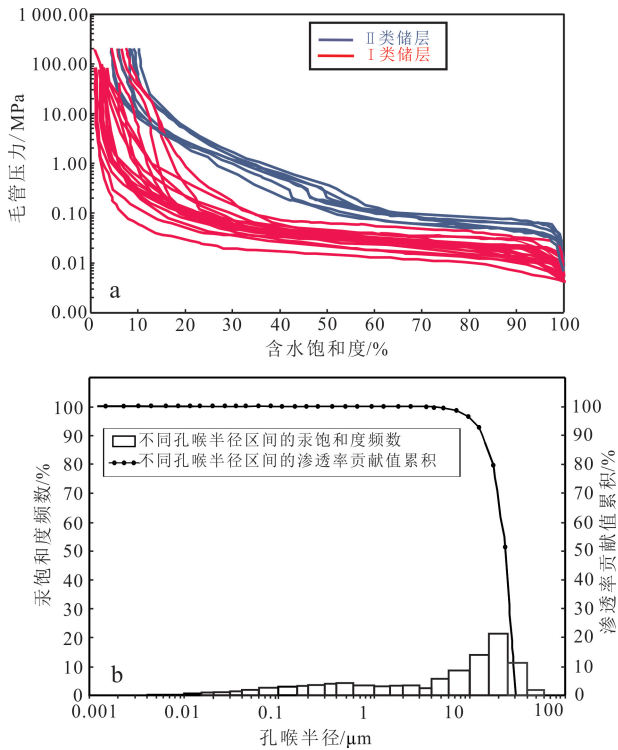


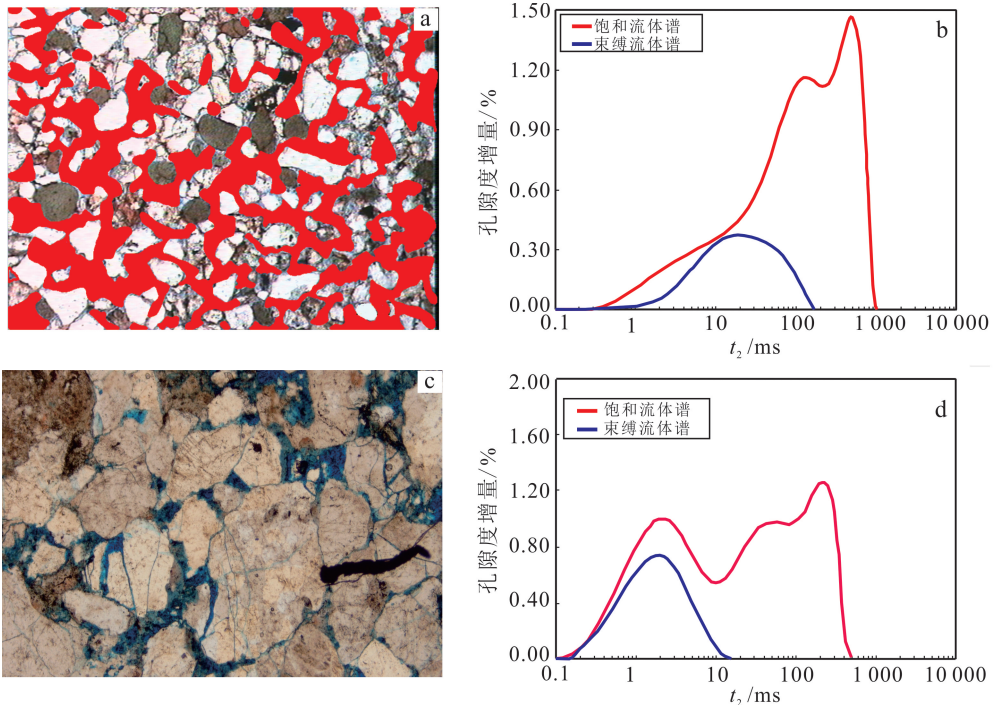
图2 研究区稠油储层压汞曲线特征(a)和典型孔喉半径分布(b)  
 Fig.2 Pressure curve characteristics (a) and typical pore throat radius distribution (b) of heavy oil reservoir in the study area

此类储层一般呈中孔低渗特征<sup>[13-15]</sup>,在本区局部构造少量发育,总体占比很低。

区域原油样品和  $pVT$  ( $p$  为压力,  $V$  为体积,  $T$  为温度) 流体分析显示,本区稠油具有“四高三低”的特征:相对密度高(0.92~1.00 g/cm<sup>3</sup>, 20 °C)、黏度高且分布范围较广(50~10 000 mPa·s, 50 °C 运动黏度)、胶质和沥青质质量分数高(普遍高于 25%),一般呈黑色果冻状或黏稠状,流动性差,而含蜡量、含硫量和倾点低。在稠油油藏形成过程中,由于生物降解、水洗作用对油藏的破坏,天然气及轻烃成分大量散失,导致本区稠油原始气油比一般为 1~20,此类稠油需要通过热采措施才能释放产能。

以原油分析、 $pVT$  流体分析的相对密度和黏度为依据<sup>[16]</sup>,参照表 1 中的量化标准对本区稠油进行分类,得到区域不同类型稠油的埋深、相对密度、黏度、含油显示和气测组分等特征(表 2),其测、录井曲线特征如图 4 所示,原油性状如图 5 所示。

综合分析认为,北部湾盆地稠油的测、录井显示有如下特征:1)从常规测井曲线来看,稠油储层岩性较纯,自然伽马绝对值降低明显,深电阻率升高,钻速相对稳定或升高,地层密度低,指示物性较好;2)部分区域的稠油储层录井岩屑有含油显示,但还



a. I 类储层薄片特征; b. I 类储层岩心核磁共振  $T_2$  谱; c. II 类储层薄片特征; d. II 类储层岩心核磁共振  $T_2$  谱。回波间隔为 1.2 ms。

图3 研究区稠油储层铸体薄片(a,c)和岩心核磁共振成果图(b,d)

Fig.3 Casting sheets (a, c) and core NMR results (b, d) of heavy oil reservoir in the study area

表 1 稠油分类标准及开采方式

Table 1 Classification standard and development method of heavy oil

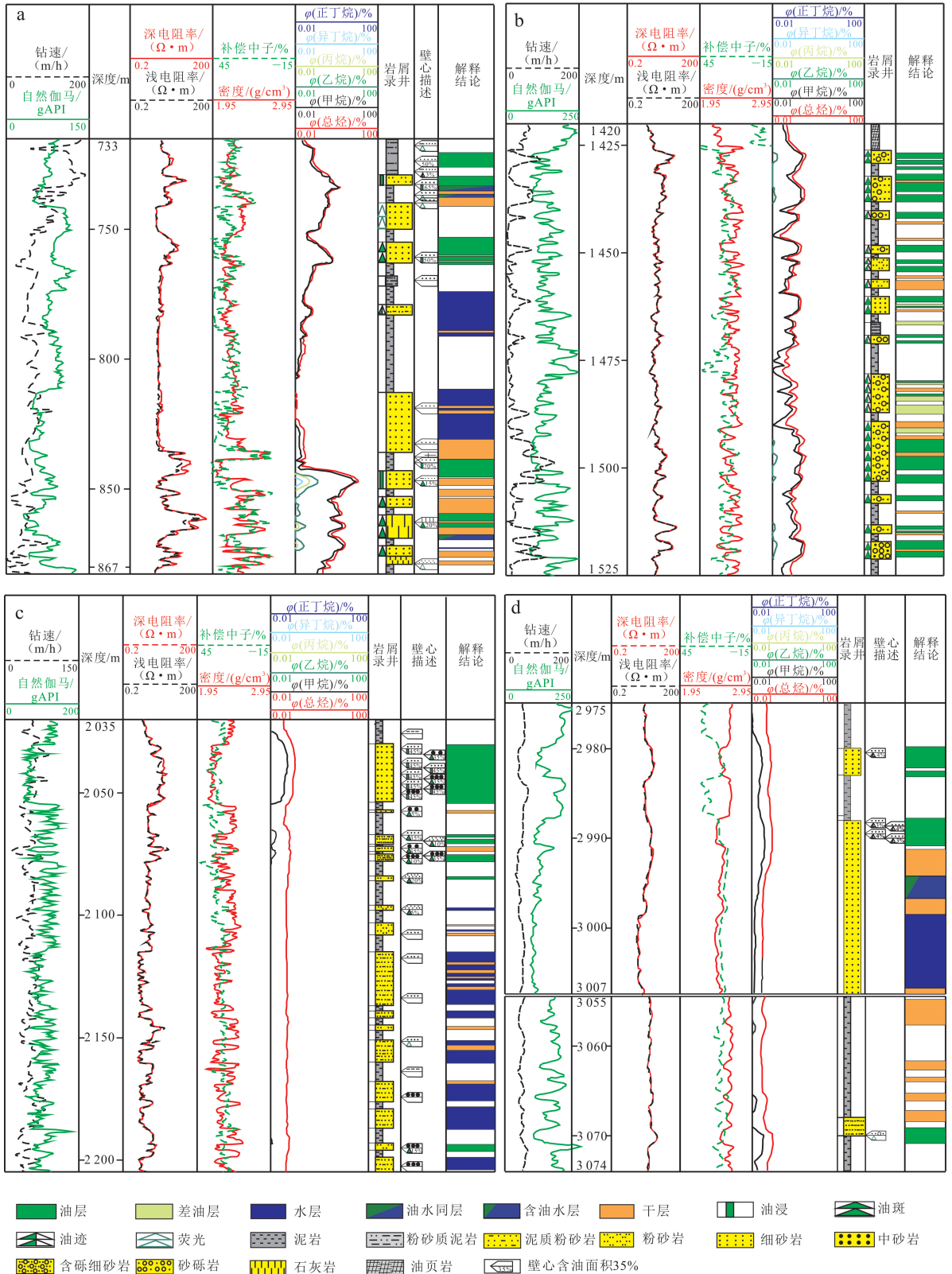
名称	类别	亚类	主要指标		辅助指标		开采方式
			黏度/(mPa·s)		相对密度(20℃)		
普通稠油	I		50*(或100)~10 000		>0.92		注水+热采
		I-1	50~150*		>0.92		
		I-2	150*~10 000		>0.92		
特稠油	II		10 000~50 000		>0.95		热采
超稠油(天然沥青)	III		>50 000		>0.98		热采

注: \* 指油层条件下黏度,其余指油层温度下脱气油黏度。

表 2 北部湾盆地普通稠油—特稠油特征参数

Table 2 Characteristic parameters of ordinary heavy oil - extra heavy oil in Beibu Gulf basin

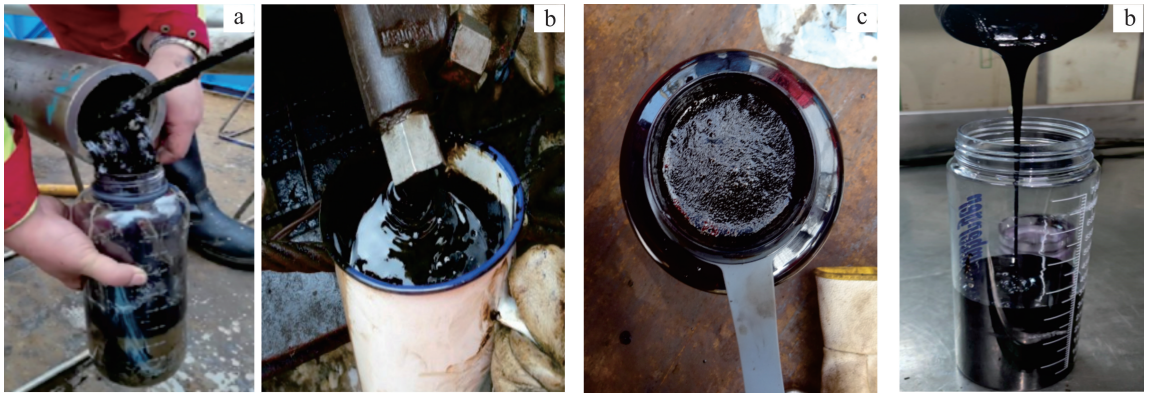
相对密度 (20℃)/(g/cm <sup>3</sup> )	运动黏度 (50℃)/(mPa·s)	埋深/ m	体积分数/%						岩屑 显示	壁心 显示	荧光 面积/%	油品
			总烃	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷				
0.925	257.9	2 982	0.193 7	0.052 3	0.006 8	0.004 1	0.001 7	0.000 9	无	油迹	10	普通稠油
0.925	257.9	2 988	0.177 2	0.045 7	0.004 4	0.002 9	0.001 6	0.000 9	无	油迹	10	普通稠油
0.925	257.9	2 990	0.214 0	0.081 0	0.007 9	0.005 3	0.002 8	0.001 5	无	油迹	15	普通稠油
0.932	241.6	1 914	1.043 0	0.403 9	0.039 9	0.016 2	0.027 5	0.016 0	无	油斑	25	普通稠油
0.920	190.6	2 274	1.126 2	0.400 7	0.041 0	0.038 9	0.027 8	0.014 9	无	油斑	20	普通稠油
0.960	3 001.9	2 032	0.177 0	0.061 4	0.005 0	0.004 1	0.003 8	0.001 9	无	油浸	45	稠油—特稠油
0.960	3 001.9	2 067	0.112 5	0.020 1	0.001 7	0.001 9	0.002 6	0.002 6	无	油斑	35	稠油—特稠油
0.950	1 158.6	2 194	0.101 5	0.010 5	0.001 2	0.002 2	0.003 0	0.001 4	无	油斑	10	稠油—特稠油
0.962	3 582.6	1 449	0.328 1	0.263 5	0.008 6	0.001 8	0.001 4	0.000 4	无	油浸	30	稠油—特稠油
0.969	4 337.4	858	0.093 4	0.037 2	0.000 2	0.000 2	0.000 7	0.000 1	无	油斑	30	稠油—特稠油
0.927	272.4	1 941	0.886 9	0.336 2	0.037 1	0.020 6	0.018 7	0.008 2	荧光	油斑	25	普通稠油
0.931	322.3	1 908	1.040 7	0.477 6	0.043 5	0.016 3	0.031 7	0.017 4	荧光	油斑	10	普通稠油
0.942	477.6	2 294	2.557 9	0.723 5	0.074 3	0.109 1	0.108 9	0.063 2	油迹	油迹	10	普通稠油
0.930	195.7	1 929	1.612 8	0.637 0	0.073 6	0.035 7	0.031 8	0.013 6	油迹	油斑	30	普通稠油
0.940	358.5	1 954	2.080 0	0.539 5	0.076 2	0.053 5	0.043 8	0.018 5	油迹	油斑	30	普通稠油
0.931	329.4	1 993	3.171 7	1.358 6	0.194 1	0.126 8	0.086 4	0.038 9	油迹	油斑	30	普通稠油
0.922	210.1	2 022	2.222 9	1.075 1	0.0471	0.053 1	0.057 4	0.031 6	油迹	油斑	10	普通稠油
0.935	591.1	1 890	2.878 3	1.419 7	0.045 7	0.054 8	0.062 2	0.036 5	油斑	油浸	70	普通稠油
0.920	402.0	1 804	1.076 2	0.526 0	0.020 1	0.025 2	0.032 1	0.018 4	油斑	油浸	50	普通稠油
0.979	6 896.0	843	2.177 9	1.177 5	0.012 0	0.002 0	0.002 0	0.000 2	油斑	油斑	40	稠油—特稠油
0.968	5 592.0	1 495	0.489 0	0.349 5	0.012 8	0.002 9	0.002 4	0.000 6	油斑	油浸	45	稠油—特稠油
0.964	4 796.9	1 518	0.573 1	0.381 2	0.015 6	0.004 0	0.002 8	0.000 6	油斑	油浸	45	稠油—特稠油
0.960	3 886.0	872	2.718 4	2.010 1	0.027 4	0.012 7	0.007 8	0.000 7	油斑	油斑	25	稠油—特稠油
0.971	5 948.3	900	3.956 0	2.030 0	0.021 0	0.004 0	0.004 0	0.000 0	油浸	油浸	45	稠油—特稠油
0.963	4 253.0	732	0.695 8	0.579 9	0.000 3	0.000 2	0.000 3	0.000 1	油浸	油浸	65	稠油—特稠油
0.967	4 648.3	749	2.605 8	1.396 1	0.014 3	0.002 8	0.002 4	0.000 2	油浸	油浸	70	稠油—特稠油
0.988	7 796.0	895	0.491 3	0.224 4	0.001 1	0.001 1	0.001 7	0.000 2	油斑	油斑	25	特稠油
0.988	12 832.0	903	1.047 7	0.559 6	0.003 1	0.002 7	0.002 4	0.000 3	油斑	油浸	75	特稠油



a. 特稠油—超稠油; b. 特稠油; c. 普通稠油—特稠油; d. 普通稠油。

图4 北部湾盆地稠油测井曲线特征图

Fig.4 Characteristic map of logging curves for heavy oil in Beibu Gulf basin



a. 特稠油—超稠油; b. 特稠油; c. 普通稠油—特稠油; d. 普通稠油。

图 5 北部湾盆地稠油物理性状图

Fig.5 Physical properties map of heavy oil in Beibu Gulf basin

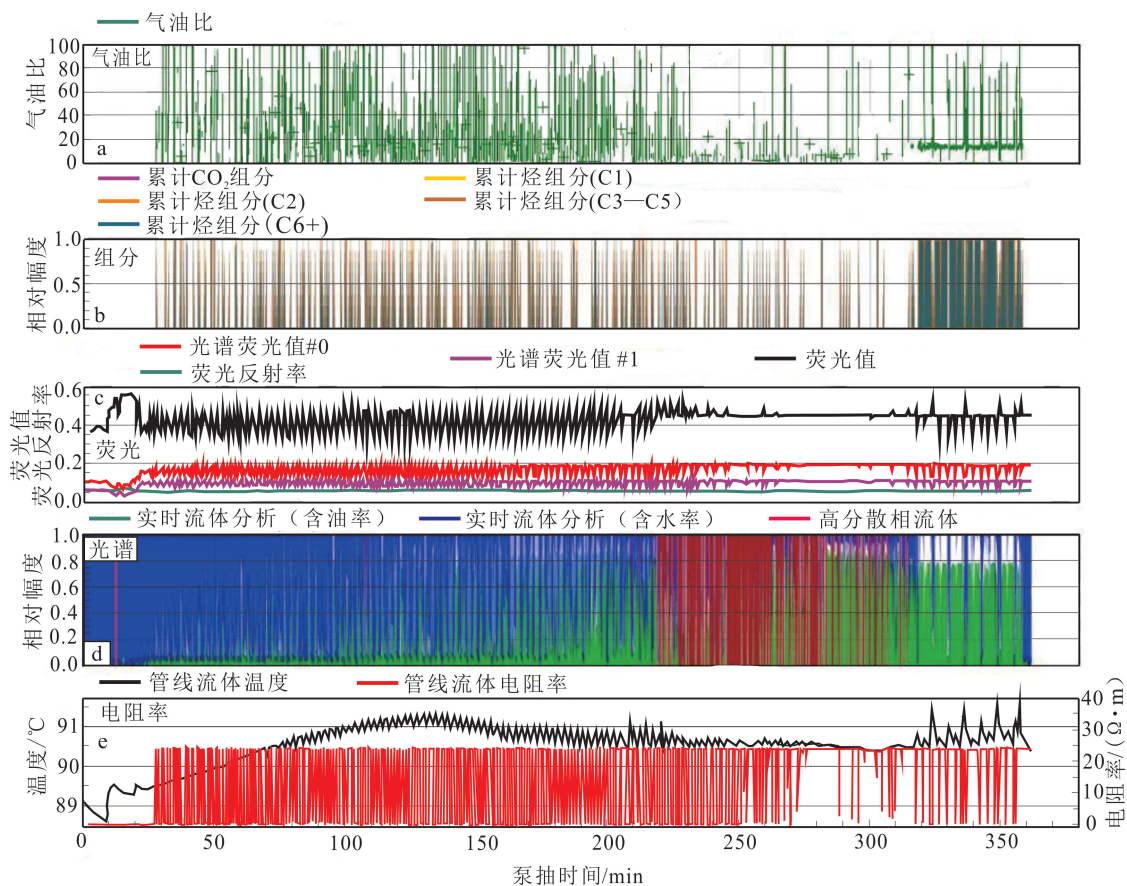
有相当数量的稠油储层岩屑无含油显示,岩屑直照、丙酮滴照均无荧光显示,现场滤纸上未见油质残留物,石英颗粒周围未见油状物充填,岩屑基本无油味,不污手,无粘连性,但取到的壁心有明显的油斑—油浸含油显示;3)稠油储层气测均无明显异常,组分不全,往往只有总烃和甲烷曲线,没有或仅略有升高趋势,总烃体积分数基本小于 2.5%,与围岩非储层差异不明显,而乙烷—戊烷等重组分几乎看不到;4)本区稠油通过钻杆地层测试和取样流体证实气油比范围为 1~20。

## 2 北部湾盆地稠油储层综合识别方法

### 2.1 基于常规测井曲线和壁心分析的稠油识别方法

在探井钻进过程中常钻遇泥质含量低、岩性较纯的砂岩储层,气测无明显异常且组分不全,岩屑录井无含油显示,但电阻率升高明显,钻速较围岩相对稳定或略有升高,判断储层物性并不差(图 4c、d),且地层中含高阻流体或矿物,这种特征与区域典型的水层和灰质干层有明显不同,此时果断改变原计划,加测中子、密度曲线并实施井壁取心作业。以图 4c 为例,2 035.0~2 054.5 m 高电阻率储层段有效孔隙度高达 30%,壁心含油性为油浸—油斑,荧光面积积达 35%~55%,且局部见原油外渗,测井初步解释为油层。为了进一步证实本段流体性质,进行了钻杆地层测试,在 50.8 mm 油嘴条件下,二开井日产稠油 106.6 m<sup>3</sup>,未出气和水;同时,实施了电缆地层测压取样作业(模块式地层动态测试器 MDT),现场取到的油样显示色黑、污手、油味重、不具透光性、黏稠呈糊状、流动性差,判断为重质原油。

随着电缆地层测试技术的发展,测压取样工具已不仅仅局限于取到原状地层流体样品,还能够泵抽的过程中通过井下流体实验室对流经管线的地层流体进行实时分析,进而得到泵抽流体的流度、组分、气油比、电阻率、荧光显示以及突破时间等一系列关键数据,为地层流体性质的判别提供了重要依据<sup>[17-19]</sup>。图 6 为图 4c 所示井利用 MDT 超大直径探针对稠油储层进行泵抽的综合分析图,可见泵抽 27 min 后即实现原油突破,泵抽突破后电阻率由烃类出现前的 0.028 Ω·m 升至 24.000 Ω·m(图 6e),电阻率在油突破前基线没有变化,油突破后以油的电阻率为主。在整个泵抽过程中,荧光值(图 6c)和电阻率稳定,由烃类出现前的电阻率以及泵抽过程中的电阻率可知,泵抽过程中的少量非烃类流体为泥浆滤液而非地层水。由光谱道(图 6d)可以看到,在泵抽初期,流体为泥浆滤液和原油的混合流体,随着泵抽过程的进行,含油率越来越高,210.5 min 后,含水率分析显示出现了高分散流体(红色),并持续了一段时间(到 310 min),该高分散流体段塞可能由于固相颗粒进入流线和 IFA(井下流体实验室)导致。由气油比道(图 6a)可以看到,稳定后地层原油的气油比较低(约为 13)。流体分析模块的光谱荧光值显示流体为烃类(图 6c),反射率较低(约为 0.06)和荧光值较高(为 0.40~0.45)说明烃类为油,光谱荧光值较低(为 0.10~0.17)说明流体中轻烃组分很低。由烃组分道(图 6b)可以看到,在泵抽时间 320 min 之前,管线的流体主要是泥浆滤液和地层稠油的混合液体,受到泥浆滤液的影响,表现为各种烃组分混杂和重叠在一起;泵抽时间



光谱荧光值#0指示烃类和轻烃组分大小;光谱荧光值#1指示烃类和轻烃组分大小;荧光值反映流体性质,指示油和气。

图6 图4c稠油储层MDT泵抽综合图

Fig.6 Comprehensive analysis of MDT pumping of heavy oil reservoir in Fig. 4c

320 min之后,管线中主要为地层稠油,烃组分整体上以C6+占绝对优势。井下测量仪器记录的数据显示,C1体积分数在1%左右,C3—C5体积分数在1%左右,C6+体积分数在98%左右。泵抽初期测压流度为 $474.4 \text{ mD}^{\text{①}}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ,泵抽后期稳态流度为 $13 \text{ mD}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ (现场泵抽过程中测量计算得到),流度的变化反映测压和泵抽后期管线流体黏度的变化,由于重油黏度高,流动性差,导致泵抽流度下降。

通过以上特征,亦证实了本段为稠油,原油样品分析显示相对密度为 $0.956 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,气油比为8.1,运动黏度( $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )为 $862 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

综上所述,在气测和岩屑录井无任何异常显示的情况下,利用自然伽马、电阻率和钻速曲线,可有效判断隐蔽的稠油潜力层,在此基础上加测物性曲线并取壁心(壁心能够有效反映稠油储层的含油

性),基于上述多种手段开展综合分析,对于稠油的发现和现场流体快速识别起着关键作用。

## 2.2 稠油储层气测组分特征及基于气测图版的流体识别

不同类型和品质的原油和天然气,其气测组分也不同<sup>[20]</sup>,气测异常和岩屑录井荧光显示亦有显著差异。稠油油藏复杂的流体特性和烃组分构成,导致目前基于气测录井的稠油流体识别存在困难<sup>[21]</sup>。

本区稠油探井钻进中均使用水基泥浆,因此基本不存在油基添加物的影响,从气测组分来看,本区稠油的总烃体积分数主体在 $0.09\% \sim 4.00\%$ 之间,甲烷体积分数主体在 $0.01\% \sim 2.00\%$ 之间(表2),较区域典型常规轻质油和气层明显偏低;常规气测组分(C1—C5)以甲烷占绝对优势(90%以上),乙烷—戊烷占比非常低,从气测组分相对值来看类似凝析气的特征。由于现场色谱分析仪只能测量C1—C5

①mD(毫达西)为非法定计量单位, $1 \text{ mD} = 0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,下同。

范围内的气测值,对于其他的烃类气体色谱柱无法吸附和分离,因此不能反映高碳烃类组分的特征。根据气测氢焰鉴定器的工作原理<sup>[22]</sup>,总烃检测值与烃组分含量本质上没有直接关系,是各自单独测量的,但从理论上讲,气测总烃应该等于各组分碳原子浓度之和<sup>[23]</sup>,所以总烃值能够反映更多烃组分的含量。因此,在稠油储层中常出现总烃值远大于C1—C5组分之和的情况,说明高碳的重烃组分占比较大。

为了进一步明确地层流体的烃组分及其含量,可对壁心或流体样品进行热解气相色谱分析。石油是由烃类、胶质、沥青质和少量非烃组成的混合物,这些物质具有不同的沸点,因此在程序升温过程中石油能够蒸发、裂解出不同烃类物质,进而获得蒸发烃组成及相对含量<sup>[24]</sup>。原油中的液态烃与气态烃,其碳数范围在C1—C37之间,油质越轻,轻组分含

量越高,油质越重,则重组分含量越高。图7为北部湾盆地涠西南凹陷不同油品性质的热蒸发烃气相色谱图,可以看到:气层是以甲烷为主的气态烃,同时含有一定量的C2—C5组分,主碳峰为C1—C2(图7a);轻质油中正构烷烃碳数主要分布在 $nC1—nC16$ ,主碳峰为 $nC6—nC11$ ,色谱峰为前端高峰型,峰坡度陡(图7b);中质油正构烷烃碳数主要分布在 $nC11—nC32$ ,主碳峰为 $nC18—nC23$ ,属中部高峰型(图7c);稠油中异构烃和环烷烃丰富,胶质、沥青质含量较高,几乎看不到C1—C5组分,正构烷烃碳数主要分布在 $nC12—nC37$ ,主碳峰为 $nC28—nC32$ ,主峰碳数高,谱图基线隆起,为后端高峰型(图7d、e)。随着油质由轻到重,正构烷烃碳数分布范围和主碳峰不断后移,由此可辅助快速判定地层流体性质。

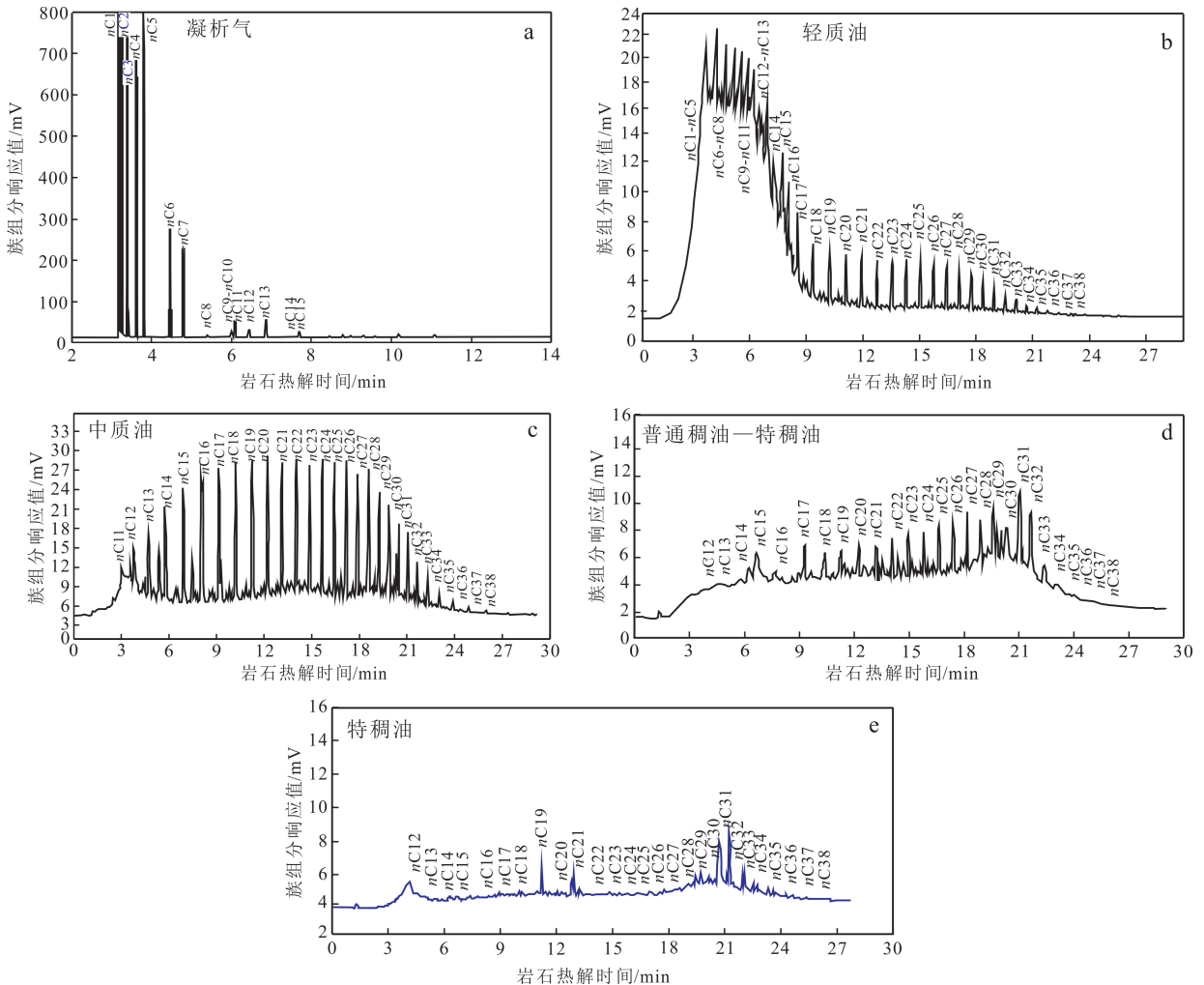


图7 涠西南凹陷不同油品性质热蒸发烃气相色谱分析图谱

Fig.7 Pyrolysis gas chromatographic analysis spectrum of thermal evaporative hydrocarbon with different oil properties in Weixinan sag

从地质成因上分析,正常的轻质原油在长期遭受生物降解、水洗及氧化作用等破坏的过程中,轻质组分和低分子量烷烃显著减少,而更稳定的高分子衍生物、多环芳烃和胶质、沥青质等显著增加,由此形成了稠油油藏。这种典型的烃组分构成决定了稠油储层在常规气测录井中的特征。

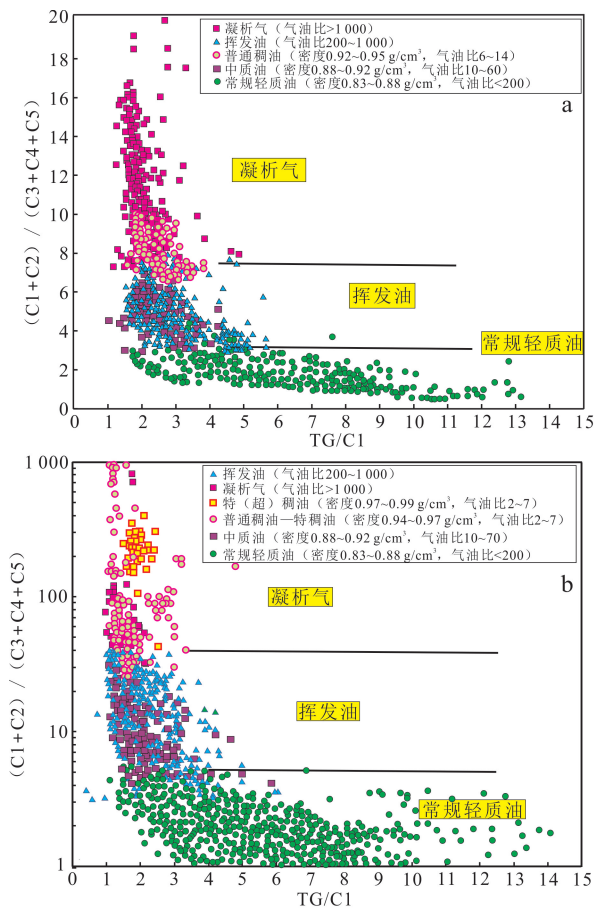
实践应用表明,利用区域气测图版可有效判别凝析气、挥发油和常规轻质原油<sup>[25]</sup>。区域油岩对比研究已证实,北部湾盆地不同生油洼陷,不同油源、烃源岩在不同成熟阶段生成的烃类物质以及后期油藏在遭受破坏过程中所处的不同阶段,导致其密度、黏度等油品特征以及烃组分存在显著差异。因此,针对不同的生油洼陷及构造需要采用不同的流体划分标准。

针对北部湾盆地乌石凹陷和涠西南凹陷B生油洼陷分别开展气测图版研究,以TG(总烃)/C1为横坐标,以(C1+C2)/(C3+C4+C5)为纵坐标,在区域已有的凝析气和挥发油气测识别图版基础上,新增加乌石凹陷9口稠油井以及涠西南凹陷12口稠油井中有代表性的稠油数据,可见稠油数据点基本分布在凝析气的区域,且油质越重,点分布的位置越高,中质油数据点则基本分布在挥发油的区域(图8)。不同生油洼陷的稠油其气测组分特征不同:在乌石凹陷,(C1+C2)/(C3+C4+C5)值高于6.5则判别为稠油;在涠西南凹陷B生油洼陷,当(C1+C2)/(C3+C4+C5)值高于26判别为稠油,高于100则为特稠油。

利用该区域气测图版可辅助判别稠油,并根据落点的相对位置大致判断稠油的油品,但首先需要结合其他有效方法来综合排除凝析气层的可能性。本区凝析气层的气测总烃体积分数高(均在8%以上),甲烷体积分数高,同时C2—C5重组分异常明显,这是本区凝析气与稠油在测、录井特征上最明显的区别;但对于一些致密和物性较差的差气层,其气测值较低,特征与稠油区别不明显,易造成流体性质误判,需要结合其他方法开展综合判别。

### 2.3 岩屑含油性影响因素探讨及基于三维定量荧光的流体识别

将区域录井岩屑无任何荧光和含油显示的稠油储层,与较好含油显示的稠油储层进行对比。首先,二者在钻进过程中均使用的是水基泥浆,泥浆化学成分类似,储层特征亦相似;第二,二者均为稠油和超稠油,呈黑色黏稠或果冻状,流动性差,油品性质和性状类似,沥青质和胶质含量均较高;第三,通过



a. 乌石凹陷; b. 涠西南凹陷。

图8 乌石凹陷和涠西南凹陷气测识别图版

Fig.8 Gas logging identification chart in Wushi sag and Weixinan sag

岩心润湿性分析,发现近年来钻遇的无含油显示的稠油储层润湿性均为中—强亲水,而有含油显示的稠油储层其润湿性一般为亲油或中性润湿(既亲油又亲水,即在油层中亲油,在水层中亲水)。综合分析认为,岩石润湿性的差异可能会导致录井荧光和含油显示不同,润湿性对录井岩屑颗粒表面附着的以束缚状态存在的烃类物质含量产生较大的影响,强亲水岩石颗粒中的束缚流体基本为水,理论上残余油很少,在聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact, PDC)钻头钻进过程中,岩屑被研磨成粉末状细小颗粒,在地层温压条件和泥浆冲刷环境下大大降低了以自由状态赋存的沥青质稠油与岩石颗粒之间的粘附性<sup>[26]</sup>,导致含烃物质发生剥离进入钻井液,而不会像常规轻质原油一样在岩石颗粒表面包裹和附着一层以束缚状态存在的油膜。因此,返出的岩屑经过反复冲洗后很难保留以自由

状态和束缚状态存在的稠油烃类物质,导致录井岩屑无荧光和含油显示。

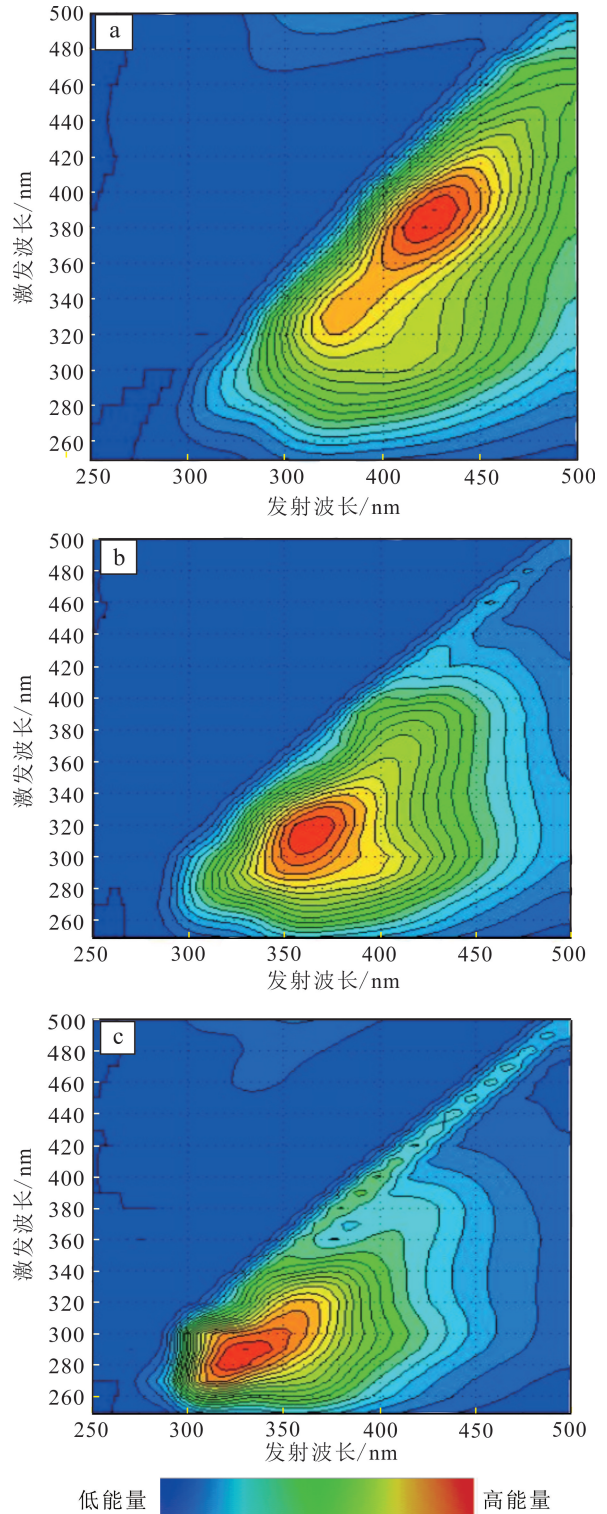
根据现场三维定量荧光,由于不同油质的原油中所含的荧光物质(烃类)具有不同的激发波长和发射波长,反映在荧光光谱中表现为最大荧光强度值(特征峰)所在的波长区间不同<sup>[27-28]</sup>。基于此原理,可根据三维定量荧光图谱特征来判别原油油品性质。

如图 9 所示,由稠油逐渐过渡到轻质油,特征谱峰逐步前移,统计可得到北部湾盆地典型的稠油、中质油和轻质油的壁心或流体样品的三维定量荧光图谱特征描述如下:稠油激发波长主峰在 360~400 nm,发射波长主峰在 400~430 nm;中质油激发波长主峰在 310~350 nm,发射波长主峰在 350~390 nm;轻质油激发波长主峰在 280~310 nm,发射波长主峰在 320~350 nm。

图 10 为图 4c 稠油储层同一深度(2 047 m)的录井岩屑(图 10a)、壁心(图 10b)、取样流体样品(图 10c)以及钻井液(图 10d)的三维定量荧光图谱,可见壁心和取样稠油流体样品的谱图特征一致,其主峰最佳激发波长为 380 nm,最佳发射波长为 420 nm;而录井岩屑主峰最佳激发波长为 320 nm,最佳发射波长为 360~380 nm,与区域中质油特征类似,与钻井液的谱图特征亦类似。壁心、流体与岩屑在谱图上的特征差别很大,岩屑谱图中的中—重质组分谱丢失,录井无任何荧光和含油显示,分析认为录井岩屑谱图中的异常峰主要是受到钻井液及其添加剂的影响,并非是地层中含烃类物质的反映;而壁心则为油浸细砂岩,相比之下,在井下射孔取壁心以及提出井口的过程中能够较好地保存样品中稠油的含烃类物质,受泥浆冲刷作用较小。因此,壁心和取样流体样品更能代表稠油储层真实的含油性。利用壁心和取样流体样品而非录井岩屑建立区域不同油品性质的三维定量荧光图谱,以此作为标准对新钻井的油品性质进行判断。

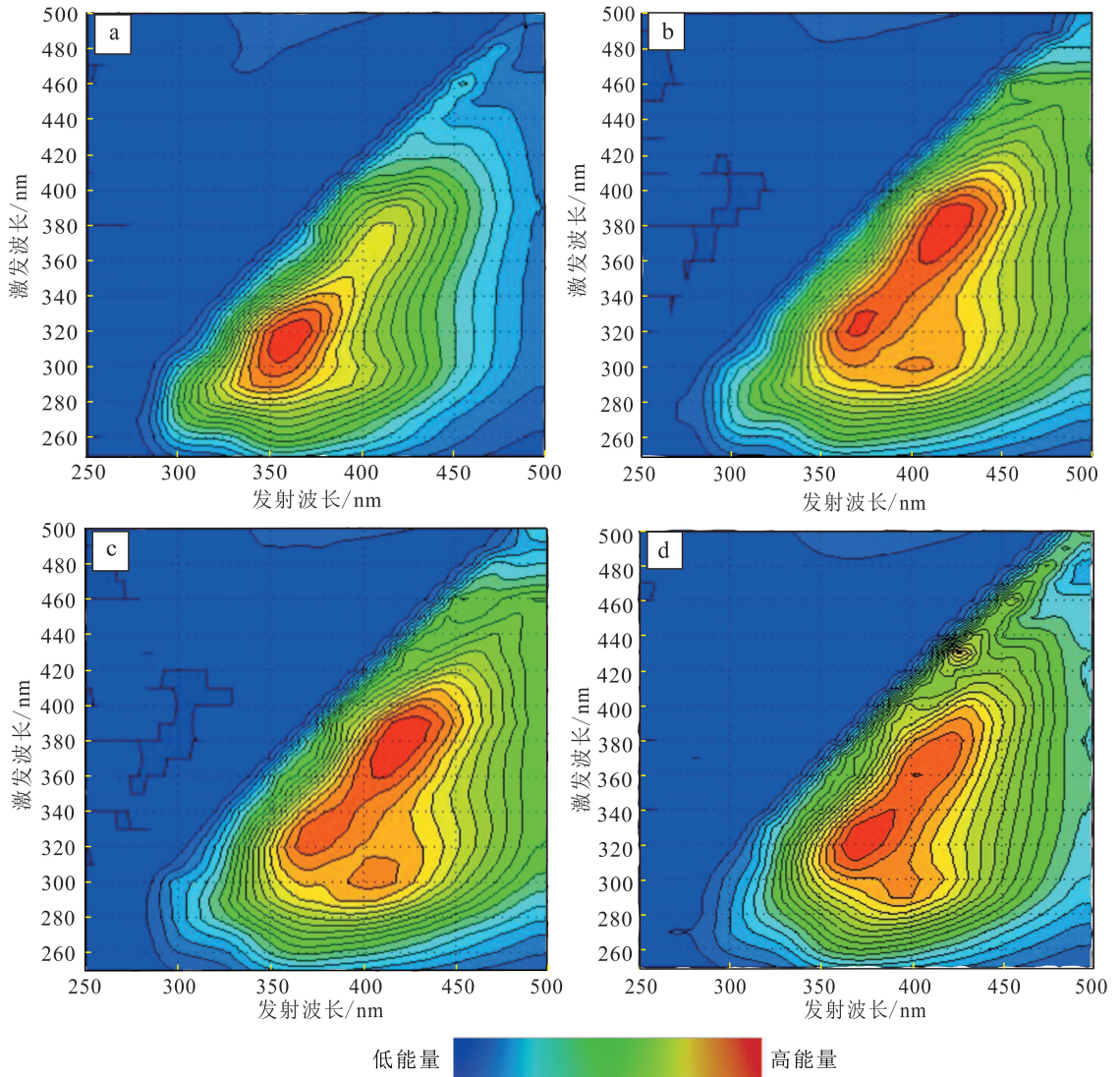
综上所述,针对稠油储层尤其是气测无异常和录井无任何含油显示的潜在稠油储层,在随钻过程中应密切注意自然伽马、电阻率和钻速曲线的特征。当自然伽马降低显示钻遇砂岩层时,若电阻率增加明显(较区域水层电阻率明显偏高)且钻速较泥岩显著升高,应考虑可能为稠油储层。这种特征对于在随钻过程中及时发现稠油有重要的意义和实用价值。此时加测中子、密度曲线以明确储层的物性,增加井壁取心以明确储层的含油性,由此可对储层流

体性质有初步的判断。在此基础上,结合气测比值图版、岩石热解和现场三维定量荧光(壁心)等多种



a. 稠油; b. 中质油; c. 轻质油。壁心或流体样。

图 9 北部湾盆地不同流体性质三维定量荧光图谱  
Fig. 9 3D quantitative fluorescence spectra of different fluid properties in Beibu Gulf basin



a. 稠油(岩屑); b. 稠油(壁心); c. 取样稠油样品(稀释 1 000 倍测); d. 钻井液。

图 10 图 4c 稠油储层同深度岩屑、壁心、取样流体和钻井液三维定量荧光谱图

Fig.10 3D quantitative fluorescence spectra of cuttings, sidewall cores, sampled fluids and drilling fluids at the same depth in heavy oil reservoir of Fig. 4c

方法开展辅助验证和综合评价,最后通过电缆地层测试取样或钻杆地层测试证实地层流体性质和产能。

### 3 结论

1)针对气测无异常、录井无含油显示的稠油储层,根据自然伽马、电阻率和钻速曲线特征,结合孔隙度测井曲线和壁心含油显示,可有效识别此类隐蔽油层。

2)壁心的三维定量荧光更能准确地反映地层真实流体特征,在随钻过程中能够及时发现稠油。

3)根据取样过程中井下流体监测和岩石热解分析的结果,稠油储层常规气测值低且无异常主要由于其典型的烃组分构成,轻烃含量非常低,烃组分主要分布于C6+以上。

4)强亲水的岩石润湿性以及沥青质稠油与砂岩骨架颗粒之间特殊的粘附性,是多数稠油储层无录井荧光和含油显示的主要原因。

### 参考文献(References):

[1] 吴婷婷,张凤义,王大为,等. 渤海稠油油藏分类方法及分类界限研究[J]. 新疆石油天然气,2019, 15(3):64 -

68.  
Wu Tingting, Zhang Fengyi, Wang Dawei, et al. Study on Classification Methods and Classification Limits of Heavy Oil Reservoirs in Bohai Oil Field[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(3): 64-68.
- [2] 邱桂强,李素梅,庞雄奇,等. 东营凹陷北部陡坡带稠油地球化学特征与成因[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 854-862.  
Qiu Guiqiang, Li Sumei, Pang Xiongqi, et al. Characteristics and Genetic Mechanisms of Heavy Oils on the North Steep Slope of the Dongying Depression in the Bohai Basin, East China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6): 854-862.
- [3] 杨永利. 赵凹油田泌 304 区浅层砾岩稠油储量分类评价及应用[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(3): 72-75.  
Yang Yongli. Reservoirs Classification Evaluation and Application of Shallow Sandy Conglomeratic Heavy Oil of Bi 304 Block in Zhaowa Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(3): 72-75.
- [4] 戚家振,黄建军,杨鹏程,等. 北部湾盆地涠西南凹陷 D 洼新近系稠油成因及资源潜力分析[J]. 海洋石油, 2022, 42(1): 13-17.  
Qi Jiazhen, Huang Jianjun, Yang Pengcheng, et al. Genesis and Resource Potential Analysis of Neogene Heavy Oil in D Sub-Sag, Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. Offshore Oil, 2022, 42(1): 13-17.
- [5] 金秋月,杨希冰,胡林,等. 北部湾盆地稠油地球化学特征及成因分析[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(4): 81-88.  
Jin Qiuyue, Yang Xibing, Hu Lin, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of Heavy Oil in Beibuwan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(4): 81-88.
- [6] 李勇,陈世加,尹相东,等. 储层中固体沥青研究现状、地质意义及其发展趋势[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(3): 732-746.  
Li Yong, Chen Shijia, Yin Xiangdong, et al. Research Status, Geological Significance and Development Trend of Solid Bitumen in Reservoirs[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(3): 732-746.
- [7] 曹志壮. 辽河油田稠油油气藏气测录井规律研究 [C]//王春鹏. 第一届全国特种油气藏技术研讨会论文集. 北京:石油工业出版社, 2004: 173-177.  
Cao Zhizhuang. Study on Gas Logging Law of Heavy Oil and Gas Reservoirs in Liaohe Oilfield [C] //Wang Chunpeng. Proceedings of the First National Special Oil and Gas Reservoir Technology Seminar. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 173-177.
- [8] 曹鹏飞,杜克拯,王轲,等. 综合现场地质录井识别稠油层[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 20(4): 61-65.  
Cao Pengfei, Du Kezheng, Wang Ke, et al. Identification of Heavy Oil Layers by Comprehensive Field Geological Logging [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 20(4): 61-65.
- [9] 车晓峰,邓己寻,马建民,等. 白音查干凹陷达尔其地区稠油地化特征识别[J]. 特种油气藏, 2001, 8(4): 23-25.  
Che Xiaofeng, Deng Jixun, Ma Jianmin, et al. Identification of Heavy Oil Geochemical Characteristics in Daerqi Area of Baiyinchagan Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 8(4): 23-25.
- [10] 郑玉朝,卢海丽,崔玉英,等. 东濮凹陷文留区块稠油储集层录井综合识别方法[J]. 录井工程, 2014, 25(4): 38-41.  
Zheng Yuchao, Lu Haili, Cui Yuying, et al. The Intergrated Mud Logging Methods for Identifying Viscous Crude Oil Reservoirs in Wenliu Block of Dongpu Sag[J]. Mud Logging Engineering, 2014, 25(4): 38-41.
- [11] 王佳凡,郭玉岩,崔红珠,等. 稠油储层交绘图识别方法研究[J]. 石油仪器, 2006, 20(5): 61-67.  
Wang Jiafan, Guo Yuyan, Cui Hongzhu, et al. Method of Identifying Thick Oil Reservoir by Cross Plot[J]. Petroleum Instruments, 2006, 20(5): 61-67.
- [12] 田鑫,毛志强. 二维核磁共振测井识别稠油储层方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(1): 127-130.  
Tian Xin, Mao Zhiqiang. Research of the Method for Identifying Heavy Oil Reservoir Using 2D NMR Logs [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(1): 127-130.
- [13] 陈思芮,王卫学,曲希玉,等. 东营凹陷北带沙四上亚段砂砾岩储层物性主控因素分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1091-1106.  
Chen Sirui, Wang Weixue, Qu Xiyu, et al. Main Controlling Factors of Physical Properties of Glutenite Reservoirs of Es<sub>4</sub> Member in North Zone of Dongying Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1091-1106.
- [14] 王小娟,洪海涛,吴长江,等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层特征及成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1037-1051.  
Wang Xiaojuan, Hong Haitao, Wu Changjiang, et al.

- Characteristics and Formation Mechanisms of Tight Sandstone Reservoirs in Jurassic Shaximiao Formation, Central of Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4):1037-1051.
- [15] 陈秀娟,刘之的,刘宇曦,等. 致密储层孔隙结构研究综述[J].物探与化探,2022,46(1):22-31.  
Chen Xiujuan, Liu Zhidi, Liu Yuxi, et al. Research into the Pore Structure of Tight Reservoirs: A Review [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 22-31.
- [16] 蒋利平,高德伟,劳业春,等. 南海西部海域复杂条件下PVT取样技术对策[J]. 中国海上油气,2012,24(1):36-40.  
Jiang Liping, Gao Dewei, Lao Yechun, et al. A Technical Solution for PVT Sampling Under Complex Reservoir Conditions in the Western South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(1): 36-40.
- [17] 张国强,许兵,潘福熙,等. 电缆地层测试聚焦探针在渤海地区的应用[J]. 中国海上油气,2011,23(5):309-312.  
Zhang Guoqiang, Xu Bing, Pan Fuxi, et al. An Application of Focused Probe for Wireline Formation Test in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(5): 309-312.
- [18] 涂春赵,张国强,信召玲,等. 电缆地层测试双探针取样技术研究与应用[J]. 测井技术,2020,44(4):338-342.  
Tu Chunzhao, Zhang Guoqiang, Xin Zhaoling, et al. Research and Application of Double Probe Sampling Technology for Cable Formation Tester [J]. Well Logging Technology, 2020, 44(4): 338-342.
- [19] 陈育勤,张树东. MDT测井技术在川东北地区多井解释中的应用[J]. 天然气工业,2006,26(7):52-53.  
Chen Yuqin, Zhang Shudong. Application of MDT Logging Technology to Multiwell Interpretation in the Northeastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 52-53.
- [20] 龚思敏,蒋有录,侯帅,等. 辽河东部凹陷牛居—长滩洼陷沙河街组天然气成因类型及来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(6):1781-1790.  
Gong Simin, Jiang Youlu, Hou Shuai, et al. Genetic Types and Source of Natural Gas of Shahejie Formation in Niuju-Changtan Sag of Eastern Liaohe Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1781-1790.
- [21] 王春鹏,马玉龙,时庚戌,等. 辽河油区油田开发实践[M]. 北京:石油工业出版社,2002.  
Wang Chunpeng, Ma Yulong, Shi Gengxu, et al. Oilfield Development Practice in Liaohe Oil Region [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [22] 吴烈钧. 气相色谱检测方法[M]. 北京:化学工业出版社,1993.  
Wu Liejun. Gas Chromatography Detection Method [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1993.
- [23] 杨占山,里富强,孙文库. 对气测录井技术全烃检测值的进一步认识[J]. 录井工程,2006,17(4):26-28.  
Yang Zhanshan, Li Fuqiang, Sun Wenku. Further Cognition to Gas Logging Total Hydrocarbon Detecting Value [J]. Mud Logging Engineering, 2006, 17(4): 26-28.
- [24] 张艳茹,杨雷. 稠油储集层热解气相色谱谱图特征及其综合解释评价方法[J]. 录井工程,2014,25(3):46-50.  
Zhang Yanru, Yang Lei. Pyrolysis Gas Chromatography Spectra for Heavy Oil Reservoirs and Related Comprehensive Evaluation and Interpretation Methods [J]. Mud Logging Engineering, 2014, 25(3): 46-50.
- [25] 吴健,胡向阳,郑香伟,等. 北部湾盆地凝析油气藏综合识别方法[J]. 天然气地球科学,2015,26(3):495-503.  
Wu Jian, Hu Xiangyang, Zheng Xiangwei, et al. Comprehensive Identification Methods of Condensate Oil-Gas Reservoir in the Beibu Gulf Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 495-503.
- [26] 封晨辉. 沥青材料的黏度与粘附性研究[D]. 西安:长安大学,2003.  
Feng Chenhui. Study on Viscosity and Adhesion of Asphalt Materials [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.
- [27] 韦少校. 三维定量荧光技术在珠江口盆地的研究与应用[J]. 录井工程,2018,29(4):36-38.  
Wei Shaoxiao. Study and Application of Three-Dimensional Quantitative Fluorescence Technique in Pearl River Mouth Basin [J]. Mud Logging Engineering, 2018, 29(4): 36-38.
- [28] 姜丽,周启达. 三维定量荧光录井解释评价方法研究[J]. 录井工程,2011,22(4):39-43.  
Jiang Li, Zhou Qida. Study for the Three-Dimensional Quantitative Fluorescence Logging Interpretation and Evaluation Method [J]. Mud Logging Engineering, 2011, 22(4): 39-43.