



李文静, 姜志豪, 张莉莉, 等. 2026. 乍得 Bongor 盆地 P 组储层复杂润湿性特征及饱和度精细评价方法研究. 地球物理学进展, 41(1): 0311-0324, doi:10.6038/pg2026JJ0234.

LI WenJing, JIANG ZhiHao, ZHANG LiLi, et al. 2026. Research on the complex wettability characteristics and precise saturation evaluation method for the P formation reservoir in the Bongor Basin, Chad. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(1): 0311-0324, doi:10.6038/pg2026JJ0234.

乍得 Bongor 盆地 P 组储层复杂润湿性特征及饱和度精细评价方法研究

Research on the complex wettability characteristics and precise saturation evaluation method for the P formation reservoir in the Bongor Basin, Chad

李文静^{1,2}, 姜志豪^{1,2*}, 张莉莉^{3,4}, 李长文⁴, 毛志强⁵

LI WenJing^{1,2}, JIANG ZhiHao^{1,2*}, ZHANG LiLi^{3,4}, LI ChangWen⁴, MAO ZhiQiang⁵

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065
2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065
3. 中国石油集团测井有限公司国际公司, 北京 102206
4. 中国石油天然气集团公司测井重点实验室, 西安 710077
5. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China
2. Key Laboratory of Oil and Gas Formation Geology, Xi'an 710065, China
3. China Petroleum Logging International Co., Ltd., Beijing 102206, China
4. Key Laboratory of Logging, CNPC, Xi'an 710077, China
5. State Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

摘要 乍得 Bongor 盆地位于中非裂谷系西延带, 其白垩系 P 组储层作为主力产层, 岩性复杂、非均质性显著, 且油层电阻率数值变化巨大, 导致饱和度评价困难。本研究根据岩性、物性、岩电实验和核磁实验等资料, 以 Bongor 盆地 Baobab 区块和 Daniela 区块为主要研究对象, 分析乍得 Bongor 盆地 P 组储层的复杂润湿性特征, 提出一种结合岩石润湿性与电阻率的饱和度计算模型。研究表明, 从上到下 P 组砂体可分为四套, 第一套是含泥质薄层砂岩, 电阻率 $20 \Omega \cdot m$ 以下, 采用泥质砂岩饱和度模型; 第二套为部分厚层砂岩, 电阻率小于 $100 \Omega \cdot m$, 适用亲水模型; 第三套存在异常高阻储层, 电阻率在 $300 \sim 1000 \Omega \cdot m$, 用亲油解释模型; 第二

Abstract The Bongor Basin in Chad is located in the western extension zone of the Central African Rift System. Its Cretaceous P reservoir, as the main production layer, has complex lithology and significant heterogeneity, and the oil reservoir resistivity values vary greatly, making saturation evaluation difficult. Based on data from lithology, physical properties, rock electrical experiments, and nuclear magnetic experiments, this study focuses on the Baobab and Daniela blocks in the Bongor Basin of Chad. The study analyzes the complex wettability characteristics of the P reservoir in the Bongor Basin and proposes a saturation calculation model that combines rock wettability with electrical resistivity. Research has shown that the P group sand bodies can be divided into four sets from top to bottom. The first set is composed of thin sandstone layers containing mud, with a resistivity of less

收稿日期 2025-05-30; 修回日期 2025-09-29. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 陕西省自然科学基金基础研究计划“面上项目”(2025JC-YBMS-281)、基于产教融合的专业型硕士研究生创新与实践能力的培养路径探析(2023-X-YJG-005)、西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划资助(YCS23213075)和中国石油集团测井有限公司项目“乍得、尼日尔复杂油气层测井评价技术研究与应用”(2016D-4502)联合资助。

第一作者简介 李文静, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事测井储层评价方面的研究. E-mail: lwjxsyjs@163.com

* 通讯作者 姜志豪, 男, 1993 年生, 副教授, 主要从事复杂润湿性储层、测井储层评价研究. E-mail: zhihaoj2021@xsyu.edu.cn

套部分砂体和第四套砂体的电阻率在 $100 \sim 300 \Omega \cdot m$ 之间,适用于混合润湿模型.该方法实现了乍得 Bongor 盆地复杂润湿性储层饱和度的精准计算,为该盆地后续高效勘探开发提供了关键技术支持.

关键词 乍得 Bongor 盆地;饱和度评价;复杂润湿性;测井解释

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10. 6038/pg2026JJ0234

CSTR:32085.14.pg2026JJ0234

than $20 \Omega \cdot m$, using a mud sandstone saturation model; The second set is partially thick sandstone with a resistivity of less than $100 \Omega \cdot m$, suitable for hydrophilic models; The third set has an abnormally high resistivity reservoir with a resistivity of $300 \sim 1000 \Omega \cdot m$, which is explained by an oil affinity model; The resistivity of the second set of partial sand bodies and the fourth set of sand bodies is between 100 and $300 \Omega \cdot m$, suitable for the mixed wetting model. This method achieves accurate calculation of saturation of complex wettability reservoirs in the Bongor Basin of Chad, providing key technical support for efficient exploration and development in the basin in the future.

Keywords Bongor Basin in Chad; Saturation evaluation; Complex wettability; Logging interpretation

0 引言

乍得 Bongor 盆地是中西非裂谷系重要的含油气盆地,油气资源极为丰富,主要来源于下部 P 组烃源岩(窦立荣等,2011).但该盆地 P 组储层非均质性强,不同油气层电阻率数值差异巨大($2 \sim 3 \Omega \cdot m$ 至数千 $\Omega \cdot m$)(毛志强等,2022).低阻油层及低对比度油层较为发育,油层识别难度大导致储层岩石测井饱和度评价困难,且常规单一储层饱和度评价方法计算精度低.因此,在乍得 Bongor 盆地油气储层分析中,高精度的含油饱和度评价对于提高该地区的勘探效益至关重要.

目前,众多学者对 Bongor 盆地开展了深入的地质研究,取得了一系列重要成果.窦立荣等(2015)研究认为乍得 Bongor 盆地基底古老,经多期地质作用形成,勘探获油气成果,基岩储层分类且垂向分带,利于储层预测评价.下白垩统烃源岩发育条件优越,有机质优质且丰度高、成熟度适中,为油气勘探及大油田的发现奠定了物质基础(徐锋等,2018).在油气分布规律上,Baobab 构造带整体呈现出独特的油气分布格局,凸起带以基岩潜山油藏为主,次洼带则以源内 P 组油藏为主(张辰,2015;王利等,2022).尽管上述研究成果为 Bongor 盆地 Baobab 区块靶区优选指明了方向,但实际勘探开发过程中,该区块 P 组储层电阻率差异大,润湿性复杂,亟需明确其润湿性特征,完善饱和度精细评价方法,以推动该地区的油气勘探开发.

针对储层电性差异,众多学者开展了复杂润湿性的研究,在不同方面取得了丰富的成果.在润湿性对岩石电阻率的影响方面,有研究指出润湿性会影响流体在孔隙中的微观分布,进而对岩石电阻率产生作用,并阐述了润湿性与 n 值的关系(高楚桥等,

1998;Meng *et al.*,2017).韩玉娇等(2022)针对油湿和水湿的中—低渗透延长组砂岩开展了岩电、核磁共振、扫描电镜等对比实验,从岩石物理角度探索了不同黏度原油对油湿和水湿砂岩导电响应规律的影响机理.张丽华等(2023)针对多种饱和度指数 n 的影响因素,简单概述各因素的影响特点及结果,并分析原因,给出了实际应用建议.随着核磁共振技术的发展,前人已经验证了核磁共振技术与岩石润湿性的关系.其中,最早采用的是定量手段评价油藏岩石润湿性,将饱和水的弛豫移动与含水饱和度和润湿性建立联系(Howard,1998).此后,Liang 等(2023)指出岩石润湿性对储层流体分布和提高采收率有显著影响,核磁共振(NMR)技术适用于润湿性表征,以饱和油水的致密砂岩为例,研究了不同润湿性特征的 T_2 响应和基于核磁共振 T_2 的润湿性指数,为混合润湿岩石中核磁共振 T_2 表征的解释提供了理论基础.

为了提高复杂润湿性条件下 P 组储层的含油饱和度评价精度,本文以 Bongor 盆地 Baobab 区块和 Daniela 区块为主要研究对象,基于岩性、物性、岩电和核磁实验数据,分析 P 组不同砂体的润湿性特征,并建立了四个油层饱和度评价模型,揭示了乍得 Bongor 盆地 P 组储层复杂润湿性电阻率、核磁共振测井响应特征并进行饱和度精细评价,实际数据应用结果表明,本模型计算的含油饱和度与试油结论吻合率显著提升,该方法可为后续的勘探开发提供理论依据和技术支持.

1 研究背景

1.1 地质概况

Bongor 盆地是受中西非北西—南东(NW-SE向)剪切带影响形成的中—新生代陆内裂谷盆地,

地层包括下白垩统、古近系、新近系和第四系。下白垩统从下往上依次为 P 组、M 组、K 组、R 组(宋红日等,2009;欧阳雪琪,2016;范璎宁,2018)。根据下白垩统地层组合特征,可划分为上、下两大成藏组合。上部组合由 B-R-K 组构成,以 R 组下部厚层泥岩为区域盖层,油气主要来源于下部的 M 组和 P 组烃源岩(肖坤叶等,2015;李威等,2017;文志刚等,2018)。P 组地层为深湖一半深湖近岸水下扇—扇三角洲沉积,具有深灰—灰黑色泥岩夹薄至中厚层砂岩,储层发育,但岩性变化大,涵盖泥质砂岩至砂砾岩(王利等,2024)。主要油层分布在 R 组和 K 组的砂岩中,以稠油藏或正常偏稠油藏为主,油气分布主要受构造控制(陈志刚等,2016;赵利伟,2016);下部组合由 M—P 组构成,是“自生自储型”成藏组合,也是 Bongor 盆地主力成藏组合(王楠,2018;闫林辉等,2019)。以轻质油藏、凝析油气藏或气藏为主,油气分布受构造和储层双重控制,原油物性好,油气比高,产量高,局部发育异常高压(图 1)。

1.2 P 组砂体特征

Bongor 盆地北部斜坡带 P 组主要为陆相扇三角洲相—湖相沉积,岩性较粗,以粗砂岩和砂砾岩为主,主要粒径分布在 0.12 ~ 8.6 mm 之间,且平均孔径较大,能形成较通畅的渗流通道(图 2)。

碎屑组分主要为长石砂岩,少量为岩屑砂岩。长石含量平均为 66.8%,主要为斜长石和钾长石,石英含量为 25.5%,岩屑含量最低,仅为 7.7%。部分井段含较高的火成岩屑(图 3)。磨圆度较差,形态主要为次棱状(图 4a)。胶结类型多为孔隙式,孔隙组合以溶孔-粒间孔和溶蚀孔-粒间孔为主(图 4b)。BN-8 井和 BNE-3 井岩心中存在大量溶蚀孔,长石含量高。黏土矿物主要为伊利石、绿泥石和伊/蒙间层,其中绿泥石含量较高,伊/蒙间层含量较低,约为 10%(表 1)。

表 1 Bongor 盆地 P 组黏土矿物含量表
Table 1 Clay mineral content of group P in Bongor Basin

井号	样品数量/个	伊利石 /%	伊/蒙混层/%	高岭石 /%	绿泥石 /%	伊/蒙混层比/%
BN-8	26	43.2	9.7	0.0	47.1	<10
BNE-3	24	28.7	13.5	0.0	57.8	24.6
BS1-1	16	30.6	9.8	0.0	59.6	<10
D-3	11	49.0	3.2	12.2	35.6	<10

P 组目的层段包含 6 口取心井,共 652 个岩心

样品数据,其中 BNE-3 井、BS1-1 井、BN-8 井和 D-3 井位于 Baobab-Daniela 凸起与 Daniela 洼陷。统计分析表明,P 组岩心孔隙度范围广泛,主要集中在 6%~24% 之间,平均孔隙度为 15.2%(图 5a)。渗透率分布跨度大,分布范围为 $(0.01 \sim 10000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$,其中大部分渗透率集中在 $(10 \sim 5000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均渗透率为 $518.9 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (图 5b)。

P 组主力砂体特征明显,主力砂体从上到下可分为四段(图 6)。第一套砂体为含泥质砂岩,自然电位异常幅度小或几乎无异常,通常发育电阻率小于 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 的低阻油气层。第二套砂体为厚层状砂岩,油层电阻率在 $30 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,保存条件好,基本未水淹,自然电位(SP)有小幅负异常。第三套砂体的特点是发育高电阻率油层,电阻率接近 $2000 \Omega \cdot \text{m}$,对应自然电位曲线负异常幅度最大,达到 -120 mV 。第三套砂体保存较好,通常未见水淹。第四套砂体位于主力砂体下部,油层大部分被破坏,形成高阻水层。岩心实验证实,第三套和第四套砂体的高阻油水层由亲油润湿引起。

P 组储层渗透率差异较大(表 2),孔隙度与渗透率呈正相关。根据渗透率,BN-8 井和 D-3 井规律一致(图 7a),BS1-1 井和 BNE-3 井规律一致(图 7b),中孔高渗现象主要出现在第三套含砾或砂砾岩砂体中。

表 2 Bongor 盆地研究区取心井 P 组物性分析情况
Table 2 Physical property analysis of core well P group in Bongor Basin research area

井名	孔隙度范围 /%	孔隙度平均值/%	渗透率范围 / (10^{-15} m^2)	渗透率平均值 / (10^{-15} m^2)
BNE-3	10 ~ 18	15.1	0.1 ~ 500	32.8
BN-8	14 ~ 22	18.1	10 ~ 5000	817.3
BS1-1	1 ~ 29	14.6	0.01 ~ 1000	113.5
D-3	4 ~ 20	12.1	10 ~ 1000	301.9

2 P 组储层复杂润湿性测井电阻率及核磁共振特征

2.1 储层电性特征分析

Bongor 盆地 P 组油层电阻率变化较大。本文结合岩心观察、岩电实验和油驱水核磁共振实验,将 P 组储层划分为亲水、亲油和混合润湿三类,并基于油层类型与电性差异,建立不同的饱和度模型,提高三类润湿储层含油饱和度的计算精度。

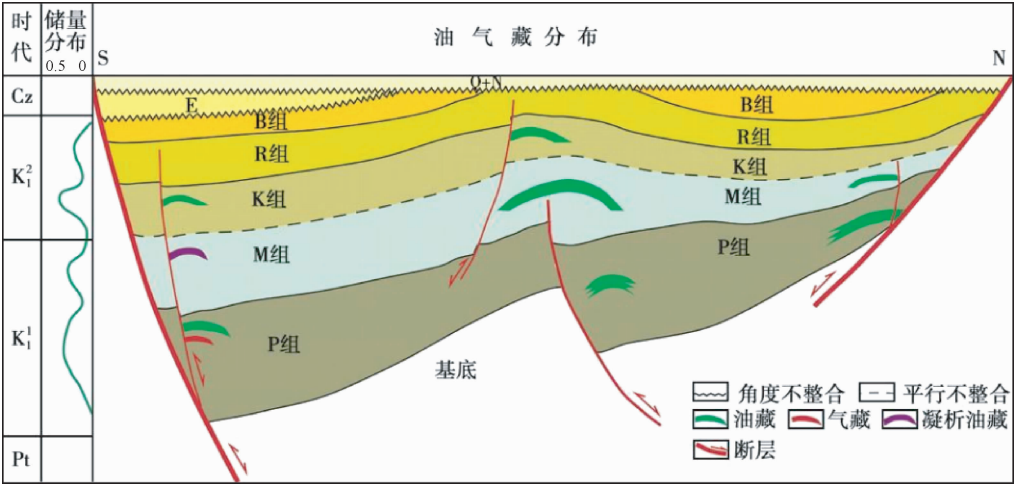


图 1 Bongor 盆地油气成藏模式(据窦立荣等,2011)

Fig. 1 Oil and gas formation formation model in Bongor Basin (according to Dou *et al.*, 2011)

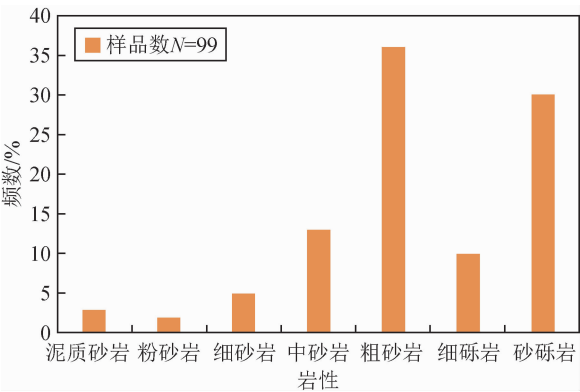


图 2 Bongor 盆地 P 组岩性类型统计图
Fig. 2 Statistical chart of lithological types of group P in Bongor Basin

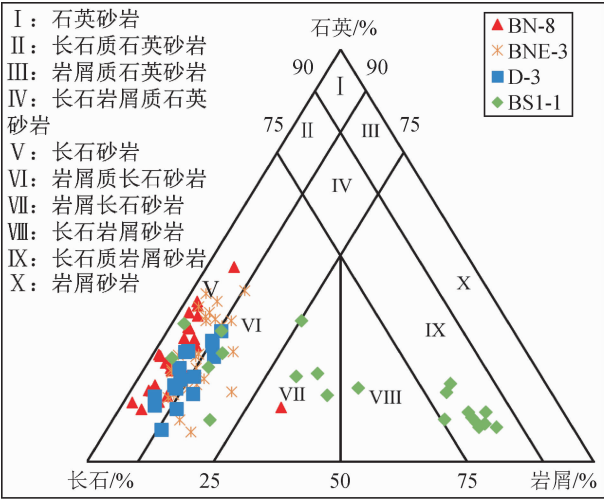


图 3 Bongor 盆地 P 组储集层砂岩统计图
Fig. 3 Statistical diagram of sandstone in the P formation of Bongor Basin

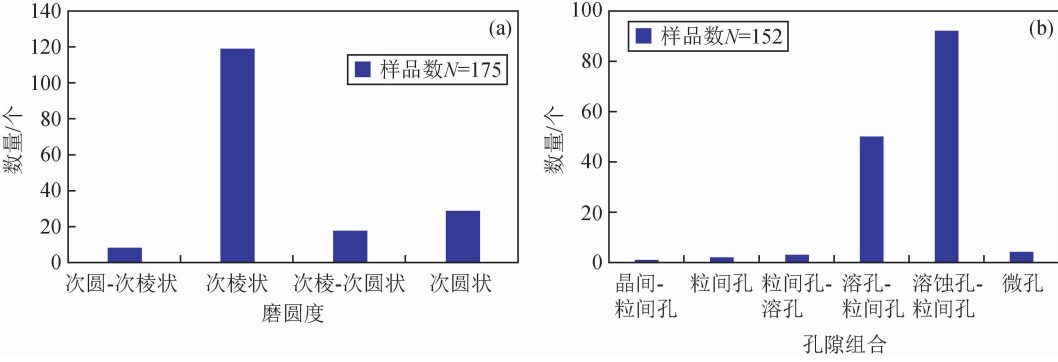


图 4 Bongor 盆地 P 组岩石磨圆度(a)及孔隙组合(b)
Fig. 4 Roundness(a) and pore combination(b) of P group rocks in Bongor Basin

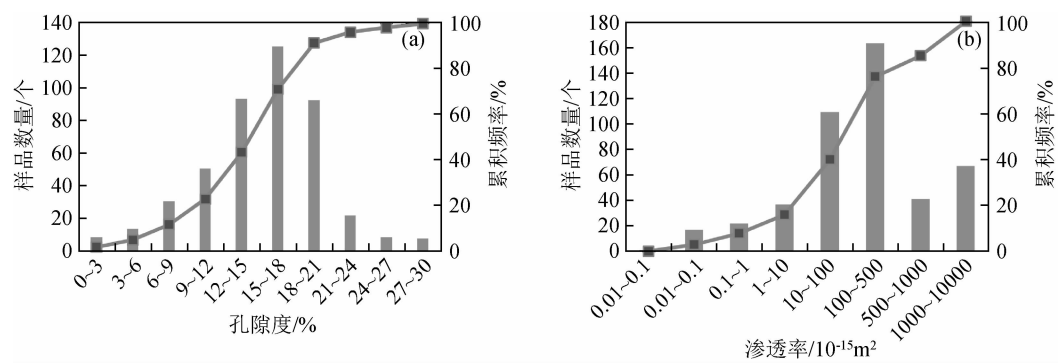


图 5 Bongor 盆地 P 组岩心孔隙度(a)、渗透率(b)分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of porosity(a) and permeability(b) of P group core in Bongor Basin

主力砂体分段	岩性柱状图	岩性描述	沉积微相	曲线特征 (常见)		含油性特征
				自然电位	电阻率	
第一套砂体		薄层状砂岩或泥质粉砂岩	半深湖		油层低阻 <30Ω·m	成藏条件好, 薄层高产 (N-1井), 油质轻或气油比高
第二套砂体		厚层状砂岩	席状砂		油层电阻率正常: 30-100Ω·m	保存条件好 (BNE-3井)
第三套砂体		厚层状砂岩	分流河道间		高阻油层: 300-2000Ω·m	保存条件较好 (D-3井)
第四套砂体		厚层状砂泥岩互层	水下分流河道		水层电阻率略低于油层: 100-300Ω·m	大多数均被破坏, 形成“高阻水层” (BN-8井)

图 6 Baobab 地区 P 组主力砂层含油性分层及各组特征

Fig. 6 Oil bearing stratification and characteristics of the main sand layers in group P of Baobab area

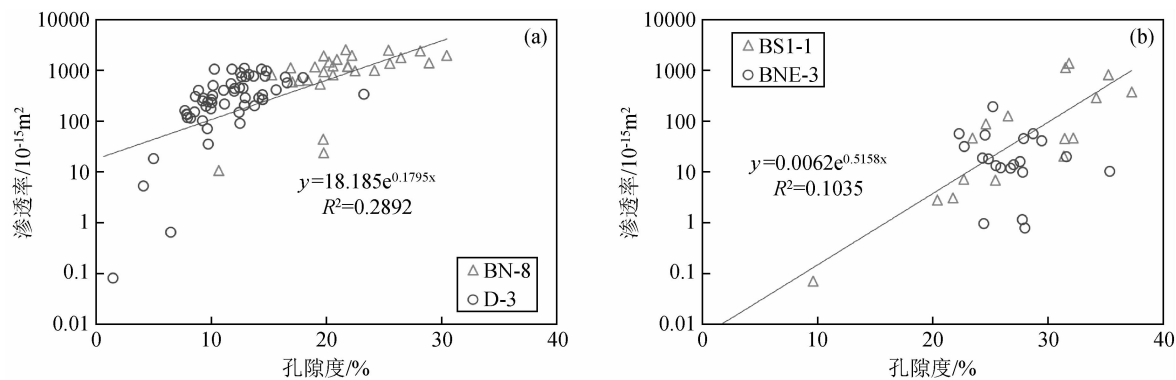


图 7 Bongor 盆地 P 组孔渗交会图

(a) BN-8 井和 D-3 井 P 组孔渗交会图;(b) BS1-1 井和 BNE-3 井 P 组孔渗交会图.

Fig. 7 Intersection diagram of P group pore permeability in Bongor Basin

(a) Cross-plot of porosity and permeability for Group P in wells BN-8 and D-3;

(b) Cross-plot of porosity and permeability for Group P in wells BS1-1 and BNE-3.

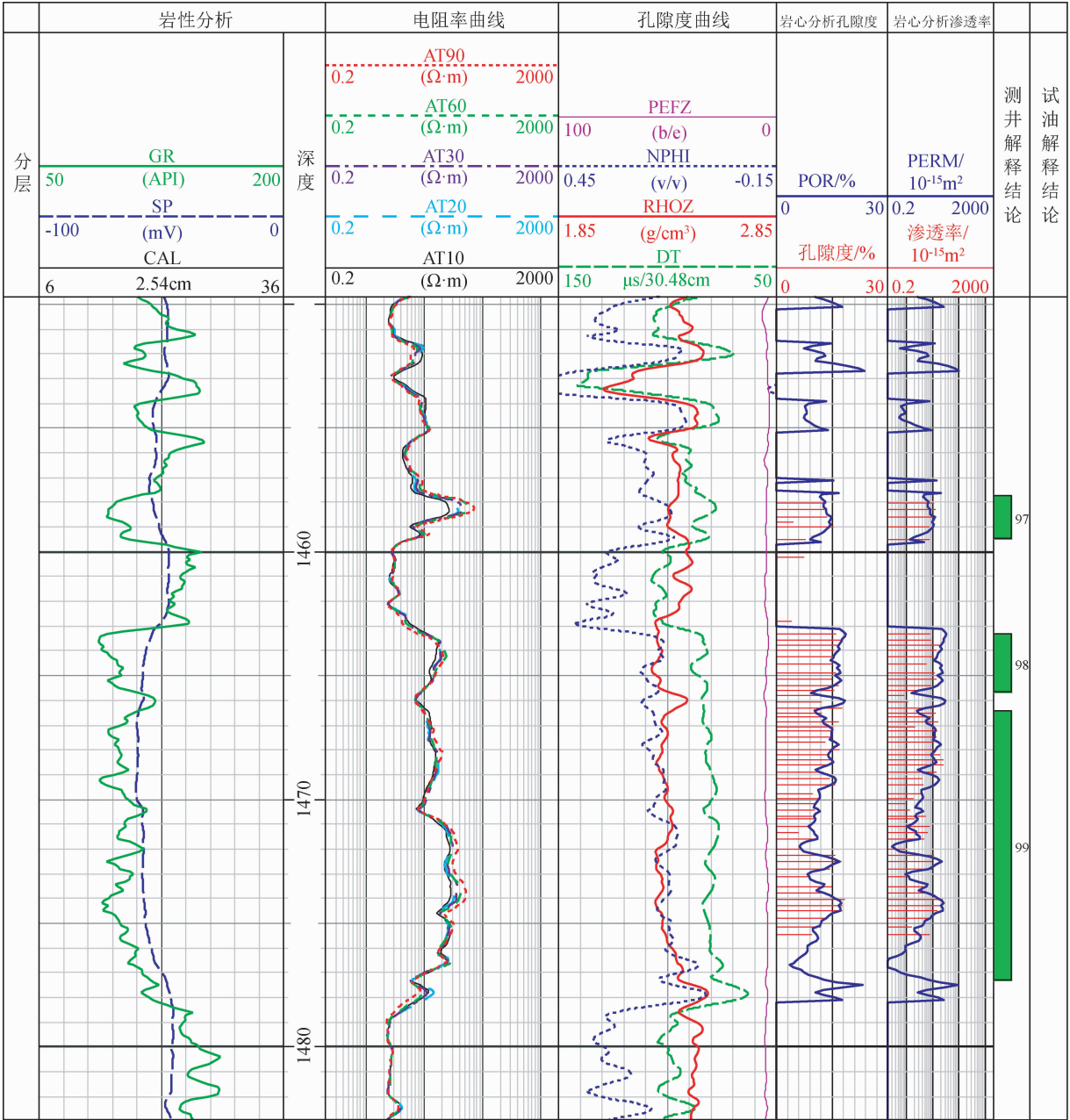


图 8 亲水润湿油层测井解释成果图(BNE-3) (1450 ~ 1480 m)

Fig. 8 Logging interpretation results of low resistance oil layer (BNE-3) (1450 ~ 1480 m)

2.1.1 亲水润湿储层

测井响应结果表明,B-1 井、BNE-3 等井存在电阻率小于 100 Ω·m 的油层,属于第二套砂体. BNE-3 井的电阻率曲线值始终低于 100 Ω·m(图 8),孔隙度介于 10% ~ 18% 之间,渗透率在 (0.1 ~ 100) × 10⁻¹⁵ m² 范围内. 亲水岩石表面易被水润湿,水膜在孔隙壁面形成,通常占据较小孔隙,而油相则分布在孔隙中央等位置. 根据 Archie 公式等相关理论,饱和度指数 *n* 在不同润湿性储层中表现出显著差异,

主要受润湿性对流体分布和孔隙结构的控制影响(张丽华等,2025). 亲水润湿储层计算得到的饱和度指数相对较小. 对该井 1456.43 ~ 1473.54 m 区间的 22 块岩心进行岩电实验,首先对样品进行清洗和烘干,确保去除孔隙中的残余流体. 再将岩心样品置于饱和装置中,通过真空抽吸和加压饱和法使其完全饱和. 饱和完成后,使用四电极法测量岩样在不同饱和度下的电阻率,记录数据. 最后通过离心法或气驱法逐步降低岩样中的流体饱和度,并在每个饱和

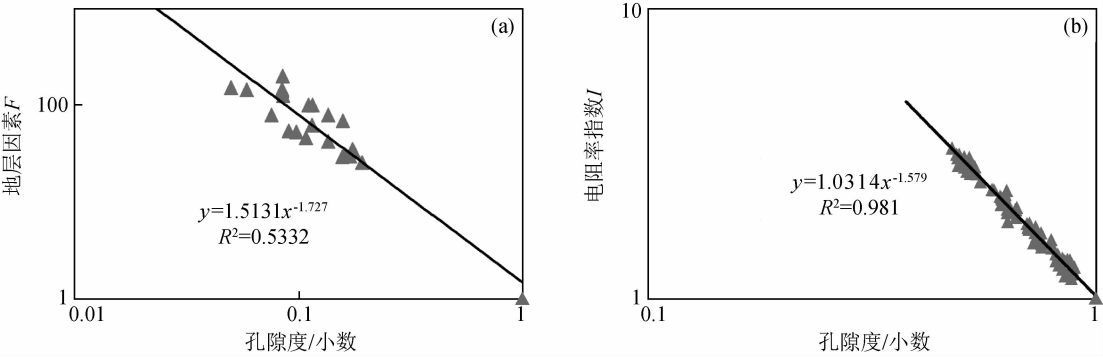


图9 BNE-3 井岩电实验

(a) 储层地层因素与孔隙度交会图; (b) 储层电阻率指数与含水饱和度交会图.

Fig.9 BNE-3 well rock electrical experiment

(a) Cross-plot of reservoir formation factors and porosity; (b) Cross-plot of reservoir resistivity index and water saturation.

度点重复电阻率测量. 实验结果如图9所示, 饱和度指数 $n = 1.579$, 表明岩石为亲水润湿.

2.1.2 亲油润湿储层

D-3 井发育典型的高阻油层, 油层电阻率最高可达 $2000 \Omega \cdot \text{m}$ (图10), 发育第三套砂体, 孔隙度介于 $8\% \sim 25\%$ 之间, 渗透率范围为 $(10 \sim 2000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$. 通过岩心观察, 该岩石呈深褐色, 为粗颗粒砂岩, 含油性良好, 散发浓郁油味, 触摸后油污易沾染双手. 亲油岩石表面不易被水润湿, 油更容易附着在岩石孔隙壁上, 形成油膜. 对该井 $1268.02 \sim 1370.06 \text{ m}$ 区间的20块岩心进行岩电实验, 结果表明, D-3 井上下两层的 $F-\phi$ 与 $I-S_w$ 关系相同, 饱和度指数 $n = 3.178$, 表明岩石为亲油润湿储层 (图11).

2.1.3 混合润湿储层

BN-8 井的油层电阻率约为 $200 \Omega \cdot \text{m}$ (图12), 发育厚层砂泥岩互层, 为第四套砂体. 岩石孔隙中同时存在润湿相与非润湿相, 电阻率介于完全亲水和完全亲油之间. BN-8 井孔隙度介于 $14\% \sim 30\%$ 之间, 渗透率在 $(0.1 \sim 2000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 范围内. 对该井 $1384.48 \sim 1401.64 \text{ m}$ 的22块岩心样品进行岩电实验, 饱和度指数 $n = 2.021$, 介于亲水润湿储层和亲油润湿储层之间, 表明岩石为混合润湿储层 (图13).

2.2 不同润湿性的核磁共振特征

核磁共振技术基于岩心流体赋存状态分析, 可实现孔隙度、渗透率及含油饱和度的同步量化表征 (Yang et al., 2020; 谢文敏等, 2024). 本实验通过测量岩心样本的孔隙度、渗透率及饱和水和饱和油状

态下的 T_2 谱, 先对岩心样品进行洗油洗盐、烘干并抽真空饱和, 然后置于核磁共振仪器中, 使用预设的测量参数进行饱和和样品测试. 样品在抽真空时的压力为 0.01 MPa , 且维持 24 h . 实验中使用 CaCl_2 溶液模拟地层水进行样品的饱和.

BNE-3 井孔隙度范围分布在 $10\% \sim 18\%$ 之间, 渗透率在 $(0.1 \sim 500) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 范围内, 电阻率小于 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 属于第二套砂体. 该储层岩石饱和和水状态下的核磁共振 T_2 谱呈较宽的单峰分布, 峰值为 60 ms 左右 (图14), 在油驱至束缚水状态过程中, $60\% \sim 80\%$ 的油进入孔隙中, 驱替后饱和油的 T_2 谱峰值显著增大至 400 ms 左右, T_2 谱表现为明显的双峰分布在 $1 \sim 10 \text{ ms}$ 之间, 表征未被油驱替出的小孔隙中水的表面弛豫信号; 后峰分布在 $100 \sim 500 \text{ ms}$ 之间, 主要是大孔隙中油的体积弛豫信号. 油驱后的核磁共振 T_2 谱与饱和水状态下的 T_2 谱存在显著差异, 岩石中油水的状态表现为油体积弛豫和水表面弛豫现象, 进一步证实岩石的亲水润湿性特征. 油驱过程中, 油优先进入大孔隙, 而水滞留在小孔隙中, 反映了岩石孔隙结构中油水分布的非均质性, 表明岩石为亲水润湿性 (Li and Cai, 2023).

D-3 井孔隙度在 $4\% \sim 20\%$ 之间, 渗透率在 $(10 \sim 1000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 范围内, 油层电阻率高达 $2000 \Omega \cdot \text{m}$, 发育第三套砂体. 该储层岩石饱和和油状态下, 油主要分布在大孔隙中, 其 T_2 弛豫时间分布在 $100 \sim 1000 \text{ ms}$ 之间, 呈现较窄的单峰分布, 峰值为 400 ms 左右 (图15), 油分子在较大孔隙中以体积弛豫为主; 而小孔隙中的水受到孔隙壁的限制, T_2

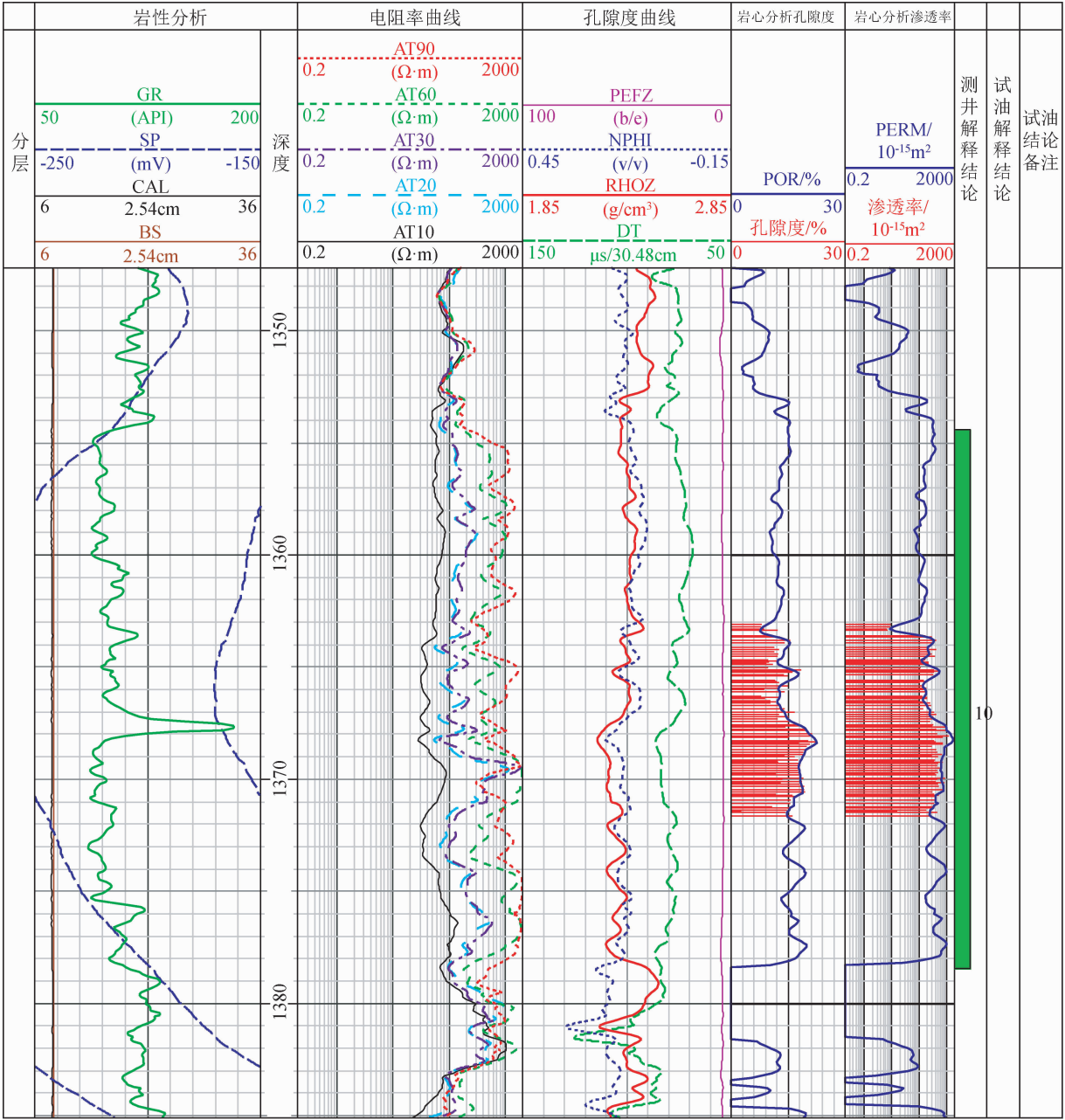


图 10 亲油润湿油层测井解释成果图(D-3)(1350~1380 m)
Fig. 10 Logging interpretation results of high resistance oil layer (D-3) (1350 ~ 1380 m)

弛豫时间小于 100 ms,随着孔隙尺寸的增大,水的弛豫信号逐渐增强.油驱过程中,油优先占据大孔隙并吸附在孔隙表面,而水被驱替至孔隙中心或滞留于小孔隙中,反映了岩石的亲油润湿性.

BN-8 井孔隙度范围分布在 14%~22% 之间,渗透率值在 $(10 \sim 5000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 范围内.油层电阻率约为 $200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$,发育厚层砂泥岩互层,为第四套砂体.该储层岩石饱和水和饱和油状态下 T_2 谱变化很小(图 16),岩石中的油和水在孔隙表面和孔隙中心

的分布会更加复杂,亲油表面和亲水表面共存,样品饱和水时,水在岩石孔隙中同时表现为体积弛豫和表面弛豫;饱和油状态下,油和水同时存在,均表现为体积弛豫和表面弛豫,反映了混合润湿性储层的特征.

3 不同润湿性饱和度模型建立

不同润湿性饱和度模型的建立至关重要.众多学者展开了相关研究,如阿尔奇 (Archie,1942) 在早

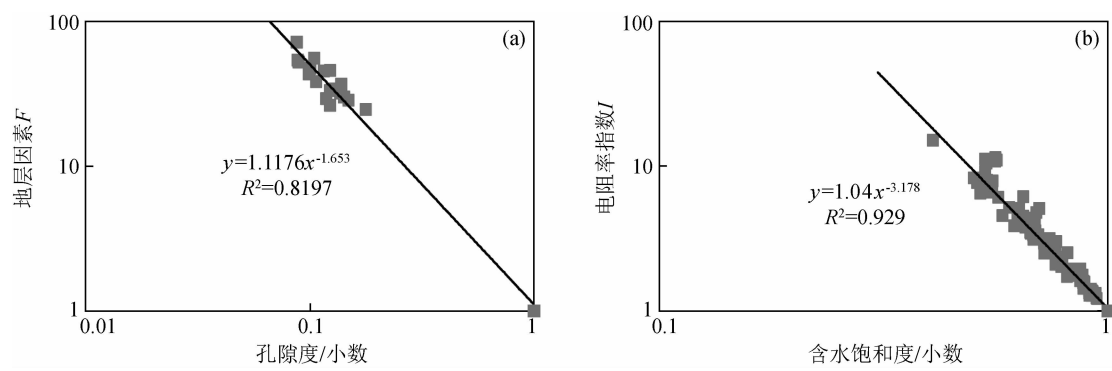


图 11 D-3 井岩电实验
(a) 储层地层因素与孔隙度交会图;(b) 储层电阻率指数与含水饱和度交会图.

Fig. 11 D-3 Rock electricity experiment

(a) Cross-plot of reservoir stratigraphic factors and porosity; (b) Cross-plot of reservoir resistivity index and water saturation.

期基于实验提出经典的阿尔奇公式,为亲水岩石电阻率与含水饱和度关系建模奠基.

本文针对不同套砂体和不同电阻率范围,采用不同润湿性模型计算饱和度.这里采用阿尔奇公式进行计算,计算公式如下:

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\varphi^m} = a \cdot \varphi^{-m}, \tag{1}$$

$$I = \frac{R_i}{R_0} = \frac{b}{S_w^n} = b \cdot \varphi S_w^{-n}, \tag{2}$$

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{abR_w\varphi^{-m}}{R_i}}, \tag{3}$$

式中, F 为地层因素, R_0 为岩石孔隙中百分百含水时的地层电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$; R_w 表示地层水电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$; R_i 为地层电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$; φ

为岩石孔隙度,小数; a 、 b 为比例系数, m 为胶结指数, n 为饱和度指数, S_w 是含水饱和度,单位为 %.

对于第一套砂体应用泥质模型进行计算含水饱和度,计算公式如下:

$$\frac{1}{S_w^n} = \left(\frac{V_{sh}^c}{R_{sh}} + \frac{\varphi^c}{\sqrt{aR_w}} \right)^2 R_i, \tag{4}$$

$$C = 1 - \frac{V_{sh}}{2}, \tag{5}$$

式中, V_{sh} 为泥质含量,小数; R_{sh} 为纯泥质层的电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$; C 为修正指数,用于量化泥质含量对参数指数的影响.

亲水储层、亲油储层和混合润湿储层岩电参数分别由样品岩电实验确定(图 17),不同润湿性模型详细参数见表 3.

表 3 不同饱和度模型适用范围
Table 3 Applicable range of different saturation models

模型分类	适用砂体	$F \cdot \varphi$	$I \cdot S_w$	S_w 计算公式	适用范围
亲水储层	第 2 套砂体	$a = 1.4149$ $m = 1.818$	$b = 1.0284$ $n = 1.557$	$S_w = \sqrt[1.557]{1.455R_w\varphi^{-1.818}/R_i}$	$R_i < 100 \ \Omega \cdot \text{m}$
亲油储层	第 3 套砂体	$a = 1.1176$ $m = 1.653$	$b = 1.04$ $n = 3.178$	$S_w = \sqrt[3.178]{1.162R_w\varphi^{-1.653}/R_i}$	$R_i > 300 \ \Omega \cdot \text{m}$
混合润湿	第 2、4 套砂体	$a = 1.0416$ $m = 1.758$	$b = 1.1095$ $n = 2.021$	$S_w = \sqrt[2.021]{1.156R_w\varphi^{-1.758}/R_i}$	$100 \ \Omega \cdot \text{m} < R_i < 300 \ \Omega \cdot \text{m}$
泥质模型	第 1 套砂体	$\frac{1}{S_w^n} = \left(\frac{V_{sh}^c}{R_{sh}} + \frac{\varphi^c}{\sqrt{aR_w}} \right)^2 R_i, C = 1 - \frac{V_{sh}}{2}$			$R_i < 30 \ \Omega \cdot \text{m}$

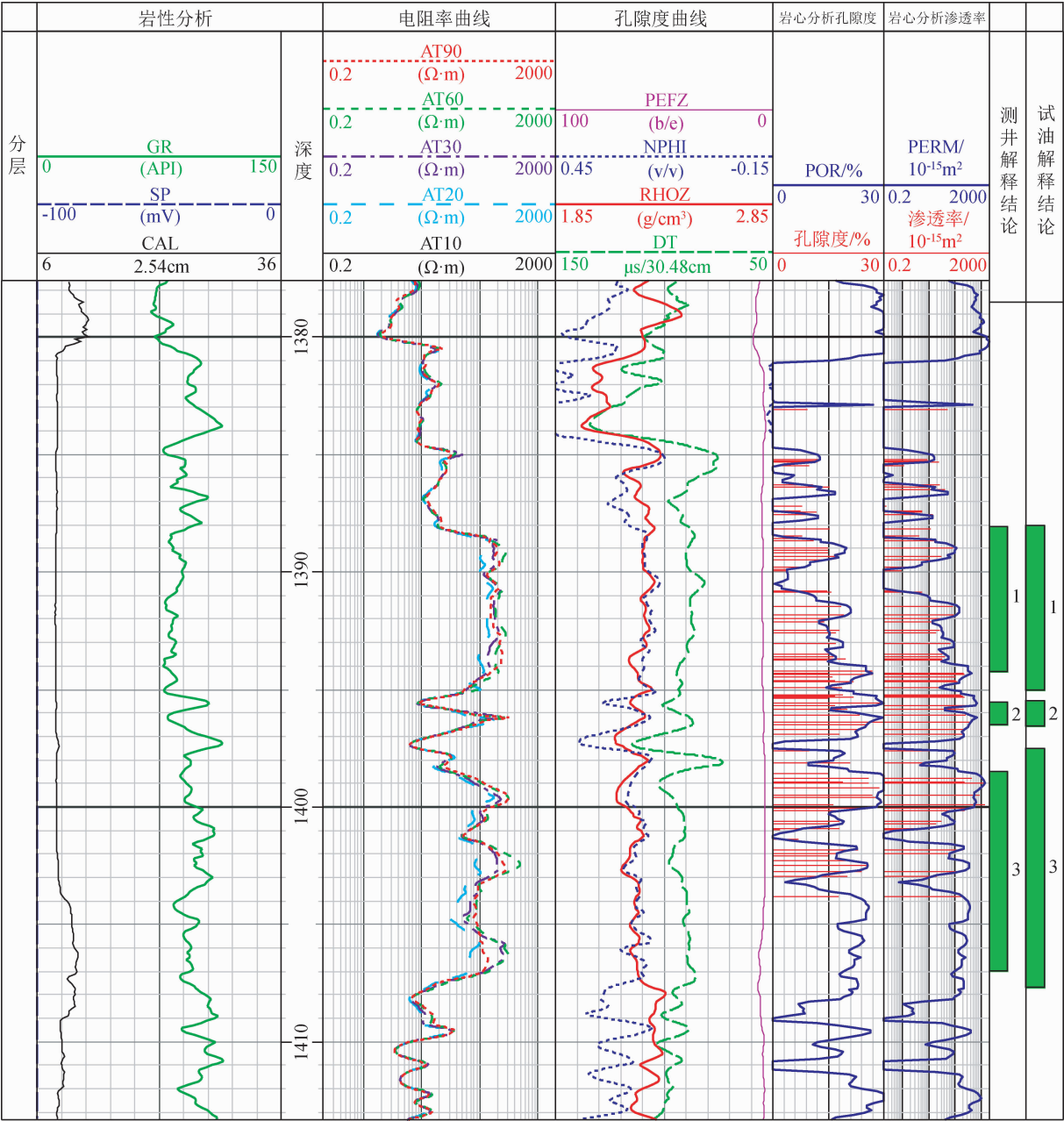


图 12 混合润湿油层测井解释成果图 (BN-8) (1380 ~ 1410 m)

Fig. 12 Interpretation results of intermediate state oil layer logging (BN-8) (1380 ~ 1410 m)

4 模型应用

在 BN-8 井 1380 ~ 1410 m 井段,测井解释图 (图 18)显示该区间发育连续厚层砂岩储层,自然伽马曲线呈现明显的钟形负异常,自然电位曲线出现显著的基线偏移,电阻率曲线表现为中高阻特征,反映出该段砂岩具有良好的渗透性和储集性能。

根据储层评价标准,将含油饱和度大于 60% 的

层段划定为油层,含油饱和度处于 40% ~ 60% 区间的层段判定为油水同层. 为了准确获取该井段的含油饱和度,基于岩电实验数据,采用混合润湿模型进行含水饱和度计算. 该井段不同深度的含水饱和度数据与试油结论呈现高度一致性. 例如,在 1385 ~ 1390 m 深度段和 1400 ~ 1405 m 深度段,模型计算的含油饱和度为 68% 左右,试油结果日产原油 16.8 m³,不含水,符合油层标准. 这一结果充分表明,采用混合润湿模型计算含水饱和度,能够有效解

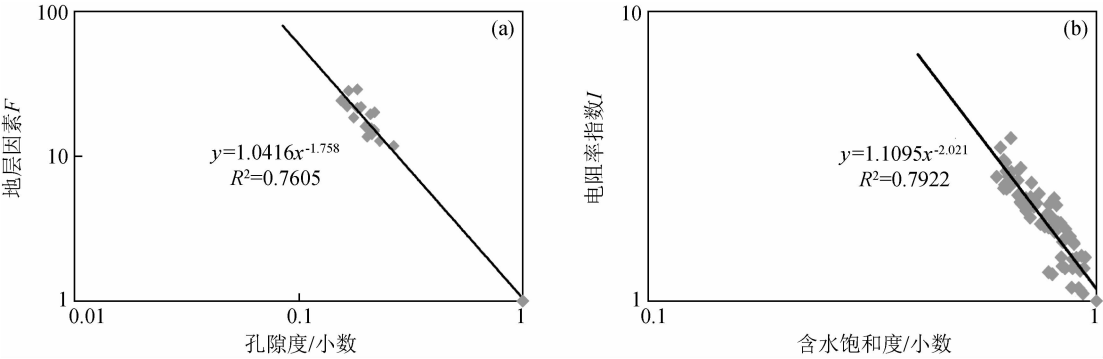


图 13 BN-8 井岩电实验
(a) 储层地层因素与孔隙度交会图; (b) 储层电阻率指数与含水饱和度交会图.

Fig. 13 Rock electrical experiment of BN-8 well

(a) Cross-plot of reservoir stratigraphic factors and porosity; (b) Cross-plot of reservoir resistivity index and water saturation.

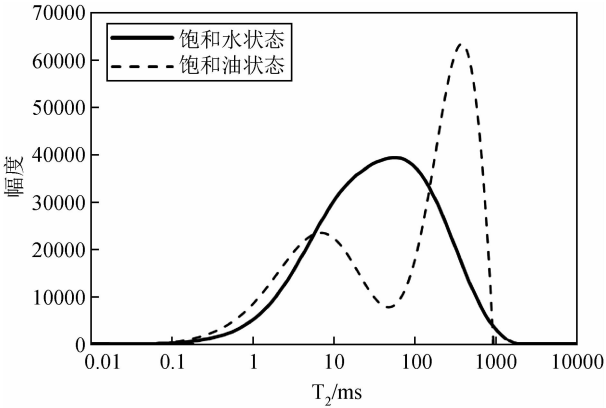


图 14 BNE-3 井岩样饱和水、饱和油核磁 T_2 对比图

Fig. 14 Comparison of nuclear magnetic T_2 of saturated water and saturated oil in BNE-3 well rock sample

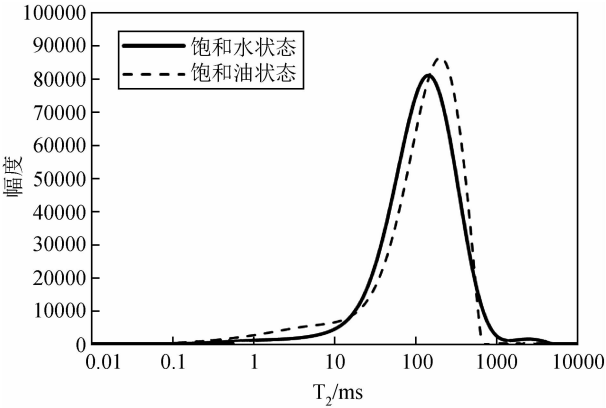


图 16 BN-8 井岩样饱和水、饱和油核磁 T_2 对比图

Fig. 16 Comparison of saturated water and saturated oil nuclear magnetic T_2 in BN-8 well rock samples

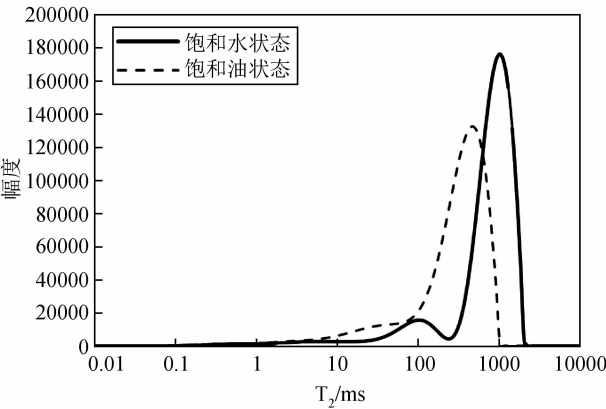


图 15 D-3 井岩样饱和水、饱和油核磁 T_2 对比图

Fig. 15 Comparison of T_2 NMR spectra of saturated water and saturated oil in rock samples from well D-3

决混合润湿储层中流体饱和度精确评价的难题,为该井段的合理开发提供了可靠依据.

5 结 论

(1)研究区 P 组储层主要以粗砂岩和砂砾岩为主,粒径较大. 孔隙度范围为 6% ~ 24%, 平均为 15.2%;渗透率分布范围较广,主要集中在 $(10 \sim 5000) \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 占比 86.4%,整体显示出较好的储集和渗流能力.

(2)研究区 P 组主力砂体特征明显,完整的主力砂体自上而下可分为四套:第一套为含泥质砂岩,常发育低阻油气层,电阻率小于 $30 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$;第二套为厚层砂岩,油层电阻率在 $30 \sim 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 之间;第三套发育高电阻率油层,电阻率接近 $2000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$;第四

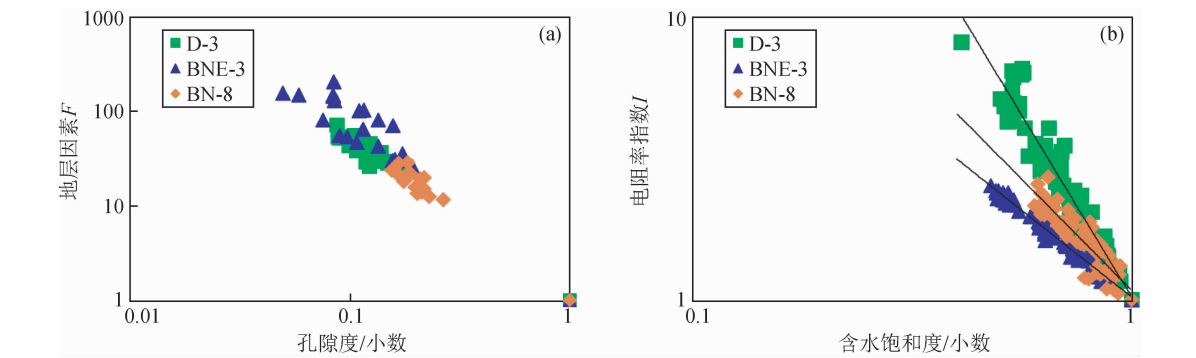


图 17 不同润湿性储层岩电实验
(a)不同润湿性储层地层因素与孔隙度交会图;(b)不同润湿性储层电阻率指数与含水饱和度交会图。
Fig. 17 Rock electrical experiment of formations with different wettability
(a) Cross-plot of formation factors and porosity for reservoirs with different wettability;
(b) Cross-plot of resistivity index and water saturation for reservoirs with different wettability.

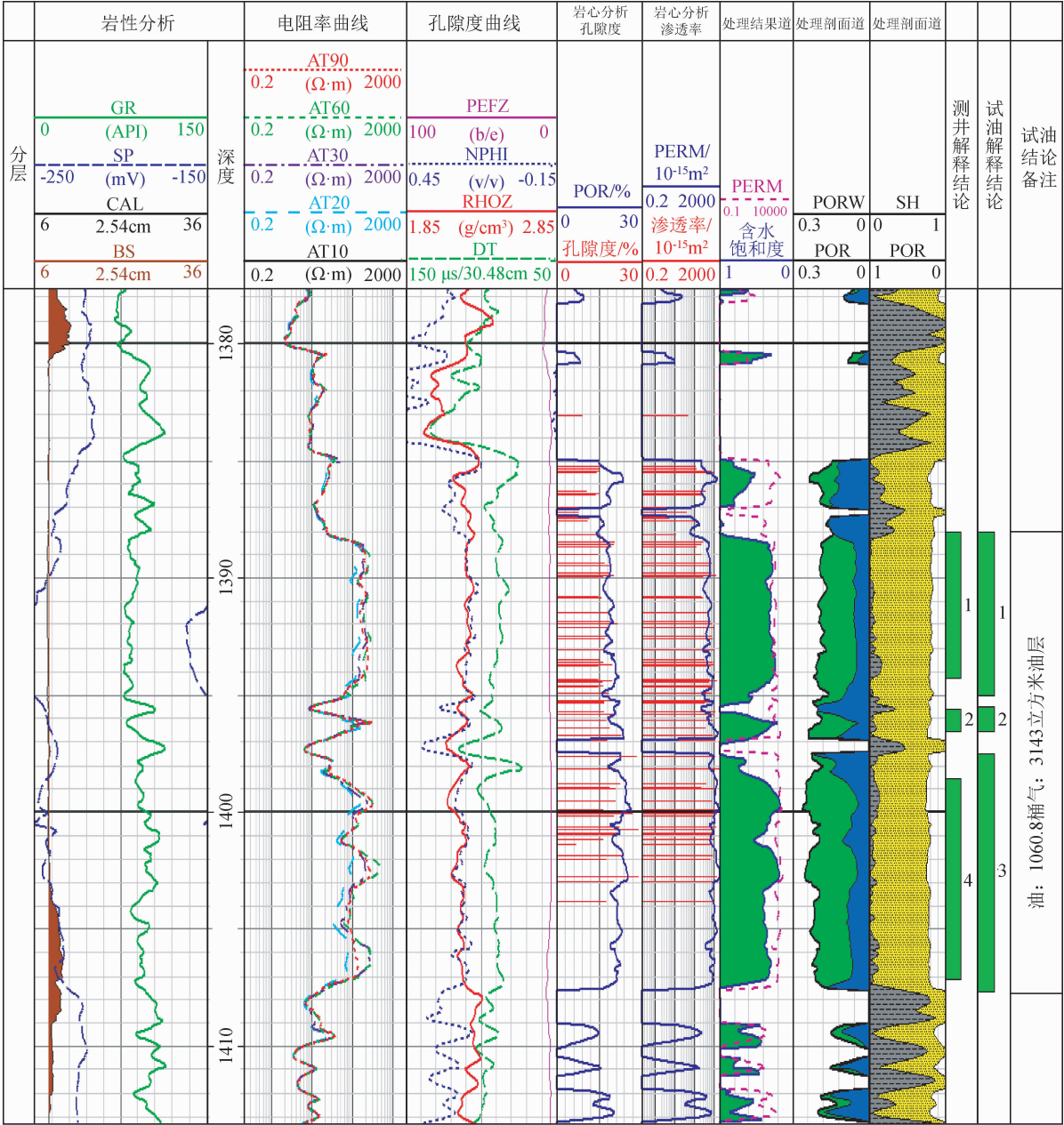


图 18 BN-8 井孔隙度、渗透率、饱和度处理成果图(1380 ~ 1410 m)
Fig. 18 Porosity, permeability, and saturation processing results of BN-8 well (1380 ~ 1410 m)

套储层位于主力砂体下部,油层大部分被破坏,形成高阻水层,电阻率介于 $100 \sim 300 \Omega \cdot \text{m}$,发育低对比度油层。

(3)本研究根据不同套砂体的润湿性和电阻率响应特征,建立了一套适用于 P 组储层复杂润湿性的饱和度计算方法。低阻油层适用于印度尼西亚饱和度和模型,常见于第一套砂体;第二套砂体为强亲水储层,适用于亲水模型;第三套砂体具有较强的亲油润湿性,可用亲油储层模型计算饱和度;第四套砂体表现为混合润湿,则采用混合润湿模型进行处理。

(4)通过对研究区 D-3 井、BN-8 井等 4 口试油井的生产数据进行分析,将基于四种不同润湿模型计算得出的含油饱和度与实际试油结果进行对比验证,本模型大幅提升了含油饱和度计算与试油结论的吻合精度,为复杂润湿性储层的定量评价与高效开发提供了可靠的技术支撑。

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Archie G E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(1): 54-62, doi: 10.2118/942054-G.
- Chen Z G, Xu G, Wang J C, *et al.* 2016. Different structural characteristics in the east and west parts, Bongor Basin, Chad, and their influence on hydrocarbon accumulation. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 51(S1): 113-119.
- Dou L R, Xiao K Y, Hu Y, *et al.* 2011. Petroleum geology and a model of hydrocarbon accumulations in the Bongor Basin, the Republic of Chad. *Acta Petrolei Sinica (in Chinese)*, 32(3): 379-386, doi: 10.7623/syxb201103002.
- Dou L R, Wei X D, Wang J C, *et al.* 2015. Characteristics of granitic basement rock Buried-Hill Reservoir in Bongor Basin, Chad. *Acta Petrolei Sinica (in Chinese)*, 36(8): 897-904, 925, doi: 10.7623/syxb201508001.
- Fan Y N. 2018. Sedimentary characteristics and reservoir comprehensive evaluation of PI formation in Baobab N block, Bongor Basin, Chad [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Gao C Q, Zhang C G, Mao Z Q. 1998. The effects of wettability on the electrical properties of rocks. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 13(1): 60-72.
- Han Y J, Zhou C C, Li C L, *et al.* 2022. Conductive response law of oil-wet and water-wet sandstone in Ordos Basin under the influence of oil viscosity. *Acta Petrolei Sinica (in Chinese)*, 43(6): 829-839, 859, doi: 10.7623/syxb202206007.
- Howard J J. 1998. Quantitative estimates of porous media wettability from proton NMR measurements. *Magnetic Resonance Imaging*, 16(5-6): 529-533, doi: 10.1016/S0730-725X(98)00060-5.
- Li J Q, Cai J C. 2023. Quantitative characterization of fluid occurrence in shale reservoirs. *Advances in Geo-Energy Research*, 9(3): 146-151, doi: 10.46690/ager.2023.09.02.
- Li W, Dou L R, Wen Z G, *et al.* 2017. Buried-hill hydrocarbon genesis and accumulation process in Bongor Basin, Chad. *Acta Petrolei Sinica (in Chinese)*, 38(11): 1253-1262, doi: 10.7623/syxb201711004.
- Liang C, Xiao L Z, Jia Z J, *et al.* 2023. Mixed wettability modeling and nuclear magnetic resonance characterization in tight sandstone. *Energy & Fuels*, 37(3): 1962-1974, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c03720.
- Mao Z Q, Jiang Z H, Li C W, *et al.* 2022. Logging characteristics of Cretaceous sequence stratigraphy and the genesis and distribution of low-resistivity oil and gas layers in Bongor Basin, Chad. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 57(1): 212-221, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2022.01.023.
- Meng Q B, Liu H Q, Wang J. 2017. A critical review on fundamental mechanisms of spontaneous imbibition and the impact of boundary condition, fluid viscosity and wettability. *Advances in Geo-Energy Research*, 1(1): 1-17, doi: 10.26804/ager.2017.01.01.
- Ouyang X Q. 2016. Sedimentary characteristics of Prosopis formation of lower cretaceous in Baobab block Bongor Basin Chad [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Song H R, Dou L R, Xiao K Y, *et al.* 2009. An exploratory research on geological conditions of hydrocarbon pooling and distribution patterns of reservoirs in the Bongor Basin. *Oil & Gas Geology (in Chinese)*, 30(6): 762-767, doi: 10.3321/j.issn:0253-9985.2009.06.014.
- Wang L, Zhang X S, Xiao K Y, *et al.* 2022. Formation and evolution of Baobab structural zone and controlling factors of hydrocarbon accumulation in Bongor Basin, Chad. *China Petroleum Exploration (in Chinese)*, 27(2): 84-92, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.02.008.
- Wang L, Nie Z Q, Du Y B, *et al.* 2024. Hydrocarbon accumulation history in Lower Cretaceous in northern slope of Bongor Basin in Chad, Central Africa. *Petroleum Exploration and Development (in Chinese)*, 51(1): 127-136, doi: 10.11698/PED.20230487.
- Wang N. 2018. The wettability of tight reservoir and experimental study of its influence on petroleum migration and accumulation [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Petroleum (Beijing).
- Wen Z G, Li W, Dou L R, *et al.* 2018. Buried-hill hydrocarbon accumulation stage of Baobab area in Bongor Basin. *Acta Petrolei Sinica (in Chinese)*, 39(8): 869-875, doi: 10.7623/syxb201808003.
- Xiao K Y, Xiao G J, Zhao J, *et al.* 2015. Characteristics and formation model of Bongor Basin buried hill oil formation. //8th China Conference on Oil and Gas Systems and Formations (in Chinese). Hangzhou, 346-347.
- Xie W M, Ma Z A, Zhang J, *et al.* 2024. Study on the fluid property identification method based on NMR spectra segmentation technique. *Mud Logging Engineering (in Chinese)*, 35(2): 110-114, doi: 10.3969/j.issn.1672-9803.2024.02.017.
- Xu F, Li X B, Hu J, *et al.* 2018. Characteristics of petroleum genesis and evolution analysis on hydrocarbon generation in the Ronier Oilfield, Bongor Basin, Chad. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 25(2): 130-139, doi: 10.13745/j.esf.2018.02.014.
- Yan L H, Chang Y W, Tian Z Y, *et al.* 2019. Characteristics of reservoir spaces and influencing factors for basement rock of Bongor Basin in Chad. *Journal of Northeast Petroleum University (in Chinese)*, 43(2): 59-67.
- Yang X, Ji H C, Dou L R, *et al.* 2020. Tectono-sedimentary characteristics in the area with distributed normal faults: Lower Cretaceous Prosopis Formation in the northern slope of Bongor Basin, Chad. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190: 107081, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107081.
- Zhang C. 2015. Chad Bongor basin H area Great Baobab oilfield reservoir characteristics research [Master's thesis] (in Chinese). Daqing: Northeast Petroleum University.
- Zhang L H, Pan B Z, Shan G Y, *et al.* 2023. Research progress on influencing factors of saturation index n in Archie formula. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 38(3): 1247-1256, doi: 10.6038/pg2023GG0430.
- Zhang L H, Pan B Z, Shan G Y, *et al.* 2025. Research progress on

influencing factors of cementation exponent m in Archie formula. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(6): 2568-2577, doi: 10.6038/pg2025II0335.

Zhao L W. 2016. Structural characteristics and its control over hydrocarbon in Bongor Basin [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

附中文参考文献

陈志刚, 徐刚, 王景春, 等. 2016. 乍得 Bongor 盆地东、西部构造特征差异及其对油气富集的影响. 石油地球物理勘探, 51(S1): 113-119.

窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等. 2011. 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式. 石油学报, 32(3): 379-386, doi: 10.7623/syxb201103002.

窦立荣, 魏小东, 王景春, 等. 2015. 乍得 Bongor 盆地花岗质基岩潜山储层特征. 石油学报, 36(8): 897-904, 925, doi: 10.7623/syxb201508001.

范璠宁. 2018. 乍得 Bongor 盆地 Baobab N 区 PI 组储层沉积特征与综合评价[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

高楚桥, 章成广, 毛志强. 1998. 润湿性对岩石电性的影响. 地球物理学进展, 13(1): 60-72.

韩玉娇, 周灿灿, 李潮流, 等. 2022. 受原油黏度影响的鄂尔多斯盆地油湿和水湿砂岩导电响应规律. 石油学报, 43(6): 829-839, 859, doi: 10.7623/syxb202206007.

李威, 窦立荣, 文志刚, 等. 2017. 乍得 Bongor 盆地潜山油气成因和成藏过程. 石油学报, 38(11): 1253-1262, doi: 10.7623/syxb201711004.

毛志强, 姜志豪, 李长文, 等. 2022. 乍得 Bongor 盆地白垩系测井特征、低阻油气层成因和分布. 石油地球物理勘探, 57(1): 212-221, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2022.01.023.

欧阳雪琪. 2016. 乍得 Bongor 盆地 Baobab 地区下白垩统 Prosopis 组沉积相特征研究[硕士论文]. 成都: 成都理工大学.

宋红日, 窦立荣, 肖坤叶, 等. 2009. Bongor 盆地油气成藏地质条件及分布规律初探. 石油与天然气地质, 30(6): 762-767, doi:

10.3321/j.issn:0253-9985.2009.06.014.

王利, 张新顺, 肖坤叶, 等. 2022. 乍得邦戈盆地 Baobab 构造带形成演化及油气成藏控制因素. 中国石油勘探, 27(2): 84-92, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.02.008.

王利, 聂志泉, 杜业波, 等. 2024. 中非乍得 Bongor 盆地北部斜坡下白垩统油气成藏期次. 石油勘探与开发, 51(1): 127-136, doi: 10.11698/PED.20230487.

王楠. 2018. 致密砂岩储层润湿性及其对石油运移与聚集影响的实验研究[硕士论文]. 北京: 中国石油大学(北京).

文志刚, 李威, 窦立荣, 等. 2018. Bongor 盆地 Baobab 地区潜山油气成藏期次. 石油学报, 39(8): 869-875, doi: 10.7623/syxb201808003.

肖坤叶, 肖高杰, 赵健, 等. 2015. Bongor 盆地潜山油藏储层特征与成藏模式. //第八届中国含油气系统与油气藏学术会议论文摘要汇编. 杭州, 346-347.

谢文敏, 马自安, 张君, 等. 2024. 基于核磁共振谱图分段技术的流体性质识别方法研究. 录井工程, 35(2): 110-114, doi: 10.3969/j.issn.1672-9803.2024.02.017.

徐锋, 李贤兵, 胡健, 等. 2018. 乍得 Bongor 盆地 Ronier 油田油气成因特征与生烃演化史分析. 地学前缘, 25(2): 130-139, doi: 10.13745/j.esf.2018.02.014.

闫林辉, 常毓文, 田中元, 等. 2019. 乍得 Bongor 盆地基岩潜山储集空间特征及影响因素. 东北石油大学学报, 43(2): 59-67.

张辰. 2015. 乍得 H 区 Bongor 盆地 Great Baobab 油田储层特性研究[硕士论文]. 大庆: 东北石油大学.

张丽华, 潘保芝, 单刚义, 等. 2023. 阿尔奇公式中饱和度指数影响因素及特征概述. 地球物理学进展, 38(3): 1247-1256, doi: 10.6038/pg2023GG0430.

张丽华, 潘保芝, 单刚义, 等. 2025. 阿尔奇公式中胶结指数 m 影响因素研究进展. 地球物理学进展, 40(6): 2568-2577, doi: 10.6038/pg2025II0335.

赵利伟. 2016. Bongor 盆地构造特征及对油藏的控制作用[硕士论文]. 成都: 成都理工大学.