

南襄盆地南阳凹陷古近系核桃园组页岩含油性 二维核磁定量表征

李楚雄^{1,2,3}, 曹 剑¹, 申宝剑^{2,4}, 卢龙飞^{2,3}, 俞凌杰^{2,3}, 李志明^{2,3}, 朱 峰^{2,3}, 李艳然⁵, 张育衡⁵,
钱门辉^{2,3}, 曹婷婷^{2,3}, 孙中良^{2,3}

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206;
3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206;
5. 中国石化 河南油田分公司 勘探开发研究院, 河南 南阳 473132)

摘要:页岩含油性准确定量评价和关键参数获取面临挑战。以南襄盆地南阳凹陷古近系核桃园组冷冻保存岩心样品为例,对二维核磁实验方法加以改进,通过系统的油-水定标实验,开展了二维核磁、岩石热解、多温阶热解和共沸蒸馏等实验研究。研究表明:在页岩油二维核磁 T_1 - T_2 评价图版建立的基础上,结合定标实验可实现对页岩内不同赋存状态原油和孔隙水的定量表征。页岩二维核磁游离油和吸附油分析结果略高于多温阶热解游离烃和吸附烃,并与它们有较强的正相关性,表明该方法对烃类的保留效果更好。二维核磁有效孔隙度和含油饱和度的计算结果与气测孔隙度和共沸蒸馏含油饱和度的实验结果相关程度有限,反映出样品性状和实验方法对结果的影响。二维核磁技术优势在于能够较好地保留页岩油轻质组分,同时获取游离油、吸附油和孔隙水含量等多个关键页岩油评价定量参数及含油、含水饱和度信息,在页岩油地质评价领域具有显著的技术优势和应用潜力。

关键词:二维核磁;含油性评价;页岩油;核桃园组;南阳凹陷;南襄盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

2D NMR-based quantitative characterization of oil contents in shales of the Paleogene Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag, Nanxiang Basin

LI Chuxiong^{1,2,3}, CAO Jian¹, SHEN Baojian^{2,4}, LU Longfei^{2,3}, YU Lingjie^{2,3}, LI Zhiming^{2,3}, ZHU Feng^{2,3},
LI Yanran⁵, ZHANG Yuheng⁵, QIAN Menhui^{2,3}, CAO Tingting^{2,3}, SUN Zhongliang^{2,3}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China; 3. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Henan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Nanyang, Henan 473132, China)

Abstract: Shale oil development is facing challenges in accurately quantifying oil-bearing properties and determining key parameters. In this study, focusing on frozen core samples from the Paleogene Hetaoyuan Formation in the Nanyang Sag, Nanxiang Basin, we improve the experimental method for two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D NMR). Based on systematic oil-water calibration experiments, we conduct 2D NMR experiments, Rock-Eval pyrolysis, multi-step temperature-programmed pyrolysis, and azeotropic distillation on the samples. The experimental results reveal that the crude oil and pore water with different occurrence states in shales can be quantitatively characterized by determining the 2D NMR T_1 - T_2 spectrum-based evaluation chart for shale oil, combined with calibration experiments. The results indicate that the contents of free and adsorbed oil calculated using 2D NMR slightly exceed those of free and

收稿日期:2025-06-12;修回日期:2025-10-10。

第一作者简介:李楚雄(1992—),男,博士研究生、助理研究员,非常规油气地质。E-mail: lichuxiong_syky@sinopec.com。

通信作者简介:曹剑(1978—),男,博士、教授、博士研究生导师,石油地质学与有机地球化学。E-mail: jcao@nju.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(U24B6002);中国石化科技部项目(P25195,P25196);中国石化河南油田分公司科技项目(31350016-24-ZC0613-0004)。

adsorbed hydrocarbons determined by temperature-programmed pyrolysis, with strong positive correlations observed between the counterparts. These findings demonstrate that 2D NMR enables more effective hydrocarbon retention. In contrast, the effective porosity and oil saturation calculated using 2D NMR exhibit relatively weak correlations with gas logging-derived porosity and azeotropic distillation-derived oil saturation, respectively, reflecting the influence of sample properties and experimental methods. 2D NMR technology offers the effective retention of light hydrocarbons in shale oil. Meanwhile, this technology can yield oil-water saturation and multiple key parameters for quantitative shale oil evaluation, including the contents of free oil, adsorbed oil, and pore water. These advantages highlight the significant technical advantages and great application potential of 2D NMR in the geological assessment of shale oil.

Key words: two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D NMR), evaluation of oil-bearing properties, shale oil, Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag, Nanxiang Basin

引用格式:李楚雄,曹剑,申宝剑,等. 南襄盆地南阳凹陷古近系核桃园组页岩含油性二维核磁定量表征[J]. 石油与天然气地质,2026,47(2):694-708. DOI:10. 11743/ogg20260222.

LI Chuxiong, CAO Jian, SHEN Baojian, et al. 2D NMR-based quantitative characterization of oil contents in shales of the Paleogene Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag, Nanxiang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 694-708. DOI: 10. 11743/ogg20260222.

页岩油是21世纪化石能源供给的重要类型^[1-5],作为烃源岩中自生自储的石油聚集,由于地层致密通常需要实施压裂等储层改造工艺后才能形成工业产能,因此明确页岩油的赋存状态和含油性对于制定勘探开发方案至关重要^[6-10]。岩石热解作为一种烃源岩快速评价方法已被广泛应用,通过分别加热至300℃和600℃释放的游离烃(S_1)和裂解烃(S_2)可用来评价页岩含油性与生烃潜力。 S_1 通常被认为是页岩中已经形成的原油,因而被用作页岩含油性评价的关键参数^[11-12],但考虑到 S_2 中实际也包含了大量烃类,以重烃和吸附烃为主,因此当直接使用 S_1 来评价含油性时,可能会导致页岩中总油含量被低估^[13]。蒋启贵等^[14]通过多温阶热解结合色谱法将游离烃(S_1)和裂解烃(S_2)进一步划分为轻质烃(S_{1-1})、重质烃(S_{1-2})、吸附烃(S_{2-1})和干酪根裂解烃(S_{2-2}),分别基于200、350、450和600℃的热解温度获取,并且认为 S_{1-1} 是比较现实的页岩油可动部分。以上两种页岩含油性热解分析方法在业内得到广泛认可,而且相关的行业标准也已经颁布。然而,岩石样品在热解实验中需要碎样至粉末状(约200目),这一前处理过程不仅会破坏页岩的孔隙结构,还会破坏页岩油原始赋存状态,导致轻质组分原油散失。液氮低温条件下碎样虽然可以抑制该过程,但无法完全避免轻质烃的逸散,尤其是高成熟阶段富含轻质烃的页岩油样品。

当前,核磁共振作为一种快速而无损的页岩油表征技术逐渐受到行业认可。一维核磁现已广泛应用于页岩的储集物性、孔隙结构、连通性和润湿性等评价研究^[15-20]。然而由于页岩油储层内部流体成分复杂,一维核磁横向弛豫时间(T_2)谱提供的信息相对

有限,因此二维核磁技术被越来越多地应用于页岩油研究,用以区分不同类型和不同赋存状态的流体^[21-29]。Yan等^[24]采用不同前处理方式获取了页岩不同流体在纵向-横向弛豫时间(T_1 - T_2)谱图上的分布区域,实现了不同赋存状态流体的二维核磁定性表征;Seyedalireza等^[19]基于不同演化阶段页岩的 T_1 - T_2 谱图分析,揭示了二维核磁特定区域信号可用于评价含油性、生烃潜力与镜质体反射率(R_o)等地球化学参数;Li等^[13]利用二维核磁与多温阶热解综合分析了济阳凹陷页岩含油性与烃类的赋存状态,确定了研究区二维核磁谱图中不同赋存状态原油的分布区域;李军等^[6]通过二维核磁与测井法综合评价了苏北盆地古近系阜宁组二段页岩可动油含量并建立了识别图版,揭示了页岩可动油纵向连续分布特征。以上的研究丰富了页岩油核磁共振评价技术方法,显示出二维核磁 T_1 - T_2 图谱在页岩含油性、烃类赋存状态及可动性评价等方面具有重要应用价值,但相关实验由于通常采用常规放置岩心开展,导致页岩中的水和轻质油存在一定程度散失,故实际上无法获取页岩内全部的原始流体信息。Li等^[29]通过冷冻状态岩心的二维核磁分析获取了松辽盆地白垩系青山口组页岩中油、水的相对含量,但其 T_1 - T_2 评价图版在其他页岩油探区的适用性还有待验证。综上所述,目前关于二维核磁技术方法在页岩的油、水含量及储集物性的定量表征方面仍存在较大困难。

南襄盆地南阳凹陷是中国重要的陆相页岩油探区,其主要勘探层段古近系核桃园组整体属于偏淡化的湖相沉积环境,有机质丰度偏低,地层厚度大,岩相及含油性非均质性强,尚处于页岩油勘探开

发初期^[30]。主要问题在于烃源条件与页岩油储层规模相对有限,亟需对页岩含油性开展精细表征与评价。

本文利用南阳凹陷核桃园组冷冻保存的岩心样品,通过对二维核磁实验方法加以改进,开展系统的油-水定标实验,对页岩中的游离油、吸附油和孔隙水进行定量,并建立二维核磁 T_1 - T_2 评价图版,实现对油水相对含量和储集物性的定量表征,以期发展页岩含油性二维核磁评价技术,为页岩油甜点评价和储量评估提供有效支撑,应用于南阳凹陷核桃园组页岩油勘探实践。

1 地质背景

南襄盆地南阳凹陷是一个中、新生代的小型断陷,南深、北浅,面积约 3 600 km²(图 1)^[31]。凹陷的构造沉积演化主要分为断陷期和拗陷期。断陷期始于晚白垩世,古近系玉皇顶组-大仓房组沉积期主要发育一套河流相红色碎屑岩;核(核桃园组)三段-核二段沉积期,凹陷边界断层活动强烈,形成了欠补偿的半深湖-深湖相沉积,富有机质泥页岩的发育造就了凹陷内主要的生烃层系;古近系沉积晚期发育核

一段及廖庄组,核一段沉积期,凹陷边界断层活动减弱,湖盆水体变浅,沉积范围缩小,形成了一套浅灰色砂泥岩;廖庄组沉积期,水体进一步变浅,沉积范围急剧缩小,以发育红色砂泥岩为主,沉积末期凹陷整体发生抬升剥蚀^[31];此后进入拗陷期(新近纪-第四纪)。

南阳凹陷南部牛三门附近为核桃园组的沉积和沉降中心地带,水体相对较深,在核二段与核三段发育厚层半深湖-深湖相暗色泥页岩,累计沉积厚度可达 700 ~ 1 400 m。其中,核二段 II 亚段下部至 I 亚段发育一套厚度约 800 m 的砂、泥互层的“夹层型”页岩,是当前页岩油勘探重点层段。

2 样品与方法

2.1 实验样品

本次研究的 3 口井位于南阳凹陷牛三门次凹核二段和核三段。其中,Z1 井取样 12 块,取样深度在 2 888 ~ 3 283 m;Z2 井取样 10 块,取样深度在 2 730 ~ 3 063 m;Z3 井取样 6 块,取样深度 2 815 ~ 2 923 m(表 1)。岩心观察结果显示,岩性以泥岩和页岩为主,还包括少量粉

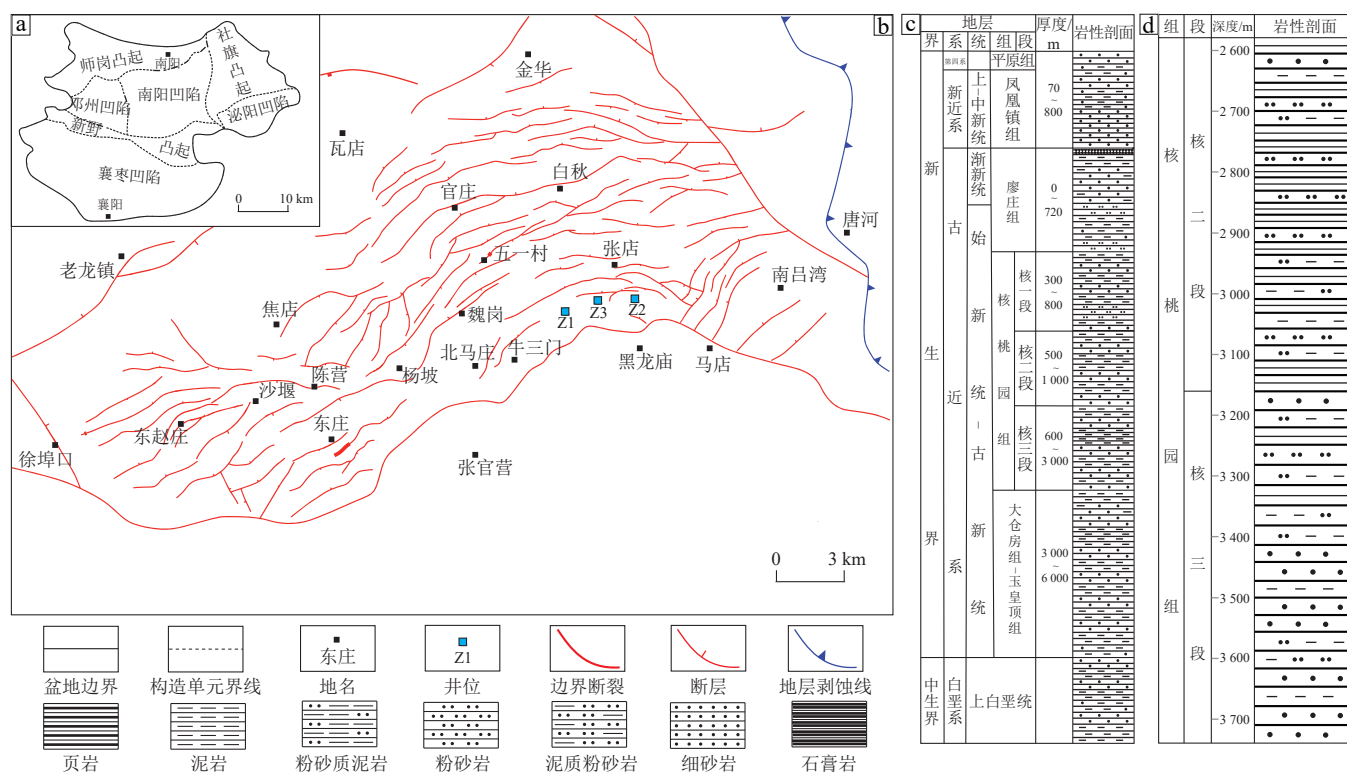


图1 南阳凹陷区域地质概况和地层岩性分布特征(据文献[31]修改)

Fig. 1 Regional geological overview (a) and stratigraphic lithology (b) of the Nanyang Sag (modified after reference [31])

a. 南襄盆地构造单元划分;b. 南阳凹陷区域地质概况;c. 古近系地层综合柱状图;d. 核桃园组岩性柱状图

表1 南阳凹陷核桃园组页岩样品地质、地球化学及含油、含水饱和度参数
Table 1 Geological and geochemical parameters and oil-water saturation of shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

井号	样品号	岩性	井深/m	气测 孔隙度/%	实测含水 饱和度/%	实测含油 饱和度/%	S_1 / (mg/g)	S_2 / (mg/g)	S_{1-1} / (mg/g)	S_{1-2} / (mg/g)	S_{2-1} / (mg/g)	S_{2-2} / (mg/g)	T_{max} /°C	TOC/%	HI/ (mg/g)	OI/ (mg/g)	OSI/ (mg/g)
Z1	Z1-1	灰黑色页岩	2 888.81	5.80	33.4	66.6	0.48	1.54	0.12	0.36	0.55	1.22	436	1.00	154	21	48
	Z1-2	灰黑色页岩	2 900.14	4.87	35.3	64.7	0.41	1.38	0.08	0.17	0.71	0.86	437	1.15	120	20	36
	Z1-3	灰黑色页岩	2 911.98	—	—	—	0.43	1.45	0.20	0.48	0.60	0.81	441	0.85	170	43	51
	Z1-4	灰黑色页岩	2 936.88	4.49	30.7	69.3	0.73	2.47	0.30	0.65	1.09	1.97	446	1.36	181	20	54
	Z1-5	灰黑色页岩	2 954.38	—	—	—	0.51	4.59	0.18	0.27	0.90	4.71	450	1.47	311	18	35
	Z1-6	灰黑色泥岩	2 989.57	—	—	—	0.84	0.79	0.29	0.21	0.17	0.18	427	0.55	142	53	153
	Z1-7	灰黑色页岩	3 003.55	5.38	38.6	61.4	0.73	2.27	0.39	0.54	0.77	1.70	446	1.28	177	17	57
	Z1-8	深灰色泥岩	3 050.92	3.07	34.4	65.6	1.13	1.70	0.55	0.79	0.77	0.88	453	1.40	121	24	81
	Z1-9	灰白色细砂岩	3 065.30	—	—	—	0.03	0.06	0.10	0.14	0.06	0.05	461	0.39	15	64	8
	Z1-10	深灰色页岩	3 244.60	4.77	47.5	52.5	0.85	1.66	0.28	0.65	0.82	0.84	452	1.12	147	12	76
	Z1-11	深灰色泥岩	3 257.46	5.54	41.8	58.2	0.66	0.67	0.15	0.29	0.35	0.44	452	0.69	97	34	96
	Z1-12	深灰色泥岩	3 282.44	4.28	77.3	22.7	0.47	0.50	0.11	0.37	0.33	0.11	—	0.63	79	41	75
Z2	Z2-1	深灰色页岩	2 730.90	4.69	39.2	60.8	4.06	5.71	1.98	2.45	2.33	2.91	437	2.28	250	7	178
	Z2-2	深灰色页岩	2 733.90	3.77	50.6	49.4	2.87	3.54	1.37	1.82	1.45	3.30	434	1.74	203	11	165
	Z2-3	灰黑色页岩	2 875.67	3.65	64.9	35.1	0.90	1.61	0.53	0.65	0.66	0.83	417	0.93	172	33	97
	Z2-4	深灰色页岩	2 879.93	3.13	41.8	58.2	1.18	0.96	0.47	0.81	0.47	0.24	397	0.80	119	31	148
	Z2-5	深灰色页岩	2 883.40	4.59	70.2	29.8	0.82	0.71	0.26	0.58	0.47	0.15	—	0.79	89	48	104
	Z2-6	灰黑色页岩	2 887.40	—	—	—	0.83	1.00	0.34	0.58	0.57	0.26	398	0.84	119	34	99
	Z2-7	灰色泥质粉砂岩	2 891.85	4.64	66.1	33.9	0.06	0.07	0.03	0.02	0.03	0.05	460	0.34	21	91	18
	Z2-8	灰白色细砂岩	2 977.70	—	—	—	1.09	0.26	0.65	0.59	0.31	0.16	396	0.55	46	64	198
	Z2-9	浅灰色中砂岩	3 009.15	—	—	—	3.24	0.88	2.11	1.16	0.36	0.41	421	0.91	97	28	356
	Z2-10	灰黑色页岩	3 062.90	3.15	56.4	43.6	1.93	0.86	1.17	0.98	0.43	0.30	435	1.09	78	28	177
Z3	Z3-1	深灰色粉砂质泥岩	2 815.30	6.33	79.3	20.7	0.24	0.56	0.07	0.14	0.23	0.15	390	0.43	129	45	56
	Z3-2	灰黑色泥岩	2 823.02	5.58	67.9	32.1	1.98	3.14	0.73	1.13	1.08	1.19	440	1.18	266	19	168
	Z3-3	灰黑色泥岩	2 824.47	7.18	84.5	15.5	0.94	0.53	0.31	0.38	0.18	0.17	431	0.54	99	149	174
	Z3-4	灰黑色页岩	2 830.83	5.51	83.4	16.6	0.50	1.18	0.13	0.24	0.37	0.41	439	0.59	200	76	85
	Z3-5	深灰色粉砂质泥岩	2 913.80	4.13	77.7	22.3	0.21	0.38	0.05	0.07	0.11	0.10	438	0.40	95	124	53
	Z3-6	灰黑色页岩	2 922.85	3.83	89.9	10.1	1.39	0.96	0.29	0.65	0.39	0.22	426	0.70	136	66	199

注: S_1 为游离烃含量; S_2 为裂解烃含量; S_{1-1} 为轻质烃含量; S_{1-2} 为重质烃含量; S_{2-1} 为吸附烃含量; S_{2-2} 为干酪根裂解烃含量; T_{max} 为最高热解峰温; TOC 为总有机碳含量; HI 为氢指数; OI 为氧指数; OSI 为含油饱和度指数。“—”表示部分页岩和砂岩样品由于质量低于实验用量而未能获取有效气测孔隙度及含油、含水饱和度数据。

砂质页岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩和中砂岩等,页岩多为层状-纹层状,发育长英质纹层、云灰质纹层和泥质纹层。将刚出筒的岩心清洗泥浆后擦干,第一时间取大块岩心样品置于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内保存,以避免岩心内部流体组分散失;然后利用冷冻保存的岩心样品开展岩石热解、多温阶热解、含油和含水饱和度及二维核磁共振实验。

2.2 实验方法

2.2.1 二维核磁

二维核磁实验使用10 g左右的冷冻块状岩心样品,将样品称重后开展二维核磁测试,结束后将样品置于常温的干燥箱内静置至室温后进行二次称重,以矫正冷凝水影响下的实验结果。页岩样品中油和水的标定使用自制标样,利用移液枪分别取200,300,500,700和1 000 μL 去离子水和典型Z1井原油样品置于2 mL色谱瓶内制成标样。原油密度为 0.83 g/cm^3 ,去离子水密度为 1.00 g/cm^3 ,分别对空色谱瓶和各个标样开展二维核磁测试。仪器采用苏州纽迈公司MesoMR23/12-060H-I型核磁共振仪,磁场强度为 $0.30 \pm 0.03\text{ T}$,主频率(SF)为12 MHz。二维核磁分析使用IR-CPMG回波序列,参数设置如下:回波间隔时间(TE)为0.02 ms,回波个数($NECH$)为2 000,等待时间(TW)为1 000 ms,累加次数(NS)为64。

2.2.2 岩石热解

岩石热解实验仪器为美国HAWK岩石热解仪,页岩样品在液氮冷冻条件下进行粉碎,以避免在碎样过程中轻烃受热逸散损失^[32]。岩石热解实验首先将页岩样品加热到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,获取游离烃含量(S_1);而后以 $25\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 加热到 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,获取裂解烃含量(S_2),最高热解峰温($T_{\max}$)来自于热解烃的裂解峰。多温阶热解实验的升温序列为:200 $^{\circ}\text{C}$ 恒温1 min获取游离烃中轻质烃含量(S_{1-1});然后以 $25\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升温至 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温1 min获取游离烃中重质烃含量(S_{1-2});再以 $25\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升温至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温1 min获取吸附烃含量(S_{2-1});最后以 $25\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升温至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温1 min获取干酪根裂解烃含量(S_{2-2})。

2.2.3 孔隙度与含油、含水饱和度

含油、含水饱和度测试采用共沸蒸馏法:取100 g左右的岩心样品敲碎至 1 cm^3 大小碎块,置于实验室自研的共沸蒸馏装置中淋浴3 d;利用甲苯进行浸泡并洗

油,通过加热($110\text{ }^{\circ}\text{C}$)使甲苯沸腾变成蒸汽进入冷凝管,样品中的水与甲苯一同蒸出,水蒸气经冷凝回流进入玻璃计量管定量,剩余甲苯回流至淋浴仓重新进行洗油循环使用;最后对收集到的水和油进行系统定量。共沸蒸馏实验剩余样品继续碎至40目大小并进行气测法孔隙度测试。

以上实验分析工作均在页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室完成。

3 实验结果

3.1 页岩地球化学特征与含油、含水饱和度

表1展示了本次研究页岩样品的地球化学参数和含油、含水饱和度数据。作为典型的陆相混积型页岩,南阳凹陷核桃园组页岩的地球化学指标在纵向上变化较为频繁,显示出较强的非均质性。总有机碳含量(TOC)分布于 $0.43\% \sim 2.28\%$,平均值为 1.00% ;氢指数(HI)分布于 $78 \sim 311\text{ mg/g}$,平均值为 152 mg/g ,生烃潜力显示出一定差异。热演化程度方面, $T_{\max}$ 主要分布于 $390 \sim 461\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均值为 $433\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明有机质总体处于生油阶段^[12]。

在含油性方面,整体非均质性较强。 S_1 分布在 $0.03 \sim 4.06\text{ mg/g}$,平均值为 1.05 mg/g ;其中 S_{1-1} 分布在 $0.03 \sim 2.11\text{ mg/g}$,平均值为 0.47 mg/g ; S_{1-2} 分布在 $0.02 \sim 2.45\text{ mg/g}$,平均值为 0.61 mg/g 。 S_2 分布在 $0.06 \sim 5.71\text{ mg/g}$,平均值为 1.48 mg/g ;其中 S_{2-1} 分布在 $0.03 \sim 2.33\text{ mg/g}$,平均值为 0.59 mg/g ; S_{2-2} 分布在 $0.05 \sim 4.71\text{ mg/g}$,平均值为 0.88 mg/g (图2a)。

在孔隙度及含油、含水饱和度方面,气测孔隙度分布在 $3.10\% \sim 7.18\%$,平均值为 4.69% 。共沸蒸馏法含油饱和度分布在 $10.1\% \sim 69.3\%$,平均值为 42.3% ;含水饱和度分布在 $30.7\% \sim 89.9\%$,平均值为 57.7% (图2b)。

3.2 二维核磁实验结果

Z1井原油标样的二维核磁 T_1 - T_2 图谱显示(图3),随原油质量的增加,在 $T_2 > 1\text{ ms}$ 的区域显示的信号面积以及信号强度逐渐增大,去离子水标样的 T_1 - T_2 图谱与之类似。将扣除色谱瓶信号的标样信号量与标样质量进行投点,可获取页岩油和水信号的定量标线及相应截距值(Z1井原油为27.400,去离子水为19.042)(图4),用于计算页岩样品的二维核磁含油量和含水量。

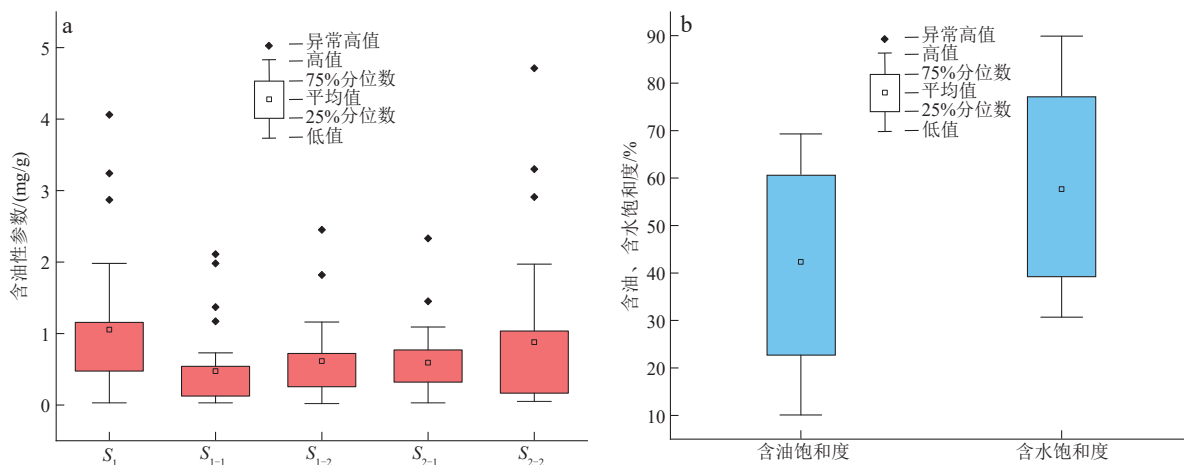


图2 南阳凹陷核桃园组页岩样品含油性(a)与含油、含水饱和度(b)特征

Fig. 2 Oil-bearing properties (a) and oil-water saturation (b) of shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

S₁. 游离烃含量; S₂. 裂解烃含量; S₁₋₁. 轻质烃含量; S₁₋₂. 重质烃含量; S₂₋₁. 吸附烃含量; S₂₋₂. 干酪根裂解烃含量

南阳凹陷页岩油二维核磁评价图版如图5所示,以Z2-1样品为例,将其二维核磁信号划分为5个区域:1号区域代表固体有机质信号($T_1/T_2 \geq 100$, $0.01 \text{ ms} \leq T_2 < 0.20 \text{ ms}$);2号区域代表吸附油信号($T_1/T_2 \geq 20$, $0.20 \text{ ms} \leq T_2 < 1.00 \text{ ms}$);3号区域代表游离油信号($T_1/T_2 \geq 20$, $T_2 \geq 1.00 \text{ ms}$);4号区域代表结构水信号($1 \leq T_1/T_2 < 100$, $0.01 \text{ ms} \leq T_2 < 0.20 \text{ ms}$);5号区域代表孔隙水信号($1 \leq T_1/T_2 < 20$, $0.20 \text{ ms} \leq T_2 < 500.00 \text{ ms}$)。

考虑到济阳坳陷和南阳凹陷页岩油主要目的层同属古近系,因此参考前者的页岩油二维核磁 T_1 - T_2 评价图版^[13],并加以改进,主要是将5号区域与2号、3号区域的分界线由 $T_1/T_2 = 10$ 改为 $T_1/T_2 = 20$,以更好地对孔隙水与原油信号加以区分;5号区域的右侧边界线由 $T_2 = 10 \text{ ms}$ 改为 $T_2 = 500 \text{ ms}$,对全部孔隙水信号加以统计。这是由于实验采用冷冻岩心样品,游离油和孔隙水的保留程度更高,进而波及更大范围的信号面积,在 $T_2 \geq 10 \text{ ms}$ 区域出现了更多孔隙水和游离油的信号。图6展示了部分页岩样品的二维核磁 T_1 - T_2 图谱,可以看出5号区域孔隙水表现出最高的信号强度,其次是4号区域结构水,而2号区域吸附油和3号区域游离油的信号强度则相对较低。这反映冷冻的页岩样品在常温测试过程中,其表面会因为附着冷凝水而增大5号区域孔隙水的信号强度,但同时能够对易于逸散的原油轻质组分的信号进行有效采集,而冷凝水对核磁含水量分析的影响能够凭借干燥后的二次称重加以矫正。此外,2号、3号和5号区域的信号面积出现了一定程度的交错和叠置现象,表明样品内保留了丰富的游离油轻质组分和游离态孔隙水。在5号区域内部, T_2 大于10 ms

的信号主要源于部分大孔和微裂缝中的水,而 T_2 小于10 ms的信号主要源于纳米孔中的水^[19],表明南阳凹陷页岩孔隙类型和孔隙结构复杂,也反映济阳坳陷页岩油二维核磁 T_1 - T_2 评价图版在其他探区应用过程中加以调整的必要性。

4 讨论

4.1 烃源岩品质与含油饱和度指数

生烃潜量($S_1 + S_2$)通常用于评价烃源岩有机质的潜在生烃量^[32]。结合前人对陆相页岩烃源品质分类的研究成果^[33-34],根据总有机碳含量和生烃潜量分布特征,将泥页岩烃源岩品质划分为差、中、好、优质4种类型,南阳凹陷页岩样品主要分布在中-好烃源岩类型(图7a)。氢指数和氧指数(OI)评价图版表明页岩有机质类型具有非均质性(图7b)。

含油饱和度指数(OSI)已被广泛应用于页岩含油性可动性评价^[8]。国外页岩油勘探开发实践显示,OSI值平均高于100 mg/g的层段具有页岩油地质勘探的潜力^[8],图7c显示部分页岩样品OSI值达到了100 mg/g以上。游离烃含量($S_{1-1} + S_{1-2}$)与总烃含量($S_{1-1} + S_{1-2} + S_{2-1}$)比值分布在56.5 ~ 73.8%,平均值为62.8%;其中轻质游离烃含量(S_{1-1})为8.3 ~ 58.1%,平均值为25.5%;重质游离烃含量(S_{1-2})为17.7 ~ 48.9%,平均值为36.0%。这表明页岩油以游离烃贡献为主,而游离烃中质组分占比较高。吸附烃作为页岩油的一种赋存形式,包括重烃和极性较强的胶质、沥青质等吸附态物质,主要吸附于有机质的表面,因而包含在裂解烃

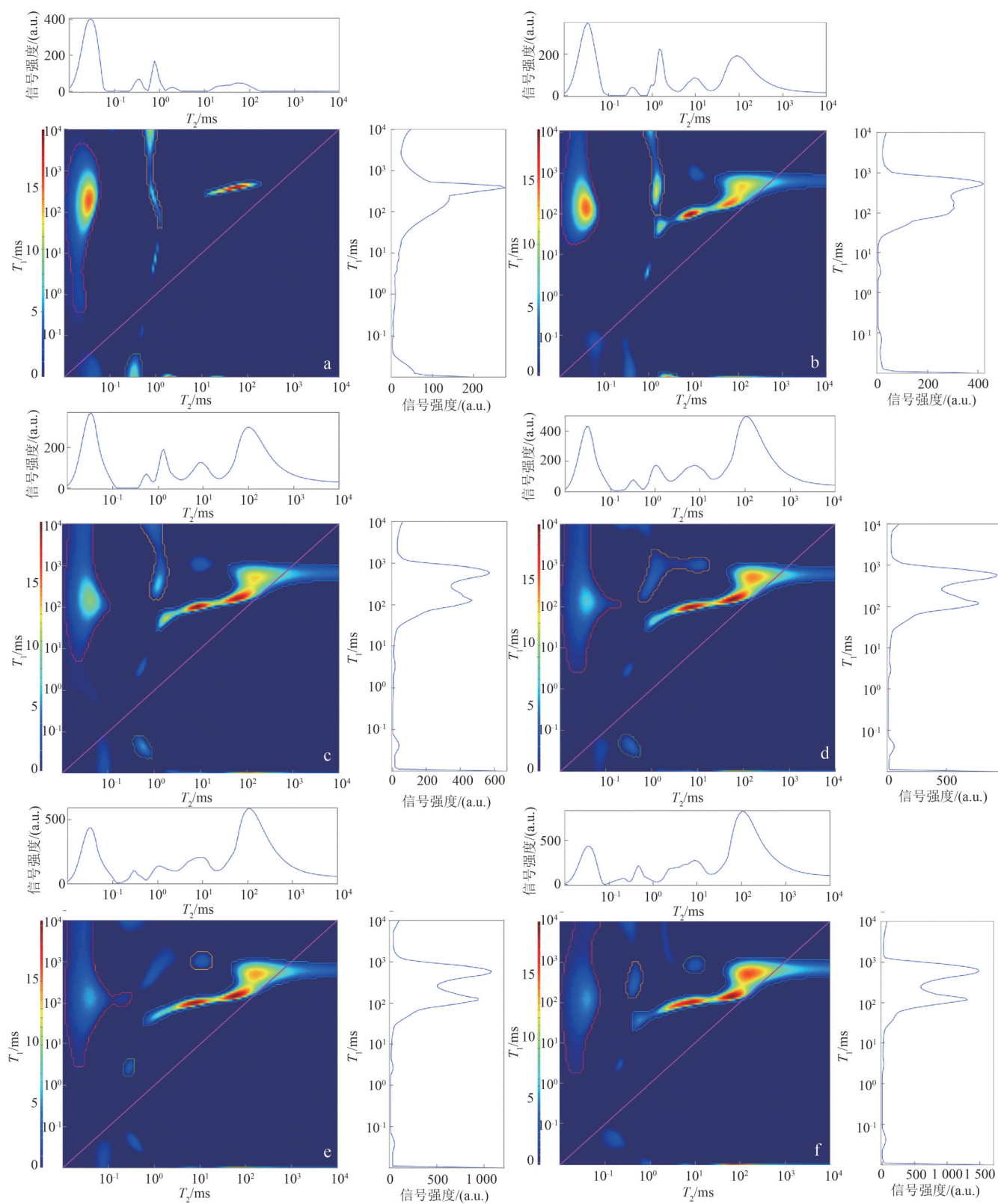


图3 南阳凹陷Z1井原油标样二维核磁 T_1 - T_2 图谱

Fig. 3 2D NMR T_1 - T_2 spectra of standard reference samples of crude oil from well Z1, Nanyang Sag

a. 空瓶; b. 空瓶 + 200 μ L原油; c. 空瓶 + 300 μ L原油; d. 空瓶 + 500 μ L原油; e. 空瓶 + 700 μ L原油; f. 空瓶 + 1 000 μ L原油

中,前人通过多温阶热解实验加以验证并通过350~450 $^{\circ}$ C的热解温度进行定量^[14],图7d显示多温阶热解

吸附烃含量(S_{2-1})与TOC具备较强的正相关性。以上特征表明TOC对游离烃和吸附烃的富集均起到促进

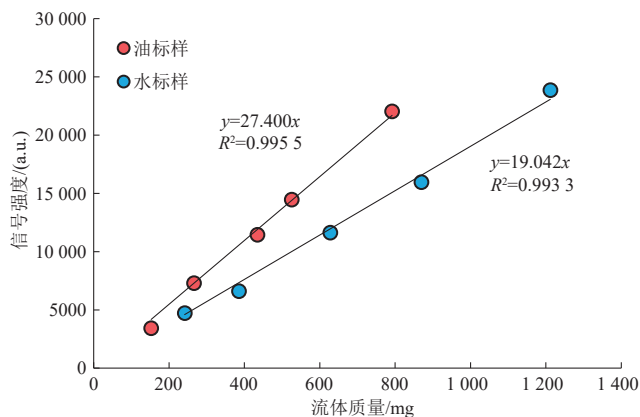
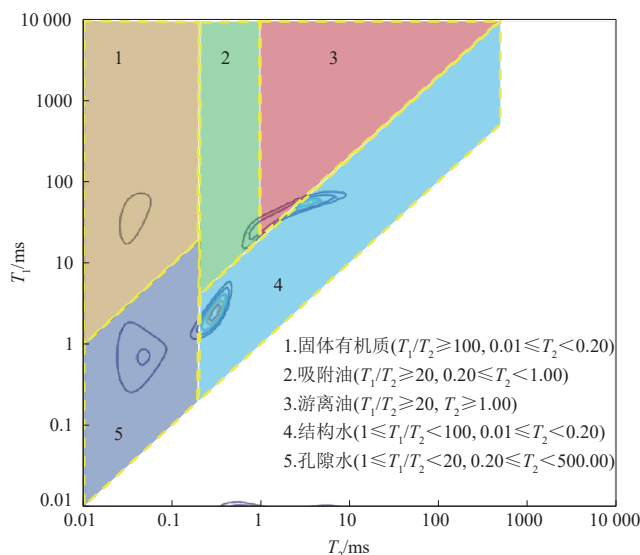


图4 南阳凹陷Z1井原油和去离子水二维核磁实验标线

Fig. 4 NMR experiment-derived calibration curves of crude oil and deionized water from well Z1, Nanyang Sag

图5 南阳凹陷核桃园组页岩油二维核磁 T_1 - T_2 评价图版
(以样品 ZY2-1 为例)Fig. 5 2D NMR T_1 - T_2 spectrum-based evaluation chart for shale oil in the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag (exemplified by sample ZY2-1)

作用。

4.2 二维核磁含油性

如前所述,二维核磁含油性分析不限制样品状态,可以通过原始冷冻状态块状样品开展实验以最大限度地保留页岩油轻质组分,确保含油性评价结果的真实性^[35-36]。不同页岩油样品可能因岩石物性、孔隙结构、热演化程度等差异而在二维核磁 T_1 - T_2 图谱上显示出不同的信号分布特征。前期的研究大多在核磁 T_1 - T_2 图谱上划定了页岩中各类流体的大致分布范围,但未能进行定量评价^[13,19,23-24]。本次研究在获取单位

样品质量的 T_1 - T_2 图谱的分区信号后,进一步结合 Z1 井原油和去离子水的标线以及流体相对含量与核磁信号的转化系数,实现了对页岩样品游离油、吸附油和孔隙水的系统定量(表2)。可以看出,通过二维核磁实验参数定量计算的游离油和吸附油含量分别与多温阶热解游离烃含量($S_{1-1} + S_{1-2}$)和吸附烃含量(S_{2-1})具有较好的对应关系。其中,游离油含量分布在 0.25 ~ 5.28 mg/g,平均值为 1.39 mg/g;吸附油含量分布在 0 ~ 3.57 mg/g,平均值为 0.77 mg/g。二者与游离烃和吸附烃含量的相关系数(R^2)分别为 0.467 1 和 0.446 5(图8),并且游离油和吸附油含量的平均值要略高于游离烃和吸附烃含量的平均值,表明利用冷冻状态页岩样品开展二维核磁含油性分析对烃类的保留效果要优于冷冻碎样条件下的岩石热解分析。有意义的是,含油性相对较低($S_1 < 1$ mg/g)的页岩样品在相关性分析过程中并未表现出较强的离散性,显示出二维核磁实验结果的可靠性。

4.3 二维核磁孔隙度及含油、含水饱和度

作为页岩油地质甜点评价和储量评估的关键参数,页岩含油饱和度最早在国家标准《页岩油地质评价方法》(GB/T 38718—2020)中被提出并作为含油性评价指标中的关键参数,通过 Dean Stark 方法、GRI 方法和核磁共振方法来获取^[37]。2023 年最新的国家标准《页岩油地质甜点评价技术规范》(GB/T 43126—2023)中明确提出将含油饱和度作为取心测试资料,推荐结合实验测试和测井资料来获取并作为页岩油储量评价的必要参数^[38]。因此在系统取心时,通常会利用密闭取心结合现场蜡封的方法最大程度地保留样品中的流体,以提高含油饱和度测量结果的可靠性。

在通过二维核磁 T_1 - T_2 图谱分析获取页岩样品游离油、吸附油和孔隙水含量的基础上,结合流体的相对密度可以进一步计算出核磁有效孔隙度和含油、含水饱和度(表2)。其中,核磁有效孔隙度为游离油、吸附油和孔隙水体积之和与页岩样品体积的比值,含油、含水饱和度为原油和孔隙水的相对占比。结果表明,页岩样品的核磁有效孔隙度分布在 1.83% ~ 7.79%,平均值为 4.62%,略低于气测孔隙度均值,并且二者没有明显的相关性(图9a),这是由于样品性状和实验方法影响所致。气测孔隙度可能在碎样干燥过程中受热损失了部分结构水,并破坏了页岩样品的原始孔隙网络与层理微裂缝结构。

页岩样品的二维核磁含油饱和度分布在 4.02% ~ 42.92%,平均值为 16.75%,与共沸蒸馏实验结果相

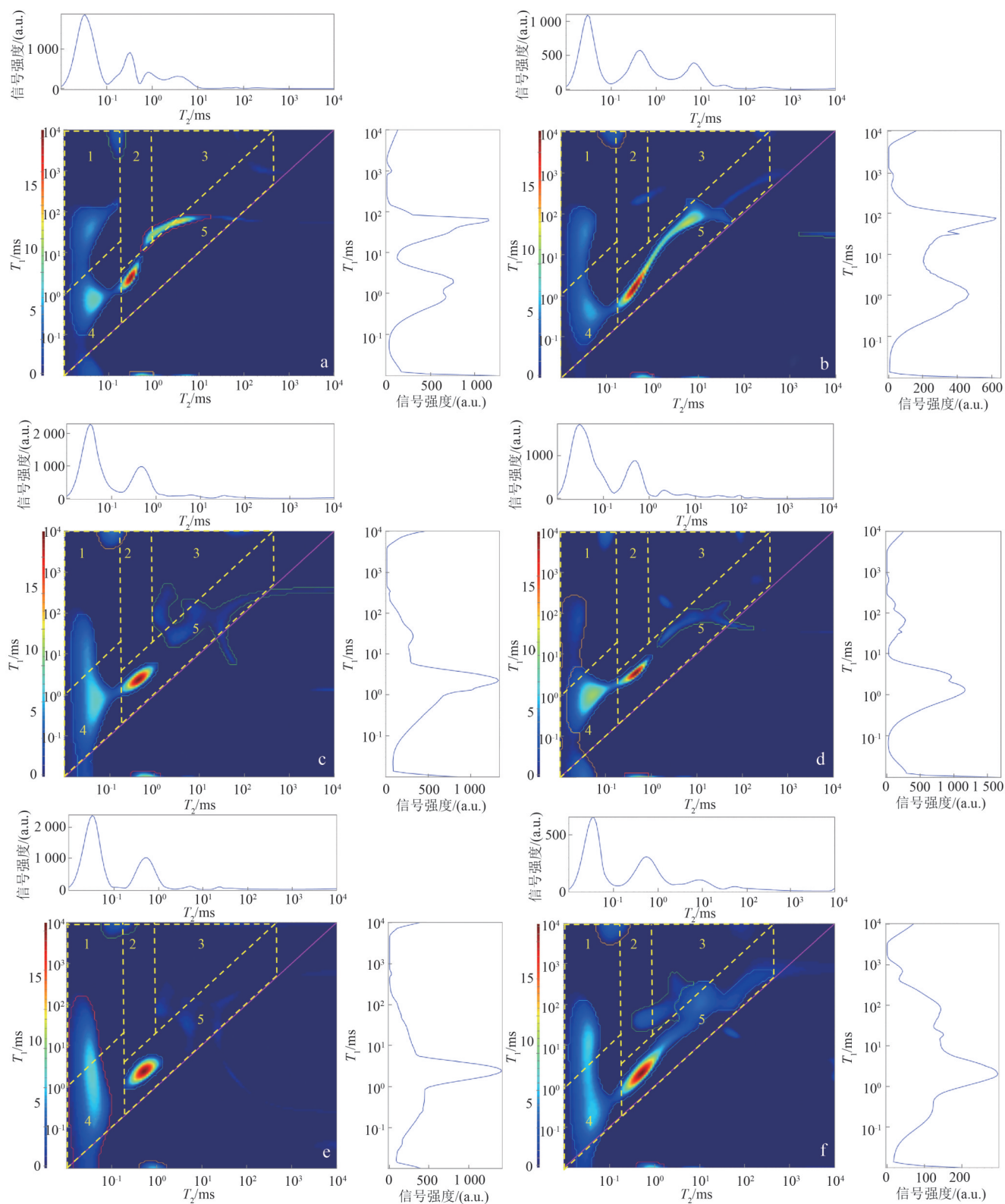


图6 南阳凹陷核桃园组页岩样品二维核磁 T_1 - T_2 图谱

Fig. 6 2D NMR T_1 - T_2 spectra of shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

a. 样品Z2-1; b. 样品Z2-2; c. 样品Z2-3; d. 样品Z2-4; e. 样品Z2-5; f. 样品Z2-6

(图中的数字含义参考图5中的文字说明。)

比,两种实验方法获取的含油饱和度仅表现出微弱的正相关关系(图9b),反映出孔隙度计算结果差异的影

响。此外,页岩样品的孔隙水含量整体要高于游离油和吸附油含量,表明孔隙流体主要由孔隙水部分贡献。

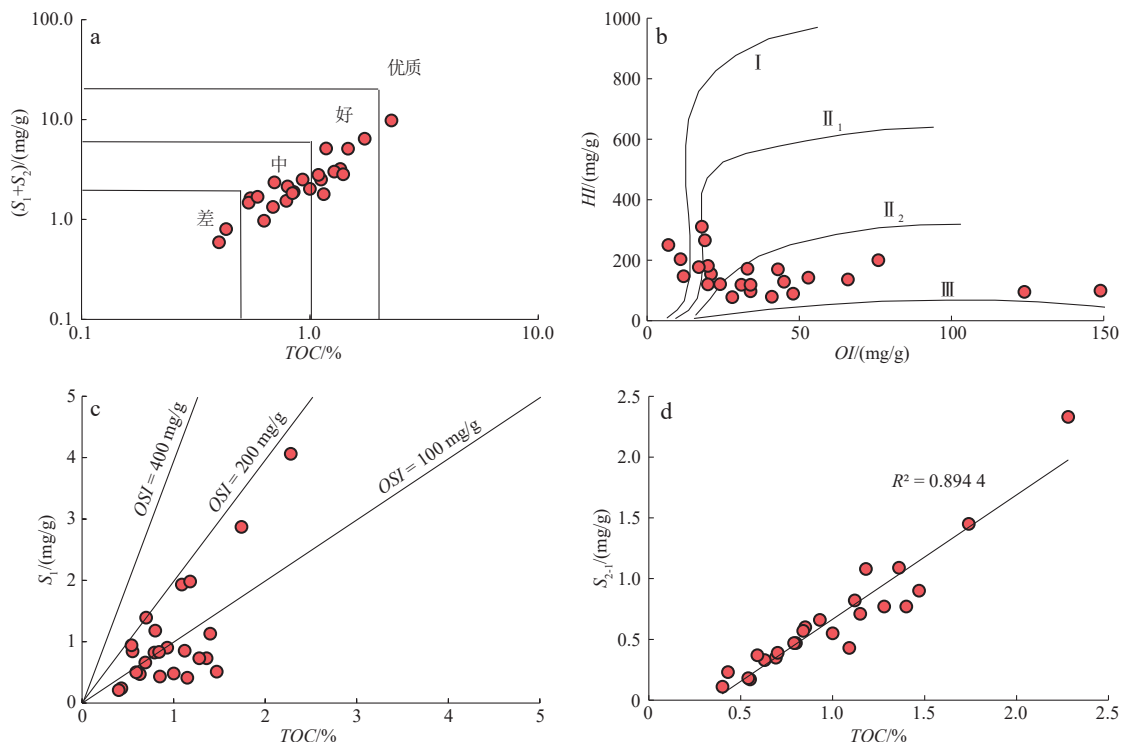


图7 南阳凹陷核桃园组页岩样品岩石热解参数的相关性

Fig. 7 Correlations among the Rock-Eval pyrolysis parameters of shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

a. 烃源岩评价图版; b. 有机质类型评价图版; c. S_1 与 TOC 相关性评价; d. S_{2-1} 与 TOC 相关性评价 S_1 为游离烃含量; S_2 为裂解烃含量; TOC 为总有机碳含量; HI 为氢指数; OI 为氧指数

与此同时,页岩二维核磁含油、含水饱和度分别与含油、含水量呈现出较强的正相关关系(图9c, d)。以上特征表明冷冻状态样品的二维核磁测试对流体的保存效果较好。

4.4 页岩油勘探有利层段

页岩油勘探有利层段通常具有含油性好、储集性优、原油可动性好等特点^[1-5, 39-43]。中国陆相页岩油勘探开发实践表明,不同盆地/凹陷富有机质泥页岩层系含油性在纵向上存在较强的非均质性^[42-43]。本次研究在二维核磁各参数与多温阶热解、共沸蒸馏实验结果相互验证的基础上,对研究区页岩油勘探有利层段进行了综合评价。如图10,南阳凹陷东南部深凹带Z1井核二段和核三段页岩含油性存在明显差异,整体而言游离油和吸附油量随埋深呈先增加、后降低的趋势,并且分别在核二段Ⅲ亚段②小层和①小层较好。可动性通过游离油/总油含量比和 OSI 来评价,纵向上总体呈递增趋势,同时在核二段Ⅲ亚段②小层明显优于其他小层。储集性通过孔隙度和含油饱和度来评价,可以看出页岩在孔隙度整体差异不大的情况下,含油饱和度和在纵向上呈递减趋势,表明研究区页岩储集物性的差异可能对页岩油有利层段评价影响比较有限,这与

准噶尔盆地玛湖凹陷风城组、济阳拗陷古近系沙河街组与泌阳凹陷同层段表现出的“高含油性与高储集性相匹配”的耦合特征^[4, 40, 44-45]明显不同。究其原因,一方面南阳凹陷总体处于正常地层压力状态,主体地层压力系数介于0.92~1.02^[30],反映地层流体的抗压保孔能力相对较弱;另一方面研究区烃源条件比较有限,Z1井取心段核二段 TOC 平均值为0.83%,核三段平均值为0.74%^[30],在目前生油阶段可能更多表现为“自生自储”,运移程度有限, S_1 与 TOC 具有一定正相关性(图7c)。

综合含油性、可动性与储集性参数,初步评价Z1井页岩油取心段勘探有利层段主要位于核二段Ⅲ亚段②小层,该小层游离油含量相对较高且原油可动条件相对较好。

5 结论

1) 以南襄盆地南阳凹陷核桃园组页岩层系为例,通过原始页岩油和水的二维核磁系统定标实验和原始冷冻状态页岩样品的二维核磁分析,建立了南阳凹陷页岩油二维核磁评价图版,对页岩样品中不同赋存状态的油和水实现了定量。

表2 南阳凹陷核桃园组页岩样品二维核磁油、水含量等关键参数计算结果

Table 2 2D NMR-derived key parameters including the oil and water contents of shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

样品号	游离油含量/(mg/g)	吸附油含量/(mg/g)	孔隙水含量/(mg/g)	有效孔隙度/%	含油饱和度/%	含水饱和度/%
Z1-1	1.05	1.06	6.83	2.48	27.16	72.84
Z1-2	1.20	1.40	5.07	2.18	38.19	61.81
Z1-3	0.97	0.91	13.36	4.14	14.54	85.46
Z1-4	0.72	1.35	11.25	3.64	18.14	81.86
Z1-5	0.94	2.56	14.22	4.89	22.87	77.13
Z1-6	0.70	1.65	5.20	2.13	35.25	64.75
Z1-7	1.79	1.75	14.25	4.91	23.04	76.96
Z1-8	1.44	0.85	7.83	2.81	26.05	73.95
Z1-9	0.67	0.02	16.09	4.48	4.88	95.12
Z1-10	0.25	0.30	10.22	2.88	6.04	93.96
Z1-11	1.11	0.49	22.27	6.41	7.94	92.06
Z1-12	0.93	0.12	24.14	6.73	4.97	95.03
Z2-1	5.28	3.57	18.75	7.79	36.25	63.75
Z2-2	0.62	0.48	24.28	6.79	5.21	94.79
Z2-3	1.79	0.06	18.61	5.52	10.72	89.28
Z2-4	0.80	0	12.56	3.58	7.12	92.88
Z2-5	1.64	0.30	24.03	6.99	8.87	91.13
Z2-6	1.03	0.52	7.28	2.43	20.46	79.54
Z2-7	0.54	0.21	21.54	5.95	4.02	95.98
Z2-8	1.21	0.08	5.36	1.83	22.43	77.57
Z2-9	4.26	0.43	7.52	3.49	42.92	57.08
Z2-10	2.18	0	13.42	4.25	16.34	83.66
Z3-1	1.37	0.09	24.36	6.92	6.72	93.28
Z3-2	1.92	1.14	14.60	4.85	20.17	79.83
Z3-3	0.88	1.19	18.50	5.56	11.90	88.10
Z3-4	1.24	0	18.41	5.28	7.51	92.49
Z3-5	0.74	0	14.66	4.12	5.73	94.27
Z3-6	1.69	1.03	21.04	6.44	13.48	86.52

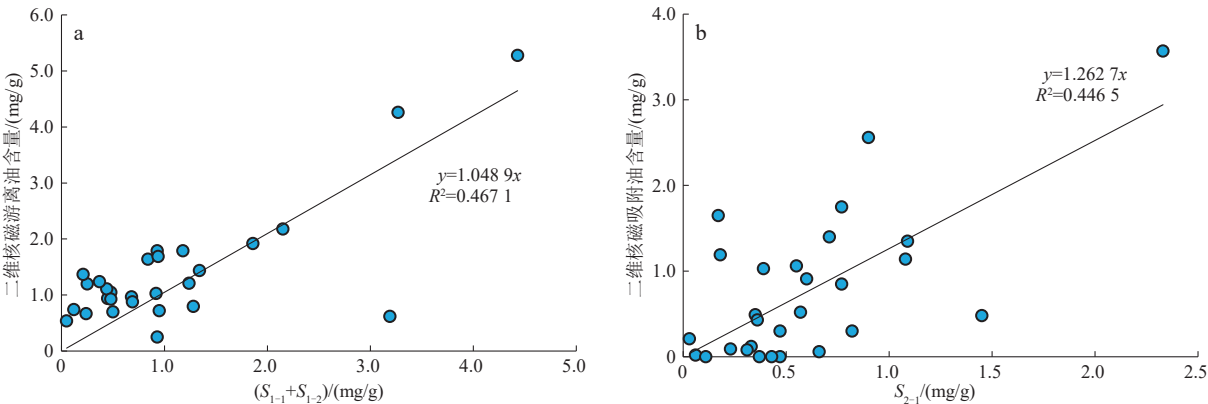


图8 南阳凹陷核桃园组页岩样品二维核磁游离油和吸附油与多温阶热解游离烃和吸附烃的相关性

Fig. 8 Correlations of the free and absorbed oil contents derived using 2D NMR with the free and absorbed hydrocarbon contents determined using multi-step heating-programmed pyrolysis, respectively for shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

a. 二维核磁游离油含量与多温阶热解游离烃含量($S_{1-1}+S_{1-2}$)的关系;b. 二维核磁吸附油含量与多温阶热解吸附烃含量(S_{2-1})的关系

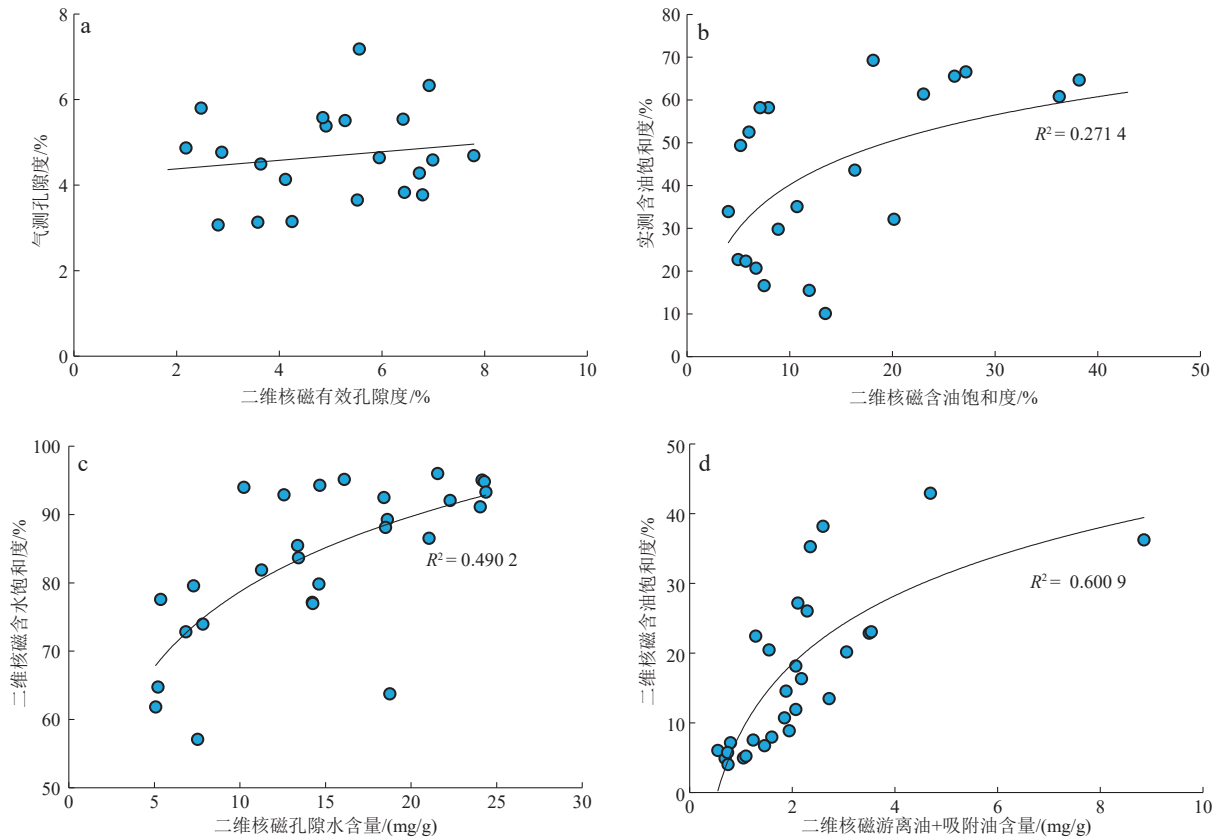


图9 南阳凹陷核桃园组页岩样品二维核磁实验参数与岩石物性和实测含油饱和度的相关性

Fig. 9 Correlations of 2D NMR experimental parameters with petrophysical properties and measured oil saturation of shale samples from the Hetaoyuan Formation, Nanyang Sag

a. 二维核磁有效孔隙度与气测孔隙度的关系;b. 二维核磁含油饱和度与实测含油饱和度的关系;c. 二维核磁孔隙水含量与二维核磁含水饱和度的关系;d. 二维核磁游离油+吸附油含量与二维核磁含油饱和度的关系

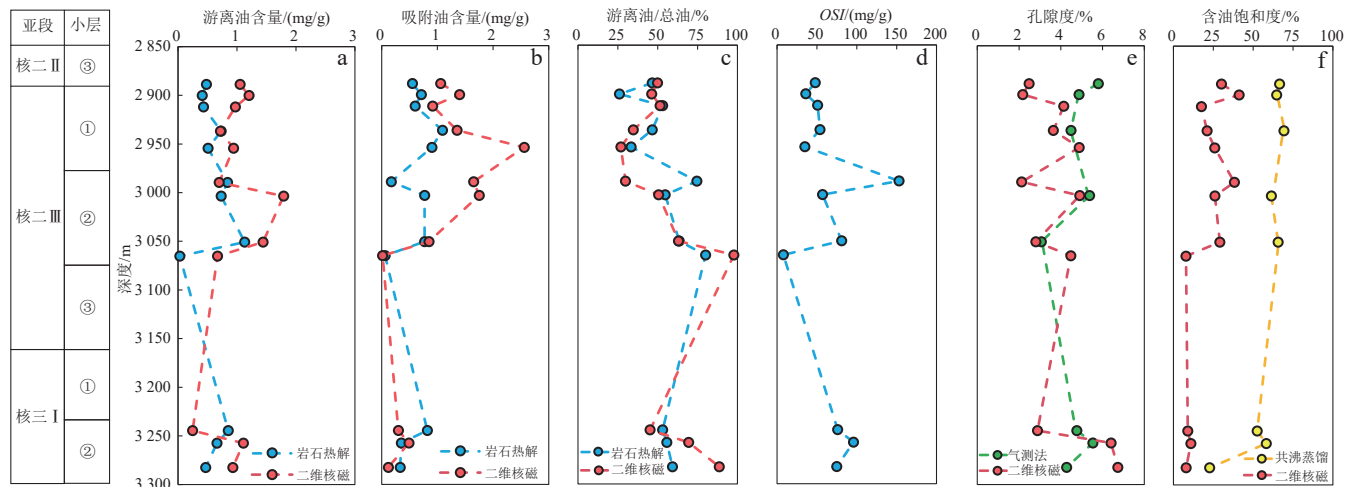


图10 南阳凹陷核桃园组页岩含油性、可动性和储集性特征(Z1井)

Fig. 10 Oil-bearing properties, oil mobility, and reservoir quality of shales in the Hetaoyuan Formation, well Z1, Nanyang Sag

2) 二维核磁实验针对同一块样品能够提供丰富的评价参数,包括含油性、储集性和可动性,且各参数与多温阶热解、共沸蒸馏实验结果具有较好的相关关系,为页岩油选区选层提供了关键实验依据。明确了

Z1井取心段页岩油勘探有利层段主要位于核二段Ⅲ亚段②小层。

3) 二维核磁在页岩油地质评价领域具有显著的技术优势和应用潜力,相较于传统的岩石热解,突出在

于能同时获取游离油、吸附油和孔隙水含量等多个关键定量参数;对不规则状样品开展分析,保留页岩油轻质组分;测试过程对样品无损,同一样品可重复利用于其他实验从而避免非均质性影响。

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 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.
- [3] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [4] 刘惠民. 济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87.
LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 73-87.
- [5] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [6] 李军, 邹友龙, 路菁. 陆相页岩油储层可动油含量测井评价方法——以苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 816-826.
LI Jun, ZOU Youlong, LU Jing. Well-log-based assessment of movable oil content in lacustrine shale oil reservoirs: A case study of the 2nd member of the Paleogene Funing Formation, Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 816-826.
- [7] 文杰, 徐尚, 苟启洋, 等. 页岩油微运移研究进展及意义[J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 1-14.
WEN Jie, XU Shang, GOU Qiyang, et al. Research status and significance of shale oil micromigration [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 1-14.
- [8] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2—Shale-oil resource systems [M]//BREYER J A. Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 89-119.
- [9] 孙中良, 王芙蓉, 韩元佳, 等. 潜江凹陷盐间页岩油储层孔隙结构分形表征与评价[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 125-137.
SUN Zhongliang, WANG Furong, HAN Yuanjia, et al. Characterization and evaluation of fractal dimension of intersalt shale oil reservoirs in Qianjiang Depression [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 125-137.
- [10] 魏威, 王飞宇. 页岩油气资源体系成藏控制因素与储层特征[J]. 地质科技情报, 2014, 33(1): 150-156.
WEI Wei, WANG Feiyu. The controlling factors of shale resource system and reservoir characteristics [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2014, 33(1): 150-156.
- [11] ESPITALIE J, MADEC M, TISSOT B, et al. Source rock characterization method for petroleum exploration [C]//Offshore Technology Conference, Houston, 1977. Houston: OTC, 1977: OTC-2935-MS.
- [12] PETERS K E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(3): 318-329.
- [13] LI Jinbu, JIANG Chunqing, WANG Min, et al. Adsorbed and free hydrocarbons in unconventional shale reservoir: A new insight from NMR T_1 - T_2 maps [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 116: 104311.
- [14] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842-849.
JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(6): 842-849.
- [15] 李楚雄, 申宝剑, 卢龙飞, 等. 松辽盆地沙河子组页岩孔隙结构表征——基于低场核磁共振技术[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 468-476.
LI Chuxiong, SHEN Baojian, LU Longfei, et al. Pore structure characterization of Shahezi Formation shale in Songliao Basin: Based on low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 468-476.
- [16] 孙中良, 李志明, 申宝剑, 等. 核磁共振技术在页岩油气储层评价中的应用[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 930-940.
SUN Zhongliang, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al. NMR technology in reservoir evaluation for shale oil and gas [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(5): 930-940.
- [17] LIU Yong, YAO Yanbin, LIU Dameng, et al. Shale pore size classification: An NMR fluid typing method [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 96: 591-601.
- [18] LI Chuxiong, SHEN Baojian, LU Longfei, et al. Quantitative characterization of shale pores and microfractures based on NMR T_2 Analysis: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southeast Sichuan Basin, China [J]. Processes, 2023, 11(10): 2823.
- [19] KHATIBI S, OSTADHASSAN M, XIE Z H, et al. NMR relaxometry a new approach to detect geochemical properties of organic matter in tight shales [J]. Fuel, 2019, 235: 167-177.
- [20] LIU Zhengshuai, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Application of

- nuclear magnetic resonance (NMR) in coalbed methane and shale reservoirs: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 218: 103261.
- [21] FLEURY M, ROMERO-SARMIENTO M. Characterization of shales using T_1 - T_2 NMR maps[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 137: 55-62.
- [22] KAUSIK R, FELLAH K, FENG Ling, et al. High- and low-field NMR relaxometry and diffusometry of the Bakken petroleum system[J]. *Petrophysics*, 2017, 58(4): 341-351.
- [23] LI Jinbu, HUANG Wenbiao, LU Shuangfang, et al. Nuclear magnetic resonance T_1 - T_2 map division method for hydrogen-bearing components in continental shale[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(9): 9043-9054.
- [24] YAN Weichao, SUN Jianmeng, CHENG Zhigang, et al. Petrophysical characterization of tight oil formations using 1D and 2D NMR[J]. *Fuel*, 2017, 206: 89-98.
- [25] 白龙辉, 柳波, 迟亚奥, 等. 二维核磁共振技术表征页岩所含流体特征的应用——以松辽盆地青山口组富有机质页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1389-1400.
- BAI Longhui, LIU Bo, CHI Yaao, et al. 2D NMR studies of fluids in organic-rich shale from the Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1389-1400.
- [26] 石玉江, 蔡文渊, 刘国强, 等. 页岩油储层孔隙流体的全直径岩心二维核磁共振图谱特征及评价方法[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(3): 132-144.
- SHI Yujiang, CAI Wenyuan, LIU Guoqiang, et al. Full diameter core 2D NMR spectrum characteristics of pore fluid in shale oil reservoir and evaluation method[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 132-144.
- [27] 李庆峰, 闫学洪, 郑建东, 等. 页岩油储层核磁共振 T_1 - T_2 谱响应特征及应用——以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2024, 48(3): 89-101, 116.
- LI Qingfeng, YAN Xuehong, ZHENG Jiandong, et al. Characteristics and application of nuclear magnetic resonance T_1 - T_2 spectrum in shale oil reservoirs: A case study of Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024, 48(3): 89-101, 116.
- [28] 方锐, 蒋裕强, 杨长城, 等. 四川盆地侏罗系凉高山组不同岩性组合页岩油赋存状态及可动性[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 752-769.
- FANG Rui, JIANG Yuqiang, YANG Changcheng, et al. Occurrence states and mobility of shale oil in different lithologic assemblages in the Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 752-769.
- [29] LI Jinbu, WANG Min, FEI Junsheng, et al. Determination of in situ hydrocarbon contents in shale oil plays. Part 2: Two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D NMR) as a potential approach to characterize preserved cores[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 145: 105890.
- [30] 王良军, 李连生, 朱颜, 等. 陆相断陷淡水湖盆页岩油富集条件及勘探潜力——以南襄盆地南阳凹陷古近系核桃园组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(1): 123-135.
- WANG Liangjun, LI Liansheng, ZHU Yan, et al. Enrichment conditions and exploration potential of shale oil in continental faulted freshwater lacustrine basins: A case study of the Paleogene Hetaoyuan Formation in the Nanyang Sag, Nanxiang Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(1): 123-135.
- [31] 罗曦, 罗家群, 杨云飞, 等. 南阳凹陷西部地区同沉积断裂与油气聚集[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(3): 20-26.
- LUO Xi, LUO Jiaqun, YANG Yunfei, et al. Synsedimentary faults and hydrocarbon accumulation in the west of Nanyang Sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(3): 20-26.
- [32] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 页岩油探井现场地质评价实验流程与技术进展[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 571-582.
- JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Experimental procedures of well-site geological evaluation for shale oil and related technological progress[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 571-582.
- [33] 李志明, 徐二社, 秦建中, 等. 烃源岩评价中的若干问题[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(6): 8-12, 27.
- LI Zhiming, XU Ershe, QIN Jianzhong, et al. Some problems on the evaluation of source rock[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2010, 25(6): 8-12, 27.
- [34] 李志明, 孙中良, 鲍云杰, 等. 冀北坳陷中元古界洪水庄组页岩油勘探前景探讨[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 29-40.
- LI Zhiming, SUN Zhongliang, BAO Yunjie, et al. Discussion on prospecting shale oil potential of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in the Jibei Depression[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(1): 29-40.
- [35] 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组7段3亚段页岩油勘探前景探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 558-570.
- LI Zhiming, TAO Guoliang, LI Maowen, et al. Discussion on prospecting potential of shale oil in the 3rd sub-member of the Triassic Chang 7 member in Binchang Block, southwestern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 558-570.
- [36] 金芸芸, 李楚雄, 王勇, 等. 南襄盆地泌阳凹陷古近系核桃园组页岩含油性及其类质赋存特征[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(2): 354-365.
- JIN Yunyun, LI Chuxiong, WANG Yong, et al. Oil-bearing potential and hydrocarbon occurrence characteristics of shale in Paleogene Hetaoyuan Formation in Biyang Sag, Nanxiang Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2024, 46(2): 354-365.
- [37] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [38] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 页岩油地质甜点评价技术规范: GB/T 43126-2023

- [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for the geological sweet spot evaluations of shale oil: GB/T 43126-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [39] 郭旭升, 申宝剑, 王鹏威, 等. 基于源-储单元的页岩油气甜点段评价优选新思路[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 1-14.
- GUO Xusheng, SHEN Baojian, WANG Pengwei, et al. A new approach to the evaluation and optimal selection of shale oil and gas sweet-spot intervals based on source rock-reservoir units[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 1-14.
- [40] 李志明, 金芸芸, 李楚雄, 等. 南襄盆地泌阳凹陷渐新统核桃园组Ⅲ亚段页岩油富集模式——以中部深凹带YYY1井取心段为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 952-962.
- LI Zhiming, JIN Yunyun, LI Chuxiong, et al. Discussion on shale oil enrichment pattern in the Ⅲ submember of the third member of Oligocene Hetaoyuan Formation, Biyang Sag, Nanxiang Basin: A case study of cored interval of Well YYY1 in the central deep sag zone[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(5): 952-962.
- [41] 郭旭升, 申宝剑, 李志明, 等. 论我国页岩油气的统一性[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 889-905.
- GUO Xusheng, SHEN Baojian, LI Zhiming, et al. Discussion on the uniformity of shale oil and gas in China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(5): 889-905.
- [42] 杜心宇, 钱门辉, 刘雅慧, 等. 四川盆地复兴地区中-下侏罗统陆相页岩储层流体赋存规律与源-储耦合特征[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 1874-1891.
- DU Xinyu, QIAN Menhui, LIU Yahui, et al. Fluid occurrence patterns and source rock-reservoir coupling characteristics of the Middle-Lower Jurassic continental shale reservoirs in the Fuxing area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1874-1891.
- [43] 何晋译, 冷筠滢, 何文军, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组不同岩相泥质烃源岩品质与含油性特征——以J10025井为例[J]. 石油实验地质, 2025, 47(3): 606-620.
- HE Jinyi, LENG Junying, HE Wenjun, et al. Quality and oil-bearing properties of argillaceous hydrocarbon source rocks across different lithofacies of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin: A case study of Well J10025[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2025, 47(3): 606-620.
- [44] 孙中良, 李志明, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩源-储协同演化机理[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 2012-2025.
- SUN Zhongliang, LI Zhiming, HE Wenjun, et al. Mechanisms behind source rock-reservoir coevolution of shales in the Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 2012-2025.
- [45] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.

(编辑 张玉银)