

引用本文: 贾梦瑶, 鲍云杰, 李志明, 等. 陆相页岩层系岩心含水量现场分析及初步应用[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 420-427. DOI: 10.11781/sysydz202402420.

JIA Mengyao, BAO Yunjie, LI Zhiming, et al. Technique and preliminary application of field analysis of water content for continental shale cores[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(2): 420-427. DOI: 10.11781/sysydz202402420.

# 陆相页岩层系岩心含水量现场分析及初步应用

贾梦瑶<sup>1,2,3,4</sup>, 鲍云杰<sup>1,2,3,4</sup>, 李志明<sup>1,2,3,4</sup>, 冷筠滢<sup>1,2,3,4</sup>,  
刘旺威<sup>1,2,3,4</sup>, 何晋译<sup>1,2,3,4</sup>, 卢龙飞<sup>1,2,3,4</sup>, 黎茂稳<sup>3,5</sup>

1. 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;
2. 中国石油化工集团公司 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;
3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 江苏 无锡 214126;
4. 国家能源页岩油研发中心, 江苏 无锡 214126;
5. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206

**摘要:** 陆相页岩层系的流体分析是页岩油选层评价的重要基础。针对陆相页岩层系流体表征技术的现状和钻井现场的需求, 基于岩心样品中水分易于散失的特性, 探索建立了适用于井场基于微波的岩样含水快速测试方法。岩心出筒擦除表面的钻井液之后, 第一时间采集具有代表性的块状岩样加载到破碎主机上破碎处理呈颗粒状, 将颗粒状的样品倒入加载到微波含水测定仪的样品杯中, 2 s 后即可得到岩样水分的质量分数, 测试绝对误差平均 0.15%。初步应用研究表明: 一是岩样水分检测结果可以转换为水分在样品孔隙系统中占据的孔隙空间, 结合井场热解等资料快速计算样品的视孔隙度, 为井场决策提供数据支撑; 二是结合岩样块密度和热解数据等资料, 计算岩心样品的视含油饱和度和视含水饱和度, 实现井场岩样流体的快速评价。该方法的应用不需要对岩样进行洗油和烘干处理, 缩短了分析周期, 丰富了适用于井场的岩心孔隙度、流体分析实验技术手段和方法。

**关键词:** 岩心含水量; 视含油饱和度; 视含水饱和度; 视孔隙度; 陆相页岩; 井场分析技术

中图分类号: TE135

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz202402420

## Technique and preliminary application of field analysis of water content for continental shale cores

JIA Mengyao<sup>1,2,3,4</sup>, BAO Yunjie<sup>1,2,3,4</sup>, LI Zhiming<sup>1,2,3,4</sup>, LENG Junying<sup>1,2,3,4</sup>,  
LIU Wangwei<sup>1,2,3,4</sup>, HE Jinyi<sup>1,2,3,4</sup>, LU Longfei<sup>1,2,3,4</sup>, LI Maowen<sup>3,5</sup>

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
4. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
5. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China

**Abstract:** Fluid analysis of continental shale layers plays a crucial role in evaluating shale oil layer selection. Given the current state of technologies of fluid characterization for continental shale layers and well-site requirements, a rapid method for testing water content of rock sample was developed in this study which uses microwave and is ideal for well site. After removing drilling fluid from the core surface, rock samples are promptly collected and crushed into particles using a mill. These granular samples are then placed in the sample cups of a microwave water content tester. Within 2 seconds, mass percentage data for the rock water sample can be obtained, with an average absolute error of  $\pm 0.15\%$ . Initial application studies demonstrate promising prospects for moisture detection data in rock samples. Firstly, the water detection results can be used to calculate the pore

收稿日期 (Received): 2023-04-24; 修订日期 (Revised): 2024-02-20; 出版日期 (Published): 2024-03-28.

作者简介: 贾梦瑶 (1994—), 女, 工程师, 从事页岩油气评价研究。E-mail: jiamy975.syky@sinopec.com.

通信作者: 鲍云杰 (1963—), 男, 研究员, 从事测试技术与页岩油气评价研究。E-mail: baoyj.syky@sinopec.com.

基金项目: 中国石化“十四五”资源评价方法与数据库建设项目 (P23229) 和国家自然科学基金项目 (42090022) 联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

space occupied by water in the sample's pore system, enabling quick determination of the sample's apparent porosity when combined with well site pyrolysis data. Secondly, the apparent oil saturation and apparent water saturation of core samples can be calculated based on rock sample density and pyrolysis data, facilitating rapid evaluation of rock sample fluids at the well site. This method eliminates the washing and drying processes for rock samples, reduces analysis time, and consequently enhanced the experimental techniques for core porosity and fluid analysis at well sites.

**Key words:** core water content; apparent oil saturation; apparent water saturation; apparent porosity; continental shale; well site analysis technology

## 1 研究背景

页岩油是指赋存于页岩层系(包括层系内粉砂岩层、细砂岩层和碳酸盐岩层)中的石油<sup>[1]</sup>。北美海相页岩发育于构造背景相对稳定、沉积环境较为简单的前陆盆地和克拉通盆地,油层厚度大,连续性好,烃源岩热成熟度处于轻质油—凝析油窗口,具有较高的地层能量和可流动性,开发效益良好。而我国陆相页岩层系主要形成于断陷和拗陷湖盆,受构造演化改造作用较强,沉积环境变化大,烃源岩热演化程度以低—中为主,页岩层系的岩性、物性、含油(气)性以及页岩油物性非均质性<sup>[2-11]</sup>。通过地质理论创新和工程工艺技术攻关研究,在松辽、渤海湾、准噶尔、鄂尔多斯、四川、苏北等盆地页岩油的勘探开发已取得重大突破<sup>[12-23]</sup>。研究和实践表明,可压裂性是陆相页岩油勘探突破和效益开发的必要条件,可流动性是陆相页岩油高产的关键,含油性、储集性是陆相页岩油富集高产的基础<sup>[2]</sup>。

我国不同盆地陆相页岩层系的含油饱和度差异明显(图1),非均质性强,客观评价其含油性气

及其非均质性,在井场及时获取岩心中易于散失的油、气、水的第一手资料就显得格外重要。前人侧重于页岩层系含油性表征,提出了页岩油探井井场岩心处置流程和方法<sup>[25]</sup>,建立了基于热解分析资料的泥页岩含油性分析行业标准<sup>[26]</sup>。然而,页岩层系中油和水共存,可动水和吸附水占据有效储集空间,影响油气渗流<sup>[27-30]</sup>;依赖于岩心热解资料进行页岩层系流体表征尚显不足,获取岩心含水第一手资料仍属于薄弱环节,直接制约着页岩层系流体表征和客观评价。本文基于陆相页岩层系流体表征技术的现状和现场需求,以微波含水测定仪等装置为支撑开展实验研究,建立了岩心含水快速测定的样品处置、测试流程和方法,探讨了基于微波含水分析与含油性热解分析资料的岩样视孔隙度和岩心视油(水)饱和度现场评价方法,以期页岩层系流体及物性快速评价提供技术支撑。

## 2 含水量检测实验装置及方法

含水分析方法主要包括常压干馏法、蒸馏抽提法以及核磁共振法<sup>[31-33]</sup>。常压干馏法和蒸馏抽提法分析岩心样品含水的精度较高,但存在分析周期

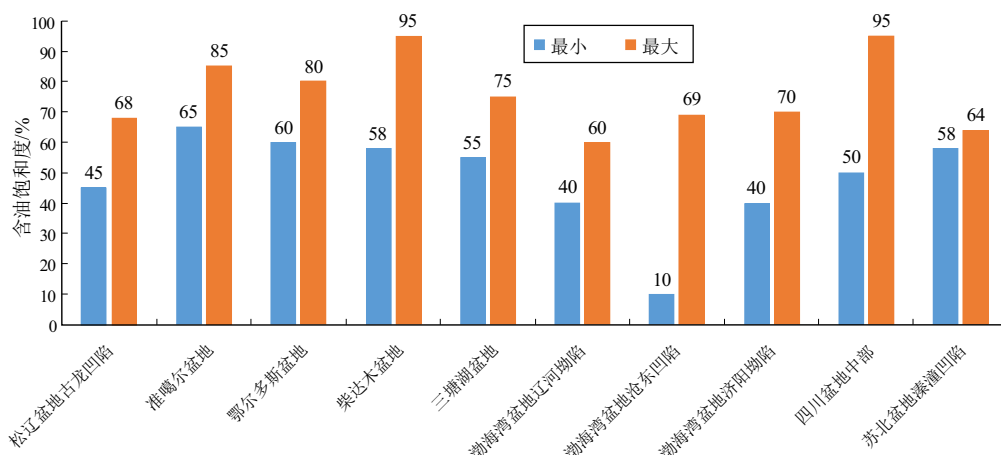


图1 我国不同盆地陆相页岩层系页岩油甜点含油饱和度分布特征  
据参考文献[9,19,24]修改。

长、不便于井场应用等局限性。核磁共振法具有快速、无损等优点,但对含水的测试精度低于含油率测定<sup>[34]</sup>。为满足井场岩心含水测定的需求,本文探讨了基于微波的岩心含水量测定方法。

## 2.1 原理及实验装置

### 2.1.1 原理

微波是一种高频电磁波,具有传播速度快、穿透能力强的特点。微波与材料相互作用时,发生与材料的介电特性相关的极化现象,微波发生相移和衰减,当材料之中含有水分时,由于水分子是一种强偶极子,对材料的介电特性起到主导作用,分析材料的介电特性即可得到材料的含水率。然而,由于介电特性测试手段复杂,在科研实践中,通常通过测量微波相移和衰减 2 个参数来检测材料的含水率,相移和衰减与含水率呈递增关系(图 2)。该方法已经成功应用于建筑材料细骨料的含水测定中<sup>[35]</sup>。

对于岩石样品而言,岩石中主要造岩矿物、天然气及石油的介电常数介于 1~10 之间,由于水分子是极性分子,其介电常数远大于其他物质,介电

常数为 80 左右<sup>[36-38]</sup>。因而,岩石样品的介电特性取决于含水率。借鉴其他领域材料含水分析的经验,当微波作用于被测岩样时,微波发生相移和衰减,且不同含水量样品具有不同的变化特征。为探讨基于微波的岩石样品含水量测定方法的可行性,借助现有装置,开展了以下实验研究。

### 2.1.2 实验装置

实验采用的装置主要包括微波含水测定仪、岩样密闭破碎机等。微波含水测定仪由无锡南木测控技术有限公司制造,以往用于烟草行业烟叶含水率的离线测定,绝对误差为 0.1%。该仪器主要由微波源、隔离器、微波收发单元、滤波器、A/D 转换单元、信息处理单元以及显示输出单元等组成(图 3)。其原理主要是微波经隔离器由收发单元作用于样品,样品中的水分吸收微波能量使得微波发生相移和衰减,经由滤波器传输至 A/D 转换和处理单元,将检测到的信号转换为样品的含水质量分数,由显示输出单元显示出来。

岩样密闭破碎机用于岩石样品的前处理,由样

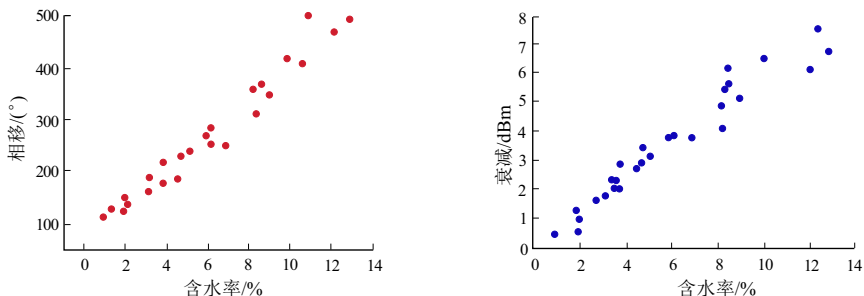


图 2 材料的含水率与微波相移和衰减的关系

据参考文献[35]修改。

Fig.2 Relationship between moisture content and microwave phase shift and attenuation of the material

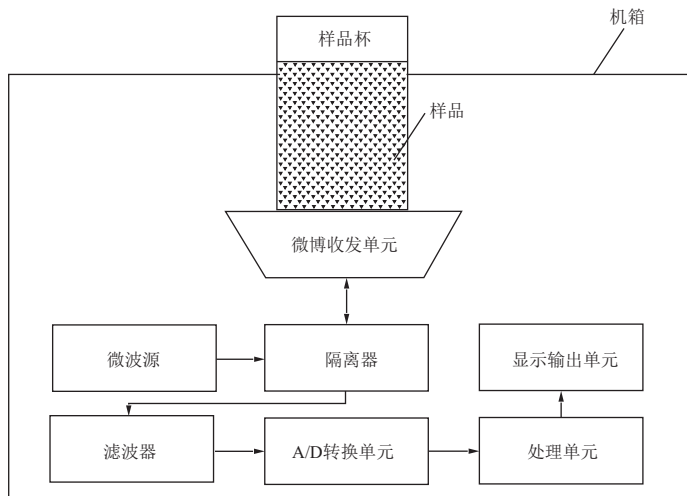


图 3 微波含水分析仪组成示意

Fig.3 Schematic diagram of microwave water analyzer

品罐和破碎主机组成。样品罐由罐体、顶盖和振子构成,当将样品放入罐体内加载到破碎主机时,振子在破碎主机磁场的作用下快速上下往复振动,将样品密闭破碎并使样品的含水部分接近均匀分布。

## 2.2 实验方法

### 2.2.1 岩心样品破碎处理对含水量测试影响实验

基于微波含水测定仪对物料均质性的限制性要求,建立了对岩心样品进行破碎处理的思路和方法。即以岩样密闭破碎机对岩心样品进行破碎,破碎时间限定在 10 s 之内,破碎后样品的粒径小于 0.5 mm,以求达到既满足均质性要求,又最大限度减少处理过程中水分损失的目标。为考察岩心样品破碎处理对其含水的影响,开展了基于烘干法的样品破碎前、后水分含量测定实验研究。

实验步骤:(1)取 10 件泥页岩柱塞状样品,浸入水中 18 h 后称重,获得样品湿重;(2)将样品放置于烘箱中烘干 4 h 后称重,获得样品干重;(3)用湿重和干重之差计算样品含水重量,并计算含水率,简称柱塞样品含水率;(4)再次将样品浸入水中 18 h 后取出,将样品放置于密闭破碎机中破碎后称重,获得样品湿重;(5)将破碎后的样品放置于烘箱中烘干后称重,获得样品干重;(6)用湿重和干重之差计算样品含水重量,并计算含水率,简称为颗粒状样品含水率。

由表 1 可见,10 件样品柱塞状和颗粒状样品的含水量相近,绝对误差为 0.01%~0.62%,平均绝对误差 0.24%。说明在密闭、快速破碎的条件下,由于没有水分与空气的对流和交换,破碎处理过程没有对样品的含水造成显著影响,基本可以满足含水率测定的要求。

### 2.2.2 标样检测实验验证

本文实验采用的微波含水测定仪属商业化产品,尽管已经成功应用于烟草行业,但尚没有应用于岩石样品含水量检测的案例。为验证其可行性,开展了基于标准样品的实验研究。实验采用四川盆地龙马溪组页岩柱塞样品和苏北盆地阜二段块状页岩样品,样品经过烘干后称重、自来水浸泡吸

表 1 柱塞样品与颗粒状样品含水测定数据对比  
Table 1 Comparison of water content determination data between plunger and granular samples

样品号	柱塞样含水率/%	颗粒样含水率/%	绝对误差/%	平均绝对误差/%
1	1.52	1.67	-0.15	0.24
2	1.92	1.93	-0.01	
3	1.63	1.61	0.03	
4	0.24	0.45	-0.22	
5	2.84	2.36	0.48	
6	3.85	4.00	-0.15	
7	2.36	2.73	-0.37	
8	3.10	3.41	-0.30	
9	5.70	5.73	-0.03	
10	4.43	3.82	0.62	

水、吸水后称重等步骤,得到含水量不同的样品,该含水量称为标称值;再将这些样品以岩样密闭破碎机破碎呈颗粒状,并以微波含水测定仪测定含水量,称之为测定值。

由表 2 的实验数据可见,15 件样品测定值与标称值的绝对误差为 0.00%~0.50%,平均绝对误差为 0.15%。可以推算,当岩样密度为 2.5 g/cm<sup>3</sup>、孔隙度大于 2.0%、热解游离油(S<sub>1</sub>)为 2.0 mg/g 时,0.15%的含水量绝对误差引起的孔隙度绝对误差不超过 0.4%,含油水饱和度绝对误差不超过 5.0%,基本满足井场测试和应用要求。

### 2.2.3 微波含水测定实验方法

考虑到岩样中水分的易挥发性,岩心出筒擦除表面的钻井液之后,第一时间采集具有代表性的块状岩样并按以下步骤完成测定:(1)称取 40 g 样品放置于样品罐中,加载到破碎主机上破碎处理呈颗粒状,破碎时间控制在 10 s 之内;(2)将颗粒状的样品倒入微波含水测定仪的样品杯中,不能人为压实岩样;(3)将样品杯加载到微波含水测定仪中,2 s 后即可得到岩样水分的质量分数。

由上述测定过程可见,与现有岩心含水分析方法相比,基于微波原理的岩样含水量测定方法具有测定速度快、操作简便的特点,可以适应井场测试的需求,从而丰富了页岩油领域井场岩样含水信息

表 2 标准样品含水量标称值与实测值数据对比

Table 2 Comparison of nominal and measured water content data of standard sample

项目	样品号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
标称值/%	0.80	0.76	1.25	1.07	1.10	1.99	1.38	1.88	1.75	2.28	1.62	3.05	2.28	2.74	2.26
实测值/%	0.79	0.76	1.25	1.19	1.11	2.02	1.20	1.95	1.41	2.01	1.95	2.90	2.41	2.24	2.31
绝对误差/%	0.00	0.00	0.00	0.12	0.01	0.03	0.18	0.07	0.34	0.27	0.33	0.14	0.12	0.50	0.05



获取技术手段,能够为页岩层系流体分析及选层评价提供数据支撑。

### 3 实验数据分析应用探讨

#### 3.1 页岩层系孔隙度快速分析评价

孔隙度作为流体评价基础参数,直接影响页岩层系选层评价研究。页岩层系岩性致密、微孔发育、类固态有机质对页岩油的吸附作用强,导致页岩层系样品洗油周期长<sup>[39]</sup>,孔隙度测试存在过程冗长、时效性低、不洗油则测试孔隙度偏低容易引起歧义等问题,不能满足生产决策和研究工作的需要。为此,探索了基于岩心样品含水检测资料和热解游离油( $S_1$ )资料,结合岩样块密度计算视孔隙度的方法。

测定和计算过程如下:(1)在井场取一块样品分为三份,第一份作为热解样品进行热解分析,第二份作为含水分析样品进行含水量分析,第三份作为块密度分析样品进行块密度分析;(2)根据岩样块密度,计算单位质量岩样的总体积;(3)根据热解分析结果结合游离油密度,计算单位质量岩样游离油的体积;(4)根据岩样含水分析结果结合水密度,计算单位质量岩样含水的体积;(5)将单位质量岩样含水体积和游离油体积之和作为孔隙体积;(6)按照孔隙度定义,计算岩样孔隙度。这个孔隙度是岩样中的水和游离油占据空间的体积在岩样总体积中的占比,与标准方法测定的孔隙度存在差异,称之为视孔隙度。视孔隙度计算简便、地质意义明确,也可以在图版上直观地表达出来(图4)。

图4中的视孔隙度等值线根据上述计算方法计算绘制。苏北盆地C井样品块密度按 $2.55\text{ g/cm}^3$ 计算,其他参数的取值如前文所述,计算11件样品的视孔隙度为 $1.6\% \sim 6.3\%$ ,平均 $4.7\%$ ;同一井段14件样品采用标准方法测定的孔隙度平均值为

$4.2\%$ ,2种方法得到的孔隙度差值为 $0.5\%$ 。南襄盆地A井样品块密度以实测计算,其他参数的取值如前文所述,计算得到10件样品的视孔隙度为 $0.4\% \sim 3.9\%$ ,平均 $1.9\%$ ;同一井段10件样品采用标准方法实测的孔隙度平均值为 $2.2\%$ ,两者相差 $0.3\%$ 。从实验数据来看,采用本文方法计算的孔隙度与标准方法实测结果基本相当,具有良好的应用前景。

这种方法规避了常规方法样品烘干、洗油的环节,提高了孔隙度分析的时效性,在岩心出筒后数小时内即可提供孔隙度数据,方便生产决策。但需指出的是:(1)这个孔隙度是视孔隙度,理论上该计算值低于标准方法测定的孔隙度;(2)这个孔隙度的影响因素包括岩样块密度、 $S_1$ 的测定结果、游离油密度和水密度的取值;(3)在操作层面,采取减少游离油和水散失的措施,有助于保障测定结果的可靠性;(4)钻井液滤液和清洗时地面水的浸入,对视孔隙度计算结果的影响有限。

#### 3.2 用含水量检测数据进行流体饱和度快速评价

按照流体饱和度的概念,其本质是某种流体体积占孔隙体积的百分数。页岩层系的孔隙系统极其复杂,由于源储一体的页岩层系中含有水、游离油、吸附油及类固体的有机物质,按照常规的做法,需要洗油处理之后进行孔隙度的测定,通过收集定量油和水计算油水饱和度,存在着洗油周期长、影响因素多、不适应现场应用等问题。考虑到页岩孔隙系统中水和游离油是甜点选层选区及资源量计算的最重要的流体,本文侧重于水和游离油建立了视含水饱和度、游离油视饱和度的计算方法。

游离油视饱和度定义为游离油在孔隙空间中的体积占比,等于单位质量岩样含游离油体积在单位质量岩样游离油体积与水体积总和之中的占比;同理,视含水饱和度定义为水在孔隙空间中的体积占比,为单位质量岩样含水体积在单位质量岩样游离油体积与水体积总和之中的占比。

单位质量岩样游离油体积=单位质量岩样游离油质量/游离油密度,单位为 $\text{cm}^3$ ;单位质量岩样游离油质量为 $1\text{g} \times \text{热解 } S_1 / 1000$ ,单位为 $\text{g}$ ;游离油密度可以按邻井原油密度计算,也可以参考相关文献<sup>[40]</sup>的方法求取,单位为 $\text{g/cm}^3$ 。

单位质量岩样含水体积由微波法分析资料换算得到:单位质量岩样含水体积=单位质量岩样含水质量/水密度,单位为 $\text{cm}^3$ ;单位质量岩样含水质量为 $1\text{g} \times \text{含水量检测结果(质量分数)}$ ,单位为 $\text{g}$ ;水密度利用邻井试油数据确定,也可以按 $1.0$ 计

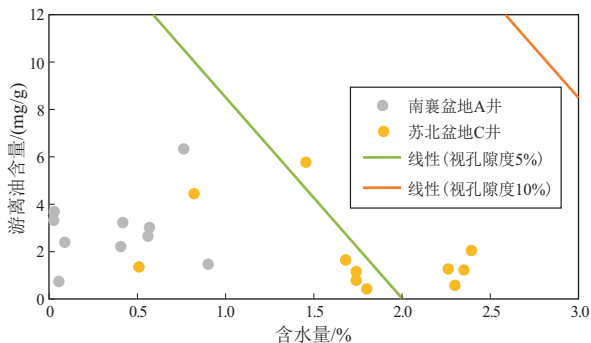


图4 利用含水量和游离油含量( $S_1$ )计算视孔隙度图版

Fig.4 Apparent porosity chart calculated using water content and free oil content ( $S_1$ )

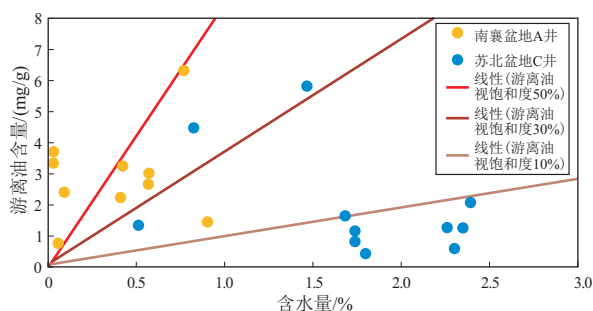


图5 利用含水量和游离油含量( $S_1$ )  
计算视含油饱和度图版

Fig.5 Apparent oil saturation chart calculated  
using water content and free oil content ( $S_1$ )

算,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

按照这一步骤,在现场开展岩心样品热解和微波含水分析实验,即可快速评估岩样的游离油视饱和度和视含水饱和度,为甜点选层评价提供参考依据。图5为岩样微波含水分析与热解游离油( $S_1$ )分析数据的交会图,游离油饱和度等值线根据上述计算方法计算绘制,其中游离油的密度按  $0.85 \text{ g}/\text{cm}^3$  计算,水的密度按  $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$  计算。这种以图版表达的方式,便于不同井(层段)的比较分析,能够取得直观、快速的效果。

由图5可见,苏北盆地C井样品的含水量为  $0.51\% \sim 2.39\%$ ,平均  $1.73\%$ ;游离油含量( $S_1$ )为  $0.41 \sim 5.79 \text{ mg}/\text{g}$ ,平均  $1.88 \text{ mg}/\text{g}$ ;游离油视饱和度介于  $3.0\% \sim 39.9\%$ 之间,平均  $13.4\%$ 。南襄盆地A井样品的含水量为  $0.03\% \sim 0.9\%$ ,平均  $0.38\%$ ;游离油含量( $S_1$ )为  $0.73 \sim 6.33 \text{ mg}/\text{g}$ ,平均  $2.90 \text{ mg}/\text{g}$ ;游离油视饱和度介于  $15.8\% \sim 94.1\%$ 之间,平均  $55.2\%$ 。这2口井的样品在图版上处于不同的区域,南襄盆地A井样品具有高油低水的特征,而苏北盆地C井样品则具有低油高水的特点。

必须指出的是,微波含水测定资料应用于页岩层系视油水饱和度计算时,样品的选取和处置需考虑钻井液滤液和清水浸入样品导致测试数据偏大的问题,应尽可能采取相应措施,以求达到接近真实的分析效果。

## 4 结论

(1)微波含水测定技术可以在井场测定岩样的含水量,测试平均绝对误差为  $0.15\%$ ,测试周期为  $2 \text{ s}$ ,具有不需要化学试剂、操作简便、测试周期短、精度较高的特点。

(2)微波含水测定数据结合岩样热解参数和块密度数据,可以计算岩样的视孔隙度,规避岩样

洗油、烘干环节,以高时效性为页岩层系储集能力评价提供数据支撑。

(3)微波含水测定数据结合岩样井场热解分析参数,可以计算岩样游离油和水的视饱和度,以高时效性为页岩层系流体分析及选层评价提供数据支撑。

(4)基于微波的岩样含水分析方法,在模型优化、精度等方面尚有提升空间,在计算视孔隙度、视油水饱和度的参数选取等方面有待进一步完善。

## 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 作者贡献/Authors' Contributions

贾梦瑶、鲍云杰参与实验设计;贾梦瑶、鲍云杰、冷筠滢、刘旺威、何晋译完成实验操作;贾梦瑶、鲍云杰、李志明、冷筠滢、刘旺威、何晋译、卢龙飞、黎茂稳参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by JIA Mengyao and BAO Yunjie. The experimental operation was completed by JIA Mengyao, BAO Yunjie, LENG Junying, LIU Wangwei and HE Jinyi. The manuscript was drafted and revised by JIA Mengyao, BAO Yunjie, LI Zhiming, LENG Junying, LIU Wangwei, HE Jinyi, LU Longfei and LI Maowen. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局,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. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J].地质学报,2022,96(1):155—171.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155—171.
- [3] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J].石油学报,2021,42(7):821—835.  
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821—835.
- [4] 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等.北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J].油气地质与采收率,2019,26(1):13—28.  
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13—28.
- [5] 周志军,张国青,崔春雪,等.不同岩性页岩油储集空间及物性特征[J].特种油气藏,2023,30(5):42—49.  
ZHOU Zhijun, ZHANG Guoqing, CUI Chunxue, et al. Reservoir space and physical characteristics of shale oil with different litholo-

- gies[J].*Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(5): 42-49.
- [6] 王继超, 崔鹏兴, 刘双双, 等. 页岩油储层微观孔隙结构特征及孔隙流体划分[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(4): 46-54.  
WANG Jichao, CUI Pengxing, LIU Shuangshuang, et al. Microscopic pore structure characteristics and pore fluid division of shale oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(4): 46-54.
- [7] 郭旭升, 魏志红, 魏祥峰, 等. 四川盆地侏罗系陆相页岩油气富集条件及勘探方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 14-27.  
GUO Xusheng, WEI Zhihong, WEI Xiangfeng, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Jurassic continental shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 14-27.
- [8] 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, LÜ Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 955-964.
- [9] 邹才能, 杨智, 王红岩, 等. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. *地质学报*, 2019, 93(7): 1551-1562.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, WANG Hongyan, et al. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan Basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(7): 1551-1562.
- [10] 彭艳霞, 杜玉山, 蒋龙, 等. 济阳拗陷缓坡带页岩油储层微观孔隙结构及分形特征[J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 535-544.  
PENG Yanxia, DU Yushan, JIANG Long, et al. Micropore structure and fractal characteristics of shale oil reservoir in gentle slope zone of Jiyang Depression[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(4): 535-544.
- [11] 钟红利, 卓自敏, 张凤奇, 等. 鄂尔多斯盆地甘泉地区长 7 页岩油储层非均质性及其控油规律[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(4): 10-18.  
ZHONG Hongli, ZHUO Zimin, ZHANG Fengqi, et al. Heterogeneity of Chang 7 shale oil reservoir and its oil control law in Ganquan area, Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(4): 10-18.
- [12] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 569-575.  
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of SINOPEC shale oil exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 569-575.
- [13] 刘惠民. 济阳拗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.
- [14] 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.
- [15] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术新进展[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(1): 1-8.  
ZHANG Jinhong. Progress in Sinopec shale oil engineering technology[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(1): 1-8.
- [16] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力: 以四川盆地涪陵地区侏罗系为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 113-120.  
HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Enrichment control factors and exploration potential of lacustrine shale oil and gas: a case study of Jurassic in the Fuling area of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 113-120.
- [17] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油地质特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 870-883.  
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 870-883.
- [18] 姚红生, 晁灵, 高玉巧, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 776-783.  
YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Su-bei Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 776-783.
- [19] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 歧口凹陷歧北次凹沙河街组三段页岩油地质特征与勘探突破[J]. *石油学报*, 2020, 41(6): 643-657.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics and exploration breakthrough of shale oil in member 3 of Shahejie Formation of Qibei Subbasin, Qikou Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(6): 643-657.
- [20] 朱国文, 王小军, 张金友, 等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 110-124.  
ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 110-124.
- [21] 霍进, 何吉祥, 高阳, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油开发难点及对策[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(4): 379-388.  
HUO Jin, HE Jixiang, GAO Yang, et al. Difficulties and countermeasures of shale oil development in Lucaogou Formation of Jimsar Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 379-388.
- [22] 文家成, 胡钦红, 杨升宇, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油储层特征及页岩油可动性评价[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(4): 63-70.  
WEN Jiacheng, HU Qinrong, YANG Shengyu, et al. Shale reservoir characteristics and shale oil mobility in Member 2 of Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(4): 63-70.
- [23] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. *油气地*



- 质与采收率,2023,30(1):1-20.
- YANG Yong.Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: a case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023,30(1):1-20.
- [24] 崔宝文,赵莹,张革,等.松辽盆地古龙页岩油地质储量估算方法及其应用[J].大庆石油地质与开发,2022,41(3):14-23.
- CUI Baowen,ZHAO Ying,ZHANG Ge, et al.Estimation method and application for OOIP of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(3):14-23.
- [25] 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.
- [26] 国家能源局.泥页岩含油量热解分析方法:SY/T 7661-2022[S].北京:石油工业出版社,2022.
- National Energy Administration.Method for pyrolysis of oil content in shale:SY/T 7661-2022[S].Beijing:Petroleum Industry Press, 2022.
- [27] 周龙政,蔡进功,李旭,等.泥页岩中水的赋存态研究进展及其意义[J].地球科学进展,2022,37(7):709-725.
- ZHOU Longzheng, CAI Jingong, LI Xu, et al.Research progress and significance of the occurrence of water in shale [J]. Advances in Earth Science, 2022,37(7):709-725.
- [28] 范雨辰,陈磊,刘可禹,等.储层润湿性及孔隙水赋存对页岩储集空间的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(9):3575-3589.
- FAN Yuchen, CHEN Lei, LIU Keyu, et al.Effects of wettability and pore water occurrence of gas storage space of shale reservoirs[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(9):3575-3589.
- [29] 胡志明,端祥刚,何亚彬,等.储层原生水对页岩气赋存状态与流动能力的影响[J].天然气工业,2018,38(7):44-51.
- HU Zhiming, DUAN Xianggang, HE Yabin, et al.Influence of reservoir primary water on shale gas occurrence and flow capacity[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(7):44-51.
- [30] 马炳杰,范菲,孙志刚,等.济阳拗陷纹层状页岩油流动能力影响因素实验[J].大庆石油地质与开发,2022,41(5):153-159.
- MA Bingjie, FAN Fei, SUN Zhigang, et al. Experimental study on influencing factors of shale oil flow capacity in laminar shale in Jiyang Depression[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022,41(5):153-159.
- [31] 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.
- [32] 闫伟林,张兆谦,陈龙川,等.基于核磁共振技术的古龙页岩含油饱和度评价新方法[J].大庆石油地质与开发,2021,40(5):78-86.
- YAN Weilin, ZHANG Zhaoqian, CHEN Longchuan, et al.New evaluating method of oil saturation in Gulong shale based on NMR technique[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(5):78-86.
- [33] 王伟,王振林,刘财广,等.页岩油甜点评价关键技术及甜点类型划分:以玛湖凹陷二叠系风城组为例[J].地球科学,2023,48(1):223-234.
- WANG Wei, WANG Zhenlin, LIU Caiguang, et al.Key technology of shale oil sweet spot evaluation and sweet spot type division in Fengcheng Formation of Mahu Sag [J]. Earth Science, 2023, 48(1):223-234.
- [34] 王民,李明,李进步,等.页岩含油率多种测试方法对比[J].石油学报,2022,43(12):1758-1769.
- WANG Min, LI Ming, LI Jinbu, et al.Comparative analysis of test methods for shale oil content [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022,43(12):1758-1769.
- [35] 万惠文,刘俊岩,刘金军,等.利用微波法全自动在线测定细骨料含水率的研究[J].武汉理工大学学报,2019,41(12):1-6.
- WAN Huiwen, LIU Junyan, LIU Jinjun, et al.Study on automatic online determination of moisture content of fine aggregate by microwave method [J].Journal of Wuhan University of Technology, 2019,41(12):1-6.
- [36] TRABELSI S, KRASZEWSKI A W, NELSON S O. Phase-shift ambiguity in microwave dielectric properties measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(1):56-60.
- [37] 白佳佳.富有机质页岩声电性质实验研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- BAI Jijia.Experimental investigation of ultrasonic and electrical properties of organic-rich shale[D].Chengdu:Southwest Petroleum University, 2017.
- [38] 余刚,魏莉,王高科,等.柴达木盆地西部地区复杂碳酸盐岩储层流体识别新方法[J].测井技术,2021,45(2):149-155.
- SHE Gang, WEI Li, WANG Gaoke, et al.New method for fluid identification of complex carbonate reservoirs in western Qaidam Basin[J]. Well Logging Technology, 2021,45(2):149-155.
- [39] 王志昊,赵建华,蒲秀刚,等.页岩油岩心样品洗油实验效率对比分析[J].现代地质,2022,36(5):1304-1312.
- WANG Zhihao, ZHAO Jianhua, PU Xiugang, et al.Comparison of washing oil experiment of core samples from shale oil reservoir [J].Geoscience, 2022,36(5):1304-1312.
- [40] 吴欣松,王志章.利用储集层岩石热解资料评价原油性质[J].新疆石油地质,2000,21(1):42-44.
- WU Xinsong, WANG Zhizhang. Application of geochemical log data to quantitative evaluation of crude oil properties [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000,21(1):42-44.