

中国石化页岩层系石油探明储量申报实践与思考

张宇¹, 李军², 王烽¹, 张永², 王敏³, 孙伟⁴

(1. 中国石化油田勘探开发事业部, 北京 100728; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000; 4. 中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏 南京 210019)

摘要:页岩层系石油既是全球油气勘探理念变革和开发技术突破的新领域,也是支撑中国能源安全和接续油气稳产的新阵地。由于以往页岩层系主要被作为烃源岩进行评价,对其石油探明地质储量的估算缺乏可行方法和实践依据。为此,中国石化以2025年1月正式实施的《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)为指导,依托水平井和直井-斜井优化部署,合理控制含油面积与有效厚度,并创新页岩岩心二维核磁共振分析方法等多项新技术,精确定页岩物性、含油性参数,从而形成了一套科学、系统的页岩层系石油探明地质储量估算方法。应用上述技术,在济阳坳陷樊页平1区块与溱潼凹陷储家楼区块成功提交了中国石化首批页岩层系石油探明地质储量 1.8×10^8 t,检验了方法的准确性与有效性。基于申报实践,中国石化进一步形成了“加强勘探开发协同部署、取全取准评估资料、迭代升级储量评估方法、深化储量分类-分级评价”等四项页岩层系石油勘探开发新启示,提升了储量申报的质效。上述储量估算方法和勘探开发模式的创新,支撑了中国石化页岩层系石油探明地质储量申报从理论到实践的突破,为中国同类油藏的高效勘探开发提供了可复制的技术路径。

关键词:勘探质效;溱潼凹陷;济阳坳陷;储量估算;探明地质储量;页岩层系石油

中图分类号: TE15 **文献标识码:** A

Practices and reflection on reporting proved oil initially-in-place of shale layers by SINOPEC

ZHANG Yu¹, LI Jun², WANG Feng¹, ZHANG Yong², WANG Min³, SUN Wei⁴

(1. Department of Oilfield Exploration & Development, SINOPEC, Beijing 100728, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 4. Exploration and Development Research Institute, East China Oil & Gas Company, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Shale oil represents a new frontier in both the conceptual revolution and technological breakthroughs for global hydrocarbon exploration while also serving as a new target for sustaining the energy security and maintaining stable hydrocarbon production in China. Shale layers have always been primarily assessed as source rocks previously, leading to a lack of feasible methods and practical bases for estimating their proved oil initially-in-place. To address this, guided by the Specification of Shale Layers Oil Reserves Estimation (DZ/T 0501—2025), effective since January 2025, SINOPEC has achieved rational control over the oil-bearing area and net pay thickness of shale layers by relying on the optimized deployment of horizontal and vertical wells-directional wells. Besides, the company further leveraged innovative technologies, including two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D NMR) analysis of shale cores, to accurately determine key parameters such as shale physical properties and oil-bearing characteristics. Accordingly, a set of scientifically robust and systematic methods for estimating proved oil initially-in-place of shale layers have been developed. Using these technologies, SINOPEC has successfully reported the first batch of 1.8×10^8 t proved oil initially-in-place of shale layers in the Fanyeping 1 block, Jiyang Depression and the Chujialou block of the Qintong Sag. This achievement validated the accuracy and effectiveness of the proposed methods. Building on the proved oil initially in place declaration

收稿日期:2025-07-30;修回日期:2025-09-09。

第一作者简介:张宇(1971—),男,博士、正高级工程师,油气勘探研究与生产管理。E-mail: zhangyu688@sinopec.com。

通信作者简介:李军(1979—),男,博士、研究员,矿权评价与储量评估。E-mail: lijun2009.syky@sinopec.com。

practice, SINOPEC has gained the following key insights into optimizing shale strata oil exploration and development: strengthening the integrated deployment of exploration and development, acquiring complete and accurate data for reserve assessment, iteratively upgrading reserve assessment methods, and deepening the classification and grading evaluation of oil reserves. These approaches contribute to the elevated quality and efficiency of reserve reporting. Through innovations in the reserve estimation methods and advances in hydrocarbon exploration and development models, SINOPEC has transformed the reporting of proved shale oil originally-in-place from a theoretical concept into a practical reality, providing a replicable technical pathway for the efficient exploration and development of similar oil reservoirs in China.

Key words: quality and efficiency of hydrocarbon exploration, Qintong Sag, Jiyang Depression, reserve estimation, proved oil initially-in-place, shale layers oil

引用格式:张宇,李军,王峰,等. 中国石化页岩层系石油探明储量申报实践与思考[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 1762–1777. DOI: 10. 11743/ogg20250602.

ZHANG Yu, LI Jun, WANG Feng, et al. Practices and reflection on reporting proved oil initially-in-place of shale layers by SINOPEC[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1762–1777. DOI: 10. 11743/ogg20250602.

页岩层系石油是指富含在有机质烃源岩层系内并自生-自储的石油,作为常规石油的革命性接替领域,其勘探开发正在重构全球能源的供应格局。美国页岩层系石油的系统勘探始于1953年Antelope油田;2000年以后,Bakken页岩油通过水平井和水力压裂技术的突破,逐步实现了商业开发;2009年后,得益于长水平段水平井和多级分段水力压裂技术的规模化应用,Permian等核心产区产量大幅增长,2024年全美页岩油产量已突破 $4 \times 10^8 \text{ t}^{[1-3]}$ 。中国页岩油的勘探始于早期泥岩裂缝性油藏偶然发现^[4-6];2009年前后,通过引入北美“连续型油气聚集”“致密油”和“页岩油”等概念^[7],并创新发展了陆相页岩油理论,相继在准噶尔、渤海湾和松辽等盆地取得一系列重要突破^[8];2020年以来,中国在新疆吉木萨尔、大庆古龙和胜利济阳等启动了国家级陆相页岩油示范区建设,产量快速增长,至2024年全国产量已超 $600 \times 10^4 \text{ t}$ 。

中国石化页岩层系石油勘探始于2010年,经历了战略选区与先导试验、重点地区攻关与突破2个发展阶段,逐步实现了从理论研究到实践突破的转变^[9-10]。2018年以来,中国石化聚焦中-高成熟度页岩油,创新提出陆相断陷盆地“咸化早生、无机控储、源-储一体、超压封存”的页岩油富集机理^[11],先后在济阳、苏北和复兴等地区实现勘探战略突破,累计落实页岩层系石油控制储量 $8.2 \times 10^8 \text{ t}$ 、预测储量 $16.9 \times 10^8 \text{ t}$,2024年产油量超 $70 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中,济阳坳陷页岩油通过立体开发,实现了“3层楼”到“5层楼”再到全洼陷的整体评价试验,建成了中国首个“5层楼”大平台立体井组^[12];苏北盆地溱潼凹陷页岩油在“四个凹陷、三套层系”均实现突破,并探索了复杂构造区直井-斜井开发模式及 CO_2 吞吐试验提高采收率。四川盆地复兴地区积极推

进高气/油比页岩油的井组试验,通过持续迭代优化,实现单井日产油气当量从50 t上升至150 t的提产跨越。

2025年1月,自然资源部发布了《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)。新规范历经3年时间的研究和意见征集,充分考虑中国页岩油勘探开发特点,明确了页岩层系石油储量估算的范围和条件,并对地质储量和可采储量的估算方法,以及储量综合评价提出了原则性要求。新规范突出了页岩层系作为一种典型的非常规油藏,其探明储量申报与常规油气存在4方面明显差异:①在地质上,作为自生-自储的“烃源岩”油藏,其物性和含油性等储层“七性”评价方法异于常规油藏;②在开发上,作为无自然产能的“人造”油藏,其储量探明条件对先导试验等提出更高的要求;③在空间分布上,作为大面积分布的“连续型”油藏,其含油面积圈定等需要综合考虑页岩分布稳定性和井控程度;④在储量经济性上,作为边际效益的“低品位”油藏,允许过路井在一定情形下参与储量估算,以提升资料录取的质效。

以此为指导,中国石化依托济阳和苏北地区页岩油勘探开发实践,构建了一套合理合规的页岩层系石油探明地质储量估算方法,形成了一系列储量研究与勘探开发协同优化的新认识,并提交了首批 $1.8 \times 10^8 \text{ t}$ 页岩层系石油探明地质储量,对中国陆相页岩油探明储量申报和高效勘探开发部署起到了示范作用。

1 页岩层系石油探明地质储量估算方法

1.1 估算对象的界定

相对于广义页岩油,《页岩层系石油储量估算规

范》(DZ/T 0501—2025)对其估算对象进行了更为严格的定义,主要体现在3个方面:①在岩性上,应以页岩、泥页岩、泥岩和粉砂质泥岩为主;②在夹层上,要求单层厚度不大于2 m,累计夹层厚度占比不超过地层的20%;③在源-储空间关系上,突出强调了石油的自生-自储^[13]。对于不满足上述定义的广义页岩油,则应依据常规《石油天然气储量估算规范》(DZ/T 0217—2020)或《致密油储量估算规范》(DZ/T 0335—2020)等规范要求进行申报^[14-15],从而在规范层面解决了页岩层系石油储量申报过程中与其他类型油藏界限不清的问题。

1.2 含油面积和有效厚度参数的确定

页岩层系石油作为一种无自然产能的连续型油藏,其含油面积圈定应在《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)要求下,着重把握3方面技术要点:

1) 新规范除了对含油面积内的地震、测井和测试等工作量提出一般性要求外,特别增加了开发先导试验区或试验井组,以及中型及以上规模储量需有保压或密闭取心等页岩层系石油储量估算的特殊要求。

2) 与常规油气不同,规范提出以“基本井距”代替“开发井距”圈定含油面积,并根据申报区的构造复杂程度和页岩层系稳定程度,将基本井距大小分为3类9型。中国石化通过探明申报实践,形成了从构造形态、断层发育密度和控藏作用等方面“定类”;再从页岩连续性、纵横向稳定性和厚度变化等方面“定型”;最后补充产能井平面分布稳定性等佐证的工作流程,提升了申报区定类、定型的合理性。

3) 含油面积圈定还受到申报区内钻井井型和开发状态影响。规范允许满足一定条件的兼探井和过路井参与储量估算,并对处于不同完钻和试油-试采状态的直井-斜井和水平井规定了差异化的外推井距。中国石化在济阳页岩油的勘探实践表明,充分利用老油区的过路直井-斜井进行页岩层段试油,通过“水平井控面、过路井控边”的指导思想,有助于扩大探明含油面积。

有效厚度划分方面,其工作核心是通过构建页岩层段“七性”关系,即在常规油藏岩性、物性、含油性和电性“四性”评价体系的基础上,增加烃源岩特性、脆性和地应力各向异性3项关键指标,综合实现有效厚度下限的科学厘定^[16-22]。

1.3 物性参数的取值

页岩层系石油“自生-自储”,孔隙度和渗透率等物性参数直接影响了页岩油的赋存状态、储集空间和

流动性,是估算探明地质和可采储量的关键参数。

实验室分析技术方面,与常规砂岩储层相比,页岩孔喉小、孔径低,储层无效孔隙度占比相对高,采用美国天然气研究所(Gas Research Institute, GRI)等的总孔隙度测量方法不能满足页岩有效孔隙度测量的需要。目前页岩有效孔隙度的岩心分析方法包括2大类:①经过改进的液测法、氦气法和压汞法等常规方法;②核磁共振等新技术^[18-22]。

页岩油储层孔-渗低、黏土矿物含量高、润湿性复杂,且岩心分析必须经过洗油处理,导致常规油气和页岩气的实验方法无法适用于页岩油,必须进行流程革新和重塑。以传统液测法为例,需解决3方面实际问题:①岩心暴露放置导致油、气、水散失和页理张开;②页岩洗油溶剂的选取和处理时间均没有经验可循,洗油时间过短则去油不净,反之则引发层理和裂缝开裂;③纳米级孔隙的强毛细管阻力效应导致常压流体饱和洗油不充分,孤立孔隙和微孔隙难以测量,孔隙度测量值偏低。为此,中国石化通过在济阳和苏北页岩油的勘探实践,完成3项关键技术改进:①优化洗油溶剂配比,洗油时间由2个月压缩至3周;②采用低温65℃烘干3 d;③精准调控流体饱和压力为20 MPa,优化时长至24 h,取得了良好的应用效果。

相对于页岩气,核磁共振技术因对液态烃氢核信号的高灵敏度及低扩散系数优势,在页岩油孔隙度解释中优势明显。该技术的关键在于横向弛豫时间(T_2)截止值的科学标定^[23-26]。中国石化在探明储量估算中主要采用了2种方法:①密闭样品洗油前、后的二维核磁共振谱对比法,标定无法洗出的流体代表束缚水,实现与游离水的区分(图1);②不同温阶烘干法,通过分析密闭样品不同温度下的烘干速率拐点作为 T_2 截止值(图2),得到了国家储量审查专家组的认可。

测井解释技术方面,受页岩矿物组成复杂影响,目前页岩有效孔隙度测井解释主要依托核磁测井法和常规测井多元拟合法等^[27-29]。中国石化在济阳和苏北页岩层系石油探明地质储量申报中,通过分析岩心核磁与测井核磁的主频、回波间隔和温度差异带来的影响,建立了申报区岩心二维核磁和核磁测井参数的定量转化;同时基于声波时差、密度和中子孔隙度等测井曲线构建孔隙度多元回归关系,构建了常规测井多元拟合法,不同地区敏感参数和系数有所差异。

1.4 含油性参数的取值

页岩低孔、低渗的特点决定了部分页岩油在开发过程中无法流动,合理确定其有效孔隙内的含油饱和

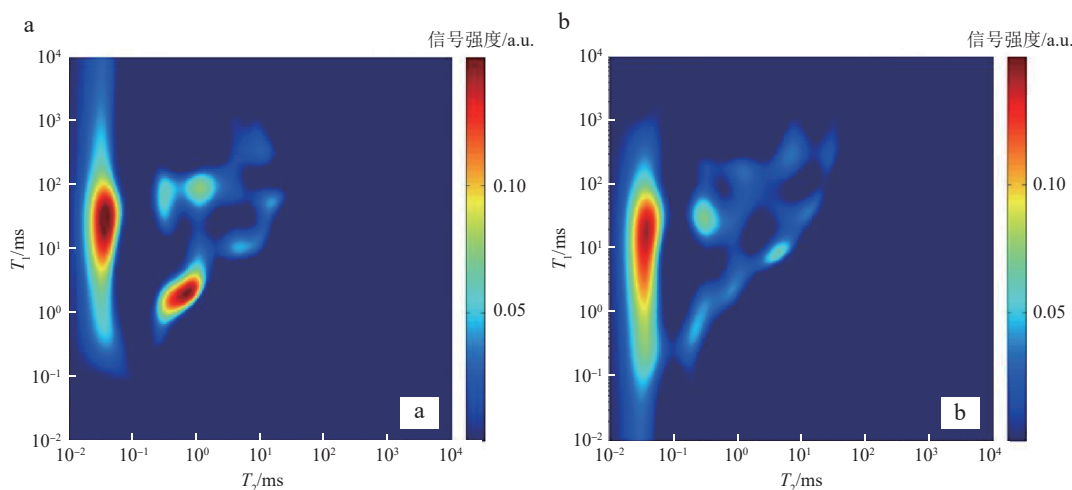


图1 济阳坳陷新兴油田樊斜184井密闭取心样品洗油前、后二维核磁共振谱对比

Fig. 1 Comparison of 2D NMR spectra before and after solvent extraction of core samples collected via sealed coring from well Fanxie 184,

Xinxing oilfield, Jiyang Depression

a. 密闭取心状态; b. 洗油后状态

T_1 : 纵向弛豫时间; T_2 : 横向弛豫时间

度和游离烃含油量等对于储量估算至关重要。

页岩含油性参数解释方法思路与物性参数相近,也是利用岩心分析标定测井^[30],但其岩心分析方法需着重解决2方面问题:①钻井取心和样本制备过程中,岩样中的轻烃组分挥发散失,导致测量结果偏小。因此,在条件允许的情况下应对关键井录取保压密闭取心资料,对损失的轻烃进行恢复;在没有保压密闭取心的情况下,则通过类比进行标定。②利用核磁共振(纵向弛豫时间-横向弛豫时间, T_1 - T_2)技术,可以直观地确定油、水的 T_2 截止值,也可以界定吸附、游离和可动等不同性质的流体^[31-34];但页岩含氢组分复杂,其核磁共振信号响应是有机质、各种赋存状态下水、油和气等含氢质子的叠加,需要针对申报区建立各含氢组分核磁信号的划分方案。以苏北溱潼油田页岩层系石油探明地质储量申报为例,在“岩心饱水—离心烘干—饱油核磁”技术流程基础上,通过不同流体组分的核磁实验,确定了申报区的二维核磁解释图版(图3)。

2 页岩层系石油探明地质储量申报实践

2.1 济阳坳陷页岩层系

2.1.1 申报区概况

济阳坳陷新兴油田樊页平1区块申报区位于济阳坳陷博兴洼陷带北部,为高青平南断层下降盘(图4),目标层位为古近系沙河街组四段上亚段纯上次亚段(沙四

上纯上)2+3层组,地层产状整体北低、南高,构造相对简单,油藏埋深3 100~3 800 m,纹层发育、夹层不发育,具源-储一体特征,为典型页岩层系石油^[35-36]。

新兴油田在早期常规石油勘探中已有25口井在页岩层段获工业油流,初步揭示了页岩油的勘探前景。自2008年起,通过系统的老井复查与测试,进一步揭示了页岩层系石油增储潜力。2020年樊页平1井获日产油量171 t的高产,标志着该地区页岩油勘探取得重大战略性突破。2021年首次在沙四上纯上报页岩层系石油预测储量;2022年9月樊页平1试验井组全面投产,5口井峰值日产油量过百吨,建成中国石化首个10万吨级页岩油开发井组,同年升级为控制储量。截至探明储量估算基准日,申报区内完成了樊斜184井密闭取心和14口井的特殊测井等静态资料录取,开展了19口水平井的试采,满足了探明储量申报的资料要求。

2.1.2 含油面积及有效厚度取值

申报区含油面积圈定遵循《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)“定类定型”原则,根据区内单斜构造背景并鉴于其内部发育多条小型断层,结合边界断层控制的稳定页岩层系,确定其属于II类(构造较复杂)第一型(页岩层系稳定),结合开发井距(0.4 km)和水平井水平段长度(2.0 km)等,可确定基本井距在水平井延伸方向为3.0 km,垂直水平段方向为1.2 km。申报区充分发挥兼探井在储量估算中的作用,通过对17口过路直井-斜井的系统试油,结合19

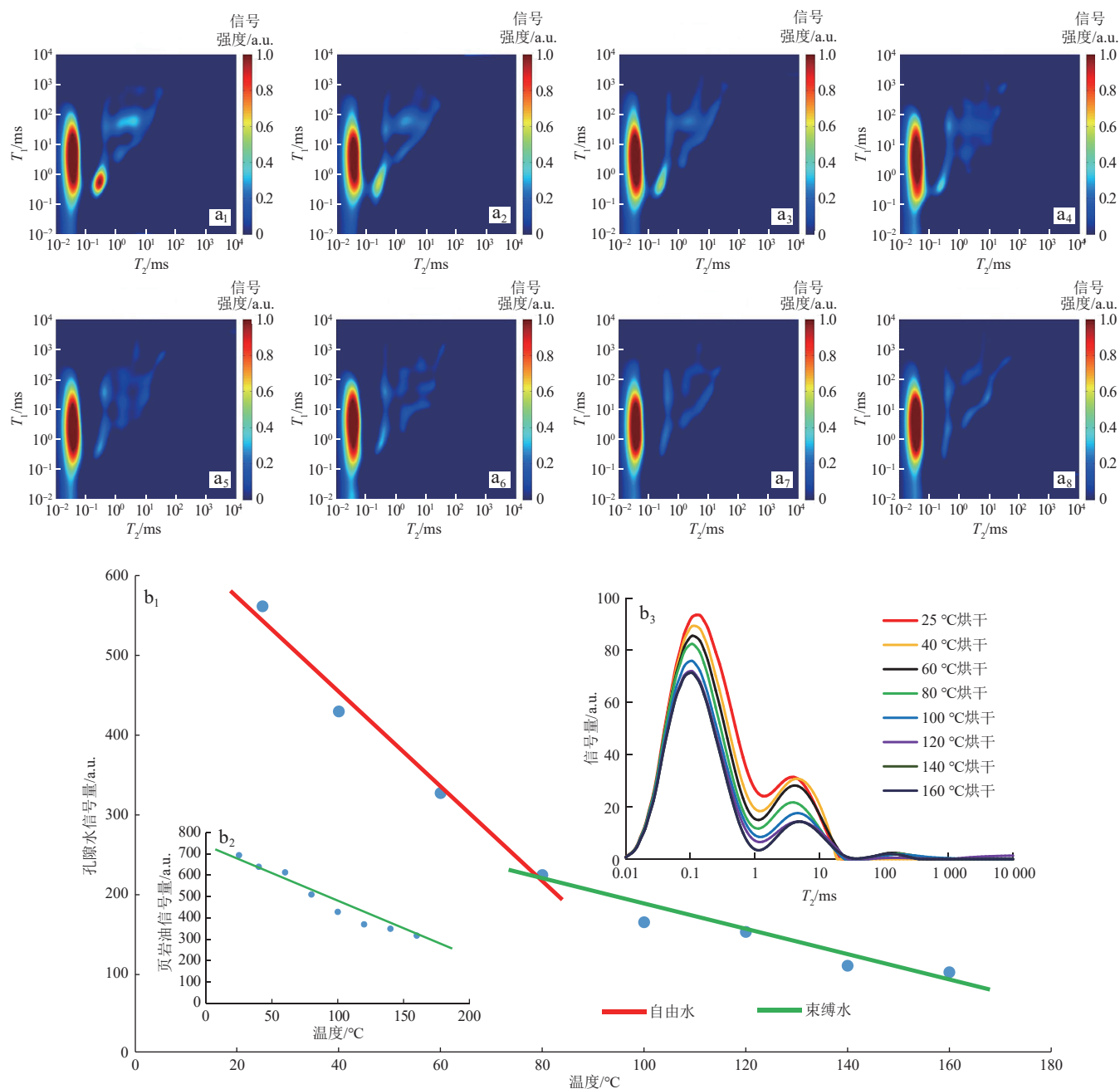


图2 济阳坳陷新兴油田樊斜184井密闭取心样品不同温度烘干状态

Fig. 2 States under drying at different temperatures for samples collected via sealed coring from well Fanxie 184, Xinxing oilfield,

Jiyang Depression

a_1 — a_8 . 分别为初始状态以及40,60,80,100,120,140和160 °C温度下烘干核磁共振谱状态; b_1 , b_2 . 分别为不同烘干温度水、油信号量变化; b_3 . 不同温度烘干下页岩核磁共振 T_2 谱信号量变化

T_1 . 纵向弛豫时间; T_2 . 横向弛豫时间

口新钻水平井,分别以已查明的控藏断层和矿业权为边界,以工业油流井0.5倍基本井距和获油流直井-斜井1.0倍开发井距划储量计算线,共圈定含油面积115.45 km²。

有效厚度划分方面,通过页岩储层“七性”关系分析,建立了有效厚度下限标准(表1),并引入了岩心核磁分析结果进行佐证。例如,在樊斜184井的密闭取

心样本中,对孔隙度2.0%~2.5%样品进行洗油前、后的二维核磁共振谱对比,证实了孔隙度下限附近仍存在大量可动油(图1;样品孔隙度2.3%),确定申报区平均有效厚度74.8 m。

2.1.3 物性和含油性参数取值

有效孔隙度和含油饱和度参数方面,针对申报区

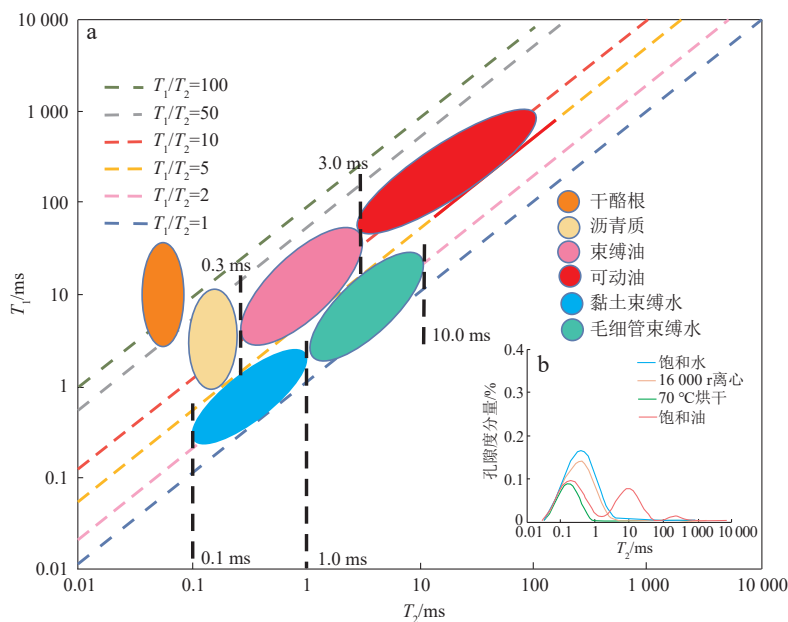


图3 苏北盆地溱潼油田页岩层系石油探明地质储量申报区二维核磁共振解释图版

Fig. 3 2D NMR interpretation chart for the area of proved oil initially-in-place reporting in the Qintong Oilfield, Subei Basin

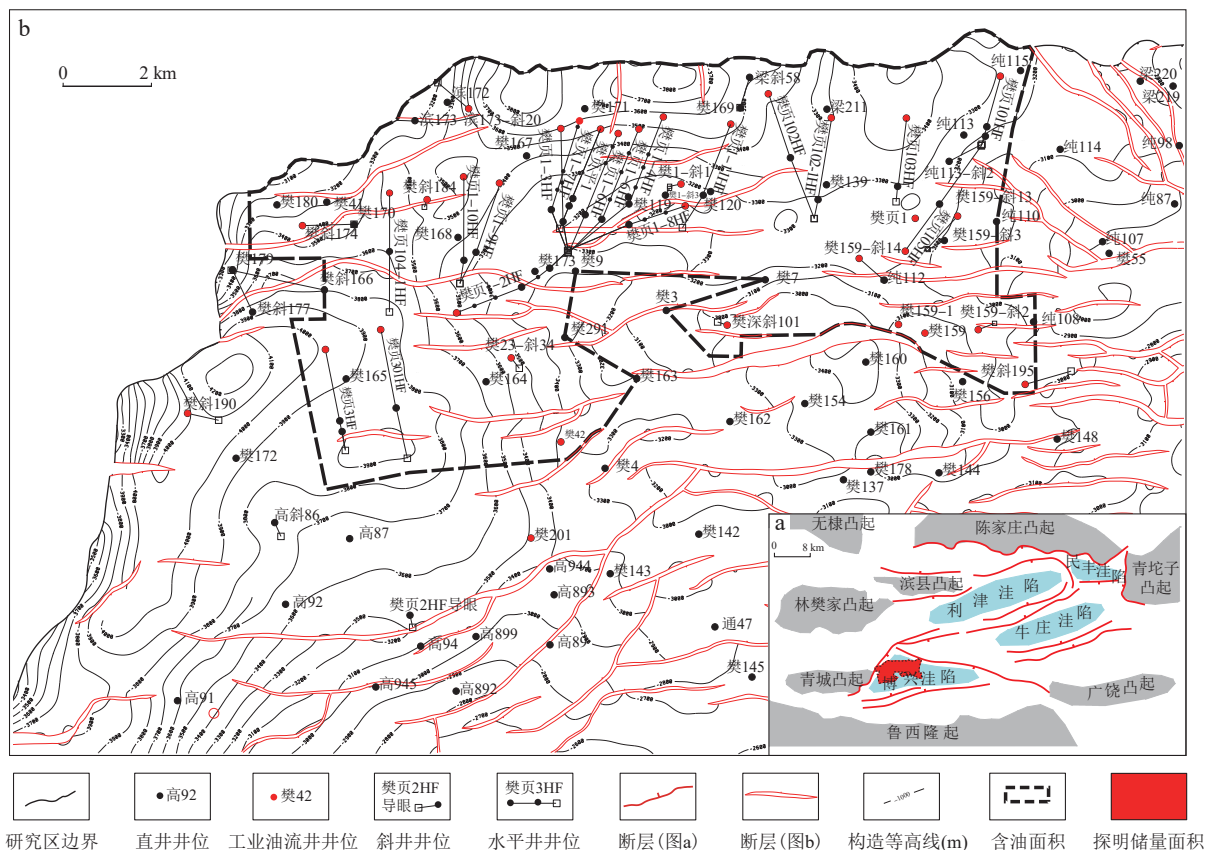
a. 不同组分二维核磁共振定量解释图版;b. 不同技术流程 T_2 分布 T_1 : 纵向弛豫时间; T_2 : 横向弛豫时间

图4 济阳拗陷新兴油田樊平1区块沙四上纯上2+3层组顶面构造及申报区位置

Fig. 4 Maps showing the top structures of the 2nd and 3rd layer groups of the Chunshang interval of the upper sub-member of the 4th member of the Shahejie Formation and the location of the proved oil originally-in-place reporting area in the Fanyeping 1 block, Xinxing oilfield, Jiyang Depression

a. 济阳拗陷构造单元划分及探明储量位置;b. 樊平1区块沙四上纯上2+3层组顶面构造

(沙四上纯上为沙河街组四段上亚段纯上次亚段。)

表1 济阳坳陷新兴油田樊页平1区块沙四上纯上2+3层组有效厚度下限标准

Table 1 Cut-off criteria for the net pay thickness of the 2nd and 3rd layer groups of the Chunshang interval of the upper sub-member of the 4th member of the Shahejie Formation in the Fanyeping 1 block, Xinxing oilfield, Jiyang Depression

岩性	烃源岩特性		物性	含油性	电性		脆性	应力各向异性
	总有机碳 含量/%	镜质体 反射率(R_o)/%	有效 孔隙度/%	含油 饱和度/%	电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	声波时差/ ($\mu s/ft$)	脆性矿物 含量/%	应力差值/MPa
纹层状页岩	≥ 1.0	≥ 0.7	≥ 2.5	≥ 40	2	55	≥ 60	≤ 10

富碳酸盐类页岩样品易破碎、气测法制备柱塞合格率较低且加载压力受限的问题,优先采取二维核磁法开展岩心分析^[37-38]。在此基础之上,将核磁与液测法、氦气法等结果对比,验证了1.3节中改进的液测法与核磁法测得有效孔隙度和含油饱和度参数一致性较好;明确了当缺乏核磁结果时,可选择改进的液测法替代。通过实验室岩心分析结果进一步标定常规测井,构建了申报区有效孔隙度[公式(1)]和含油饱和度[公式(2)]的常规测井多元回归解释模型。结果显示,刻度后的常规测井解释结果与岩心分析保持了良好一致性(图5),估算申报区平均有效孔隙度为4.3%,平均含油饱和度为60.2%。

$$\Phi = 0.425256 + 0.024982GR + 0.009750AC + 0.107871CNL \quad (1)$$

式中: Φ 为有效孔隙度,%; AC 为声波时差测井值, $\mu s/ft$; CNL 为补偿中子孔隙度测井值,%; GR 为自然伽马测井值,API。

$$S_o = 781.012000 - 226.064100DEN + 0.265588GR - 2.131290AC \quad (2)$$

式中: S_o 为含油饱和度,%; DEN 为补偿密度测井值, g/cm^3 。

游离烃含油量方面,申报区基于密闭取心井的新鲜样品,采用分温阶热解法^[39-40]进行实验室测定。在此基础之上,通过对比现场密封冷冻样品与常规取心样品的热解结果,构建轻烃恢复系数,补偿热解过程中的轻烃损失;在分温阶热解过程中,将300~380℃阶段与300℃之前的热解烃量进行对比,构建重烃恢复系数,实现可动重烃的补偿。基于岩心分析结果,利用测井敏感参数进行回归分析,构建了游离烃含油量的测井解释模型[公式(3)],解释申报区游离烃含油量平均值为6.07 mg/g。

$$T_f = -3.18447 - 0.19016(GR - 20)/(100 - 20) + 263.04760\Phi S_o \quad (3)$$

式中: T_f 为游离烃含油量,mg/g。

2.1.4 地质储量估算结果

基于上述参数取值,采用容积法估算申报区新增

探明地质储量 $14\,024.62 \times 10^4 t$;同时与体积法估算结果 $13\,595.95 \times 10^4 t$ 进行了交叉验证,相对误差3%,佐证了估算结果的可靠性(表2)。

2.1.5 技术和经济可采储量估算

技术可采储量方面,申报区樊页平1开发试验井组生产时间已超过2年,采用已投产单井技术可采储量反算采收率。首先综合井口压力-累产液分析法、改进双曲产量递减法和产量不稳定分析(RTA)法,估算樊页平1区块平均单井技术可采储量为 $4.10 \times 10^4 t$,结合平均单井控制地质储量为 $50.10 \times 10^4 t$,反算采收率为8.1%,估算申报区原油技术可采储量为 $1\,135.99 \times 10^4 t$ 。

经济可采储量方面,参照国内外已投产页岩油气田开发方式,结合济阳坳陷不同洼陷页岩油评价试验效果及认识,明确了申报区初期采用水平井压裂弹性开发、后期转抽的开发方式,根据开发方案设计,采用现金流量法估算经济可采储量为 $749.97 \times 10^4 t$ 。

2.2 苏北盆地页岩层系

2.2.1 申报区概况

苏北盆地储家楼区块位于苏北盆地溱潼凹陷(图6),目标层位为古近系阜宁组二段I亚段,埋深3430~4560 m,呈北西高、南东低的构造格局,岩性为富含有机质混合质页岩和长英质页岩,为典型的源-储-运-储一体页岩层系油藏^[41-42]。

2018—2019年,溱潼凹陷针对页岩层系开展了系统的勘探老井复查,并建立了页岩层系石油评价标准。2020年3月,沙埕1X井获50.9 t/d高产,宣告溱潼油田的发现。2021年起,相继通过帅页3-7HF等井的实施并结合其高产的结果,逐步落实含油性并扩大含油范围;后续在溱页1平台实施了6口I亚段试验井,落实了提产增效工艺技术。截至探明储量估算基准日,申报区完成了溱页8-1X03HF井的密闭取心,以及其他4口井的特殊测井;同时有8口水平井开展了试采,达到了探明储量申报的资料要求。

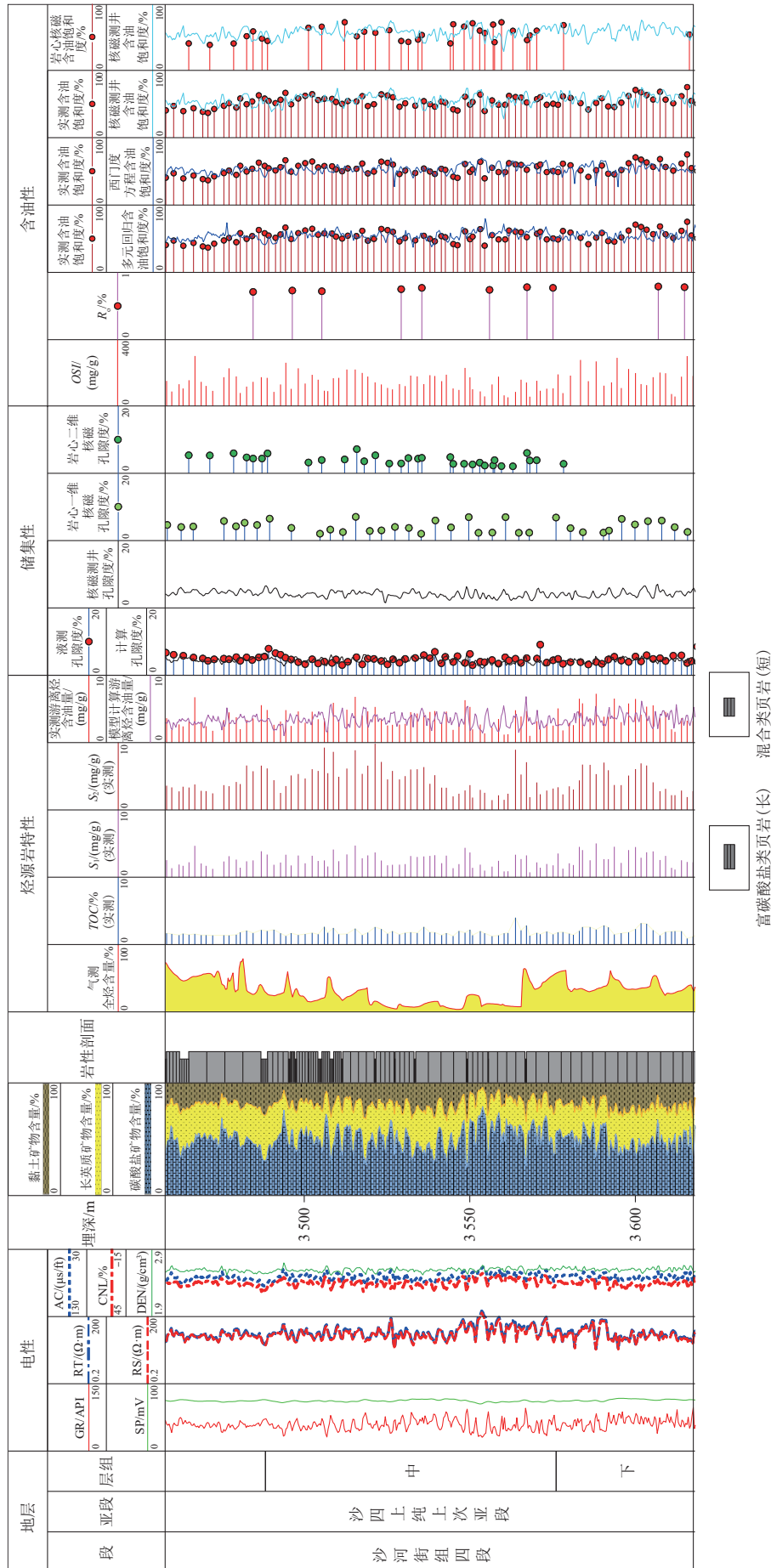


图5 济阳坳陷新兴油田樊斜184井测井解释成果
Fig. 5 Log interpretation results of well Fanxie 184, Xinxing oilfield, Jiyang Depression

TOC. 总有机碳含量; S_1 , 300 °C初始等温阶段, 每克岩石中热蒸发出的烃含量; S_2 , 300 ~ 650 °C程序升温阶段, 每克岩石中不溶有机质热裂解产生的烃含量; OSI, 含油饱和度指数; R_o , 镜质体反射率

表2 新兴油田樊页平1区块沙四上纯上2+3层组页岩层系石油探明地质储量估算结果

Table 2 Estimation of proved oil initially in place of shale layers in the 2nd and 3rd layer groups of the Chunshang interval of the upper sub-member of the 4th member of the Shahejie Formation in Fanyeping 1 block, Xinxing oilfield, Jiyang Depression

估算方法	含油面积/ km ²	有效厚度/m	有效孔隙度/%	含油饱和度/%	页岩质量密度/ (t/m ³)	游离烃含油量/ (t/t)	体积系数	原油密度/ (t/m ³)	原油地质储量/ (10 ⁴ t)
容积法	115.45	75.8	4.304	60.2	—	—	1.376	0.852	14 024.62
体积法	115.45	75.8	—	—	2.558	0.006 07	1.376	0.852	13 595.95

注:“—”代表该列值不适用。

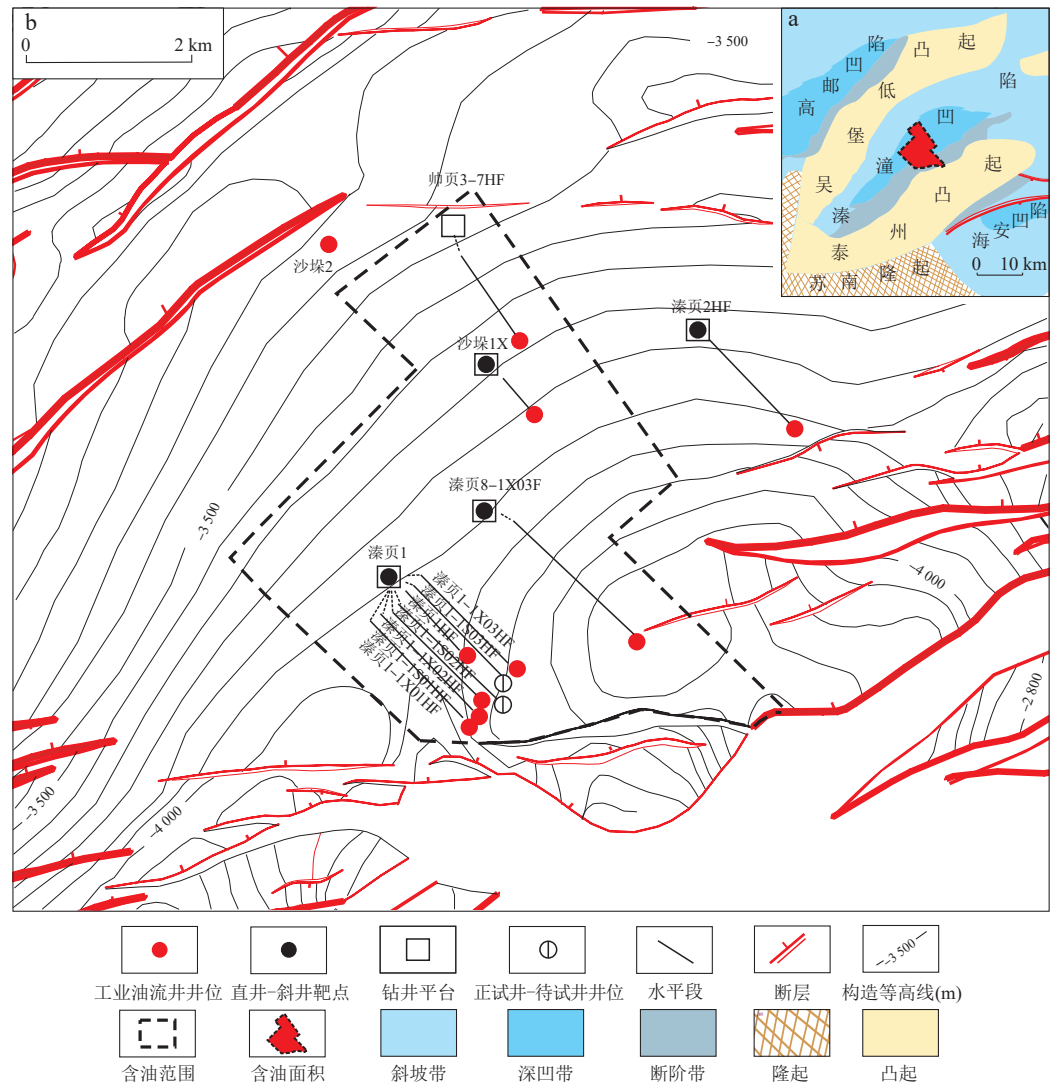


图6 苏北盆地溱潼凹陷储家楼区块阜宁组二段顶面构造及申报区位置

Fig. 6 Maps showing the top structure of the 2nd member of the Funing Formation and the location of the reporting area in the Chujialou block, Qintong Sag, Subei Basin

a. 苏北盆地构造单元划分及储家楼区块位置;b. 储家楼区块阜宁组二段顶面构造分布

2.2.2 含油面积圈定及有效厚度取值

申报区为北西高、南东低的单斜构造,断层不发育,页岩层系分布稳定,可划为《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)中定义的I类(构造简单)第一型(页岩层系稳定)。结合申报区试验井组水平排

距(0.3 km)和水平段长度(1.8 km),确定基本井距在水平段延伸方向为3.6 km,垂直水平段方向为1.2 km。申报区在满足基本井距控制原则下,充分应用水平井甩开部署、沿工业油井外推0.5倍基本井距,并以断层、矿业权线为界,最终圈定探明含油面积23.74 km²。申报区综合核磁实验、油气显示、测试和生烃模拟

等手段,建立了页岩层系“七性”关系和有效厚度下限标准,并利用二维核磁测井可动油信号(在有效孔隙度2.6%附近时仍存在部分可动油信号)进行了佐证,估算申报区平均有效厚度为87.5 m。

2.2.3 物性和含油性参数取值

有效孔隙度方面,与樊页平1区块不同,储家楼区块页岩黏土矿物含量相对偏高,若采用酒精法测量孔隙度,易在样品饱和过程中造成重量缺失。为此,对传统氦气法进行改进,针对页岩孔隙度小且页理发育的特点,采用精度更高且对样品无损的3D激光扫描方法测量样品体积,并与密闭取心二维核磁测量结果进行了交叉校验(表3),作为刻度测井的依据^[43]。在此基础上,通过多元回归分析,建立了利用密度和中子测井计算孔隙度的测井解释模型[公式(4)],估算申报区平均有效孔隙度为4.5%。

$$\Phi = 6.8863 \ln(CNL/DEN) - 8.4185 \quad (4)$$

式中: DEN 为补偿密度测井值, g/cm^3 。

含油饱和度方面,储家楼区块开展了二维核磁法和蒸馏抽提法两种岩心实验,并利用二维核磁开展泥浆滤液识别,对蒸馏抽提法结果进行了泥浆滤液侵入校正;同时利用密闭取心冷冻样品分析结果对常规取心进行了逸散校正。经双重校正后,溱页8-1X03井的

密闭取心分析结果表明,蒸馏抽提法与二维核磁法的结果相对误差仅为5.8%,利用该结果对常规测井的多元拟合方法进行了标定[公式(5)]。结果显示,刻度后的常规测井解释结果与岩心分析结果一致性较好(图7),估算申报区平均含油饱和度为61.4%。

$$S_o = 98.6 \lg(\lg R_t) + \Phi^{1.8} + 38.9 \quad (5)$$

式中: R_t 为深电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

游离烃含油量方面,储家楼区块采用与樊页平1区块相似的分温阶热解法,并通过申报区内密闭与常规取心条件下的密闭热释、冷冻热解实验结果对比,进行游离烃的轻烃补偿,目的层轻烃补偿平均值为2.20 mg/g;再根据岩样氯仿沥青“A”抽提前、后热解所得 S_2 (300℃以上热解烃量)的差值进行重烃补偿校正,目的层重烃校正平均值为1.20 mg/g。在此基础上,通过多元回归分析,建立含油量的测井解释模型[公式(6)],估算申报区平均游离烃含油量为7.17 mg/g。

$$T_f = 1.39CNL/DEN + 10.24 \lg R_t - 14.19 \quad (6)$$

2.2.4 地质储量估算结果

基于上述参数,采用容积法估算申报区新增探明地质储量 $4\,002.87 \times 10^4 \text{ t}$,并与体积法估算结果 $3\,948.06 \times 10^4 \text{ t}$ 进行了交叉验证,相对误差1.4%,证明了估算结果可靠性(表4)。

表3 苏北盆地溱潼凹陷储家楼区块酒精法、氦气法与二维核磁法孔隙度比对结果

Table 3 Comparison of porosity derived using the ethanol immersion, helium pycnometry, and 2D NMR methods in the Chujialou block, Qintong Sag, Subei Basin

序号	实测孔隙度/%			氦气法与二维核磁法 绝对误差/%	酒精法与二维核磁法 绝对误差/%
	氦气法	酒精法	二维核磁法		
1	4.99	6.36	4.25	0.74	2.11
2	5.03	4.79	4.76	0.27	0.03
3	5.91	6.75	5.76	0.15	0.99
4	2.75	3.03	2.58	0.17	0.45
5	0.79	1.43	0.88	-0.09	0.55
6	5.43	5.57	5.07	0.36	0.50
7	3.60	4.45	3.21	0.39	1.24
8	4.22	4.57	4.16	0.06	0.41
9	3.99	5.40	3.73	0.26	1.67
10	3.91	4.18	3.57	0.34	0.61
11	3.67	4.14	3.44	0.23	0.70
12	4.74	4.56	4.71	0.03	-0.15
13	5.05	5.40	4.86	0.19	0.54
14	5.13	5.60	5.00	0.13	0.60
15	5.06	5.31	4.72	0.34	0.59
16	6.39	6.51	5.77	0.62	0.74
17	2.17	2.30	2.33	-0.16	-0.03
平均值	4.28	4.73	4.05	0.23	0.68

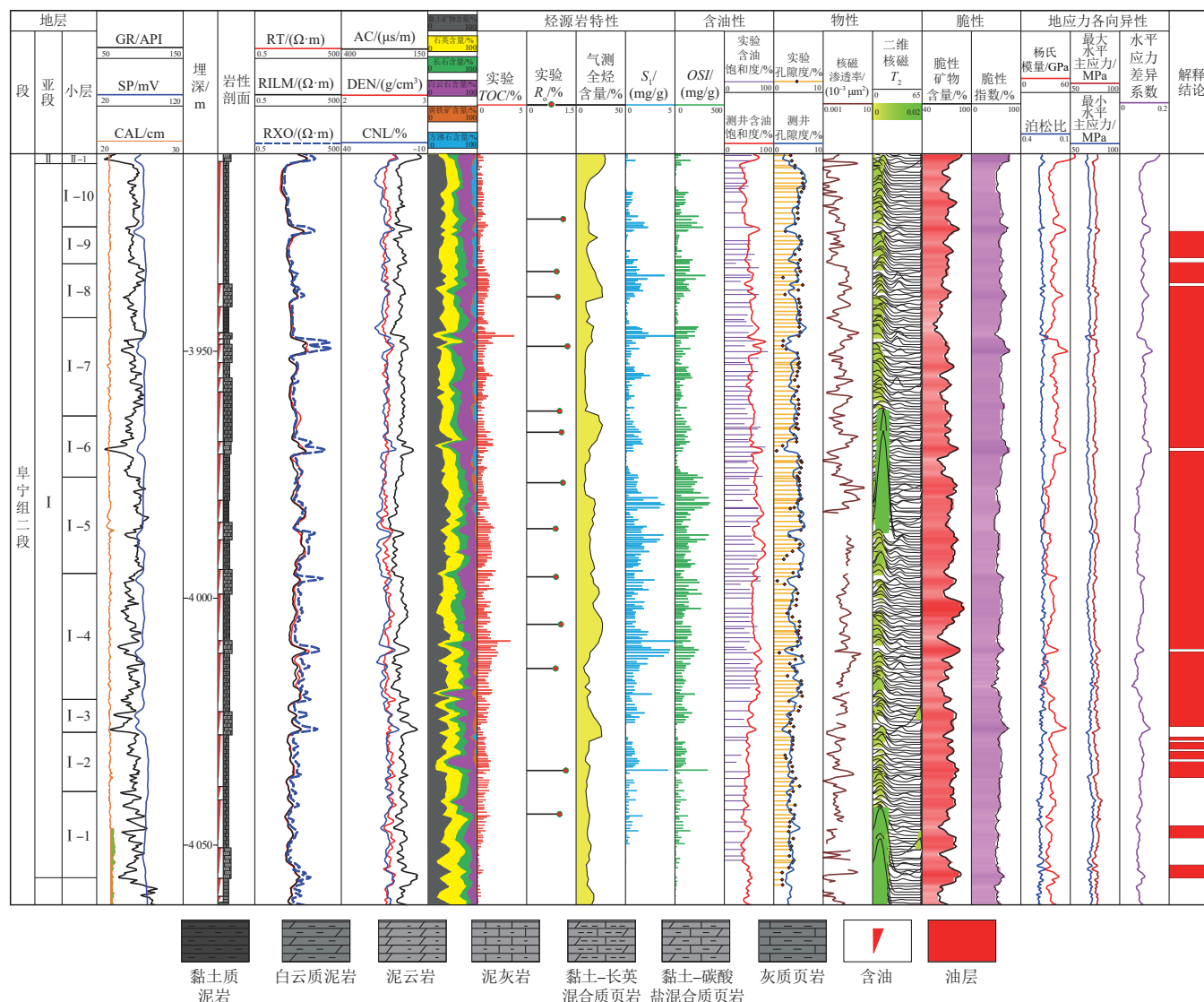


图7 苏北盆地溱潼凹陷储家楼区块溱页1井测井解释成果

Fig. 7 Log interpretation results of well Qinye 1 in the Chujiatou block, Qintong Sag, Subei Basin

TOC. 总有机碳含量; S_1 . 300 °C初始等温阶段, 每克岩石中热蒸发出的烃含量; OSI. 含油饱和度指数; R_r . 镜质体反射率

2.2.5 技术和经济可采储量估算

技术可采储量方面, 采收率主要依据申报区内试验井组的产量递减法确定, 并辅以数值模拟法交叉验证。利用溱页1井组中试采时间较长的溱页1HF井、溱页1-1X03HF井和溱页1-1S01HF井的生产动态资料, 估算3口井的技术可采储量为 10.70×10^4 t, 井控地质储量为 137.10×10^4 t, 测算采收率为8.3%。在此基础上, 估算申报区原油技术可采储量为 332.24×10^4 t。

申报区目前处于未开发状态, 按照“整体部署、滚动建产”思路编制开发方案。结合单井初产, 综合产量递减法和弹性产率法进行开发指标预测, 同时考虑未来开发工程投资等, 采用现金流法估算申报区经济可采储量 273.44×10^4 t。

3 页岩层系石油探明地质储量申报启示

3.1 勘探开发协同高效部署是提质的前提

新兴油田和溱潼凹陷的储量估算实践表明, 相对于常规油藏, 页岩层系石油探明申报对勘探部署与开发评价的协同性和系统性提出了更高要求。

首先, 勘探开发要一体化协同部署。页岩层系石油作为一种“连续型”油藏, 勘探井取得突破后, 开发应迅速跟进, 明产能、保井控; 通过井组先导试验, 加快明确开发技术政策界限。同时, 勘探应及时甩开控面, 充分利用过路直井-斜井试油控边, 取全取准资料, 以最大范围控制含油面积。其中, ①水平井部署应平面甩

开、纵向覆盖,最大限度控制立体空间;②优先利用水平井控面、直井-斜井控边,充分利用过路直井-斜井增加井控;③提升测试比例,用好达标井外推规则,井控实现“外紧内松”。以新兴油田为例(图4),樊页平1井突破后,①开发紧跟部署实施了“3层楼”8口井的立体开发井组,试验过断层和小角度顺断层两种布井方式,论证井网、井型和井距,支撑申报区“定类定型”和确定基本井距;②勘探随后向东、西部甩开部署樊页101HF等3口评价井,并向西南深洼区部署樊页3HF井,扩大控制含油面积,同时在纵向上部署樊页102-1HF等5口评价井,确保沙四上纯上2+3层组上、下部均有水平井钻遇;③系统补充樊斜195井等17口过路直井-斜井的试油资料,实现含油边界的有效控制。

其次,要超前谋划储量申报方案。《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)对井控要求和试采达标等提出更高标准,例如要求页岩层系试验井组至少试采3~6个月,加之钻井、压裂、取心、分析化验和测井建模等,区块一般申报探明周期不低于3年。为此,①必须将储量申报视为勘探开发的重要环节,建立井位部署和资料录取的前瞻性管理机制,从探井突破后超前谋划储量方案,科学安排运行节奏。②要建立“类型导向”的井位部署和风险控制策略,新储量规范中I类一型与III类三型区块的井控要求相差8倍,应建立差异化的评价井位部署思路。对I类一型等简单稳定型区块,应充分利用基本井距优势,勘探合理大幅甩开;对II类二型以下的复杂不稳定型区块,则宜逐级滚动部署。

3.2 取全取准资料是提质的基础

《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)高度重视保压密闭取心和探井-评价井测试比例等静-动态资料的录取,如何取全取准、充分利用高价值勘探开发资料,是区块申报探明储量的关键。

在静态资料录取方面,应重点提升3方面的工作质效:①在取心方面,规范要求中型规模以上储量必须具备保压或密闭取心,建议申报区预判储量规模,超前谋划密闭取心井位置,为深化储量参数研究预留时间。

②在岩心实验室分析方面,应力求保压密闭取心等高价值资料“吃干榨净”,做全实验项目;同时注重将二维核磁与常规岩心分析充分结合,满足“七性”评价和标定测井需要。③在测井解释方面,构建“密闭取心刻度+特殊测井解释+常规测井多元拟合”的解释模式,并通过盲井验证,合理减少岩相和厚度稳定区的测井工作量;同时在老油区充分利用过路直井-斜井,合理减少新井测井项目,降低勘探成本。

在动态资料录取方面,应高度关注页岩油井测试及试采工作质效。①新井试采应“求早求稳”,即尽早试采,确保满足3个月和6个月试采时长;同时,合理安排工作制度和开井时率,保障平均日产符合起算标准。②系统谋划过路井试油,在条件具备的情况下,力求“应试尽试”,将达到起算标准的过路井纳入储量估算范围,扩大探明含油面积。

3.3 迭代提升储量评价技术是提质的关键

中国石化在不同类型页岩层系储量申报过程中,持续优化储量参数估算方法,迭代提升储量参数估算的准确性。以济阳页岩层系石油勘探展开为例,岩心分析团队基于不同洼陷的最新资料,持续完善不同构造带页岩含烃组分的二维核磁图版(图8)和液测法流程,并开展实验结果对比,有效提升了页岩物性和含油性参数的解释精度。随着四川盆地复兴高熟页岩油的突破,目前中国石化正在构建不同成熟度情况下的页岩层系石油轻烃恢复系数图版,为游离烃含油量的准确计算提供支撑。

此外,页岩油申报区应重视储量评价与生产部署的结合研究,着力提升储量探明质效。①开展优化井型部署研究,特别是老油区应统筹构建过路直井与水平井相结合的布井策略,优化储量申报方案;②站在全盆地、多层系的视角,统筹开展保压密闭取心和测井系列优化等研究,压低成本;③以储量分类优选为目标,深化地质-工程-经济甜点主控因素等研究,统一评价标准。通过上述研究持续优化储量探明成本,提升页岩油勘探开发经济效益。

表4 苏北盆地溱潼凹陷储家楼区块阜宁组二段I亚段页岩层系石油探明地质储量估算结果

Table 4 Estimation of proved oil initially in place of shale layers in the 1st sub-member of the 2nd member of the Funing Formation in the Chujialou block, Qintong Sag, Subei Basin

估算方法	含油面积/ km ²	有效 厚度/m	有效 孔隙度/%	含油 饱和度/%	页岩质量密度/ (t/m ³)	游离烃含油量/ (t/t)	体积系数	原油密度/ (t/m ³)	原油地质 储量/(10 ⁴ t)
容积法	23.74	88.9	4.5	61.4	—	—	1.267	0.862	4 002.87
体积法	23.74	88.9	—	—	2.61	0.007 17	1.267	0.862	3 948.06

注:“—”代表该列值不适用。

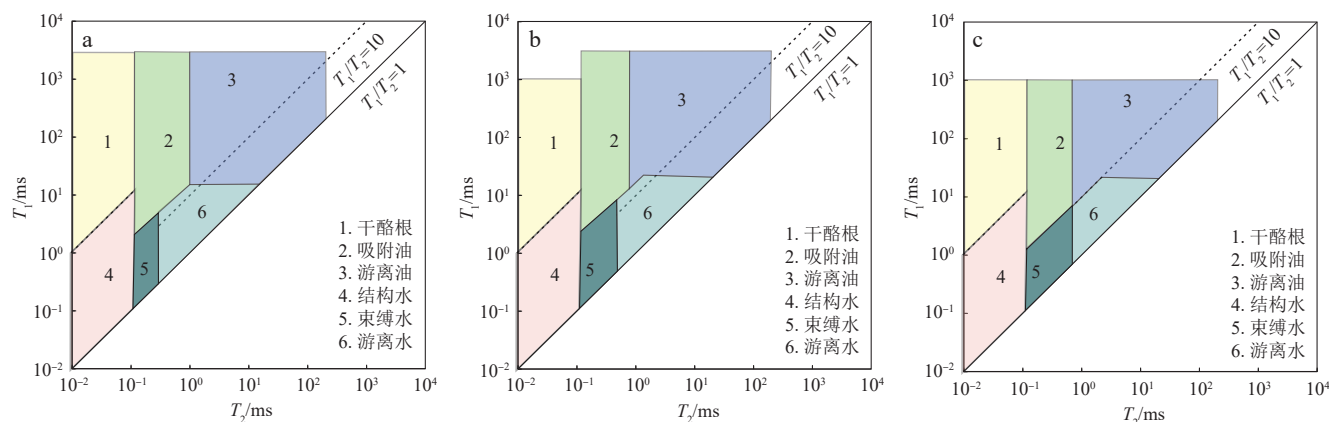


图8 济阳凹陷不同构造带页岩含烃组分二维核磁共振图版系列

Fig. 8 A series of 2D NMR charts of hydrocarbon-bearing components in shales from different tectonic zones in the Jiyang Depression

a. 缓坡断块区; b. 洼陷稳定区; c. 陡坡深陷区

T_1 : 纵向弛豫时间; T_2 : 横向弛豫时间

3.4 深化储量分类-分级评价是提质的保障

页岩层系石油勘探开发成本高,存在资源规模大、效益建产难的突出矛盾。为此,需要在储量分类-分级评价的基础上择优探明,有序实施区块接替。为此,①应立足中国陆相页岩油特点,引入人工智能和机器学习等先进理念,持续深化不同类型页岩油高产富集主控因素研究;②综合不同地区、不同类型的潜力区块,构建地质甜点、工程甜点和经济甜点“三统一”的评价项目库,并按照不同油价情景,对甜点区进行分类-分级评价;③以效益建产为导向,以“三统一”的评价项目库为平台,以区块分类-分级评价结果为依据,制定科学有序的储量探明和动用策略,实现储量、产量及效益的协同增长。

展望未来,中国石化页岩层系石油探明地质储量申报正在向复杂断块区、低演化程度区、高气/油比区、复杂岩相区和裂缝发育区等不同类型区块持续拓展。为此,①要加强复杂断块区保存条件、不同井型探评井部署策略研究,提升储量评价井位部署质效;②开展不同成熟度、气/油比页岩油的下限层测试,持续完善有效厚度下限标准;③深化不同岩相的储层物性和含油性解释方法研究,探索利用人工智能优化岩石物理实验、测井解释和岩相分类;④系统开展不同类型页岩油的保压密闭取心和试油-试采等资料录取工作,构建经验解释图版,指导降本增效。

4 结论

1) 中国石化依托济阳和苏北页岩油的勘探开发

实践,以自然资源部《页岩层系石油储量估算规范》(DZ/T 0501—2025)为指导,通过优化水平井和直井-斜井部署,合理控制含油面积与有效厚度,并应用二维核磁共振等新技术构建储层物性和含油性参数解释方法等,形成了一套系统的页岩层系石油储量参数估算方法,在济阳凹陷樊页平1区块和溱潼凹陷储家楼区块提交了首批页岩层系石油探明地质储量。

2) 新兴和溱潼2个申报区的探明储量估算实践与对比研究表明,页岩层系石油储量估算应根据不同页岩油区块的地质特点,在遵循储量规范的框架下,建立“分类化”的含油面积圈定、有效厚度下限,以及物性和含油性参数的取值标准,并通过多种方法综合验证,提升储量参数取值的可靠性。

3) 结合申报实践的思考,指出了提升页岩层系石油探明地质储量申报质效的4个方向。①勘探开发协同高效部署是提质的前提;②取全取准资料是提质的基础;③迭代提升储量评价技术是提质的关键;④深化储量分类-分级评价是提质的保障。

4) 展望未来,中国石化将积极拓展页岩层系石油探明地质储量申报新领域,持续攻关复杂断块区、低演化程度区、复杂岩相区和高气/油比区等不同类型页岩油储量估算方法,探索利用人工智能等新技术优化储量参数解释精度,着力为中国页岩层系石油增储上产构筑坚实的技术保障。

参考文献

- [1] FREEMAN L. Aging US shale wells: Years of remaining opportunities or growing asset retirement obligations? [J]. Journal of Petroleum Technology, 2022, 74(3): 10-15.

- [2] WEIJERS L, PEARSON M, WRIGHT C, et al. The American shale revolution in three stages[J]. *Oil-Industry History*, 2018, 19(1): 107-130.
- [3] HELMS L. Horizontal drilling[J]. *DMR Newsletter*, 2008, 35(1): 1-3.
- [4] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 128-142.
- ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 128-142.
- [5] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2007-2019.
- SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [6] 赵文智, 朱如凯, 张婧雅, 等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 1-13.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, ZHANG Jingya, et al. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 1-13.
- [7] 赵文智, 胡素云, 朱如凯, 等. 陆相页岩油形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, ZHU Rukai, et al. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [8] 米立军, 徐建永, 李威. 渤海海域页岩油资源潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1366-1377.
- MI Lijun, XU Jianyong, LI Wei. Shale oil resource potential in the Bohai Sea area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1366-1377.
- [9] 张宇, 赵培荣, 高山林, 等. 中国石化页岩油气高质量勘探实践与启示[J]. *中国石油勘探*, 2025, 30(1): 16-27.
- ZHANG Yu, ZHAO Peirong, GAO Shanlin, et al. Practice and enlightenment of high-quality shale oil and gas exploration of Sinopec[J]. *China Petroleum Exploration*, 2025, 30(1): 16-27.
- [10] 何希鹏, 张培先, 高玉巧, 等. 中国非常规油气资源效益开发面临的挑战与对策[J]. *中国石油勘探*, 2025, 30(1): 28-43.
- HE Xipeng, ZHANG Peixian, GAO Yuqiao, et al. Challenges and countermeasures for beneficial development of unconventional oil and gas resources in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2025, 30(1): 28-43.
- [11] 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.
- [12] 杨勇, 张世明, 吕琦, 等. 中国东部陆相断陷盆地中一低成熟度页岩油立体开发技术——以济阳坳陷古近系沙河街组为例[J]. *石油学报*, 2024, 45(4): 672-682, 697.
- YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in eastern China: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(4): 672-682, 697.
- [13] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 页岩层系石油储量估算规范: DZ/T 0501-2025[S]. 北京: 地质出版社, 2025.
- National Technical Committee for Standardization of Natural Resources and Land Spatial Planning. Specification of shale layers oil reserves estimation: DZ/T 0501-2025 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2025.
- [14] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 石油天然气储量估算规范: DZ/T 0217-2020[S]. 北京: 地质出版社, 2020.
- National Technical Committee for Standardization of Natural Resources and Land Spatial Planning. Regulation of petroleum reserves estimation: DZ/T 0217-2020 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [15] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 致密油储量估算规范: DZ/T 0335-2020[S]. 北京: 地质出版社, 2020.
- National Technical Committee for Standardization of Natural Resources and Land Spatial Planning. Regulation of tight oil reserves estimation: DZ/T 0335-2020 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [16] 侯连华, 吴松涛, 姜晓华, 等. 页岩油地质评价实验方法现状、挑战与发展方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 72-90.
- HOU Lianhua, WU Songtao, JIANG Xiaohua, et al. Situation, challenge and future direction of experimental methods for geological evaluation of shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 72-90.
- [17] 李映艳, 邓远, 何吉祥, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油有效储层物性下限研究[J]. *断块油气田*, 2025, 32(1): 20-26.
- LI Yingyan, DENG Yuan, HE Jixiang, et al. Study on lower limit of physical properties of effective shale oil reservoirs of Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2025, 32(1): 20-26.
- [18] 周志军, 张国青, 崔春雪, 等. 页岩储层孔隙结构表征及物性下限确定方法及应用[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(4): 96-102.
- ZHOU Zhijun, ZHANG Guoqing, CUI Chunxue, et al. Methods and applications for characterizing pore structure and determining physical property lower limit in shale reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(4): 96-102.
- [19] 陈兵. 陆相页岩储层有效孔隙度实验测定及测井表征方法——以博兴洼陷沙四段上亚段纯上次亚段页岩为例[J]. *油气地质与采收率*, 2025, 32(3): 47-57.

- CHEN Bing. Experimental determination of effective porosity in terrestrial shale reservoirs and logging characterization methods: A case study of shale of E_4^{UC} in Boxing subsag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2025, 32(3): 47–57.
- [20] 方朝强, 万金彬, 杨林, 等. 基于低温氮吸附实验的页岩油储层微观孔隙结构[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 39(5): 19–26, 42.
- FANG Chaoqiang, WAN Jinbin, YANG Lin, et al. Study on micro pore structure characteristics of shale oil reservoirs based on low temperature nitrogen adsorption experiment [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2024, 39(5): 19–26, 42.
- [21] 张金晴, 陶国亮, 黄代, 等. 页岩油岩心孔隙度测量的若干问题[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(2): 433–440.
- ZHANG Jinqing, TAO Guoliang, HUANG Dai, et al. Issues in shale oil core porosity measurement [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2025, 47(2): 433–440.
- [22] 王民, 赵信斌, 唐育龙, 等. 页岩孔隙度、含油率评价方法现状与研究进展[J]. *石油学报*, 2025, 46(9): 1817–1834.
- WANG Min, ZHAO Xinbin, TANG Yulong, et al. The current status and research progress of evaluation methods for shale porosity and oil content [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(9): 1817–1834.
- [23] 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.
- [24] 吴连波. 页岩核磁共振横向弛豫时间与孔径分布量化关系及应用[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(1): 36–43.
- WU Lianbo. Quantitative relationship between shale NMR transverse relaxation time and pore size distribution and its application [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(1): 36–43.
- [25] 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.
- [26] 张融, 王伟, 高怡, 等. 页岩油储层 T_2 - T_1 二维核磁共振测量参数敏感性分析[J]. *波谱学杂志*, 2023, 40(2): 122–135.
- ZHANG Rong, WANG Wei, GAO Yi, et al. Sensitivity analysis of T_2 - T_1 2D NMR measurement parameters in shale oil reservoirs [J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2023, 40(2): 122–135.
- [27] 陈龙川, 张兆谦, 郑建东, 等. 核磁共振测井在古龙页岩油评价中的应用[J]. *测井技术*, 2024, 48(1): 110–116.
- CHEN Longchuan, ZHANG Zhaoqian, ZHENG Jiandong, et al. Application of NMR logging in the evaluation of Gulong shale oil [J]. *Well Logging Technology*, 2024, 48(1): 110–116.
- [28] 韩进信. 核磁共振测井在古龙页岩储集性表征中的应用[J]. *录井工程*, 2025, 36(2): 58–64.
- HAN Jinxin. Application of NMR logging in characterization of Gulong shale reservoir performance [J]. *Mud Logging Engineering*, 2025, 36(2): 58–64.
- [29] 张丽华, 曲鹏, 黄亮, 等. Bongor盆地页岩油储层测井评价方法及应用[J]. *测井技术*, 2024, 48(3): 363–369.
- ZHANG Lihua, QU Peng, HUANG Liang, et al. Log evaluation method and application of shale oil reservoir in Bongor Basin [J]. *Well Logging Technology*, 2024, 48(3): 363–369.
- [30] 江程舟, 王贵文, 宋连腾, 等. 定量荧光技术在页岩油储层研究中的应用——以准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组为例[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(3): 634–644.
- JIANG Chengzhou, WANG Guiwen, SONG Lianteng, et al. Quantitative fluorescence techniques and their applications in shale oil reservoir research: A case study of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(3): 634–644.
- [31] 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.
- [32] 白龙辉, 柳波, 刘明博, 等. 页岩粉碎及热处理的流体核磁共振响应及其原位含油性启示[J]. *地球科学进展*, 2025, 40(5): 525–539.
- BAI Longhui, LIU Bo, LIU Mingbo, et al. Nuclear magnetic resonance characteristics and in situ oil content analysis of shale crushing and heat treatment [J]. *Advances in Earth Science*, 2025, 40(5): 525–539.
- [33] 刘飞, 杜金良, 孙林, 等. 基于核磁共振的页岩油吸附/游离微观分布定量表征——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为例[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(3): 645–658.
- LIU Fei, DU Jinliang, SUN Lin, et al. Quantitative characterization of adsorbed and free shale oil microscopic distribution based on nuclear magnetic resonance: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(3): 645–658.
- [34] 李军亮, 王民, 秦峰, 等. 陆相富碳酸盐页岩纹层组合对页岩油富集的控制作用——以渤海湾盆地济阳凹陷古近系沙河街组页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 392–406.

- LI Junliang, WANG Min, QIN Feng, et al. Controlling effects of lamina assemblages on shale oil enrichment for lacustrine carbonate-rich shales: A case study of shales in the Paleogene Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 392–406.
- [35] 李军亮, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳陆相断陷盆地页岩油研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(4): 60–72.
- LI Junliang, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Research progress of shale oil in Jiyang continental faulted basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 60–72.
- [36] 魏永波, 刘全有, 卢双舫, 等. 中国陆相页岩油富集机制: 以渤海湾盆地饶阳凹陷沙河街组为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(7): 2268–2289.
- WEI Yongbo, LIU Quanyou, LU Shuangfang, et al. Accumulation mechanisms of nonmarine shale oil in China: A case study of the Shahejie Formation in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2025, 55(7): 2268–2289.
- [37] 杨雨萱, 王森, 梁怡普, 等. 济阳坳陷纹层状页岩油储层孔隙结构表征与渗流模拟[J/OL]. 油气地质与采收率: 1–9. <https://doi.org/10.13673/j.pgre.202402005>.
- YANG Yuxuan, WANG Sen, LIANG Yipu, et al. Pore structure characterization and flow simulation of laminated shale oil reservoir in Jiyang Depression [J/OL]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency: 1–9. <https://doi.org/10.13673/j.pgre.202402005>.
- [38] 冯子辉, 张居和, 邵红梅, 等. 高黏土陆相页岩实验技术及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 75–87.
- FENG Zihui, ZHANG Juhe, SHAO Hongmei, et al. Experimental techniques and their application for high clay content continental shale [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 75–87.
- [39] 郭同政, 张晋言, 柴婧, 等. 基于测录井资料计算页岩含油饱和度与气油比的方法[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 126–136.
- GUO Tongzheng, ZHANG Jinyan, CHAI Jing, et al. Methodology of calculating oil saturation and the GOR of shale based on logging data [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 126–136.
- [40] 曹婷婷, 蒋启贵, 钱门辉, 等. 页岩含油量热解分析关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 329–338.
- CAO Tingting, JIANG Qigui, QIAN Menhui, et al. Key technologies for pyrolysis analysis of shale oil content [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 329–338.
- [41] 蔡潇, 夏威, 马晓东, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组页岩油储集空间特征及其影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1482–1493.
- CAI Xiao, XIA Wei, MA Xiaodong, et al. Storage spaces characteristics and influencing factors of shale oil reservoirs of Paleogene in Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1482–1493.
- [42] 付茜, 段宏亮, 刘世丽, 等. 高邮凹陷花庄地区阜二段页岩储层孔喉结构特征研究[J]. 复杂油气藏, 2024, 17(2): 131–138.
- FU Qian, DUAN Hongliang, LIU Shili, et al. Study on pore throat structure characteristics of shale reservoirs in the second member of Funing Formation in the Huazhuang area of Gaoyou Sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(2): 131–138.
- [43] 王欣, 韩建强, 胥灵, 等. 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩油测井评价研究[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 364–372.
- WANG Xin, HAN Jianqiang, ZAN Ling, et al. Logging evaluation of shale oil in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 364–372.

(编辑 许诺)