

文章编号:1673-2677(2026)02-0057-09

DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.02.007

引用:杨兆中,滕金池,王小玮,等.页岩储层甜点预测与评价方法研究进展与展望[J].新疆石油天然气,2026,22(2):57-65.

Cite: YANG Zhaozhong, TENG Jinchi, WANG Xiaowei, et al. Research Progress and prospect of sweet spot prediction and evaluation methods for shale reservoirs[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2026, 22(2): 57-65.

页岩储层甜点预测与评价方法研究进展与展望

杨兆中¹,滕金池²,王小玮²,徐铭阳¹,李嘉文²,郭静²,刘艺文²

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都 610500;2. 中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院,新疆克拉玛依 834000)

摘要:针对我国油气对外依存度高、页岩油气规模效益开发对储层甜点精准预测与评价的核心需求,系统梳理页岩储层甜点预测与评价方法的研究进展,明确各类方法的适用性与局限性,为页岩油气勘探开发高效部署提供理论参考与技术支持。基于国内外相关研究成果,围绕地质甜点与工程甜点两大核心维度,从岩心实验测试、测井与地震资料分析、数值模拟三类主流技术路径,系统剖析了甜点评价的核心控制因素、指标体系与技术特征。研究明确了地质-工程“双甜点”评价理念已成为行业共识,阐明了三类评价方法的核心优势,同时指出岩心实验尺度转换不确定性、测井地震解释多解性、数值模拟精度受简化假设制约等关键局限。未来页岩储层甜点评价需向多维度一体化、智能多源数据融合、多物理场耦合动态评价方向发展,以全面提升预测精准度与工程适用性。

关键词:页岩储层;地质甜点;工程甜点;智能预测;多物理场耦合

中图分类号:TE122;P618.13

文献标识码:A

Research Progress and Prospect of Sweet Spot Prediction and Evaluation Methods for Shale Reservoirs

YANG Zhaozhong¹, TENG Jinchi², WANG Xiaowei², XU Mingyang¹, LI Jiawen², GUO Jing², LIU Yiwen²

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 2. Oil Production Technology Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: Given the accurate prediction and evaluation of reservoir sweet spots, a core demand for the large-scale and cost-effective development of shale oil and gas against the backdrop of China's high dependence of imported oil and gas, this study systematically reviews the research progress of prediction and evaluation methods for shale reservoir sweet spots, clarifies the applicability and limitations of various methods, and provides theoretical reference and technical support for the efficient deployment of shale oil and gas exploration and development. Based on relevant domestic and international research achievements, this study focuses on two core dimensions, namely the geological and engineering sweet spots, and systematically analyzes the core control factors, index system and technical characteristics of sweet spot evaluation with respect to three mainstream technical routes: experimental core tests, well logging and seismic data analysis, and numerical simulation. It is demonstrated that the evaluation concept of the geological-engineering "dual sweet spot" has become a consensus across the industry. Moreover, the core advantages of the three types of evaluation methods are clarified, and the key limitations are presented, including the uncertainty of scale conversion in core experiments, the multiplicity of well logging and seismic interpretation, and the accuracy of numerical simulation restricted by simplified assumptions. Finally, it is pointed out that the future evaluation of shale reservoir sweet spots needs to develop towards multi-dimensional integration, intelligent

基金项目:国家自然科学基金面上项目“纳米油基钻屑填充超低密度支撑剂的强化机制研究”(52574051);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“多类型页岩油个性化压裂技术与试验”(2023ZZ28YJ04)。

作者简介:杨兆中(1969—),1996年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,博士,教授,主要从事非常规及特殊油气藏的增产改造理论与技术、采油气理论与技术攻关。(E-mail) yzzycl@vip.sina.com

multi-source data fusion, and multi-physical field coupling dynamic evaluation, so as to comprehensively improve the prediction accuracy and engineering applicability.

Key words: shale reservoir; geological sweet spot; engineering sweet spot; intelligent prediction; multi-physical field coupling

长期以来,我国油气消费端对外依存特征显著,石油进口依存度突破70%,天然气进口依存度亦超40%^[1]。在国际地缘政治博弈加剧、贸易秩序重构的背景下,国际油气市场呈现出剧烈波动的运行态势,依托高效开发技术实现油气产量突破,是当下保障能源安全的核心要务^[2-3]。页岩气规模效益开发是降低天然气对外依存度的重要现实途径,我国的页岩气资源储量丰富,地质资源量为 $121.86 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量介于 $11.5 \times 10^{12} \sim 36.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具有巨大的经济开发价值^[1,4-6]。

地质学中“甜点”这一概念最早由Yarborough^[7]于1977年在与板块构造和边缘演化相关的大陆边缘类型的研究中提出,将发育于努比亚型壶状构造顶部的一套中新世盐岩层盖层称为“低温型甜点区”;2002年,美国地质学家Shurr和Ridgley^[8]在非常规浅层生物成因气系统的研究中首次明确定义“甜点”(Sweet Spot)术语,定义为非常规浅层生物气盆地中含气或产气最好的地理区域。页岩储层甜点的精准预测与评价是连接地质认识与工程实施的核心纽带,其本质是系统表征控制甜点发育的三大核心要素——优越的储层指标、良好的保存条件及有利的工程品质,最终实现地质甜点与工程甜点的协同识别^[9]。

地质甜点是指非常规油气储层中油气富集程度高、储层物性好、资源潜力大的区域或层段,是控制油气产量的基础地质条件^[10-11];工程甜点是指非常规油气储层中相对易于压裂改造并能形成有效复杂缝网的区域或层段,是决定油气能否被经济有效开采的关键工程条件^[10,12]。地质甜点和工程甜点统称为“双甜点”,二者的重叠区域是页岩油气勘探开发的最优目标区,即“甜点区”,该区域既具备良好的油气富集条件,又具有优异的可压裂改造潜力,能够实现经济效益最大化的开发。

本文基于现有研究成果,系统梳理页岩储层甜点预测与评价方法的发展脉络,重点剖析地质与工程甜点的核心控制因素及评价指标体系,总结各类甜点评价方法的适用性与局限性,结合地质-工程-地球物理一体化发展趋势,展望未来精准化、智能化、全生命周期评价的研究方向,为页岩油气勘探开发的高效部署提供理论参考与技术支撑。

1 页岩储层甜点预测与评价方法研究进展

地质甜点是常规油气储层内,兼具高油气富集

程度、优异储集物性与巨大资源潜力的区段或层位,是决定油气井产能的核心地质基础。2007年,Jarvie等^[13]提出“四高”标准来评价地质甜点,即:高有机碳含量(Total Organic Carbon, TOC)($>3.0\%$)、高孔隙度($>3.0\%$)、高含气量($>3.0 \text{ m}^3/\text{t}$)、高地层压力(压力系数 >1.3);2022年,金之钧等^[14]提出陆相页岩油甜点评价新方法,综合岩性组合及储集性、含油性等特征;2025年,曹剑等^[15]强调源储耦合对甜点形成的控制作用,研究页岩油甜点形成机理以及页岩油富集模式,进一步完善国内页岩油地质甜点评价体系。

而工程甜点是油气储层中利于水力压裂造缝与缝网扩展、压裂施工安全高效且改造后能实现经济有效产能的核心优选区域^[16-17]。2007年,Jarvie等^[13]系统阐述了构成页岩气甜点的地质与工程双重属性,提出“双甜点”评价理念。2008年,Rickman等^[18]建立以脆性指数为核心的可压性评价方法。2023年,葛勋等^[19]基于实测岩石力学参数、天然裂缝发育程度、天然裂缝有效性、水平应力差以及水平井轨迹与最小水平主应力夹角,建立了永川、丁山复杂构造区海相页岩气“工程甜点”的评价指标体系;同年,王志战等^[20]采用高分辨率一维、二维核磁共振测量,结合氮气吸附、压汞、地化分析等实验结果,评价了泌阳凹陷YY1井的储集性、含油性,建立了基于二维核磁谱图组分的干酪根含量表征模型,完善了“工程甜点”评价体系。

在评价地质甜点时侧重储集性能、含油性,而评价工程甜点时侧重可压性、脆性,表征重点略有差异。基于国内外主流的甜点评价方法,本研究从岩心实验测试、测井和地震资料分析、数值模拟三类方法展开甜点评价方法的分析。

1.1 基于岩心实验测试的甜点评价方法

基于岩心实验测试的地质甜点评价方法优先适用于非常规储层钻井取心后的勘探后期和开发阶段,尤其适合微观孔隙结构复杂、烃类赋存状态多样的储层,可通过实验数据对前期甜点预测结果进行验证和修正,也可用于常规储层的关键参数校准,具有极高的实验精度^[21-22]。

王剑等^[21]采用场发射扫描电镜、激光共聚焦显微镜、纳米CT等多种实验技术,系统分析了芦苇沟组页岩油不同岩性的孔隙分布特征,实验测试能够精准区分不同岩性的孔隙差异,长石岩屑粉细砂岩孔隙结构最好(图1),为甜点评价提供了微观尺度的直接证据,

且可直接获取甜点评价的关键参数,避免间接预测的误差。而Sun等^[23]通过12个岩心样品的核磁共振、热解和共聚焦激光扫描显微镜实验,分析不同层理的孔

隙结构与流体赋存特征,揭示了层状页岩油流动性的控制因素,进一步实现了微观参数的定量表征与可动油精准区分。

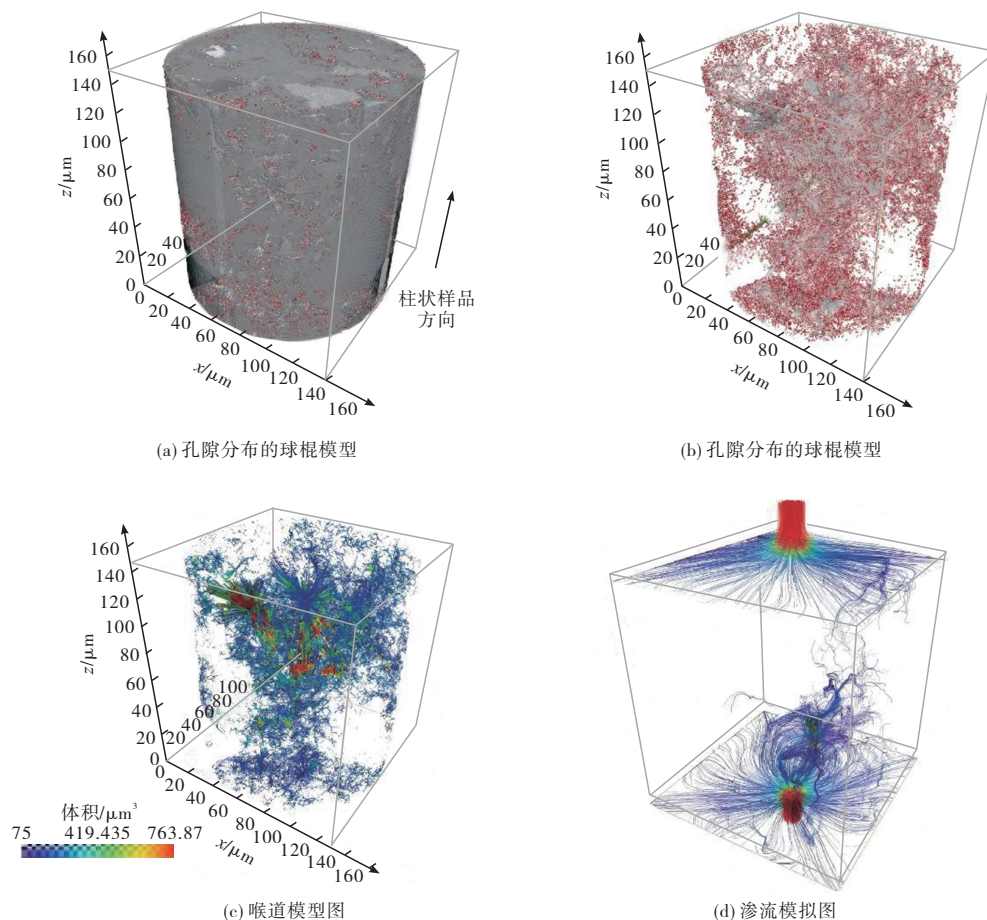


图1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩储层纳米CT孔隙结构特征^[21]

Fig. 1 Nanoscale CT pore structure characteristics of the shale reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin^[21]

图(a)和(b)中,红色节点为孔隙,连接线是喉道,吉305井,3 579.36 m,粉细砂岩;(d)中,渗流趋势线以平行岩石层理的方向为主,垂直层理分布的趋势线较少。

针对储层流体特征与含油性评价,Zhang等^[24]采用温度依赖性干馏与二维核磁共振联合实验方法研究古龙页岩流体特征,建立了流体类型分类的实验标准,通过整合多种实验手段,可全面表征储层的储集性能、渗流能力、含油性和可压性,形成多维度评价体系,为甜点含油性评价提供了精确方法;贾昀等^[25]则利用接触角测量系统和核磁共振技术,独立评价了油相在不同尺度孔隙中的可动性,建立了综合考虑润湿性、孔隙结构和可动性的多尺度评价体系,实验数据的直接测量特性使其成为验证其他评价方法结果的重要标准,确保了甜点评价的可靠性。

在甜点形成机理与工程参数评价方面,Bai等^[26]通过不同温度、压力条件下的自发渗吸实验和时间分辨核磁共振分析,揭示了页岩孔隙结构和润湿性对流

体流动的影响机制,实验测试能够深入研究甜点形成的微观物理化学过程,为理解甜点分布规律提供了机理层面的认识;王伟等^[27]以系统实验为基础,开展了游离油、脆性指数的测井评价方法研究,建立了产量潜力指数计算模型和甜点分类方法,实验测试获得的量化参数为甜点分类提供了明确的量化标准,实验可模拟地层条件,揭示了层理结构和流体对弹性参数各向异性的影响,为地震甜点预测提供机理参考;Xiao等^[28]采用交叉带岩石物理测量技术,在不同围压和流体饱和条件下进行低频应力应变测量和高频超声波测试,阐明了陆相页岩弹性参数的各向异性频散机制;Zhang等^[29]使用三轴岩石力学伺服测试系统和X射线衍射仪测试36个样品的力学参数和矿物组成,对比主流脆性指数计算方法,实验测试获得的弹性模量

和泊松比精度高,建立了适合鄂尔多斯盆地Y区块页岩油储层的脆性评价方法;Wang等^[30]则提出了基于裂缝复杂度的页岩可压性评价新模型,采用恒应变率法进行岩心破裂压力实验,提取裂缝形态并计算裂缝面积比、倾角离散度等参数。

然而,岩心实验测试存在一定局限性,实验室样品与实际储层存在尺度差异,实验结果外推存在不确定性,如Meng等^[31]的研究反映微观尺度实验揭示的裂缝扩展机制与宏观储层压裂效果存在差异,需通过数值模拟进行尺度转换。

1.2 基于测井与地震资料的甜点评价方法

基于测井与地震资料的地质、工程甜点评价方法适合用于覆盖区域普查的勘探早期至开发中期,适用于全尺度储层,尤其适合如陆相页岩油层、海相页岩气层和致密砂岩气层这样大面积分布的层状储层,而对薄互层甜点,需结合如成像测井、核磁共振测井等高分辨率测井进行识别,是甜点评价中应用最广泛的方法^[32-33]。

测井资料具备垂向连续高分辨率的优势,地震资料可实现横向大面积覆盖,二者结合能够完成储层三维立体评价,这也是其广泛应用的核心原因。姚东华等^[34]利用测井与地震资料建立了页岩岩性、储集物性、含油性、脆性等产能敏感参数的测井定量预测模型,构建了综合甜点评价指数,明确测井数据的连续性使其能够在单井垂向上连续预测甜点参数,地震反演则可实现井间参数的连续插值;贾曙光等^[35]对比了多种测井和地震属性对甜点识别的效果,研究得出核磁共振孔隙度对甜点识别效果最佳,基于测井资料进行多维度、多尺度的甜点评价能提高甜点识别的准确性,可有效区分不同类型的甜点储层。

在技术优化方面,葛勋等^[19]基于成像测井和地震数据,结合岩石力学参数、天然裂缝发育程度等,预测了最小水平主应力、天然裂缝有效性等工程甜点的关键参数以评价深层页岩储层的工程甜点,为水平井部署和压裂设计提供依据;刘国强等^[36]利用电成像、核磁共振、三分量感应和阵列声波测井,建立宏观结构分类标准,提出了“双结构甜点评价方法”,综合宏观结构与微观特征以提升评价精准度。

针对大范围勘探优选需求,基于测井与地震进行的工程甜点评价范围广,可覆盖整个勘探区块,Chen等^[37]通过非线性叠前AVO(Amplitude Variation with Offset,振幅随偏移距变化)反演获取敏感弹性参数,结合随机森林算法构建综合评价模型,建立了陆相页岩油甜点地震预测技术,成功划分三类甜点区;葛勋

等^[38]则通过岩心实验建立储层参数与地震弹性参数的定量关系,结合构造和沉积特征,建立了地质-测井-地球物理相结合的甜点预测方法,进一步完善评价体系。

测井曲线和地震属性与储层参数之间的关系复杂且非唯一,测井和地震参数解释存在多解性,需要结合地质背景和实验数据进行约束,周雨晴等^[39]使用测井资料结合实际工区特征针对性构建了致密砂岩储层岩石物理模型,分析了弹性参数与储层参数的关系;秦德文等^[40]通过应用小波边缘分析与井-震联合建模的波阻抗反演技术,实现了甜点储层开发过程中的动态监测,提高了低渗气藏甜点预测精度;Zeng等^[41]通过叠前同步反演获取弹性参数体,结合模糊优化法建立评价体系,建立了基于地震数据的页岩气甜点定量预测方法,7口验证井证实其可靠性。

1.3 基于数值模拟的甜点评价方法

基于数值模拟的地质甜点评价方法适用于潜力预测勘探早期阶段,优先适用于包括超深层页岩储层、断裂发育型致密储层以及高温高压储层的复杂地质条件储层,也可用于常规储层的开发方案优化,是连接地质评价与工程实施的核心方法^[19,42]。

数值模拟的核心优势在于,可复现实验室难以模拟、现场测试风险较高的极端地质条件,同时能实现地质评价与工程设计的一体化衔接。韦世明等^[42]采用MATLAB对COMSOL进行二次开发,实现了流固全耦合条件下的水力压裂数值模拟,二次开发过程采用COMSOL的固体力学与达西定律模块进行流固全耦合条件下的应力场和压力场求解,采用MATLAB调用应力场进行裂缝扩展判定,通过网格的动态修改控制裂缝扩展,从而实现流固全耦合条件下的裂缝扩展模拟(图2),为甜点的动态评价提供依据;赵志刚等^[43]以神府南区为例,综合应用地质、测试、压裂及生产动态资料,围绕深部煤层气藏资源性和可压性,建立了深部煤层气地质-工程“双甜点”预测模型,通过数值模拟分析了各参数对甜点的影响。

在工程甜点优化方面,数值模拟可对比不同压裂方案在各类甜点区的实施效果,选择最优方案,降低开发风险。Shen等^[44]通过Planar3D和UFM模型模拟不同甜点区的裂缝扩展,优化压裂参数,建立了地质-工程一体化压裂设计方法,现场应用获得工业油流;Lu等^[45]通过数值模拟整合地质甜点和工程甜点评价结果,用数值模拟将地质评价与工程设计相结合,实现全流程一体化分析,优化压裂规模,建立了基于甜点刻画的页岩油压裂设计方法,提高了阶段产量预测

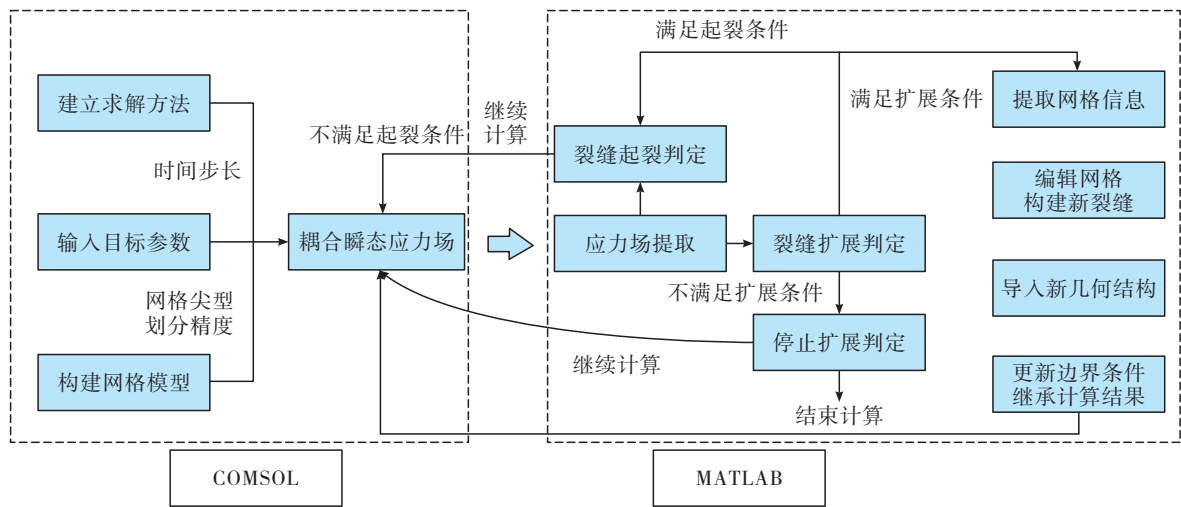


图2 模型二次开发步骤^[42]
Fig. 2 Procedures for secondary development of the model^[42]

的均匀性。

Mesdour等^[46]曾指出数值模拟方法在非常规页岩储层甜点识别中的局限性,由于地质条件的复杂性和不确定性,数值模拟中的简化假设会造成模拟误差,影响模拟结果的准确性;同时,模拟结果的准确性高度依赖地质模型、本构关系和边界条件的合理性,Meng等^[31]的研究表明数值模型对页岩非均质性和各向异性的表征能力有限,如线弹性假设等本构关系简化与实际岩石非线性变形存在差异,会导致模拟结果偏差。

2 页岩储层甜点预测与评价方法展望

2.1 多维度一体化甜点评价体系的完善与应用

页岩储层甜点预测与评价的核心目标是实现资源开发的精准化与效益化,传统单一地质维度或工程维度的评价模式已难以适配非常规油气开发的复杂需求,随着地质-工程“双甜点”的评价理念已得到广泛认可,未来页岩储层甜点预测与评价可能向地质-工程-经济三维度一体化方向推进,构建全生命周期动态评价新范式。

国内外油田选用的页岩油/气甜点评价参数多达52个,大部分评价方法使用5~9个评价参数,先确定其在甜点评价中的权重,再开展甜点评价。近年来,参与评价的工程参数也在变多,见表1,地质-工程“双甜点”的评价理念已得到广泛认可。

“双甜点”评价体系的构建可依托灰色关联法实现参数权重的定量化表征^[47],以压后产量为目标函数,对孔隙度、储层厚度、含气饱和度等地质参数与脆性指数、水平应力差、断裂韧性等工程参数进行归一化处理,通过计算各参数与产量的关联度确定权重系

数,分别构建地质甜点指数与工程甜点指数,再通过区域适配系数耦合形成“双甜点”评价指数,其阈值划分可有效识别优先开发区域与低效区域。

基于上述方法体系,地质-工程-经济的三维一体化评价则需进一步纳入弹性产率、开发成本、油价波动阈值等经济参数,通过拓展灰色关联法的多因素分析能力,量化经济维度权重并耦合地质-工程双指数,形成三维一体化评价模型^[48]。同时,可融合全生命周期动态数据,将预探阶段资源潜力评价、开发阶段产能预测与生产阶段效益评估动态衔接,通过多源数据融合与智能算法迭代,实现评价模型的实时更新。随着研究的深入,将有效解决地质甜点与工程甜点错位、资源量与产能衔接不畅等问题,为非常规油气差异化开发策略制定与效益优化提供科学支撑。

2.2 人工智能与多尺度数据融合的智能甜点预测技术

页岩储层具有强非均质性、多尺度特征,传统甜点预测方法依赖人工经验且工作量大,难以满足大规模、精细化甜点预测的需求。近年来,出现了以机器学习、深度学习算法为核心,融合多源数据的智能预测技术,可能成为解决传统甜点预测方法多解性强、效率低、主观性强等问题的关键。

基于机器学习的立体三元甜点评价方法通过多维度指标体系构建实现甜点精准刻画,通过脆性指数、杨氏模量等判断的可压裂性,根据总有机碳、孔隙度等判断的流动性以及岩性三类核心评价参数,采用自训练半监督聚类算法突破无岩心数据段的岩性识别难题,结合熵权法量化指标权重,经Kriging插值实现井眼甜点分布的三维离散化,最终通过t-SNE算法降维得到立体甜点分布,拓展了甜点识别的纵向范围与分辨率。构造裂缝智能识别则依托Pearson相关系

表1 国内各大油田评价参数选取
Tab. 1 Evaluation parameter selection for major oilfields in China

评价参数	长庆 油田	大庆 油田	吉林 油田	辽河 油田	胜利 油田	西南 油田	苏北 油田	吐哈 油田	新疆油田	
									吉木萨尔 凹陷	玛湖 凹陷
地质 参数	岩性岩相		○	○	○		○	○		○
	TOC含量/%		○	○	○	○	○		○	○
	残留烃S _i 含量/(mg·g ⁻¹)		○	○	○	○	○			
	含油饱和度指数		○		○		○			○
	储层厚度/m	○							○	
	有效孔隙度/%	○		○		○	○	○		
	含油饱和度/%		○	○			○	○	○	
	原油密度/(g·cm ⁻³)		○	○	○					
工程 参数	归一化产能指数								○	
	脆性矿物含量/%		○	○		○	○			
	脆性指数	○			○	○			○	
	压力系数		○	○		○				
	渗透率/mD				○		○			
	页理密度/(条·m ⁻¹)		○							
	裂缝发育	○			○		○			○

表中“○”表示对应列的油田在开展储层评价、甜点筛选、开发工程方案设计时,将对应行的评价参数纳入了核心评价指标体系,作为主控因素、关键评价与选取参数使用。

数分析法筛选声波时差、中子孔隙度、深浅双侧向电阻率比等敏感测井参数,优选TabNet表格数据深度学习架构,针对富有机质与含有机质页岩分类构建模型,分别实现裂缝规模与产状的高效识别,并通过裂缝网络有效指数建立识别结果与含气性、改造体积的关联^[49-50]。

未来该技术可向多维度深度融合方向发展,优势明显:①整合测井、钻井、地震等全链条数据,突破单一信息局限^[51];②同步推进算法优化,构建物理约束与数据驱动耦合的混合模型,适配复杂储层;③搭建智能化闭环体系实现一体化决策,并拓展工程化应用,结合实时监测动态调整,为深层页岩储层甜点精准刻画与高效开发提供核心技术支撑。

2.3 多物理场耦合与动态甜点评价方法的创新

当前基于数值模拟的页岩储层甜点评价多以静态评价为主,主要基于储层原始地质、工程参数等开展甜点识别与预测,而忽略了开发过程中储层物性、流体分布等的动态变化,导致评价结果与实际开发效果存在偏差,难以适应储层全生命周期开发的需求。近年来,甜点评价开始出现从静态评价向动态评价的转变,研究者通过多物理场耦合模型模拟储层开发过程中的动态演化规律,实现甜点区的全生命周期精准预测与评价。

以嵌入式离散裂缝模型(Embedded Discrete Frac-

ture Model, EDFM)结合有限体积法(Finite Volume Method, FVM)构建的流固耦合模型作为动态评价的核心支撑,整合页岩气吸附、解吸、扩散及滑移流等多传输机制,可实现天然裂缝、复杂几何形态水力裂缝与储层应力、孔隙弹性效应的耦合模拟,通过应力计算与产能模拟的双重验证,可精准捕捉开发过程中的应力时空演化、压力衰竭区域形态及产能动态变化规律^[52]。在此基础上,可进一步构建热-流体-力学-化学(THMC, Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical)多场耦合模型,该模型在流固耦合基础上,进一步融入如二氧化碳与页岩相互作用引发的化学溶解、力学弱化效应及热传导-对流过程,综合考虑有效应力演化、竞争吸附膨胀、矿物溶解与孔隙重构等多因素耦合影响,通过数值求解验证,能够定量表征开发全周期内储层渗透率、孔隙度等核心甜点参数的动态响应^[53]。

此类多场耦合模型为动态甜点评价提供了全新范式,未来需进一步强化复杂裂缝网络精细表征与多尺度耦合模拟,优化化学-力学作用定量表征方程,结合矿场动态数据实现模型参数自适应校正,同时探索与机器学习等技术的融合路径。随着多物理场耦合理论的不完善和计算技术的升级,动态甜点评价方法将逐步实现规模化应用,甚至可能实现储层动态演化的实时预测。

3 结论

1)地质甜点与工程甜点在评价方法上主要是侧重点不同,如今页岩储层甜点预测与评价已成体系,地质-工程“双甜点”评价理念已受到广泛认可。

2)现有的页岩储层甜点评价方法仍有改进空间。岩心实验测试精度高,适用于开发阶段验证,但存在尺度转换不确定性;测井与地震资料分析覆盖广,适用于全尺度储层,但解释多解性突出;数值模拟成本低,可模拟极端环境,但受简化假设制约,模拟精度有所欠缺。

3)未来需向多维度一体化、智能融合、动态表征方向推进。完善地质-工程-经济一体化评价体系,深化人工智能与多源数据融合应用,发展多物理场耦合动态评价方法,提升甜点预测的精准度与工程适用性。

参考文献:

- [1]李文博,郑志红,樊大磊,等.2025年上半年国内外油气资源形势分析及展望[J].中国矿业,2025,34(8):9-15.
LI Wenbo, ZHENG Zhihong, FAN Dalei, et al. Analysis of oil and gas resource situation at home and abroad in the first half of 2025 and prospects[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(8):9-15.
- [2]徐东.国际油气并购市场五大特征[J].中国石油石化,2025,(18):48-49.
XU Dong. Five characteristics of the international oil and gas M&A market[J]. China Petrochem, 2025, (18):48-49.
- [3]李鹭光,何海清,范士芝,等.中国石油油气勘探进展与上游业务发展战略[J].中国石油勘探,2020,25(1):1-10.
LI Luguang, HE Haiqing, FAN Tuzhi, et al. Oil and gas exploration progress and upstream development strategy of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1):1-10.
- [4]何晓,李武广,党录瑞,等.深层页岩气开发关键技术难点与攻关方向[J].天然气工业,2021,41(1):118-124.
HE Xiao, LI Wuguang, DANG Lurui, et al. Key technological challenges and research directions of deep shale gas development[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1):118-124.
- [5]马新华.四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索[J].天然气工业,2018,38(10):1-10.
MA Xinhua. Enrichment laws and scale effective development of shale gas in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10):1-10.
- [6]周志,姜振学,李世臻,等.鄂西建始地区五峰-龙马溪组黑色页岩生物地层特征[J].地球科学,2021,46(2):432-443.
ZHOU Zhi, JIANG Zhenxue, LI Shizhen, et al. Biostratigraphic characteristics of black graptolite shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Jianshi area of west Hubei[J]. Earth Science, 2021, 46(2):432-443.
- [7]YARBOROUGH H. Continental margin types related to plate tectonics and evolution of Margins [M]//CURRAY J R, DICKINSON W R, DOW W G, et al. Geology of Continental Margins. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977: A1-A8.
- [8]SHURR G W, RIDGLEY J L. Unconventional shallow biogenic gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1993-2014.
- [9]牛卫涛,朱斗星,蒋立伟,等.复杂山地页岩气藏“甜点”综合评价技术——以昭通国家级页岩气示范区为例[J].天然气地球科学,2021,32(10):1546-1558.
NIU Weitao, ZHU Douxing, JIANG Liwei, et al. “Sweet spot” comprehensive evaluation technology of complex mountain shale gas reservoir: taking the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10):1546-1558.
- [10]国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.页岩气术语和定义:GB/T 41611—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Terms and definitions for shale gas: GB/T 41611—2022 [S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [11]杨智,侯连华,陶士振,等.致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J].石油勘探与开发,2015,42(5):555-565.
YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5):555-565.
- [12]罗迪,江锚,李黎,等.海上低渗油田水平井压裂地质-工程双甜点评价新方法——以珠江口盆地陆丰凹陷为例[J].石油钻探技术,2025,53(5):119-130.
LUO Di, JIANG Mao, LI Li, et al. A new geological-engineering double sweet point evaluation method for horizontal well fracturing in offshore low-permeability oilfield: a case study of Lufeng Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(5):119-130.
- [13]JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [14]金之钧,梁新平,王小军,等.玛湖凹陷风城组页岩油富集机制与甜点段优选[J].新疆石油地质,2022,43(6):631-639.
JIN Zhijun, LIANG Xinping, WANG Xiaojun, et al. Shale oil enrichment mechanism and sweet spot selection of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(6):631-639.
- [15]曹剑,秦志军,魏超,等.陆相纹层型页岩油源储耦合与甜点形成机理——以准噶尔盆地风城组为例[J].新疆石油地质,2025,46(6):668-683.
CAO Jian, QIN Zhijun, WEI Chao, et al. Source-reservoir coupling and sweet spot formation mechanism of continental

- laminated shale oil: a case study of the Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2025, 46(6):668–683.
- [16] NIE S S, ZHONG X Q, SONG J, et al. Experimental study on hydraulic fracturing in clayey-silty hydrate-bearing sediments and fracability evaluation based on multilayer perceptron-analytic hierarchy process[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 106: 104735.
- [17] LIU S, YANG X, ZHAO S, et al. Evaluation of geological-engineering sweet spots in deep shale gas reservoirs of the North Luzhou Block[J]. *Processes*, 2026, 14(4):594.
- [18] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2008;SPE-115258-MS.
- [19] 葛勋, 郭彤楼, 黎茂稳, 等. 深层页岩储层“工程甜点”评价与优选——以川南永川、丁山地区为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(2):210–221.
- GE Xun, GUO Tonglou, LI Maowen, et al. Evaluation and optimization of “engineering sweet spots” in deep shale reservoirs: case study of Yongchuan and Dingshan areas in southern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(2):210–221.
- [20] 王志战, 韩玉娇, 金芸芸, 等. 泌阳凹陷中低成熟度页岩油核磁共振评价方法[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(5):58–65.
- WANG Zhizhan, HAN Yujiao, JIN Yunyun, et al. Nuclear magnetic resonance evaluation method of shale oil with medium and low maturity in Biyang Sag[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(5):58–65.
- [21] 王剑, 周路, 靳军, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层孔隙结构、烃类赋存及其与可动性关系[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(6):941–948.
- WANG Jian, ZHOU Lu, JIN Jun, et al. Pore structure, hydrocarbon occurrence and their relationship with shale oil production in Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(6):941–948.
- [22] 张琳琳, 王孔杰, 赖枫鹏, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组海相页岩气储层甜点分类评价[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(1):191–201.
- ZHANG Linlin, WANG Kongjie, LAI Fengpeng, et al. Classification and evaluation of sweet spots of marine shale gas reservoirs in the Ordovician Wulalike Formation on the western margin of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(1):191–201.
- [23] SUN B, LIU X, ZHAO X, et al. Laminated shale oil system mobility and controlling factors of the Paleogene Shahejie Formation: evidences from T_1 - T_2 NMR experiments, multi-temperature pyrolysis and confocal laser scanning microscopy [J]. *Fuel*, 2025, 379: 133015.
- [24] ZHANG Z, SONG Y, YIN S, et al. Analysis of the controlling factors for sweet spots in lacustrine shale based on core experiments and 2D NMR logging[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1):20440.
- [25] 贾昀, 邓森, 鲜成钢, 等. 基于矿物组分微观润湿特性的页岩油可动性研究[J]. *地球科学*, 2025, 50(12):4671–4684.
- JIA Bao, DENG Sen, XIAN Chenggang, et al. Shale oil mobility based on microscopic wetting properties of mineral components[J]. *Earth Science*, 2025, 50(12):4671–4684.
- [26] BAI L, LIU B, HUO Y, et al. Liquid spontaneous imbibition and its time-resolved nuclear magnetic resonance within differently matured shale indications for shale pore structure and wettability[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(23):22804–22819.
- [27] 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.
- [28] XIAO Z, ZHAO J, ZHONG Q, et al. Anisotropic dispersion mechanism of inter-salt shale oil reservoir in terrestrial saline lake sediments using cross-band experiments [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2023, 66(7):1603–1621.
- [29] ZHANG J, CHEN J, XIONG J, et al. A new method for evaluating the brittleness of shale oil reservoirs in block Y of Ordos Basin of China[J]. *Energies*, 2024, 17(17):4201.
- [30] WANG F, ZHANG Y, LI X, et al. Study on a new rock fracability evaluation model of shale gas reservoir [J]. *Geofluids*, 2020, 2020:8882899.
- [31] MENG S, LI D, LIU X, et al. Study on dynamic fracture growth mechanism of continental shale under compression failure[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 114:204983.
- [32] 郭春安, 关平, 师永民, 等. 基于测井曲线无量纲交会法的致密砂岩储层“甜点”识别及预测[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(2):262–270.
- GUO Chun'an, GUAN Ping, SHI Yongmin, et al. Identification and prediction of “Sweet Spots” in tight sandstone reservoirs based on logging curve dimensionless rendezvous method[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(2):262–270.
- [33] ZENG Q, CHEN S, ZHAO W, et al. Significance and current state of seismic technologies for the prediction of shale gas sweet spots[M]//ZENG Q, LIU Y, ZHAO W, et al. Seismic-based prediction technologies for shale gas sweet spots. Singapore: World Scientific Publishing, 2024:1–19.
- [34] 姚东华, 周立宏, 王文革, 等. 页岩油综合甜点测井评价——以沧东凹陷孔店组二段为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(7):912–924.
- YAO Donghua, ZHOU Lihong, WANG Wenge, et al. Logging evaluation of composite sweet spots for shale oil: a case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7):912–924.
- [35] 贾曙光, 王军, 王玲玲, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油甜点地震预测方法[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(5):535–541.

- JIA Shuguang, WANG Jun, WANG Lingling, et al. Seismic prediction methods for shale oil sweet spots in Lucaogou Formation of Jimusar Sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(5): 535–541.
- [36] 刘国强, 赵先然, 袁超, 等. 陆相页岩油宏观结构测井评价及其甜点优选[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 120–134.
- LIU Guoqiang, ZHAO Xianran, YUAN Chao, et al. Logging evaluation of macro-structure of continental shale oil reservoir and sweet spots selection [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 120–134.
- [37] CHEN S, WANG X, LI X, et al. Geophysical prediction technology for sweet spots of continental shale oil: a case study of the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin, China [J]. *Fuel*, 2024, 365: 131146.
- [38] 葛勋, 郭彤楼, 马永生, 等. 四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统五峰组–龙马溪组页岩气储层甜点预测[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 633–647.
- GE Xun, GUO Tonglou, MA Yongsheng, et al. Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng–Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 633–647.
- [39] 周雨晴, 张佳佳, 张广智, 等. 致密砂岩储层岩石物理建模及“甜点”预测[J]. *地球物理学进展*, 2025, 40(1): 255–265.
- ZHOU Yuqing, ZHANG Jiajia, ZHANG Guangzhi, et al. Research on rock physical modeling and “sweet spot” prediction methods for tight sandstone reservoirs [J]. *Progress in Geophysics*, 2025, 40(1): 255–265.
- [40] 秦德文, 张岩, 于杰. 东海M构造中深层低渗气藏“甜点”预测技术[J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(4): 83–91.
- QIN Dewen, ZHANG Yan, YU Jie. “Sweet spot” prediction technique for mid-deep low permeability gas reservoirs in M Structure of East China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(4): 83–91.
- [41] 曾庆才, 陈胜, 贺佩, 等. 四川盆地威远龙马溪组页岩气甜点区地震定量预测[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 406–414.
- ZENG Qingcai, CHEN Sheng, HE Pei, et al. Quantitative seismic prediction of shale gas sweet spots in Lower Silurian Longmaxi Formation, Weiyuan area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 406–414.
- [42] 韦世明, 考佳玮, 金衍, 等. 基于COMSOL二次开发的流–固全耦合裂缝扩展数值模拟方法[J]. *计算力学学报*, 2025, 42(6): 997–1004.
- WEI Shiming, KAO Jiawei, JIN Yan, et al. Numerical simulation method of fully fluid–solid coupled fracture propagation based on COMSOL secondary development [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2025, 42(6): 997–1004.
- [43] 赵志刚, 朱学申, 王存武, 等. 基于资源性与可压性的深部煤层气“甜点”预测[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(8): 22–31.
- ZHAO Zhigang, ZHU Xueshen, WANG Cunwu, et al. Predicting the “sweet spot” of deep coalbed methane based on resource conditions and fracability [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(8): 22–31.
- [44] SHEN Y, LIU B, JIANG H, et al. Geological and engineering integration fracturing design and optimization study of Liushagang Formation in Weixinan Sag [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(10): 1821.
- [45] LU C, JIANG H, Qu S, et al. Hydraulic fracturing design for shale oils based on sweet spot mapping: a case study of the Jimusar formation in China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 214: 110568.
- [46] MESDOUR R, BASRI M, TEMIZEL C, et al. Sweet spot identification in unconventional shale reservoirs [M]//GHANBARIAN B, LIANG F, LIU H H. *Physics of Fluid Flow and Transport in Unconventional Reservoir Rocks*. Hoboken: Wiley, 2023: 333–349.
- [47] LIU Y, LIU S, LOU Y, et al. A novel approach for evaluating geology–engineering dual sweet spots in tight gas reservoirs in the LX block of China [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 6061.
- [48] 郭旭升, 赵培荣, 张宇, 等. 中国陆相页岩油分类分级评价的现状、挑战与发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(6): 1745–1761.
- GUO Xusheng, ZHAO Peirong, ZHANG Yu, et al. Current status, challenges, and future trends of the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(6): 1745–1761.
- [49] DENG Y, WANG W, DU X, et al. Machine learning based stereoscopic triple sweet spot evaluation method for shale reservoirs [C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Denver: SPE, 2023: 1–13.
- [50] 徐碧兰, 何建华, 吴炎峰, 等. 多源数据与地质逻辑融合的深层页岩储层构造裂缝测井智能识别[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(5): 931–950.
- XU Bilan, HE Jianhua, WU Yanfeng, et al. Intelligent logging identification of structural fractures in deep shale reservoirs based on the fusion of multisource data and geological logic [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2025, 52(5): 931–950.
- [51] LI J, XIU Q, HE X, et al. Integration of multi-source geological engineering data for fracturing parameter optimization model [J/OL]. *Petroleum Science*, (2026–04–01) [2026–04–15]. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2026.03.059>.
- [52] ZHANG D, WU H, JIANG F, et al. Development of coupled fluid–flow/geomechanics model considering storage and transport mechanism in shale gas reservoirs with complex fracture morphology [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 19238.
- [53] YANG K, SUN Y, ZHOU J, et al. A multi-field coupling model for CO₂ enhanced shale gas recovery integrating chemical dissolution and mechanical weakening effects [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2025, 18(2): 180–194.

(修改回稿日期: 2026–04–24 编辑: 丁艳艳)