

中国大陆相页岩油分类分级评价的现状、挑战与发展趋势

郭旭升^{1,2,3}, 赵培荣^{2,3}, 张宇⁴, 申宝剑^{1,2,3}, 李倩文^{1,2,3}, 李沛^{1,2,3}, 李雄⁴, 钱恪然⁴,
蔡生娟^{1,3}, 马晓潇^{1,2,3}, 李鹏^{1,2,3}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 中国石化油田勘探开发事业部, 北京 100010)

摘要:科学的分类分级评价是实现中国大陆相页岩油效益开发的理论基础与关键前提。在系统性文献调研与综合研判的基础上, 全面梳理了中国大陆相页岩油分类分级评价的研究进展, 深入剖析了其面临的核心挑战, 并对未来的发展方向作出展望; 厘清了页岩油分类体系的演进脉络与内在逻辑, 围绕页岩油“四性”(含油性、储集性、可动性和可压性)评价参数体系, 剖析了关键阈值的动态特征及其对类型的依赖性, 并比较了从多参数叠合到机器学习等多种评价方法的适用性与局限性。分析认为, 当前陆相页岩油分类分级评价存在三大核心局限性: ①分类方案多元化但缺乏统一框架, 导致概念体系混乱、推广困难; ②评价参数繁冗且普适性标准缺失, 关键参数阈值差异显著, 尚未形成机理层面的统一认识; ③评价方法与勘探开发实践融合不足, 存在地质甜点与工程甜点错位、资源量与产能衔接不畅等问题。当前, 中国大陆相页岩油评价正处于从静态描述向动态预测、从单一地质维度向地质-工程-经济多维度协同的范式变革时期。未来应着力于构建全生命周期的动态分类分级评价体系, 深化多源数据与人工智能技术的融合应用, 并通过典型刻度区解剖和行业标准建设, 推动该领域朝着标准化、精准化与效益化方向迈进。

关键词:地质-工程-经济一体化; 源-储耦合; 人工智能; 分类分级; 陆相页岩油

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Current status, challenges, and future trends of the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China

GUO Xusheng^{1,2,3}, ZHAO Peirong^{2,3}, ZHANG Yu⁴, SHEN Baojian^{1,2,3}, LI Qianwen^{1,2,3}, LI Pei^{1,2,3}, LI Xiong⁴,
QIAN Keran⁴, CAI Shengjuan^{1,3}, MA Xiaoxiao^{1,2,3}, LI Peng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. Oilfield Exploration and Development Division, SINOPEC, Beijing 100010, China)

Abstract: Scientific classification and grading evaluation provide a theoretical foundation and key prerequisite for the cost-effective development of lacustrine shale oil in China. Based on a systematic literature review, along with comprehensive investigation and judgement, we present a thorough summary of advances in research on the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China, and identify core challenges and future trends. The evolutionary path and inherent logic of the shale oil classification system are clarified. Furthermore, we elaborate high dynamism and type-dependence of key parameter thresholds, and systematically compare the applicability and limitations of various evaluation methods ranging from multi-parameter overlay to machine learning, while focusing on the “four-property” parameter system consisting of reservoir properties, oil-bearing capacity, oil mobility, and fracability for shale oil evaluation. The analytical results reveal three major limitations in the current classification and grading evaluation. First, the classification schemes, in spite of diversity, lack a unified framework, leading to conceptual confusion and

收稿日期: 2025-10-16; 修回日期: 2025-11-06。

第一作者简介: 郭旭升(1965—), 男, 中国工程院院士, 油气勘探研究与生产管理。E-mail: guoxs@sinopec.com。

通信作者简介: 申宝剑(1978—), 男, 研究员, 非常规页岩油气地质评价。E-mail: shenbj.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U24B6002); 中国石化科技部项目(724029)。

hindered popularization. Second, the evaluation parameters prove cumbersome and lack universal criteria, resulting in key parameter threshold significantly varying by basin and type, thus the absence of a unified understanding of the formation mechanisms of shale oil. Third, the disconnection between assessment methods with exploration and exploitation practices is manifested in the mismatches between geological and engineering sweet spots and broken links in the upgrade chain from resource volume to productivity. Currently, the lacustrine shale oil evaluation paradigm in China is shifting from static description to dynamic prediction and from a single geological dimension to a geological-engineering-economic multi-dimension synergy. Future efforts should be put into constructing a dynamic, full-lifecycle classification and grading assessment system by deepening the integration and applications of multi-source data and artificial intelligence (AI) technologies. Furthermore, it is necessary to thoroughly analyze typical calibration areas and develop industry standards, thus enhancing the standardization, precision, and cost-effective applications of the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China.

Key words: geological-engineering-economic integration, source rock-reservoir coupling, artificial intelligence (AI), classification and grading, lacustrine shale oil

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20250601.

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. DOI: 10. 11743/ogg20250601.

页岩油作为中国原油产量稳步增长的重要接替领域,对保障国家能源安全意义重大。经过10余年的基础研究和攻关,中国页岩油勘探开发呈现快速发展态势,已在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组和风城组、松辽盆地白垩系青山口组、渤海湾盆地古近系孔店组和沙河街组、四川盆地侏罗系凉山组、苏北盆地古近系阜宁组等多个层系取得战略突破。2025年,通过自然资源部新规评审备案的探明地质储量达 3.58×10^8 t,探明新兴、溱潼、复兴和古龙4个规模页岩油田,建成新疆吉木萨尔、大庆古龙和胜利济阳3大陆相页岩油国家级示范区^[1-3],这标志着中国页岩油进入从勘探发现向规模建产加速推进的关键阶段。

中国页岩油以陆相沉积为主,具有构造-沉积分异强、岩相组合复杂、源-储关系多样以及非均质性显著等特征,难以直接套用海外成熟开发模式^[3-6]。当前中国页岩油勘探开发仍面临多重理论和技术瓶颈:①页岩油类型多样,富集机理复杂,传统基于高总有机碳含量(TOC)和高镜质体反射率(R_o)的选区方法适用性有限^[4-6];②随着勘探范围扩大,甜点区关键参数(如TOC、孔隙度和压力系数等)趋于变差,储层强非均质性导致试采效果差异显著^[3,7-8];③缺乏贯穿全阶段的分类分级评价标准,制约了储量动用效率与开发效益的系统优化。上述问题的核心在于主控因素认识不清、甜点预测精度不足及增储建产梯队不明。因此,构建科学有效的分类分级评价体系,已成为实现陆相页岩油规模效益开发的迫切需求^[9-12]。

前人围绕页岩油分类与评价开展了广泛研究,形成了基于地质背景、资源类型、储层性质及源-储配置等多种分类方案,以及以“四性”(含油性、储集性、可动性和可压性)为核心的评价参数体系^[9-10,12-25]。评价方法也从多参数叠合逐渐发展为测井解释、地球物理预测、三维地质建模与机器学习智能预测等多技术融合体系^[26-40]。然而,现有研究仍存在分类体系不统一、参数阈值区域性强、评价方法推广难度大及地质-工程-经济闭环尚未形成等问题。因此,有必要对现有成果进行系统梳理,明晰现状、识别瓶颈、展望方向。本文在回顾中国陆相页岩油分类分级评价研究进展的基础上,重点剖析其在分类体系、参数标准、评价方法及实践应用中的局限,并展望其向一体化、智能化与动态化方向的发展趋势,以期为该领域的理论创新与技术发展提供参考。

1 页岩油分类方案

科学合理的分类是页岩油甜点预测与差异化开发策略制定的基础。随着地质认识的深化与勘探实践的拓展,页岩油分类方案亦持续演进,呈现出显著的多元化特征(表1)。然而,面对高效勘探开发的需求,建立兼具科学性与普适性的分类方案已成为推动页岩油高质量发展的关键课题。

1.1 分类依据

页岩油分类方案的演变,反映了对其地质本质与

表 1 国内外页岩油分类方案汇总

Table 1 Summary of shale oil classification schemes around the world

划分依据	划分要素	分类结果	来源
资源类型	资源特点	致密油、页岩油	美国国家石油委员会(NPG)
		致密油、页岩气(页岩层系的油气)	美国能源信息署(EIA)
		裙边型区带、地层区带、页岩油区带	加拿大国家能源委员会(NEB)
		致密油、裙边油藏或裙边型致密油或环边油或边际区油、页岩油(针对非常规轻质油)	加拿大致密油联盟团体, 郭秋麟等 ^[26]
地质背景	盆地类型	断陷盆地型、拗陷盆地型、叠合盆地型	郭旭升等 ^[2]
	沉积环境	海相、海-陆过渡相、陆相	黎茂稳等 ^[17]
	构造差异	陡坡深陷型、缓坡断块型、深注稳定型	刘惠民等 ^[18]
	水体环境	淡水-微咸水型、半咸水型、咸水型、盐湖型	本次研究
储层性质	储集空间	致密型、裂缝型、复合(或混合)型	Jarvie 等 ^[27]
		基质型、裂缝型、混合型	宋明水等 ^[16]
		微孔微缝型、夹层型、微裂缝富集型	刘文卿等 ^[15]
	岩石类型	页岩型(裂缝不发育、裂缝性和夹层型)、非页岩致密型(有运移,邻近、相隔较远)	赵俊龙等 ^[14]
		多期叠置砂岩发育型(Ⅰ类)、页岩夹薄层砂岩型(Ⅱ类)和纯页岩型(Ⅲ类)	付金华等 ^[19]
		长英型、黏土型、碳酸盐型、混积型	NB/T 11611—2024 ^[28]
甜点特征	甜点类型	基质含油型、夹层富集型、裂缝富集型	张金川等 ^[13]
		夹层型、混积型、页岩型	焦方正等 ^[29]
		砂-泥岩互层型、泥岩夹薄砂层型、纯页岩型(青山口组)	王广昀等 ^[22]
		页岩型、夹层型、原位转化型	GB/T 43126—2023 ^[30]
		常规致密储层(源-储分异)、多种岩石组合或互层(源-储分异)、多孔泥岩(源-储一体)、裂缝泥岩储层(储层近似烃源岩)	赵文智等 ^[8]
	源-储关系	致密油型、过渡型、纯正型(源/储比或砂/地比)	赵文智等 ^[8]
		源-储一体型、源-储分离型、纯页岩型	杜金虎等 ^[9]
		源-储共存型、源-储分离型、纯页岩型	胡素云等 ^[20]
		源-储一体型、源-储共生型、源-储分离型	郭旭升等 ^[2]
	含油性	可根据游离烃含量和总有机碳含量等参数分类,例如高含油性、中含油性和低含油性	金之钧等 ^[12] ;李志明等 ^[31] ;匡立春等 ^[25]
	储集性	可根据储集物性和裂缝发育程度等划分,例如高孔隙度、中孔隙度和低孔隙度	金之钧等 ^[12] ;李志明等 ^[31] ;匡立春等 ^[25]
	可动性	可根据含油饱和度指数(OSI)、热演化程度、地层能量和烃组分特征等参数进行划分,例如高流动性、中流动性和低流动性	金之钧等 ^[12] ;李志明等 ^[31] ;匡立春等 ^[25]
	可压性	可根据脆性矿物含量、黏土矿物含量和岩石力学参数等进行划分,例如高可压性、中可压性和低可压性	金之钧等 ^[12] ;李志明等 ^[31] ;匡立春等 ^[25]
	保存条件	可根据应力条件和地层压力等分类,例如根据压力分为超压型、弱超压型和常压型	金之钧等 ^[12] ;李志明等 ^[31] ;匡立春等 ^[25]
原油性质	油品性质	轻质油区、稀油区、重油区、稠油区(针对纯正型页岩油)	赵文智等 ^[8]
	热成熟度	中-低熟、中-高熟(不同学者给出的界限不同)	赵文智等 ^[10] ;杜金虎等 ^[9] ;胡素云等 ^[20] ;付锁堂等 ^[32] ;金之钧等 ^[4]
		油页岩油、中-低成熟页岩油、中-高成熟页岩油	邹才能等 ^[33]
	埋藏深度	浅层、中-浅层、深层、超深层	本次研究

开发属性认知的逐步深化,总体呈现出从宏观背景向微观机理、从资源评价向开发指导过渡的趋势^[34]。

1.1.1 早期探索:基于资源类型与地质背景

在勘探初期,分类方案主要服务于资源潜力评估,多借鉴北美“连续型油气资源”的概念,涵盖致密油与页岩油等广义类型^[35]。例如,1953年在美国威利斯顿

(Williston)盆地发现的 Antelope 油田,标志着美国开始进入页岩油时代^[36]。该油田页岩油产量部分来自局部的砂岩储层,同时密西西比系巴肯组(Bakken)上段页岩也有一定贡献^[37]。中国学者在早期研究中,亦提出了如砂岩薄夹层型、泥岩裂缝型、盐间型、泥页岩夹脆性层型以及纯页(泥)岩型等分类方案。此类方案虽然便于资源统计与国际对比,但在指导具体盆地勘探

部署方面存在局限性。

后期出现的基于沉积相带(海相、海-陆过渡相和陆相)或盆地类型(断陷型、拗陷型和叠合型)的分类^[2, 17-18],虽在把握宏观差异方面具有价值,但对于盆地内部非均质性与可采性的区分仍显不足。此外,早期页岩油的发现与突破常与裂缝密切相关。例如,巴肯组中段储层岩性为裂缝性白云岩^[38-39],中国则在玉门油田和大庆油田等进行了泥页岩裂缝性油藏开发^[40]。这些国内外实例表明,初始的分类方案多受勘探发现与高产井现象的驱动,对页岩油富集内在机理的系统性考量尚不充分。

1.1.2 深化发展:聚焦储层性质与甜点特征

随着勘探开发技术的发展,页岩油分类依据开始“由宏入微”逐渐转向控制油气储集与产出的内在属性。例如,依据储集空间类型,Jarvie^[27]将其划分为致密型、裂缝型和复合型;刘文卿等^[15]划分出了微孔微缝型、夹层型和微裂缝富集型;宋明水等^[16]划分出了基质型、裂缝型和混合型。这些方案主要直接关联了储层的储渗性能与初期产能,但对烃源岩品质和流体性质考虑仍显不足。

随着“甜点”概念的推广应用^[24],从页岩油甜点特征出发,张金川等^[13]划分出了基质含油型、夹层富集型和裂缝富集型;焦方正等^[29]划分出了夹层型、混积型和页岩型;王广昀等^[22]将松辽盆地青山口组划分为砂-泥岩互层型、泥岩夹薄砂层型和纯页岩型。此外,国家标准《页岩油地质甜点评价技术规范》(GB/T 43126—2023)^[30]明确了页岩型、夹层型和原位转化型3种页岩油类型;而页岩油行业标准《页岩层系岩相划分与编图规范》(NB/T 11611—2024)^[28]则基于岩石矿物组成,将页岩油划分为长英型、黏土型、碳酸盐型与混积型,该分类是岩相精细描述的基础,并为评价储层可压裂性提供了关键依据。

这一阶段的分类体系演化,是勘探开发实践与理论认识持续深化的必然结果,对页岩油产业的快速发展起到了重要的指导作用。此外,一系列基于成熟度、地层压力和原油品质等开发导向参数的分类方案被提出^[4, 9-10, 20, 21, 32-33],其与开发效果和经济价值的关联更为直接,实用性显著增强。

1.1.3 凝聚共识:以“源-储配置”为核心的综合分类

近年来的研究表明,页岩油的富集与高产本质上是烃源岩与储集层在空间及成因上紧密耦合的结果。因此,以“源-储配置”为核心的分类方案逐渐成为主

流^[2, 11]。杜金虎等^[9]划分出了源-储一体型、源-储分离型和纯页岩型;胡素云等^[20]划分出了源-储共存型、源-储分离型和纯页岩型;赵文智等^[8]划分出了致密油型、过渡型和纯正型(源/储比或砂/地比)。郭旭升等^[11]基于烃源岩与储集层的宏观性质和微观空间配置关系,将页岩油划分为源-储分离型、源-储共生型和源-储一体型(图1)。该方案从成因机制上揭示了页岩油的富集规律,不仅可用于评价甜点层段识别与勘探潜力,还可用于指导水平井压裂改造与开发方案设计,代表了当前分类研究的重要方向。

中国在多类型页岩油领域的连续勘探突破,既体现了富集理论的深化,也反映了工程技术的进步。总体而言,页岩油分类经历了从外部宏观描述走向内部成因机理、从资源评价走向勘探开发指导的演进路径。然而,现有分类方案仍存在并行使用、部分概念界定不统一等问题,在一定程度上制约了页岩油勘探开发的标准化与规模化发展。

1.2 分类方案

国内外页岩油分类方案类型多样,本质上是从不同视角对页岩油复杂地质系统进行解析的体现。系统梳理不同分类方案的地质逻辑与工程指向,是理解当前研究进展与现存问题的关键。

基于资源类型与地质背景的方案宏观性强,便于资源管理与区域对比,从战略选区层面回答了“在哪里找油”的问题,可用于资源规划和矿权管理,但与开发实践的联系不够紧密。例如,将某个区块界定为“致密油”或“断陷盆地型页岩油”并不能直接指导甜点识别、钻井部署或压裂设计。

基于储层性质与岩相的分类方案,如依据储集空间类型(致密型、裂缝型和复合型)或岩石矿物组成(长英质、黏土质和碳酸盐质等),能够直接反映页岩储层的物性特征与力学行为,具有明确的地质-工程内涵。例如,长英质页岩通常脆性较好,有利于形成复杂缝网,而黏土质页岩则可能存在塑性变形与支撑剂嵌入等工程风险。该类方案为压裂工艺设计提供了重要依据,但对储量丰度、含油性及流体流动能力的指示性较弱^[41-42]。

基于“甜点”特征的分类方案(如依据“四性”关系、地层压力或原油品质),体现出分类思想从“描述地质体”向“识别经济目标”的转变。例如,地层超压代表更强的天然驱动能量,轻质原油通常具有更好的流动性与采收潜力。该类方案将地质条件与开发效益紧密联系,经济导向明确。

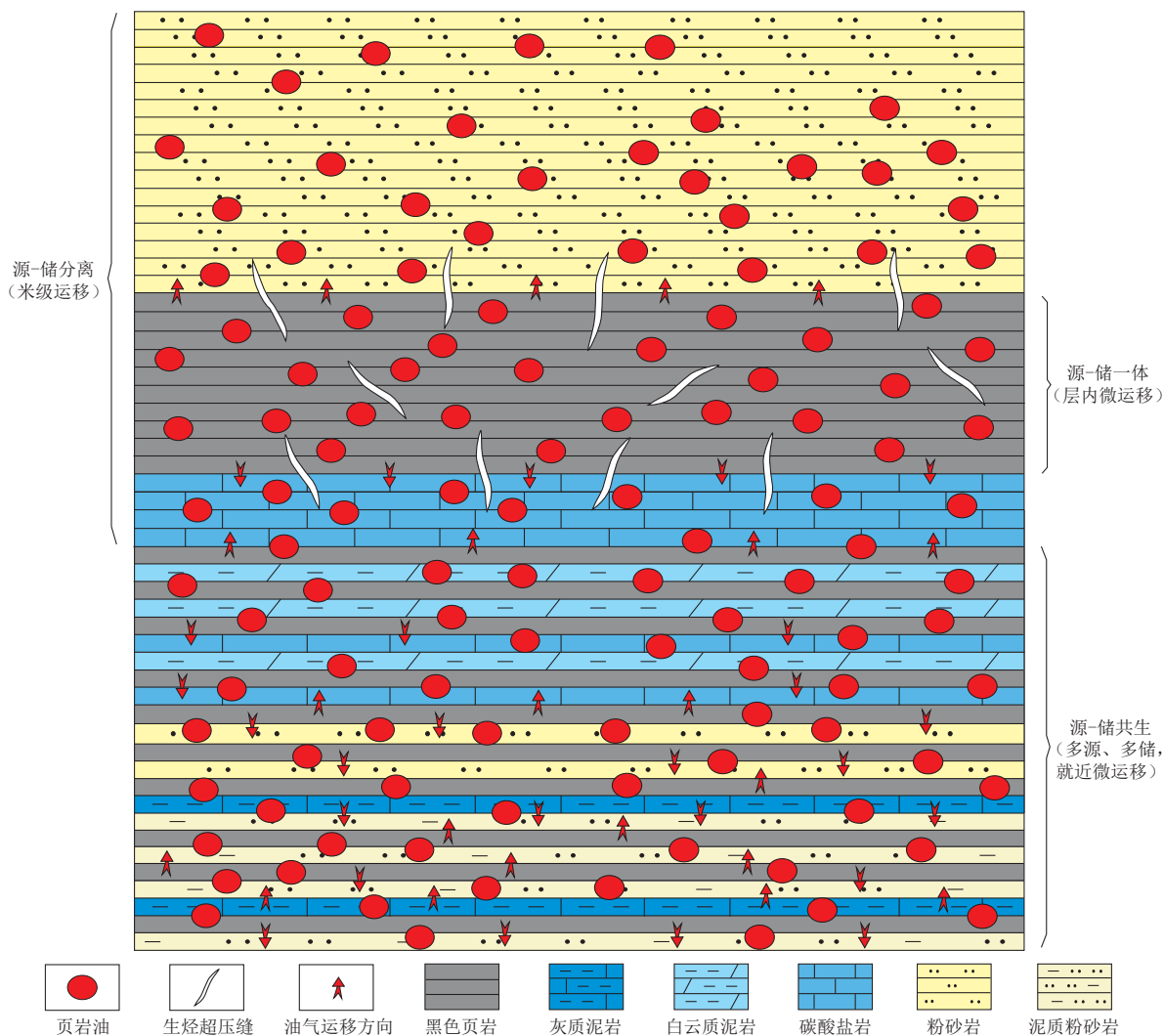


图1 基于源-储配置关系的页岩油类型划分与源-储耦合微观模式(修改自文献[11])

Fig. 1 Classification of shale oil based on source rock-reservoir configuration and corresponding microscopic source rock-reservoir coupling models (modified after reference [11])

基于源-储配置关系的分类方案是当前业界关注的重点之一(表1)。该方案不仅体现地层结构特征,更蕴含了烃类富集与分布的成因机制。源-储一体型的核心是评价原位滞留烃,源-储共生型关注岩相(组合)和多尺度源-储组合关系,源-储分离型则侧重评价运移路径与夹层性质。该方案兼具深刻的工程内涵,能够指导形成差异化的开发策略:①针对源-储一体型页岩油,重点在于攻克高黏土矿物含量带来的压裂难问题,需有效激活纳米孔-页理缝系统,尤其是纳米孔喉和偏重油质,需要更强的驱动能量和更复杂的渗流通道。目前多采用高强度、细分切割的体积压裂,以开启天然页理缝为主要目标,打造“基质-页理缝-人工缝”三重流动模型。例如,松辽盆地青山口组一段建立了以游离油含量、核磁大孔与页理缝为核心的地质、工程“双甜点”评价标准,通过构建多尺度流动数学

模型和可采储量评价方法,坚持“控近扩远”增产改造技术理念,优选开采方式,形成配套技术,有效支撑了古龙页岩油的规模效益开发^[41-42]。②源-储共生型(或混积型)页岩油多见于断陷盆地,通常具有页岩厚度较大、热演化程度变化大、脆性好及压力系数高等特点,可采用差异化开发与立体开发策略,建立“缝控可动储量”模型,通过差异化井网部署和多尺度裂缝充分支撑的压裂技术,针对性地动用不同区域的储量。例如,济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段(沙河街组四段上亚段)-沙三下亚段(沙河街组三段下亚段)形成以甜点立体评价、井网立体优化、水平井立体压裂为核心的评价技术,采用大平台“井工厂”模式,实现多层系立体开发,提升单平台控制储量和效率,有力支撑了济阳陆相断陷湖盆页岩油国家级示范区的高效建设^[24]。③针对源-储分离型页岩油,需要综合夹层发育频率、

天然裂缝、压裂改造性进行一体化评价,开发上要注重地质-工程一体化,可采用平面动态靶框和纵向轨迹控制窗,优化钻井方案,降低钻井难度和缩短建井周期。通常部署于高频夹层发育区,利用水平井细分切割体积压裂形成复杂缝网,沟通更多夹层,获取最大改造体积。例如,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组岩性主要为由粉-细砂、泥及碳酸盐组成的混积岩夹层,且具有薄层状结构,粉砂岩层是最优质的储层,孔径大、渗流条件好,是已建产的芦草沟组甜点的主要岩性,表现为“源生-邻储”的富集模式。通过随钻地质导向钻进,多靶点精细控制水平井井眼轨迹跟踪技术以及高强度的“密切割+水平井体积压裂”主体改造技术,实现了吉木萨尔页岩油效益开发^[43]。

基于源-储配置关系的分类体系在一个统一框架内回答了页岩油“来源、聚集、品质与可采性”等关键问题,为地质-工程一体化评价与高效开发奠定了分类学基础。

1.3 发展方向

多元化的分类方案适应了当前勘探开发阶段的认知需求,从多维度深化了对页岩油地质特征与开发响应的理解,但也反映出当前分类体系在标准化、适用性方面仍存在系统性问题,主要体现在以下3个方面。

1) 概念与术语体系尚未统一,制约有效交流与系统评价。当前分类体系中普遍存在“同名异质”与“同质异名”现象,如“基质型”“混积型”“夹层型页岩油”和“致密油”等术语在使用中缺乏统一界定,对夹层厚度、砂/地比及源-储配置关系的认识仍存在争议。此外,分类对象不明确——究竟是针对“页岩”“页岩油”还是“页岩油藏”?是针对“储层”还是“甜点”?这些概念层面的模糊性,不仅阻碍学术沟通,也为全国范围内的资源对比、储量评估与开发管理带来了困难。

2) 地质描述与工程、经济目标衔接不足,影响开发决策效能。现有分类多停留于地质属性刻画,与工程可改造性及开发经济效益关联较弱,难以有效支撑差异化开发策略的制定与经济门槛的确定。

3) 缺乏具有普适性的分类框架,制约技术体系的推广与应用。中国陆相盆地地质条件复杂,基于特定盆地或层系建立的分类方案在跨区域应用时适用性差,呈现“一案一策”的碎片化状态。例如,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组夹层型页岩油评价标准难以直接应用于鄂尔多斯盆地长7段(延长组7段)同类油藏。这种方案缺乏一个兼具区域包容性与逻辑一致性的分类框架,已成为制约页岩油评价技术标准化、系列化与

规模化推广的关键瓶颈。

综上所述,中国陆相页岩油分类体系的演进是伴随勘探开发实践不断深化与精细化的过程。当前分类方案的多元化虽拓展了研究视角,但也因概念不统一、与工程经济脱节以及普适性不足等问题,尚未形成贯穿“地质成因-储层属性-工程响应-经济价值”的统一理论框架。这些缺陷进一步传导至参数体系与评价方法中,成为制约页岩油高效评价与有效开发的重要根源。为推进页岩油分类的标准化与规范化,类型划分应遵循统一指导原则:①在理念层面,应立足共性、兼顾个性,实现与现有标准的动态兼容,并以勘探开发实际需求为根本导向;②在操作层面,应注重分类因素的简洁性与代表性,突出主控因素,强化地质-工程-经济多维度融合,提升分类在勘探开发实践中的科学指导价值与应用效能。

2 评价参数体系的构建

北美海相页岩油勘探理论的发展推动了勘探范式的转变——从寻找传统圈闭转向评价“源-储一体化”的甜点富集带,并由此建立了一套系统的甜点评价参数体系与资源分级方法^[44]。针对中国陆相页岩油复杂的地质条件,国内学者在选区方法、参数标准及评价流程等方面开展了广泛探索,初步形成了适用于不同类型页岩油的评价参数体系与分级评价流程^[10, 18, 24](表2)。总体上,页岩油甜点评价呈现出从单一地质维度向地质-工程-经济多维度融合、从传统数理统计向人工智能技术拓展的发展趋势^[45]。

2.1 “四性”评价框架的建立

随着页岩油类型的不断丰富与“甜点”概念的持续扩展,评价参数体系日益复杂,某些盆地或特定类型页岩油的评价参数可达50余项^[24],显著增加了有利区优选难度。在长期勘探实践基础上,业界逐步形成以含油性、储集性、可动性与可压性(统称“四性”)为核心的共性评价框架,为地质-工程“双甜点”优选提供了基础依据。

含油性是页岩油富集的物质基础,回答了“有没有油”的根本问题,核心在于量化烃类的原始富集程度,主要依赖于 TOC 、 R_o 和游离烃含量(S_i)等关键参数。 TOC 的评价价值高度依赖于源-储配置关系,是否将其作为必要参数应结合页岩类型与勘探阶段综合判定^[2]。 R_o 作为成熟度指标,宏观上限定了甜点形成的热演化窗口,微观上影响烃类的生成、滞留与可动性,

表2 不同地区、不同类型陆相页岩油甜点分级评价参数

Table 2 Grading evaluation parameters for sweet spots of various types of lacustrine shale oil in different areas of China

重点盆地	典型地区	目的层系	页岩油类型	关键评价参数	甜点类别	文献来源
鄂尔多斯盆地	LY1H 井区	长7段	纹层型	砂质纹层与中-低TOC泥质纹层组合	甜点段、甜点层	付金华等 ^[46]
	L1H 井区		页理型	较高TOC(4%~14%)、高S ₁ 、高核磁孔隙度		
	庆城地区		夹层型	目的层厚度、孔隙度、含油饱和度、气/油比、原油黏度、脆性指数	平面甜点	何永宏等 ^[47]
				孔隙度、含油饱和度、泥质含量	纵向甜点	
				自然伽马、声波时差、密度、电阻率、气测全烃、最小水平主应力、脆性指数	水平段甜点	
准噶尔盆地	吉木萨尔凹陷	芦草沟组	混积型	核磁孔隙度、密度、横波阻抗、纵波阻抗、叠后地震属性	地震甜点区	贾曙光等 ^[48]
				孔隙度、S ₁ 、脆性指数、裂缝密度、含油饱和度指数、岩石类型	甜点段	邹阳等 ^[49]
渤海湾盆地	济阳凹陷	沙四上亚段-沙三下亚段	基质型、夹层型、裂缝型	有利岩相占比、有利岩相集中段厚度、TOC、S ₁ 、有效孔隙度、脆性矿物含量、非有利岩相单层厚度	甜点区、甜点层	杨勇等 ^[50]
	黄骅凹陷	孔店组二段、沙三下亚段	纹层型	S ₁ 、脆性矿物含量、全烃峰基比、深电阻率比值对数、自然伽马	甜点区	蒲秀刚等 ^[51]
				TOC、R _o 、黏土矿物含量	甜点层	
	歧口凹陷	沙三下亚段	单一型、夹层型	OSI、气测含气量、TOC、孔隙度、脆性指数、R _o 、埋深、地层厚度	甜点区	赵贤正等 ^[52]
松辽盆地	齐家-古龙凹陷	青山口组	纯页岩型	S ₁ 、可动孔隙度、总孔隙度、含油饱和度、页理密度、脆性矿物含量、脆性指数、弹性模量、泊松比、应力差	甜点层	崔宝文等 ^[53]
			页岩型、砂质混合型	成熟度、压力系数、一类层厚度比例、气/油比、原油密度、原油黏度	甜点区	
苏北盆地	溱潼凹陷	阜宁组二段	混积型	总孔隙度、有效孔隙度、微裂缝密度、层理缝密度、渗透率、有机质丰度、S ₁ 、OSI、R _o 、压力系数、杨氏模量、泊松比、脆性矿物含量	甜点段、甜点区	荆晓明 ^[54]
				长英矿物含量、纹层数量、大孔占比、孔隙度、OSI、TOC、方解石、黏土矿物含量	生产甜点段	高玉巧等 ^[55]
四川盆地	平安1井区	凉高山组	多种类型	游离烃含量、孔隙度、压力系数、可压指数	富集层段(区)	白雪峰等 ^[56]
	阆中地区	侏罗系		岩相组合优质、储层物性及含油性较好、纹层或裂缝相对发育、储层脆性好、水平应力差小、单井可采储量高	储层开发甜点	胡来东等 ^[57]
柴达木盆地	英雄岭地区	下干柴沟组上段	源-储一体型	有效孔隙度、含油饱和度、脆性矿物含量	甜点段	李国欣等 ^[58]
				TOC、有效孔隙度、脆性矿物含量、含油饱和度和、R _o	甜点区	

注: TOC. 总有机碳含量; S_1 . 游离烃含量; OSI. 含油饱和度指数; R_o . 镜质体反射率。

具双重控制作用。页岩油的产能贡献主要来自其游离态烃类,因此 S_1 是评价含油性最直接有效的参数^[59],但其测定结果受取心、处理、碎样及分析时效等多种因素影响,有效性和可对比性需进一步提升^[31]。

储集性是页岩油赋存的空间保障,回答了“油在哪里”的问题,核心在于评估油气的储纳能力与空间结构,主要围绕岩相、孔隙度与渗透率三大共性参数展开。孔隙度作为核心定量指标,直接决定储油潜力。

研究提出,中国陆相页岩油甜点段有效孔隙度下限为3.0%,且需配合裂缝发育^[60]。目前,针对孔隙度评价的重点已逐渐转向发展更精确的测量技术与方法,并愈重视由纳米级孔喉系统与微米级裂缝(包括纹层和页理缝)组成的多尺度“有效孔缝系统”的储集和渗流价值^[2]。

可压性评价用于预测压裂过程中裂缝网络的复杂程度,主要依据矿物组成与岩石力学参数,形成以脆性

矿物含量、杨氏模量和水平应力差等为核心的评价体系。随着认识的深化,脆性矿物的范畴已从石英扩展至长石、碳酸盐矿物及黄铁矿等矿物组合;评价理念也从单一矿物含量分析,发展为融合岩石力学参数(杨氏模量和泊松比)、地应力场(水平应力差)与压裂响应(破裂压力和储层改造体积)的“矿物-力学-结构-缝网”一体化评价^[41-42, 61-62]。

可动性是衡量页岩油流动能力的关键,回答了“油能否产出”的问题,核心在于评估油气在特定地质与工程条件下的流动潜力,主要包括含油饱和度指数(OSI , $OSI = S_i/TOC$)和压力系数两大关键参数。两者从不同角度揭示页岩油的可动特征,前者消除了有机质背景干扰^[63],后者直接表征地层驱动能量^[64]。

“四性”特征的协同匹配是构建统一评价体系的基础。优越的含油性与储集性构成甜点形成的物质与空间条件,理想的可动性与可压性则是实现资源向产量转化的关键。该框架虽为复杂问题提供了结构化思路,但尚未形成普适性解决方案,具体参数的选择、权重与阈值仍强烈依赖于地质背景与页岩类型,需依“类”优化。

2.2 关键参数阈值的差异化

“四性”框架虽确立了评价的通用维度,但核心参数的阈值却表现出强烈的动态性与类型依赖性,成为制约评价体系由“通用”走向“精准”的关键瓶颈。这一特性本质上源于中国陆相页岩油复杂的地质成因。

TOC 作为烃源岩品质的经典指标,在页岩油评价中的有效性已不再是固定值,而是与源-储配置关系紧密相关。源-储一体的混积型和页岩型页岩油甜点段 TOC 最低门限应分别为1.0%和2.0%,最高门限值不宜超过6.0%。盐水-咸水、咸化-半咸水和微咸水-淡水湖盆地 R_o 最低门限分别为0.50%、0.60%和0.80%^[63]。同样, R_o 的生油窗也因有机质类型及沉积水体盐度不同而变化,咸化湖盆优质烃源岩(I-II₁型)生烃门限和生油高峰期($R_o \approx 0.7\%$ 即可达峰)显著早于淡水湖盆($R_o > 0.9\%$)。勘探实践揭示,渤海湾盆地济阳拗陷牛庄洼陷牛页2井在 R_o 小于0.6%的层段仍然取得了页岩油勘探突破。同样, S_i 和 OSI 阈值划分在实际应用中也需进行类型化校正^[31]。

储集性能的区域差异同样显著。济阳拗陷半咸水富油主力洼陷平均孔隙度达7.6%,富油小洼陷类型较丰富但连续性一般,孔隙度约为4.8%,因此,孔隙度下限的确定必须考虑其与流体可动性的耦合关系。在强超压驱动下,纳米级孔喉中的油气仍可启动流动,因

此,古龙页岩油的可动孔隙度下限可设定为2.5%;而对于常压系统的夹层型页岩油,有效孔隙度下限需提高至8.0%甚至更高。

可压性评价中,高脆性矿物含量(>60%)是储层可压性评价的前提,但实践表明,这并非形成复杂缝网的充分条件。例如,四川盆地侏罗系介壳灰岩虽矿物组成脆性高,但因结构致密、天然裂缝不发育,可压性极差;反之,古龙页岩油黏土矿物含量较高,但因发育丰富的页理缝,在压裂中更易形成复杂缝网。因此,如何确定“有效脆性”的界限值是值得深入研究的另一科学问题。

综上所述,核心参数阈值并非固定常数,而是地质背景、页岩类型与工程条件动态耦合的结果。建立基于成因机理的类型化参数评价图谱,推动评价指标从“静态阈值”向“动态地质过程响应指标”转变,是未来研究的重要方向。

2.3 评价指标体系的优化趋势

为刻画陆相页岩油的强非均质性与类型多样性,现行研究中常引入大量评价参数,导致指标体系日趋繁冗。这种做法在体现研究深度的同时,也暴露出当前评价体系在聚焦主控因素与提升决策效率方面的不足,成为制约甜点评价由理论研究向生产实践转化的关键瓶颈。

参数冗余的根源在于“描述性”思维过度,而“机理驱动”的提炼能力不足。现有许多参数基于统计相关性引入,未能深入揭示页岩油“富集-流动-产出”的主控机制。例如,含油性评价中, S_i 为含油量的直接体现,而 TOC 、有机质类型和 R_o 等仅作为生烃潜力间接指标;可动性评价中, OSI 、可动油饱和度和气/油比等参数信息重叠,且与产能间存在复杂的非线性关系,反而增加了模型复杂性与操作成本。

因此,从繁杂的参数中筛选出对富集与高产具决定性作用的核心指标,构建简洁、高效、实用的评价体系,已成为未来的必然趋势。该过程并非简单的删减,而是基于地质机理的“优化提纯”,应遵循成因主导、类型化适配、地质-工程一体化及经济可获取等原则。业界已在此方向开展有益探索,如匡立春等^[25]强调将评价聚焦于可动油量、有效渗透率和可压裂性等少数几个与产能直接挂钩的根本性参数。大庆古龙页岩油经过5轮迭代研究,逐步建立了以 S_i 和核磁大孔为核心的地质-工程一体化甜点评价。笔者团队基于100余口井的生产数据,采用随机森林与SHAP分析(shapley additive explanations)量化参数对产能的贡献,初步明确 S_i 、有效孔隙度、压力系数、脆性矿物含量

与破裂压力为关键地质工程参数,为分类分级评价体系的完善提供了量化依据。这些实践预示页岩油甜点评价正经历关键范式转变:从追求“大而全”的参数描述,转向构建“少而精”的机理模型,最终形成类型清晰、参数精简且逻辑明确的高效评价范式,为勘探开发决策提供可靠支撑。

3 评价方法和技术的演进

北美基于地质-工程-经济“三甜点”评价体系,实现了资源的精准优选与动态分级,并逐步进入“数字化、智能化与工厂化”深度融合的新阶段,人工智能技术的应用使甜点优选效率提升约30%^[65-67]。相比之下,中国陆相页岩油甜点评价方法亦经历了从低维定性、经验主导向高维定量、数据驱动的深刻转变。这一过程不仅是技术工具的迭代,更是评价理念由“静态地质描述”向“动态产能预测”、由“地质选区”向“地质-工程-经济一体化优化”的根本性演进。

3.1 评价方法的技术演进

页岩油评价方法的发展表现为评价维度不断拓展、量化精度持续提高的过程。其技术体系大致可划分为3个阶段(图2)。

3.1.1 经验与定性评价阶段(1.0时代)

此阶段以多参数平面叠合法为代表,通过叠合关键地质参数(如 TOC 、 R_o 、孔隙度和有利岩相)的平面等值线图,结合专家经验进行半定量评分,进而圈定

有利区带^[54, 66]。宋明水等^[16]优选页岩层系岩相、裂缝、页岩油可动性和地层压力4个主要评价参数,综合约束并开展了东营凹陷页岩油甜点研究;赵贤正等^[29]针对歧口凹陷沙三段单一型和夹层型页岩油,采用等值线图半定量平面叠合评价方法,结合电阻率和声波时差属性融合反演资料,开展了平面甜点区的综合评价。该方法在勘探早期资料有限的条件下具有快速、直观的优势,但其主观性强、分辨率低,难以满足陆相页岩油强非均质地层的精细评价需求。

3.1.2 定量与半定量评价阶段(2.0时代)

随着测井与地球物理技术的广泛应用,评价方法逐步走向量化。测井解释方法通过“岩心刻度测井”,建立了“四性”参数与测井响应的定量关系,实现了甜点层段的高精度连续识别与分级^[67-74]。例如,Li等^[68]与Hou等^[69]分别建立了基于游离油量与可压裂性指数的甜点指数模型,并在东营、沾化等凹陷成功应用。李潮流等^[75]则构建了能够反映试油层段与邻近主力烃源岩段耦合关系的源-储耦合系数计算公式,实现了基于试油井资料刻度的夹层型页岩油产能分级,确立了具有工业产能的甜点下限标准,解决了鄂尔多斯盆地长7段夹层型页岩油甜点测井评价难题。地球物理预测方法则依托井-震结合、岩石物理建模与地震反演技术,实现 TOC 、孔隙度、脆性和应力等参数在平面和三维空间的预测,为井位部署提供关键依据^[76, 77]。

3.1.3 智能化与一体化评价阶段(3.0时代)

当前,评价方法正处于以机器学习与多维地质建

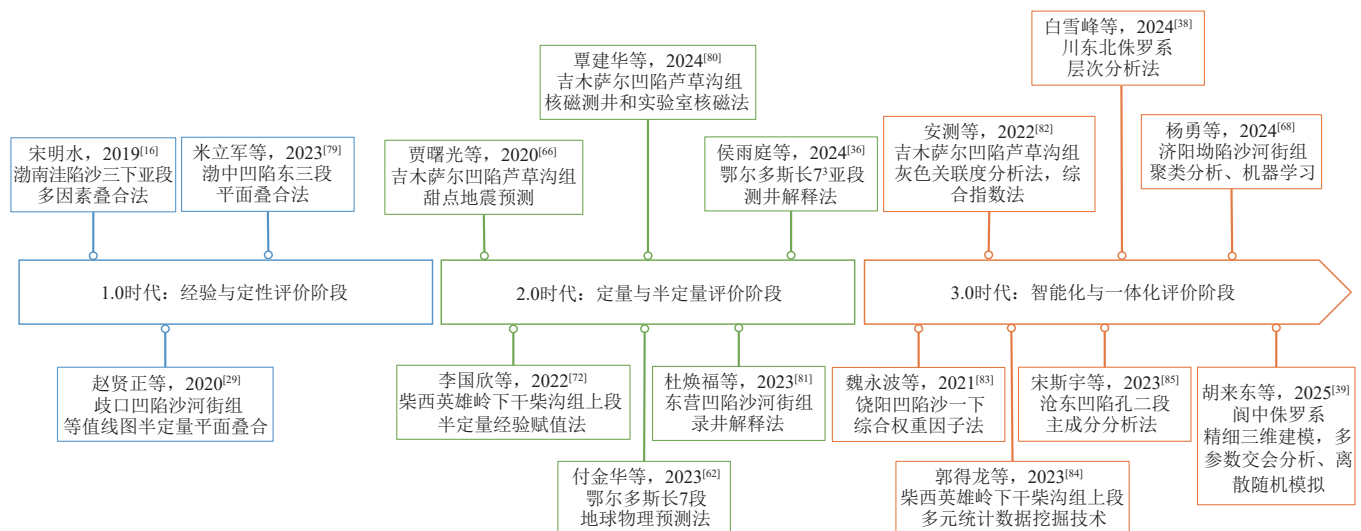


图2 页岩油评价方法演进路线

Fig. 2 Evolutionary path of shale oil evaluation methods

模为代表的智能化阶段。机器学习方法(如随机森林、神经网络等)通过数据驱动挖掘地质-工程参数与产能间的复杂非线性关系,实现甜点的智能分级预测^[56,71-72]。多维地质建模则构建融合地质、力学与裂缝信息的三维数字地质体,实现甜点体空间形态的精细表征,为地质-工程一体化设计与模拟提供平台^[39,78]。在勘探实践中,胡来东等^[39]在四川盆地阆中侏罗系采用微观-宏观-三维模型一体化耦合技术,结合多参数交会分析与离散随机模拟,建立了精准三维地质模型,揭示了甜点参数对产能的控制机制,为建产目标区优选提供了依据。

3.2 不同评价方法的适用性对比

尽管方法技术不断进步,但任何一种方法都存在其固有的适用场景与局限性(表3),不存在“万能”的解决方案。平面叠合法适用于勘探早期的战略选区;测井解释与地球物理方法在评价阶段发挥重要作用,但其结果仍以静态地质属性为主,且受分辨率与多解性制约,预测产能存在偏差;智能化与一体化方法面向开发阶段,融合动态生产数据,支撑产能预测与压裂参数优化,是实现“动态开发响应”的关键手段。例如,万晓龙等^[78]针对鄂尔多斯盆地庆城油田夹层型页岩油,提出了“多维-多元约束”的智能化三维甜点预测方法,通过地震宏观约束与多井模式拟合预测平面分布,基于微构造面智能算法构建单甜点三维模型,并采用叠置嵌入式方法实现多甜点空间集成,显著提升了甜点钻遇率与水平井部署效果。

因此,在实际应用中需根据勘探开发阶段与资料基础,构建与之适配的技术组合,以实现评价精度与效率的平衡。例如,在新区勘探阶段,可采用平面叠合法和地球物理预测进行战略选区;进入评价阶段,则需依靠测井解释和三维地质建模进行甜点层段精细刻画和

井轨迹优化;在开发阶段,则需运用机器学习法和三维地质大模型综合动态生产数据,实现产能精准预测与压裂参数优化。

3.3 地质-工程-经济一体化趋势

页岩油评价的终极目标是实现地质、工程与经济的三元协同,核心在于寻找“地质富集、工程可压、经济有效”三者的最优耦合区,即“效益甜点”。

目前该方向已取得初步进展。济阳坳陷民丰洼陷位于陡坡深陷带,发育纹层状碳酸盐质混合类页岩、纹层/层状长英质混合类页岩夹砂质条带等多种岩相类型,平面分布广、纵向厚度大,丰页1-1HF井峰值日产量263 t,展现巨大的勘探开发潜力。为实现民丰洼陷的分级有序动用,胜利油田根据2 000 m长度水平段的首年累产油量和弹性产率,将济阳页岩油探井划分为高产井、中产井和低产井3大类,并基于“四性”参数开展机器学习产能主控因素分析,揭示有利的 S_1 、合适的 R_0 、较高的压力系数等源-储地质条件,以及脆性矿物含量和应力差等工程条件,共同控制民丰洼陷页岩油富集高产。在此基础上,建立了“井点-平面-立体”开发甜点评价方法,划分出“蜜点、蔗点、橘点”三级评价单元,甜中选蜜,蜜点优先动用,指导民丰洼陷7层楼差异化井位设计与立体开发模式,为效益开发奠定基础^[37,68](表4)。

然而,地质-工程-经济一体化评价仍面临关键挑战。首先,地质属性与工程响应间的本构关系尚不明确,难以定量预测不同地质条件下缝网形成的复杂性;其次,多源数据尺度差异显著,微观孔喉结构、宏观地震属性与动态生产数据的高效融合仍缺乏成熟模型支持。

综上所述,页岩油评价方法的范式转移,是对陆相页岩油复杂性认知深化与开发决策效率提升双重驱动的必然结果。未来的评价体系将是以“地质-工程-经

表3 页岩油甜点分级评价方法对比

Table 3 Comparison of grading evaluation methods for shale oil sweet spots

方法类别	核心原理	典型技术、算法	优点	局限性
多参数平面叠合	多参数图层叠加,定性-半定量分析	等值线图叠合、经验赋值、加权评分	快速、直观,适用于勘探早期	依赖专家经验,平面预测精度低
测井解释评价	岩心刻度测井,建立参数解释模型	最优化、神经网络、多元拟合、核磁共振	纵向分辨率高,可实现全井段连续评价	仅限井点及附近,无法实现平面预测
地球物理预测	井-震结合,建立岩石物理模型与反演	地震属性分析、叠前-叠后反演、各向异性分析	实现井间“甜点”要素平面预测,指导井位部署	分辨率受地震资料限制,反演存在多解性
多维地质建模	多源数据融合,三维空间随机模拟	离散随机模拟、相控建模	直观展示甜点三维形态,实现“甜点体”综合预测	建模过程复杂,成本高,地区推广性差
机器学习综合预测	数据驱动,挖掘参数与产能的复杂关系	层次分析法、灰色关联法、因子分析、熵权法、神经网络、随机森林	能处理复杂非线性关系,量化、智能化程度高	对数据质量和数量要求高,模型可解释性差

表4 渤海湾盆地民丰洼陷页岩油效益甜点分级标准

Table 4 Grading criteria for commercial shale oil sweet spots in the Minfeng Sub-sag, Bohai Bay Basin

甜点 分类	地质评价指标			工程评价指标		经济评价指标	
	镜质体 反射率(R_o)/%	压力系数	游离烃含量(S_1)/ (mg/g)	脆性矿物 含量/%	应力差/MPa	水平段首年累产 油量/(10^4 t)	弹性产率/ (m^3 /MPa)
蜜点	0.7~1.0	>1.4	>3.0	>65	<5.0	>1.5	>1 500
蔗点	0.6~0.7/1.0~1.2	1.3~1.4	1.0~3.0	40~65	5.0~10.0	1.0~1.5	800~1 500
橘点	<0.6/>1.2	<1.3	<1.0	<40	>10.0	<1.0	<800

济一体化”为核心、以“多源多尺度数据”为基础、以“智能算法”为支撑的动态预测系统,推动页岩油勘探开发从经验导向走向科学驱动。

4 面临挑战与发展趋势

在系统梳理页岩油分类、参数与评价方法的基础上分析认为,尽管中国陆相页岩油评价研究已取得显著进展,其整体体系仍面临一系列相互关联的系统性瓶颈,制约着评价结果的可靠性、可推广性及其对勘探开发决策的有效支撑。

4.1 研究局限性分析

4.1.1 理论瓶颈:地质演化与产能响应的耦合机制尚不明确

当前评价体系对页岩油“生—滞—排—采”全过程的定量描述仍显不足,尤其缺乏从“地质甜点”到“商业产能”的转化机制模型。①“源-储”耦合机理的量化研究滞后,不同类型页岩油中烃类生成、滞留、微运移与富集的动力学过程及其对可动烃(S_1)分布的控制机制仍以定性分析为主,实验数据支撑有限,导致TOC和 S_1 等关键参数的阈值缺乏统一的成因模型支持。②页岩油在纳米级孔喉、微裂缝与人工缝网中的多相多尺度流动机制极为复杂,涉及传质、相变与应力敏感等多重效应,现有可动性评价主要依赖OSI及压力系数等宏观静态参数,未能与微观孔隙网络中流体的动用行为建立定量关联,导致从“可动油”到“采出油”的预测存在较大不确定性。

4.1.2 技术瓶颈:评价方法的普适性、精度与成本难以兼顾

现有评价方法在推广中普遍面临“精度-普适性-效率”难以协同的制约。①方法区域性过强,无论是经验叠合、地球物理反演还是地质建模,其核心算法与关键参数多具地区专属性,如在鄂尔多斯盆地长7

段适用的模型,往往难以直接用于准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组,导致技术体系呈现“孤岛化”,难以形成可复制的评价流程。②智能方法存在“黑箱”与数据依赖问题。机器学习等数据驱动方法虽在预测中表现出色,但模型可解释性差,影响决策可信度;同时,其性能高度依赖高质量、标准化的训练数据,而当前页岩油领域数据质量不一、标准缺失,严重限制了模型的泛化能力与实际应用效果。

4.1.3 应用瓶颈:评价体系与勘探开发实践的融合不足

当前评价体系尚未形成贯穿全生命周期的动态决策支持机制。①早期资源评价与后期产能预测之间存在脱节,基于体积法的资源量估算难以有效指导产建区优选与开发策略制定,易出现“资源量大而产能低”的局面。②地质甜点与工程甜点在空间上存在不匹配现象,富烃层段可能因工程条件差而难以有效改造,易改造层段则可能含油性差,导致部分钻井位于“次优”目标,影响整体开发效益。③现有评价对工程风险的预见性不足,尤其在大井组立体开发中,对套损、套变等井筒完整性风险的评估尚不充分。当前一体化评价未能有效融合地质力学与实时施工数据,难以实现风险预警与压裂参数优化,制约了安全高效开发目标的实现。

综上所述,中国陆相页岩油评价在理论、技术与应用层面均面临系统性问题,这些瓶颈相互交织,构成复杂制约网络。任何单一技术的改进均难以实现体系性突破,亟需推动整体性范式变革。

4.2 发展趋势展望

为突破上述瓶颈,中国陆相页岩油评价研究正迈向以“理论深化、技术智能、应用协同”为特征的范式变革,其发展趋势主要体现在以下4个方面。

1)从静态描述转向全生命周期动态评价。未来的评价工作必须彻底摆脱“一次性”的静态思维,转而构建一个与“预探—评价—开发—生产”全流程紧密耦

合的动态评价系统,并且预先制定阶段化评价目标。在预探阶段,侧重于盆地/区块级的资源潜力与地质风险评价;在评价阶段,核心是地质-工程双甜点耦合评价与储量升级;在开发与生产阶段,则聚焦于井位优化、压裂设计与经济可采储量(EUR)的实时预测与评估。在岩心、测井和地球物理等静态数据的基础上,集成随钻、随压和随产的动态数据,实现评价模型的实时更新与反馈优化。例如,利用第一批井的生产数据动态修正地质模型和甜点预测结果,从而指导后续评价模型和井网优化部署,形成一个“评价—决策—实施—学习—再评价”的闭环管理范式。

2) 构建地质-工程-经济一体化的评价参数体系。解决“地质-工程-经济”融合不足问题的根本出路,在于构建一个三元一体化的评价框架。未来的研究将致力于从海量参数中筛选出对最终效益起决定性作用的关键核心参数,并厘清其内在关联,构建一个以地质甜点、工程甜点和经济甜点为核心的三元动态评价模型。该模型不仅能回答“哪里油多、哪里好压”,更能回答“在哪里开采有效益”。同时,针对不同类型页岩油,该体系将赋予差异化的参数权重。例如,对于源-储一体型页岩油,地质甜点(如 S_i 和压力系数)的权重可能更高;而对于夹层型页岩油,工程甜点(如夹层钻遇率和应力差)可能成为主要制约因素。

3) 深化多源数据融合与人工智能驱动的智能评价。技术进步的焦点将从单一方法的创新,转向数据、算法与算力的协同赋能。利用数字孪生和大数据平台等技术,打破地震、测井、岩心、钻井、压裂和生产等数据之间的壁垒,通过多源异构数据深度融合,构建统一的“页岩油数据湖”。例如,融合微观CT扫描、介电测井、光纤DAS/DTS数据和三维地震属性,实现对甜点体从纳米到千米尺度的综合表征。在机理模型与人工智能方法的融合方面,发展物理信息驱动的神经网络(PINN)等新型算法,将地质力学方程和渗流力学规律等先验知识嵌入机器学习模型,提升模型的预测精度、外推能力及可解释性,破解“黑箱”困境。这将推动评价方法从“数据驱动下的相关性挖掘”升级为“模型机理约束下的因果性推理”。

4) 推动典型刻度区研究与行业标准规范化。为解决评价体系“大而全”的繁冗问题,必须加强顶层设计,通过典型刻度区研究,推动关键技术与评价流程的标准化。应优先选择吉木萨尔(混积型)、古龙(纯页岩型)、庆城(夹层型)和济阳(断陷混积型)等不同类型页岩油的代表性区块作为典型刻度区,通过开展精细解剖建立评价规范,不仅解决本地区的生产问题,更旨在

形成可复制、可推广的分类分级评价技术规范与参数模板。在刻度区研究的基础上,行业主管部门、企业和研究机构需协同合作,共同制定和完善页岩油分类、关键参数测试与取值、甜点评价流程等方面的行业标准与国家规范。同时,亟需建立行业级的页岩油专业数据库与数据治理体系,确保数据的质量、一致性与共享性,为智能化评价奠定坚实的基础。

中国陆相页岩油分类分级评价研究正处于范式变革的关键时期。通过构建全生命周期动态评价新范式、地质-工程-经济一体化新体系、多源数据与人工智能新引擎、典型刻度区与标准化新基石,将系统突破当前瓶颈,推动页岩油勘探开发从经验探索走向科学预测,实现从规模增储向效益开发的根本转变。

5 结论

1) 在分类体系方面,研究已从早期基于资源类型与宏观背景的划分向以“源-储配置”为核心、旨在揭示富集机理与指导差异化开发的综合分类方案的方向发展,在实践中已初步形成了源-储一体型、源-储共生型与源-储分离型3大基本类型。然而,当前尚未建立能够贯通“地质成因-储层属性-工程响应-经济价值”的统一理论框架,概念不统一、术语混乱等问题仍是制约分类方案标准化和应用推广的关键瓶颈。

2) 在评价参数体系方面,业界已形成以“含油性、储集性、可动性、可压性”为核心的“四性”共性评价框架,为页岩油甜点评价提供了通用语言。然而,关键参数阈值表现出强烈的动态性与类型依赖性, TOC 、 R_o 、孔隙度及脆性矿物含量等参数的评价标准因地质背景与页岩类型而异,否定了“一刀切”的评价模式,凸显了从参数冗余中筛选类型化核心指标的迫切性。

3) 在评价方法方面,技术谱系经历了从经验叠合到智能预测的范式转移,多源数据融合与机器学习等智能算法已成为提升评价精度与效率的新引擎。然而,如何实现地质机理与数据驱动的深度融合、破解智能模型的“黑箱”困境、提升方法的跨区域适用性,仍是未来技术突破的关键。

4) 为系统解决当前面临的理论认知、技术方法和实践应用等方面的瓶颈,未来应着力构建以“全生命周期动态评价”为新范式、以“地质-工程-经济一体化”为新体系、以“多源数据与人工智能”为新引擎、以“典型刻度区与标准化建设”为新基石的下一代评价系统。通过分类分级评价理论的创新与实践的突破,将有力推动中国陆相页岩油勘探开发从经验探索走向科学预

测,为实现规模效益开发和保障国家能源安全提供坚实的科学技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 赵喆,白斌,刘畅,等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327-340.
ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327-340.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 金之钧,朱如凯,梁新平,等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xiping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [5] 袁士义,雷征东,李军诗,等. 陆相页岩油开发技术进展及规模效益开发对策思考[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 13-24.
YUAN Shiyi, LEI Zhengdong, LI Junshi, et al. Progress in technology for the development of continental shale oil and thoughts on the development of scale benefits and strategies [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 13-24.
- [6] 贾承造,王祖纲,姜林,等. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 1-11.
JIA Chengzao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China [J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 1-11.
- [7] 杨阳,郑兴范,肖毓祥,等. 中国石油中高成熟度页岩油勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 23-33.
YANG Yang, ZHENG Xingfan, XIAO Yuxiang, et al. Progress in exploration and development of high-mature shale oil of PetroChina [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 23-33.
- [8] 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.
- [9] 杜金虎,胡素云,庞正炼,等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.
DU Jinhu, HU Suyun, PANG Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.
- [10] 赵文智,胡素云,侯连华,等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.
- [11] 郭旭升,胡宗全,申宝剑,等. 中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义[J]. 石油学报, 2024, 45(11): 1565-1578.
GUO Xusheng, HU Zongquan, SHEN Baojian, et al. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(11): 1565-1578.
- [12] 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.
- [13] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩油分类与评价[J]. 地质前缘, 2012, 19(5): 322-331.
ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [14] 赵俊龙,张君峰,许浩,等. 北美典型致密油地质特征对比及分类[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 44-50.
ZHAO Junlong, ZHANG Junfeng, XU Hao, et al. Comparison of geological characteristics and types of typical tight oil in North America [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 44-50.
- [15] 刘文卿,汤达祯,潘伟义,等. 北美典型页岩油地质特征对比及分类[J]. 科技通报, 2016, 32(11): 13-18.
LIU Wenqing, TANG Dazhen, PAN Weiyi, et al. Comparison of geological characteristics and types of typical shale oil in North America [J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(11): 13-18.
- [16] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 1-12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1-12.
- [17] 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.
- [18] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1717–1729.
LIU Huimin, LI Junliang, LIU Peng, et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1717–1729.
- [19] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 601–614.
FU Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 601–614.
- [20] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819–828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819–828.
- [21] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 116–127.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China: Enrichment conditions and occurrence features [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 116–127.
- [22] 王广昀, 王凤兰, 赵波, 等. 大庆油田公司勘探开发形势与发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 55–73.
WANG Guangyun, WANG Fenglan, ZHAO Bo, et al. Exploration and development situation and development strategy of Daqing Oilfield Company [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 55–73.
- [23] 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.
- [24] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 1–13.
SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” for shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 1–13.
- [25] 匡立春, 吴松涛, 邢浩婷, 等. 陆相页岩油规模产出的关键参数与评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(4): 782–791.
KUANG Lichun, WU Songtao, XING Haoting, et al. Key parameters and evaluation methods for large-scale production of lacustrine shale oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(4): 782–791.
- [26] 郭秋麟, 米石云, 张倩, 等. 中国页岩油资源评价方法与资源潜力探讨[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 402–412.
GUO Qiulin, MI Shiyun, ZHANG Qian, et al. Assessment methods and potential of shale oil resources in China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(3): 402–412.
- [27] 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.
- [28] 国家能源局. 页岩层系岩相划分与编图规范: NB/T 11611–2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
National Energy Administration. Specification for lithofacies classifying and mapping of shale strata: NB/T 11611–2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [29] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1067–1078.
JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067–1078.
- [30] 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.
- [31] 李志明, 刘雅慧, 何晋译, 等. 陆相页岩油“甜点”段评价关键参数界限探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1453–1467.
LI Zhiming, LIU Yahui, HE Jinyi, et al. Limits of critical parameters for sweet-spot interval evaluation of lacustrine shale oil [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1453–1467.
- [32] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 561–569.
FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561–569.
- [33] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1675–1686.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, DONG Dazhong, et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1675–1686.
- [34] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451–458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451–458.
- [35] GAUTIER D L, DOLTON G L, TAKAHASHI K I, et al. 1995 National Assessment of United States oil and gas resources: Results, methodology, and supporting data: Data Series 30 [R].

- Reston, VA: U. S. Geological Survey, 1995.
- [36] HELMS L. Horizontal drilling[J]. DMR Newsletter, 2008, 35(1): 1-3.
- [37] LEFEVER J A. History of oil production from the Bakken Formation, North Dakota[M]//HANSEN W B. 1991 Guidebook to Geology and Horizontal Drilling of the Bakken Formation. Billings: Montana Geological Society, 1991: 3-17.
- [38] DURHAM L S. Elm coulee idea opened new play [EB/OL]. (2009-08-01) [2024-01-01]. <https://www.aapg.org/news-and-media/details/explorer/articleid/678/elm-coulee-idea-opened-new-play>.
- [39] BROWN D. Oil finder shares some insights[EB/OL]. (2006-06-01) [2024-01-01]. <https://www.aapg.org/news-and-media/details/explorer/articleid/32627/oil-finder-shares-some-insights>.
- [40] 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.
- [41] 刘合, 黄有泉, 蔡萌, 等. 松辽盆地古龙页岩油储集层压裂改造工艺实践与发展建议[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 603-612.
- LIU He, HUANG Youquan, CAI Meng, et al. Practice and development suggestions of hydraulic fracturing technology in the Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 603-612.
- [42] 刘合, 孟思炜, 王素玲, 等. 古龙页岩力学特征与裂缝扩展机理[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 820-828.
- LIU He, MENG Siwei, WANG Suling, et al. Mechanical characteristics and fracture propagation mechanisms of the Gulong shale[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 820-828.
- [43] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 99-110.
- XIE Jianyong, CUI Xinjiang, LI Wenbo, et al. Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 99-110.
- [44] 郭旭升, 黎茂稳, 赵梦云. 页岩油开发利用及在能源中的作用[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 38-47.
- GUO Xusheng, LI Maowen, ZHAO Mengyun. Shale oil development and utilization and its role in energy industry [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38-47.
- [45] 张少龙, 闫建平, 石学文, 等. 深层页岩气甜点分类的地质-工程评价指标体系及应用: 以四川盆地LZ地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3666-3680.
- ZHANG Shaolong, YAN Jianping, SHI Xuewen, et al. Geological and engineering evaluation index system for deep shale gas sweet spots classification and its application: A case of Wufeng—Longmaxi formations in LZ area, Sichuan Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3666-3680.
- [46] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 1-14.
- FU Jinhua, WANG Long, CHEN Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 1-14.
- [47] 何永宏, 薛婷, 李桢, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油开发技术实践——以庆城油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1245-1258.
- HE Yonghong, XUE Ting, LI Zhen, et al. Development technologies for Triassic Chang 7 shale oil in Ordos Basin: A case study of Qingcheng Oilfield, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1245-1258.
- [48] 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 of shale oil sweet spots in Lucaogou Formation of Jimsar Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 535-541.
- [49] 邹阳, 韦盼云, 曹元婷, 等. 碱湖型页岩油“甜点”分类与主控因素——以准噶尔盆地风城组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(3): 458-470.
- ZOU Yang, WEI Panyun, CAO Yuanting, et al. Classification and main controlling factors of sweet spots of alkaline lake type shale oil: A case study of Fengcheng Formation in Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 458-470.
- [50] 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.
- [51] 蒲秀刚, 柴公权, 许静, 等. 黄骅坳陷古近系细粒沉积区勘探开发认识技术迭代与页岩油增储上产成效[J]. 石油学报, 2024, 45(9): 1399-1408.
- PU Xiugang, CHAI Gongquan, XU Jing, et al. Technological iteration and understandings of exploration and development as well as increase of shale oil reserves and production in Paleogene fine-grained sediments areas of Huanghua depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(9): 1399-1408.
- [52] 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 subsag, Qikou sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(6): 643-657.
- [53] 崔宝文, 王瑞, 白云凤, 等. 古龙页岩油勘探开发进展及发展对策[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(4): 125-136.
- CUI Baowen, WANG Rui, BAI Yunfeng, et al. Exploration and development progress and development strategies of Gulong shale oil [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,

- 2024, 43(4): 125-136.
- [54] 荆晓明. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜二段页岩油甜点评价[J]. 非常规油气, 2023, 10(3): 31-38, 45.
- JING Xiaoming. Evaluation of shale oil sweet spots in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(3): 31-38, 45.
- [55] 高玉巧, 蔡潇, 夏威, 等. 苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油储集空间特征及甜点段评价——以溱潼凹陷QY1井为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 916-926.
- GAO Yuqiao, CAI Xiao, XIA Wei, et al. Characteristics of reservoir space and sweet spot evaluation of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Subei Basin: A case study of Well QY1 in Qintong Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 916-926.
- [56] 白雪峰, 王民, 王鑫, 等. 四川盆地东北部侏罗系凉高山组页岩油甜点与富集区评价[J]. 地球科学, 2024, 49(12): 4483-4500.
- BAI Xuefeng, WANG Min, WANG Xin, et al. Evaluation of shale oil sweet spot and rich area in Jurassic Lianggaoshan Formation, Northeast Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(12): 4483-4500.
- [57] 胡来东, 霍哈勇, 管倩倩, 等. 多尺度地质建模技术在页岩油储层甜点预测中的应用[J]. 测井技术, 2025, 49(3): 471-480.
- HU Laidong, HUO Hanyong, GUAN Qianqian, et al. Application of multi-scale geological modeling technology in sweet spot prediction of shale oil reservoirs [J]. Well Logging Technology, 2025, 49(3): 471-480.
- [58] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18-31.
- LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 18-31.
- [59] LARTER S, HUANG Haiping, BENNETT B, et al. What don't we know about self sourced oil reservoirs: Challenges and potential solutions [C]//SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, 2012. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2012: SPE-162777-MS.
- [60] 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.
- [61] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏媛, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 16-20.
- JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 16-20.
- [62] 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.
- [63] 李志明, 孙中良, 黎茂稳, 等. 济阳坳陷第一轮页岩油探井“失利”原因剖析[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 143-157.
- LI Zhiming, SUN Zhongliang, LI Maowen, et al. Cause analyses of “failure” for first round shale oil exploration wells in Jiyang Depression [J]. Earth Science, 2023, 48(1): 143-157.
- [64] 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.
- [65] BOWKER K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [66] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.
- [67] GRANA D, AZEVEDO L, LIU Mingliang. A comparison of deep machine learning and Monte Carlo methods for facies classification from seismic data [J]. Geophysics, 2020, 85(4): WA41-WA52.
- [68] LI Maowen, CHEN Zhuoheng, QIAN Menhui, et al. What are in pyrolysis S1 peak and what are missed? Petroleum compositional characteristics revealed from programmed pyrolysis and implications for shale oil mobility and resource potential [J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 217: 103321.
- [69] HOU Lianhua, LUO Xia, YU Zhichao, et al. Key factors controlling the occurrence of shale oil and gas in the Eagle Ford Shale, the Gulf Coast Basin: Models for sweet spot identification [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 94: 104063.
- [70] 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.
- [71] NIU Daming, LI Yilin, ZHANG Yunfeng, et al. Multi-scale classification and evaluation of shale reservoirs and ‘sweet spot’ prediction of the second and third members of the Qingshankou Formation in the Songliao Basin based on machine learning [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216: 110678.
- [72] 杜心宇. 东营凹陷沙三下-沙四上亚段页岩油开发甜点评价 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- DU Xinyu. Evaluation of development sweet spots of shale

- reservoirs in Lower Es3 and Upper Es4 sub-members, Dongying Sag[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2022.
- [73] 侯雨庭, 杨兆钰, 张忠义, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7_3 页岩油地质认识与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(6): 16-28.
- HOU Yuting, YANG Zhaoyu, ZHANG Zhongyi, et al. Geological understanding and exploration potential of shale oil in the third submember of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(6): 16-28.
- [74] 杨勇, 张世明, 吕琦, 等. 济阳坳陷古近系沙四段—沙三段页岩油立体评价探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(3): 31-44.
- YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Research and practice of stereoscopic evaluation of shale oil in the fourth-third member of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(3): 31-44.
- [75] 李潮流, 王长胜, 张文静, 等. 陆相湖盆夹层型页岩油甜点分级测井评价方法研究——以鄂尔多斯盆地陕北吴起地区延长组长7段为例[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 156-165.
- LI Chaoliu, WANG Changsheng, ZHANG Wenjing, et al. Logging evaluation method for sweet spots classification of the interlayered type shale oil in continental lake basin: a case study of the seventh member of Yanchang Formation in Wuqi area in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(4): 156-165.
- [76] ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIN Fengming, et al. Geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil sweet spots: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in the Cangdong sag in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Research, 2019, 4(2): 97-112.
- [77] 刘喜武, 刘宇巍, 郭智奇. 陆相页岩油关键甜点要素地球物理表征技术[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1576-1584.
- LIU Xiwu, LIU Yuwei, GUO Zhiqi. Key sweet spot factors seismic characterization of continental shale oil [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1576-1584.
- [78] 万晓龙, 吴胜和, 周新平, 等. 夹层型页岩油三维甜点分布预测方法研究: 以鄂尔多斯盆地庆城油田B15区块延长组为例[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 417-431.
- WAN Xiaolong, WU Shenghe, ZHOU Xinping, et al. Research on the prediction method of 3D reservoir sweet spots distribution of shale oil in shale intercalated layer: A case from the Yanchang Formation of B15 block, Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(5): 417-431.
- [79] 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.
- [80] 覃建华, 李映艳, 杜戈峰, 等. 基于核磁共振测井的页岩油产能分析及甜点评价[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(3): 317-326.
- QIN Jianhua, LI Yingyan, DU Gefeng, et al. NMR logging-based productivity analysis and sweet spot evaluation for shale oil [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(3): 317-326.
- [81] 杜焕福, 孙鑫, 王春伟, 等. 东营凹陷页岩油双甜点录井解释评价方法研究[J]. 矿产勘查, 2023, 14(3): 480-490.
- DU Huanfu, SUN Xin, WANG Chunwei, et al. Study on mud logging interpretation and evaluation method of geological and engineering sweet spots for shale oil in Dongying Sag[J]. Mineral Exploration, 2023, 14(3): 480-490.
- [82] 安测. 吉木萨尔凹陷西部芦草沟组混积型页岩层系储层特征及综合甜点评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- AN Ce. Study on reservoir characteristics and evaluation of desserts of Lucaogou shale reservoirs, western Jimsar Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2022.
- [83] 魏永波, 李俊乾, 卢双舫, 等. 湖相页岩油甜点综合评价方法及应用——以饶阳凹陷沙一下亚段页岩油为例[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 813-824.
- WEI Yongbo, LI Junqian, LU Shuangfang, et al. Comprehensive evaluation method of sweet spot zone in lacustrine shale oil reservoir and its application: A case study of shale oil in lower 1st member of the Shahejie formation in the Raoyang Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 813-824.
- [84] 郭得龙, 申颖浩, 林海, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油CP1井压裂后甜点分析[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 117-128.
- GUO Delong, SHEN Yinghao, LIN Hai, et al. Post fracturing shale oil sweet spot evaluation in Well CP1 in Yingxiangling area, Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 117-128.
- [85] 宋斯宇, 陈世悦, 鄢继华, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段—亚段有利岩相及页岩油甜点区优选[J]. 地质与资源, 2023, 32(2): 225-232.
- SONG Siyu, CHEN Shiyue, YAN Jihua, et al. Favorable lithofacies and sweet spot optimization of the Ek₂ shale oil in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Geology and Resources, 2023, 32(2): 225-232.

(编辑 张玉银)