

基于源-储单元的页岩油气甜点段评价优选新思路

郭旭升^{1,2}, 申宝剑^{1,2,3}, 王鹏威^{1,2,3}, 卢龙飞^{1,2}, 李倩文^{1,2,3}, 王冠平^{1,2,3}, 常佳琦^{1,2,3},
刘伟新^{1,2}, 李楚雄^{1,2}, 何晋译^{1,2}

(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 石油勘探开发研究院, 北京 102206;
3. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206)

摘要: 目前行业内尚未从页岩油气统一性的角度建立甜点段评价参数与标准体系。总有机碳含量(*TOC*)被认为是必不可少的评价参数,但仅仅利用*TOC*作为主要参数进行甜点评价而不充分考虑页岩油气储集条件的重要性,会导致评价结果与最优甜点段偏离。在研究中国页岩油气甜点段类型特征的基础上,提出了基于源-储单元的页岩油气甜点段评价新思路,并结合典型地区和典型页岩层系甜点段,提出了该方法的评价流程。源-储分离型页岩油气甜点段的孔隙度与含油/气性正相关,孔隙度是甜点段优选的关键参数;源-储一体型页岩油气甜点段的*TOC*与含油/气性正相关,无论是*TOC*还是孔隙度均可作为是甜点段评价的关键参数;源-储共生型页岩油气甜点段的含油/气性受*TOC*和孔隙度共同控制,只有综合考虑两者才能准确地评价甜点段。页岩油气甜点段评价应聚焦良好的储集层段,而非高有机质丰度层段。今后在页岩油气甜点段评价方法体系中,应对储集条件予以更多考虑,增加孔-缝-纹一体化储集条件评价,并结合地球物理甜点评价技术,提高甜点评价的准确性。

关键词: 孔隙度; *TOC*; 甜点段; 源-储单元; 页岩油气

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

A new approach to the evaluation and optimal selection of shale oil and gas sweet-spot intervals based on source rock-reservoir units

GUO Xusheng^{1,2}, SHEN Baojian^{1,2,3}, WANG Pengwei^{1,2,3}, LU Longfei^{1,2}, LI Qianwen^{1,2,3}, WANG Guanping^{1,2,3},
CHANG Jiaqi^{1,2,3}, LIU Weixin^{1,2}, LI Chuxiong^{1,2}, HE Jinyi^{1,2}

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

Abstract: There is a lack of a unified parameter and criterion system for optimal selection of shale oil and gas sweet-spot intervals at present. Although the total organic carbon (*TOC*) content is widely considered an essential parameter for the selection, the parameter alone may be insufficient to accurately evaluate sweet-spot without adequate consideration of shale reservoir conditions, resulting in deviation of evaluation results from the optimal sweet-spot intervals. Given this, we categorize the shale oil and gas sweet spots in China, and propose a new approach to the evaluation of shale oil and gas sweet-spot intervals based on source rock-reservoir units. Furthermore, an evaluation process of the new approach is proposed combining the analysis of typical regions and typical shale formations in China. The analytical results reveal that the source rock-reservoir units can be categorized into three types: separated, integrated, and paragenetic types. For separated source rock-reservoir units, the shale oil and gas sweet-spot intervals are characterized by a positive correlation between porosity and oil/gas-bearing properties, establishing porosity as the key parameter for selecting optimal sweet-spot intervals. For integrated source rock-reservoir units, the shale oil and gas sweet-spot intervals feature a positive correlation between the *TOC* content and oil/gas-bearing

收稿日期:2024-10-18;修回日期:2024-12-16。

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,博士、研究员,烃源岩及页岩油气地质评价。E-mail:shenbj.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U24B6002)。

properties. This indicates that both the *TOC* content and porosity can serve as key parameters for the evaluation. In contrast, for paragenetic source rock-reservoir units, the oil/gas-bearing properties of shale oil and gas sweet-spot intervals are jointly governed by the *TOC* content and porosity, both of which should be jointly considered for accurate evaluation. The abovementioned analyses indicate that the evaluation of the shale oil and gas sweet-spot intervals should focus on favorable reservoir intervals rather than those with high organic matter abundance. Therefore, priority should be given to reservoir conditions in the evaluation methodology for optimal selection of shale oil and gas sweet-spot intervals. Specifically, it is necessary to introduce the integrated evaluation of reservoir conditions in terms of pores, fractures, and lamina and develop geophysical evaluation technologies in order to improve the evaluation accuracy.

Key words: porosity, total organic carbon (*TOC*), sweet-spot interval, source rock-reservoir unit, shale oil and gas

引用格式: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. DOI: 10.11743/ogg20250101.

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. DOI: 10.11743/ogg20250101.

“甜点”(sweet spot)概念的起源可以追溯到20世纪末的美国石油勘探,最初是指通过分析岩层和构造特征识别出的高产油气区。在非常规油气领域,甜点通常指油气分布相对富集、高产的有利区带或层段^[1]。页岩油气与常规油气不同,通常具有大面积连续聚集、自生自储、不受浮力作用、无明显圈闭界限等特点。因此,页岩油气甜点的准确预测与评价对于能否找准页岩油气有利区带和层段,提升勘探效率与成功率,进而实现经济效益开发均具有重要意义。

根据国家标准《页岩油地质评价方法》(GB/T 38718—2020)^[2],页岩油甜点可分为甜点段和甜点区。甜点段(区)是指含油性好、储集条件优越、可改造性强,在现有经济技术条件下具有商业开发价值的页岩油层段(聚集区)。目前,有关页岩气甜点评价尚未建立统一的国家标准或行业标准,前期有学者将页岩气甜点简单定义为最佳的页岩气勘探与开发的区域或层位^[3]。根据郭旭升等^[4-5]提出的概念,可将页岩油和页岩气纳入同一套成烃、成储、成藏的动态演化体系中。因此,页岩气甜点段(区)的定义也可相应概括为含气性好、储集条件优越、可改造性强,在现有经济技术条件下具有商业开发价值的页岩气层段(聚集区)。

然而,页岩油和页岩气在沉积、成烃、储集、工程地质与开采工艺方面均有差异,因而两者在甜点评价参数方面存在差异性。根据页岩油气勘探开发的不同阶段和评价重点,甜点可进一步分为地质甜点、工程甜点和经济甜点^[1, 6-7]。地质甜点是指页岩油气富集的区域或层段,主要考虑烃源岩品质、储集空间、地层能量(压力系数、气/油比)、保存条件等要素;工程甜点是指易于工程开发的区域或层段,主要关注岩石可压性和地

应力各向异性等要素;经济甜点是指具有经济开发效益的区域和层段,主要考虑资源丰度、品质、规模、埋深以及地面条件等要素^[1, 7]。此外,根据构造保存条件,甜点也可分为构造型甜点和连续型甜点。如焦石坝页岩气田为典型的构造型甜点,具有构造边缘复杂、内部稳定、裂缝发育等特点;而威远区块为典型的连续型甜点,构造稳定、面积大、连续分布^[8]。从沉积环境来看,甜点包括海相、陆相和海-陆过渡相等不同沉积环境下的甜点。根据甜点的成因类型,可分为沉积型甜点和裂缝型甜点^[9]。总之,甜点发育类型较多,分类标准多样,不同类型的甜点评价体系也存在差异,研究程度也不均衡。

针对页岩油气甜点评价参数,早期研究认为页岩油气甜点由3个要素共同形成:油气的富集、适宜的地质力学性质以及较强的储层驱动能量^[10]。随着页岩油气勘探开发的不断进展,研究程度的不断深入,更加注重烃源性、岩性、物性、脆性、含油气性和应力各向异性等“六性”匹配评价^[11]。国内外常用的页岩气甜点评价核心参数包括:页岩厚度与埋深、有机质类型与丰度、有机质成熟度、页岩物性、含气性、页岩力学性质、页岩矿物成分和孔隙压力^[1, 12-13]。周德华等^[3]结合中国海相页岩气地质特点提出了包含10项核心参数指标的页岩气甜点判别标准;何希鹏^[14]在储层分级评价的基础上,考虑了保存条件和压裂体积改造,优选了13项关键参数并赋予权重,建立了页岩气甜点目标评价体系及标准。页岩油甜点评价参数与页岩气基本类似,李阳^[15]等提出地质甜点评价应以有利岩相分布为基础,优选有机质含量、滞留烃含量、成熟度和压力系数等关键参数,工程甜点评价应考虑页岩可

压性、地应力各项异性和天然裂缝发育分布等关键参数;杨智^[7]等从地质甜点、工程甜点和经济甜点3个方面对比了北美海相与中国陆相页岩油甜点评价的11项主要参数与标准,与页岩气甜点评价标准相比,还考虑了原油密度,说明可动性也是页岩油甜点评价需考虑的关键参数^[16-17];李潮流^[18]等针对夹层型页岩油提出了源-储耦合关系测井评价,既考虑烃源岩品质参数和储层品质参数,又考虑二者的空间距离耦合关系。《页岩油地质评价方法》(GB/T 38718—2020)规定了页岩油甜点评价参数包括生烃、储集、工程力学和含油性共24项参数^[2],而《页岩油地质甜点评价技术规范》(GB/T 43126—2023)针对页岩型、夹层型和原位转化型页岩油的地质甜点评价提出了不同的参数和定量计算方法^[19]。综上可见,目前针对页岩油气甜点的评价参数并不统一,但均强调利用有机质丰度、成熟度、含油气性等代表页岩生烃品质的参数,以及页岩物性、可压性、力学性质等代表储层品质的参数进行甜点评价。

页岩油气甜点(尤其甜点段)的确定直接关系到水平井靶窗的优选,是一口井成功与否的前提。现有技术表明,页岩油气甜点评价的参数体系较多,但总有机碳含量(TOC)和有机质成熟度(镜质体反射率 R_o)通常被作为页岩油气甜点评价最核心的指标。然而,海相页岩气甜点评价标准提出的 TOC 大于2%可能并不适用于陆相页岩气和页岩油。实践证明,利用 TOC 作为主要评价参数优选出的甜点段可能无法与后期生产所证实的页岩油气高产层段相吻合,如美国西部丹佛盆地 Niobrara 页岩油甜点更多地出现在脆性碳酸盐岩储层,而不是富有机质或黏土质页岩储层^[20]。对于页岩油甜点,普遍认为 R_o 大于0.9%时生烃量才具备较大规模,然而渤海湾盆地东营凹陷牛页2HF井页岩层段在 R_o 为0.62%条件下仍获勘探突破^[21],表明以生烃品质为主导的页岩油气甜点评价思路与方法仍需要进一步优化和完善。目前建立的页岩油气甜点评价体系多局限于具体地区和某一类型,统一的甜点评价体系尚未提出,并且建立的甜点评价体系通常是将页岩油和页岩气分开,尚无学者将页岩油气放到统一的源-储耦合体系下进行思考。为了更加系统地对中国页岩油气甜点段进行评价优选,在郭旭升等^[4]提出的中国页岩油气“二元富集”统一性认识基础上,本文提出了基于源-储单元的页岩油气甜点段评价优选新思路,并选取典型实例进行剖析,以期对中国页岩油气的高效勘探开发提供方法上的借鉴和指导。

1 主要甜点类型和特征

中国页岩油气分类各异,评价参数体系不一,一方面是页岩油和页岩气勘探开发进度差异较大,另一方面是两者在沉积、成烃、储集、工程地质与开采工艺方面均有差异,导致在甜点评价时难以统一度量。诸多学者对页岩油气的富集规律进行了总结与归纳,如源内和源外富集体系、6类“源-位结构”关系、输导层(体)的天然气富集模式以及不同盆地的页岩油气源-储组合分类等,但多局限于具体地区和层系,尚无学者将页岩油气放到统一的源-储耦合体系下进行思考,并在这样的体系下评价不同类型源-储配置的甜点^[22-27]。如有学者根据源岩和储层的岩性组合特征,划分出了源-储一体型、源-储分异型和纯页岩型甜点^[28];也有学者根据源岩与储层的空间配置关系,划分出了源-储紧邻型甜点和源-储一体型甜点,前者包括下源上储型、上源下储型和三明治型甜点,后者包括薄互层型甜点和源-储共生型甜点^[29];甚至也有学者提出根据有效储层的单层厚度与总厚度之比,分为储夹源型、源-储互层型、源夹储型和泥页岩型甜点^[30]等等。郭旭升^[4-5]等指出,基于页岩油气源-储耦合思路识别源-储耦合类型及配置,是明确页岩油气勘探思路、实现页岩油气高效勘探开发的基础。

本文在前期研究的基础上,基于源、储的宏观性质(烃源岩 TOC 和储层孔隙度)和微观空间配置关系提出了页岩油气源-储耦合类型的划分方案,将页岩油气甜点划分源-储分离型、源-储共生型和源-储一体型3大类甜点^[5]。①源-储分离型甜点也可称为互层/夹层型甜点,具有源-储分离或近源运移的特点,泥页岩层系中的薄层砂岩或灰岩层为有利储层,由于近源而有利于捕获油气形成甜点;强调烃类发生运移且运移距离在米级以上,为源-储分离或近源运移,泥页岩层系中的薄层砂岩或灰岩层为有利储层,如四川盆地井研地区寒武系筇竹寺组⑦小层和鄂尔多斯盆地三叠系长7¹⁺²亚段(延长组7段1+2亚段)。②源-储共生型甜点也可称为混积页岩型甜点,具有多源供烃、源-储共存的特点,页岩层系整体含油气,混积岩自身与相邻页岩向混积岩储层供烃并富集成优质甜点;强调烃类就近运移至优势储层内,如东营凹陷古近系沙河街组和红星地区二叠系吴家坪组。③源-储一体型甜点具有源-储一体的特点,即长英质-黏土质黑色页岩整体含油气,高 TOC 、高热演化程度、地层超压以及物性甜点共同控制着页岩油气富集;强调烃类在层内发生微运移,如焦石坝地区五峰组-龙马溪组和松辽盆地白垩系青山口组一段(图1)。

页岩油气甜点类型	源-储分离型			源-储共生型				源-储一体型					
典型实例	四川盆地 下寒武统 筇竹寺组 ⑦小层页岩 气	鄂尔多斯 盆地三叠 系长7 ¹⁺² 亚段页岩 油	准噶尔盆 地吉木萨 尔凹陷二 叠系芦草 沟组页岩 油	四川盆地 二叠系吴 家坪组页 岩气	四川盆地 侏罗系凉 高山组页 岩气	渤海湾盆 地古近系 沙三段- 沙四段页 岩油	苏北盆地 古近系阜 宁组二段 页岩油	四川盆地 下寒武统 筇竹寺组 ⑤小层页 岩气	四川盆地 奥陶系五 峰组-志 留系龙马 溪组页岩 气	四川盆地 二叠系大 隆组页岩 气	四川盆地 侏罗系自 流井组页 岩油	松辽盆地 中部白垩 系青山口 组一段页 岩油	鄂尔多斯 盆地三叠 系长7 ² 亚 段页岩油
甜点发育模式	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
甜点形成机制	源-储分离或近源运移，泥页岩层系中的薄层砂岩或灰岩层为有利储层，由于近源而利于捕获油气形成甜点			多源供烃，源-储共存，混积岩自身与相邻页岩向混积岩储层甜点供烃并富集成优质甜点				源-储一体，高有机质含量、高成熟度、地层超压以及物性甜点共同控制页岩油气的富集					

图1 中国页岩油气甜点类型及形成机制

Fig. 1 Types and formation mechanisms of shale oil and gas sweet spots in China

2 评价优选新思路

2.1 评价方法

前文所述甜点分类标准可将中国的页岩油和页岩气纳入到统一的甜点评价理论体系下^[4],基于此,本文提出了一种基于源-储单元的页岩油气甜点段评价新思路,即:根据页岩层系内的源、储宏观性质和微观空间配置关系划分源-储单元,综合考虑烃源岩质量、储集条件、源-储配置关系及地质条件等因素,对页岩油气层段进行精细化评价,以识别并优选出页岩油气富集程度高、开采潜力大的甜点段。该方法强调以源-储单元为基本评价单元,通过“源”和“储”的多参数综合评价,优选页岩油气甜点段(图2)。

2.1.1 源-储单元划分

根据页岩层系的沉积特征、岩性变化、有机质丰度、热演化程度及储集条件等,将页岩层系划分为若干个相对独立的源-储单元,每个单元包含一定厚度的富有机质页岩及其相邻(或内部)的储集层。根据前述分析,页岩油气源-储单元可划分为源-储分离型、源-

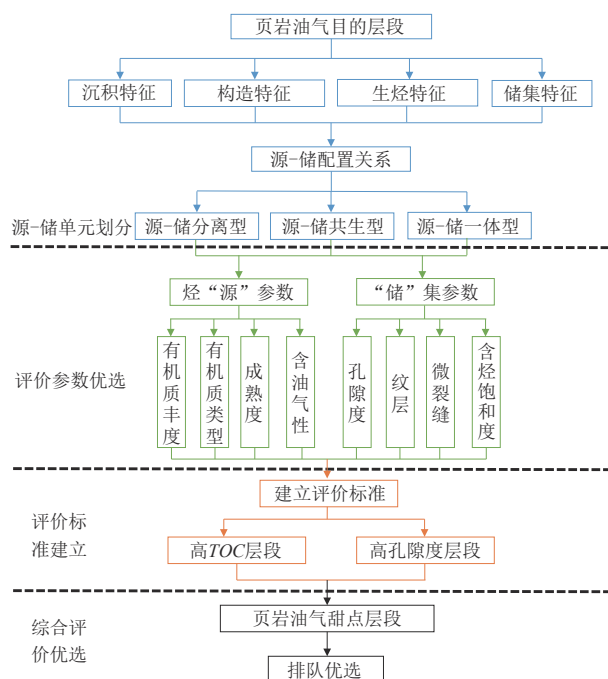


图2 基于源-储单元的页岩油气甜点段评价-优选流程

Fig. 2 Flow chart of the evaluation and selection of shale oil and gas sweet-spot intervals based on source rock-reservoir unit classification

储共生型和源-储一体型3种类型。不同页岩油气的主力层段因其源-储配置关系的不同而分属不同的

源-储耦合类型,而无论哪种源-储耦合类型,都具有油气富集和高产潜力。

2.1.2 评价参数优选

收集并整合沉积(岩性岩相、岩心分析、测井资料等)、生烃(有机质丰度、类型及成熟度)、储集(孔隙结构特征、孔隙度、渗透率、含烃饱和度)及岩石力学性质等评价参数。其中,有机质丰度(TOC)是反映页岩生烃能力的重要指标,是评价“源”的基础参数;孔隙度等储层物性参数直接影响油气的储集能力,是基于源-储单元进行页岩油气甜点段评价的两个关键量化参数。从源-储评价单元的角度来看,页岩油气源-储耦合特征宏观上表现为 TOC 与孔隙度的配置关系,高 TOC 和高孔隙度通常代表优质的源-储耦合条件;微观上体现在页岩中有机质和孔隙之间的配置关系。因此,从简化和统一甜点评价的思路出发,可用 TOC 和孔隙度分别作为评价生烃和储集条件的最关键参数。

2.1.3 评价标准建立

基于源-储单元的类型,制定不同的甜点段识别标准。评估富有机质页岩层系的烃源岩质量和储集条件,需从“源”和“储”两方面分别评价源-储单元内页岩油气纵向层段的优劣,明确以高 TOC 为特征的有利烃源岩层与以高孔隙度为特征的有利储集层哪个参数更能代表甜点段,并以此参数为依据建立该源-储单元内的甜点段评价标准。值得注意的是,不同页岩油气源-储单元的甜点评价标准并不一样,需要根据侧重点提炼影响勘探的评价标准和关键参数。

2.1.4 综合评价优选

根据不同源-储单元的特征和类型,筛选出符合识别标准的甜点段,在此基础上,对各个源-储单元内的页岩油气甜点段进行综合评价和排队,优选纵向上最有利的甜点段,后续将此甜点与工程可行性条件相结合,更好地优选水平井靶窗,为水平井的成功钻探奠定基础。

2.2 典型实例

2.2.1 源-储分离型甜点

鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)为典型的源-储分离型页岩油甜点。长7段发育的黑色页岩和暗色泥岩是优质烃源岩,细砂岩、粉砂岩以及凝灰岩夹层具有良好的储集能力^[30-32]。长7¹⁺²亚段页岩油主力产

层多为夹层段(砂岩),而长7³亚段页岩含油性与 TOC 不匹配,烃类多赋存在粉砂岩和凝灰岩夹层中,具有明显的源-储分离特征(图3)。这是由于泥页岩生、排烃作用强,烃类经过孔-缝网络系统在粉-细砂岩夹层中富集,形成优质甜点。Wang^[33-34]等提出 TOC 最高的黑色富有机质页岩和孔隙度最高的砂岩互层组合是长7段页岩油最理想的勘探目标;潘松圻等^[35]提出容烃层、供烃层和滞烃层3类地层单元构成长7段源内的“页岩油系统”。高孔隙度层段具有较高的含油性,因此这里高含油性的代表参数是孔隙度,而非通常认为的高 TOC 是评价源-储分离型页岩油甜点的关键参数。

四川盆地寒武系筇竹寺组⑦小层为典型的源-储分离型页岩气甜点(图4)。筇竹寺组页岩自下而上由富硅、富磷以及富碳页岩过渡为砂泥质互层或砂质-泥质-灰质互层或灰泥质页岩沉积^[37-38]。该层系共沉积4套富有机质页岩,有机质类型主要为I型, R_o 为2.2%~5.0%,拉张槽内 R_o 平均值可达3.5%,大多数处于过成熟阶段晚期,富有机质页岩生烃进入泥质粉砂岩以及粉砂岩夹层中并聚集,形成源-储分离型烃类富集模式^[39]。⑦小层主要为泥质粉砂岩,夹杂在上、下2套富有机质页岩中,具有较高的孔隙度。该小层孔隙度与含气量正相关,而 TOC 与含气量没有相关性。例如,获得高产稳产工业气流的JS103井主力产层岩性即为泥质粉砂岩,孔隙度为3.95%,远大于附近小层,而平均 TOC 仅仅小于1.0%(图4)。因此,高孔隙度才是源-储分离型页岩气甜点评价优选的关键参数。

2.2.2 源-储共生型甜点

渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组四段为典型的源-储共生型页岩油甜点(图5)。沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)发育一套半咸水-咸水的半深湖-深湖相细粒沉积,发育多种岩相类型^[40-41],其中纹层状岩相和灰岩相储集性好,为良好的储集层;富有机质泥岩相有机质含量高,富有机质黏土生烃纹层大量生烃,短距离运移至具有大孔优势、孔缝发育的富碳酸盐岩储集纹层中,具有“泥生灰储”互层的源-储共生特征^[42]。该页岩油层段含油性既受控于有机质含量又受控于孔隙度,主要储集空间类型为重结晶晶间孔、溶蚀孔及黏土矿物晶间缝,其中纹层状页岩平均孔隙度可达8.72%。

四川盆地红星地区二叠系吴家坪组为典型的源-储共生型页岩气甜点(图6)。吴家坪组二段(吴二段)为目前勘探的有利层系,主要发育硅质页岩相、灰岩相、硅质灰质页岩相和灰质硅质页岩相等, TOC 由①—③—④—⑤—②小层依次降低,而平均孔隙度由③—

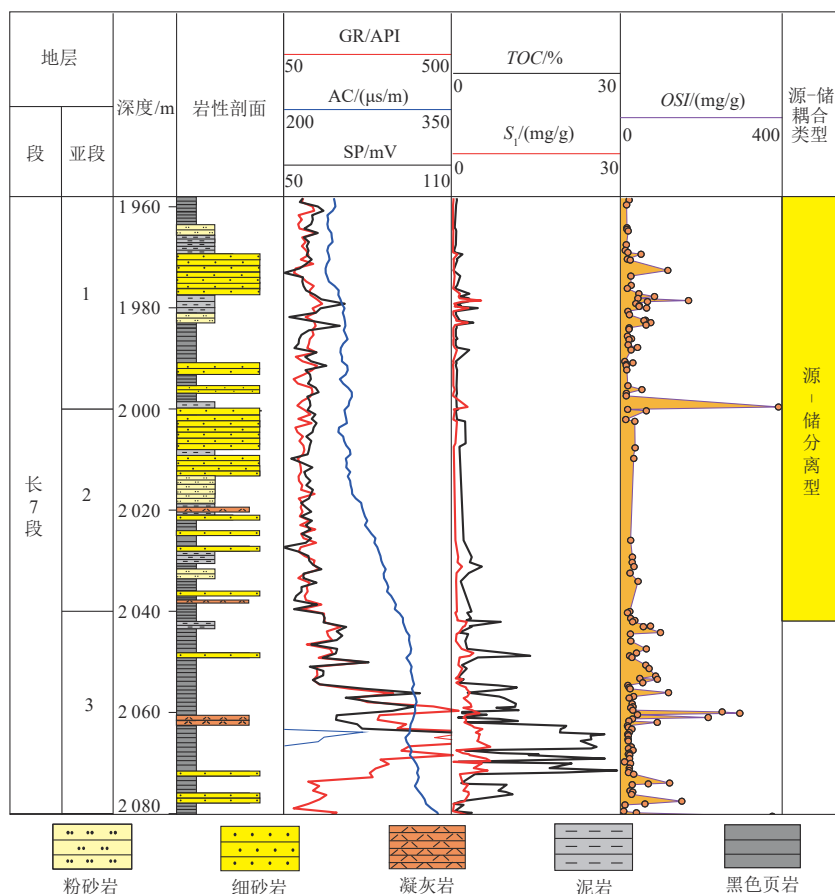


图3 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩甜点类型(据文献[36]修改)

Fig. 3 Types of shale oil sweet spots in the 7th member of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin (modified after reference [36])

④—①—⑤—②小层依次降低,含气性由③—①—④—⑤—②小层依次降低^[43-44]。由此可知,单一孔隙度或单一TOC并不能控制含气性,只有兼具较高TOC与较高孔隙度才能控制较高的含气性,表明不同小层、不同岩相发生了多源供烃,向临近的优势储层中发生了运移^[44]。较好的源-储配置关系控制了页岩气的富集。因此,评价时需要综合考虑孔隙度和TOC才能优选出甜点段。

2.2.3 源-储一体型甜点

松辽盆地白垩系青山口组一段(青一段)为典型的源-储一体型页岩油甜点(图7)。青一段主要发育薄片状页岩、块状泥岩、纹层状页岩以及层状页岩。该层段页岩以黏土质和长英质为主,具备典型的源-储一体特征,页岩段既是优质烃源岩也是优质储层,整体含油^[45-46]。薄片状页岩的TOC高,通常大于2.0%,储集空间以黏土矿物晶间孔为主,平均孔隙度高达6.4%,有机质热解生成的液态烃可以直接储集在相邻的无机矿物孔隙中。薄片状页岩的热解参数 S_1 (游离烃含量)与TOC和孔隙度也表现出较好的匹配关系。有学者

提出古页岩油平1井中,高TOC页岩最有利于页岩油富集,总体表现为高TOC、高孔隙度和高含油性(含油饱和度和OSI、 S_1 和游离烃含油率)^[47]。综上分析,该层段TOC和孔隙度具有高度一致性,评价页岩油甜点段时,既可以选择TOC也可以选择孔隙度作为关键参数。

四川盆地五峰组-龙马溪组为典型的源-储一体型页岩气甜点。五峰组-龙马溪组页岩主要发育富有机质硅质页岩、高有机质含灰质硅质黏土质页岩、中-高有机质硅质黏土质页岩以及中-高有机质含灰质黏土质页岩多种等岩相类型^[22-25, 48]。页岩有机孔隙主要发育于干酪根和原位滞留油的热裂解产物——焦沥青中。有机孔隙的数量直接受控于TOC和热演化程度^[25]。在高演化阶段,TOC不仅反映了生烃母质数量,也反映热解沥青数量,在热演化程度接近的条件下,热解沥青越多,有机孔隙也就越多^[49-51]。涪陵地区志留系下部气层累计产气量与孔隙度和TOC均具有明显的正相关关系(图8)。因此,高TOC代表良好生烃条件的同时,也指示了良好的有效储集空间,因为有机质也是有机孔隙形成的宿主与载体^[25, 52-53]。正是由于这种特殊的源-储耦合成因模式,使得TOC直接影响总

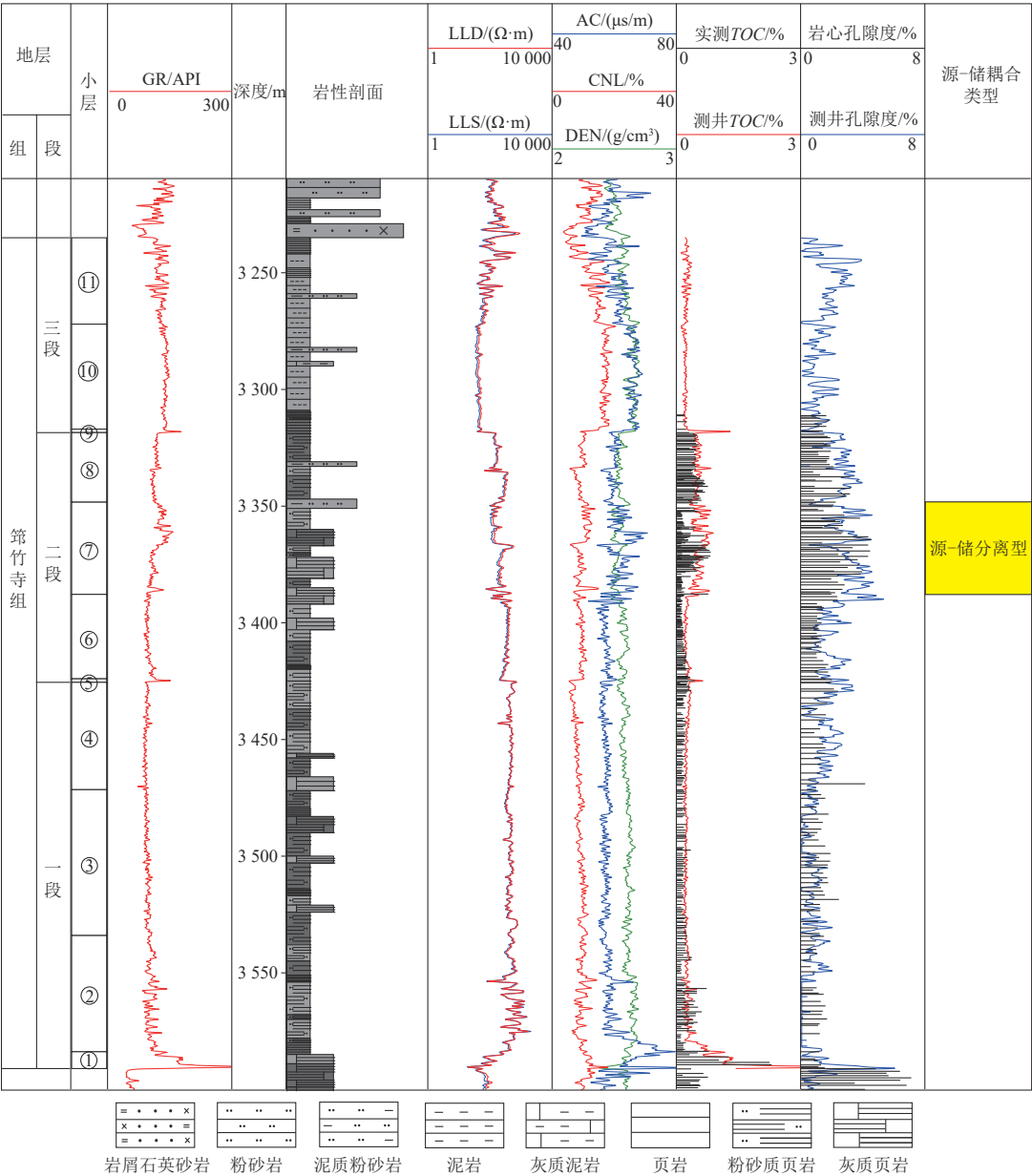


图4 四川盆地寒武系筇竹寺组典型钻井地层综合柱状图

Fig. 4 Stratigraphic column of the Cambrian Qiongzhusi Formation in a typical well in the Sichuan Basin

孔隙度大小,二者变化具有高度的一致性。五峰组-龙马溪组黑色页岩具有高 TOC 、高孔隙度和高含气量,表现为源-储一体、整体含气的特征^[23-24, 54]。因此,选择 TOC 或孔隙度均可进行甜点段优选。

3 评价方法的优势

页岩油气属于非常规油气资源,勘探开发成本高,提高勘探成功率和开发效率对增储上产具有重要意义。然而,相较于海相页岩,陆相页岩和海-陆过渡相页岩厚度较大,纵向上非均质性极强,识别页岩油气甜点段难度较大,提高识别准确率是提高勘探成功率与

开发效率的关键与基础。

前期研究认为,只要烃源条件良好就能够在原位形成烃类富集,因此前人更关注富有机质页岩层的烃源发育条件,并将 TOC 作为不可或缺的甜点评价参数。然而,页岩层系中有有机质富集层段虽可大量生烃,但因微运移导致的原位滞留量与源-储单元中油气较为富集的层段并不完全一致,烃类更易富集在孔隙度较高的富有机质页岩内部或与之紧邻的优质储集体发育段,从而构成一个完整的源-储单元^[26, 55-56]。尽管源-储单元内总体含油、含气,但良好的储集层段才是油气最为富集的甜点段。此外,工程甜点评价更加关注脆性矿物含量、泊松比、杨氏模量、纹层和裂缝发育

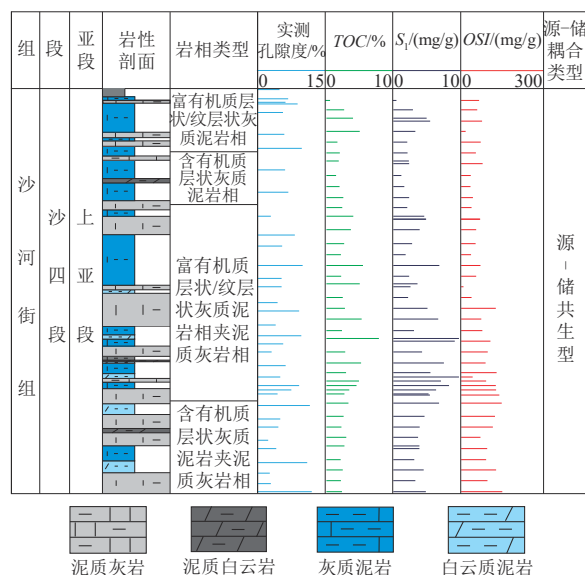


图5 渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组四段页岩油典型源-储共生型页岩油发育特征(据文献[41]修改)

Fig. 5 Characteristics of shale oil within typical paragenetic source rock-reservoir units in the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin (modified after reference [41])

特征等相关参数^[1, 2, 7, 57],而这些参数也多是针对储层属性进行评价,从地质-工程一体化的角度来看,有效的储集条件应是页岩油气甜点段评价的关键指标,是确定水平井靶窗的重要依据。因此,源-储单元内是否发育良好储集层,是甜点段评价优选研究的核心内容,储集条件的优劣在参数评价体系中应得到更多的重视,为此,本文提出了基于源-储单元的页岩油气甜点段评价优选新思路。

基于此方法,对中国典型页岩油气类型进行解剖和甜点评价优选(表1)。源-储分离型页岩油气甜点的孔隙度和含油/气性正相关,孔隙度是甜点段优选的关键参数,如鄂尔多斯盆地长7段页岩油,根据高孔隙度优选出的长7¹⁺²亚段作为甜点段,含油气性较好,产量较高^[30];源-储一体型页岩油气甜点的TOC与含油/气性正相关,无论是TOC还是孔隙度均可作为甜点段优选的关键参数,如四川盆地五峰组-龙马溪组页岩的①—③小层均为高有机质和高孔隙度层段,为甜点段,气测显示较好^[25];源-储共生型页岩油气甜点的含油/气性受有机质和孔隙度共同控制,如渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组页岩的甜点段既具有相对高的孔隙度,又具有相对高的TOC,因此需要综合考虑TOC和孔隙度才能优选出甜点段^[41, 55]。

该方法将页岩油和页岩气纳入同一套成烃、成储、成藏的动态演化体系中进行评价,弥补了现有页岩油甜

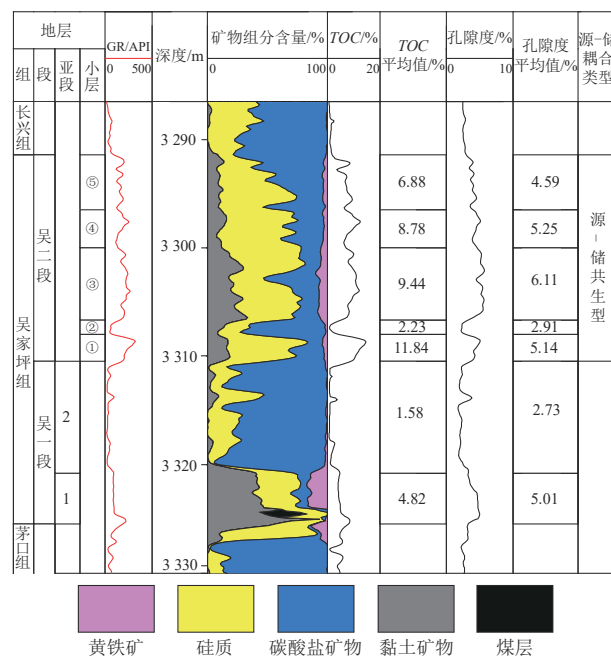


图6 四川盆地红星地区二叠系吴家坪组典型源-储共生型页岩气发育特征

Fig. 6 Characteristics of shale gas within typical paragenetic source rock-reservoir units in the Permian Wujiaping Formation, Hongxing area, Sichuan Basin

点和页岩气甜点评价不统一、高有机质丰度的源岩层与高孔隙度的储集层并不完全对应、地质甜点和工程甜点时常产生矛盾等问题,地质意义明确、操作简单、可行性高,与生产特征更加匹配,能够用于指导中国页岩油气甜点段的评价优选。此外,该方法的核心观点是在进行页岩油气甜点评价时应更多关注储集条件,比如页岩油气地质甜点评价的根本是高孔隙度,而不是高有机质丰度;而工程甜点评价岩石可压性和地应力各向异性等均更加关注储层品质。因此,页岩油气甜点优选高度依赖储层属性,而不是烃源岩属性。本文提出的基于源-储单元的页岩油气甜点段评价优选新思路,从地质-工程一体化的角度对页岩油气甜点段评价和优选思路进行了统一,更好地指导了水平井靶窗优选。

4 展望及建议

本文从页岩油气富集统一性的角度,将页岩油气甜点类型划分为源-储分离型、源-储共生型和源-储一体型,并基于不同类型分析了在甜点评价时应重点关注的参数类型,解释了典型地区页岩油气甜点评价和产油气状况的匹配关系。然而,基于源-储单元的页岩油气地质甜点段评价方法尚存在一定的制约因素,有待进一步完善。

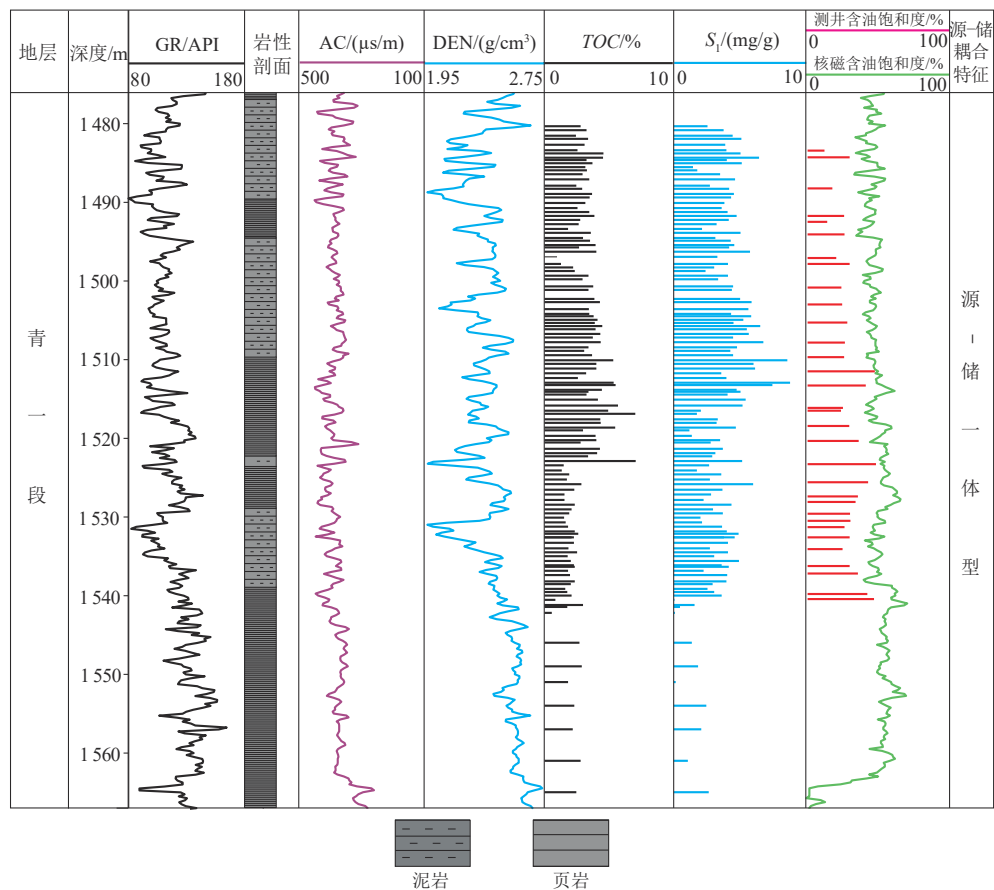


图7 松辽盆地南部青山口组一段典型源-储一体型页岩油发育特征(据文献[45]修改)

Fig. 7 Characteristics of shale oil within typical integrated source rock-reservoir units in the 1st member of the Qingshankou Formation, southern Songliao Basin (modified after reference[45])

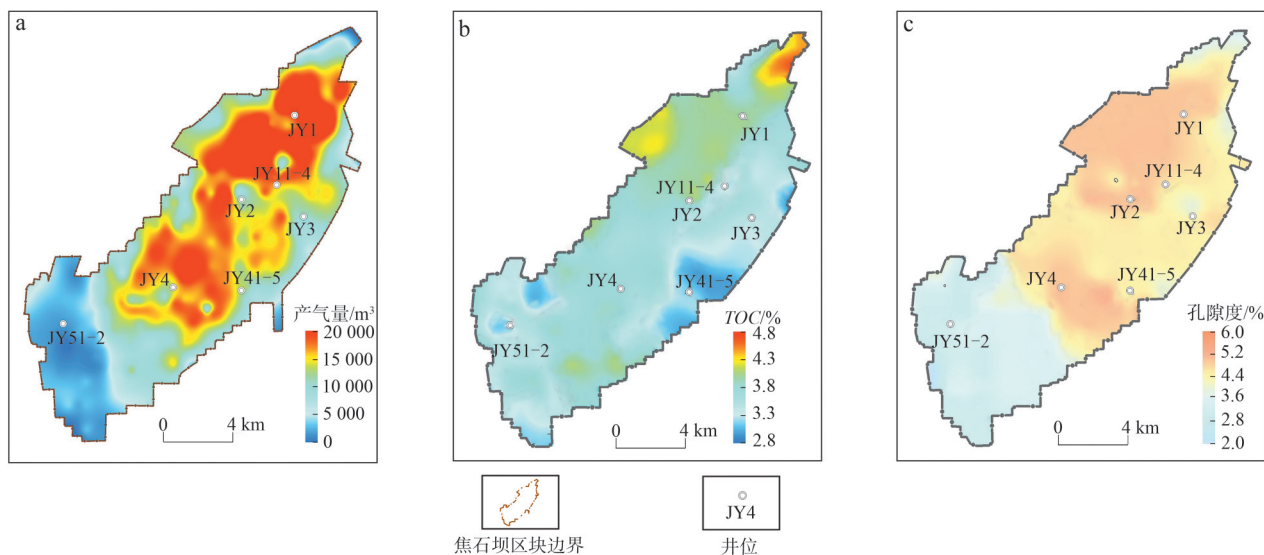


图8 四川盆地涪陵气田焦石坝区块下部气层累计产气量(a)、TOC(b)和孔隙度(c)平面分布特征

Fig. 8 Contour maps showing the cumulative gas production (a), TOC content (b), and porosity (c) of the lower gas layers in the Jiaoshiiba Block, Fuling shale gas field, Sichuan Basin

4.1 关注不同尺度页岩的源-储耦合配置

在实际进行源-储单元分类时,需要关注不同尺

度页岩的源-储耦合配置。中国海相、陆相以及海-陆过渡相页岩分布广泛,地质条件复杂且纵、横向差异很大,构造保存条件不同^[58-60],该方法尚未涵盖构造保存

表1 不同源-储单元的页岩油气甜点段评价特征

Table 1 Sweet-spot interval evaluation for different types of source rock-reservoir units

甜点类型	典型案例	甜点评价参数	甜点段	高产/高含油气层
源-储分离型	鄂尔多斯盆地长7段	孔隙度	长7 ¹⁺² 亚段	长7 ¹⁺² 亚段
	四川盆地筇竹寺组	孔隙度	⑦小层	⑦小层
源-储共生型	济阳坳陷沙四段	孔隙度和TOC	沙四下亚段	沙四下亚段
	红星地区吴家坪组	孔隙度和TOC	①和③小层	①和③小层
源-储一体型	四川盆地五峰组-龙马溪组	TOC或孔隙度	①—③小层	①—③小层
	松辽盆地青一段	TOC或孔隙度	青一段下部	青一段下部

等方面的评价。例如,复杂构造区源-储一体型五峰组-龙马溪组页岩气,高TOC而相对低含气性的钻井比比皆是,深层页岩有机质的石墨化对储集空间及TOC和孔隙度统一性的影响等有待进一步揭示。

4.2 加强孔隙-裂缝-纹层一体化储集条件评价

为便于定量表征,本文虽然优选孔隙度这一参数作为“储”的宏观性质表征,但实际上页岩层系中除孔隙外,还广泛发育宏、微观裂缝和纹层等^[61],对储层品质具有较大影响,在现有技术条件下,对于“缝”的量化表征程度不足,制约了现有评价方法的准确性。例如,东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段泥页岩层系裂缝发育,其中层理缝在牛斜55井区最发育,生烃超压缝在牛页1井最发育,构造缝主要在洼陷南部边缘官斜27井最发育,不同类型的裂缝发育不仅有利于油气的储集和充注,对页岩油的渗流和产出同样具有重要的作用^[62]。由于中国在现有地质甜点段评价体系中,储集条件方面的评价参数所占权重不足,在标准的制订和修订工作中,建议增加孔隙-裂缝-纹层系统和孔隙连通性等参数的定性、定量刻画,同时在甜点评价中,赋予这些“储”集条件相关参数更高的权重,结合其他烃“源”参数,构建更加科学、合理的甜点评价体系,在客观评价思路指导下不断提高页岩油气甜点段优选的准确性。

4.3 强化储集条件精细刻画

由于页岩油气源-储耦合特征宏观上表现为TOC与孔隙度的配置关系,微观上体现在页岩中有机质和孔隙之间的配置关系,目前的甜点评价方法多从宏观角度出发,在今后的工作中,建议进一步针对页岩层系源-储单元内储集层段评价预测加强研究,深入研究孔-缝体系发育的有效储集空间,精细刻画储集体特征,建立储集性多参数预测的地质模型。细化不同源-储配置下的甜点评价体系,建立适合不同沉积环境和不同成熟阶段的油气产率动态演化模式。针对陆相页岩特征,加强优质储集层精确评价,建立岩相组合

体的储层品质评价模型。

4.4 发展地质-地球物理甜点评价技术

在页岩油气甜点评价技术方面,目前常用的评价预测技术方法有测井法^[63-64]、地震法^[65-67]、平面叠合法^[7]和机器学习法^[68-71]等。测井法能够在纵向上确定甜点段,地震法能够在横向上确定甜点分布,通过井-震结合来预测页岩油气甜点分布已成为目前较为普遍的甜点预测技术,利用机器学习法加强测井和地震预测的准确性是未来的发展趋势。海相页岩的地质条件较为简单,岩性和岩相平面展布较为稳定,评价相对容易;而对于陆相和海-陆过渡相页岩,地质条件更加复杂,纵、横向非均质性更强,准确预测难度更大,建议持续加强地质与地球物理的结合,强化利用地球物理手段预测优质储集空间,发展地球物理储层反演预测与精确预测技术,结合页岩油气甜点评价方法的新思路,实现对页岩油气甜点段的准确预测。

5 结论

1) 中国典型页岩油气甜点类型可划分为源-储分离型、源-储共生型和源-储一体型。基于此,提出基于源-储单元的页岩油气甜点段评价新思路,可将中国页岩油和页岩气纳入统一的甜点评价理论体系下,从地质-工程一体化角度对中国页岩油气甜点进行评价、优选。

2) 源-储分离型页岩油气的孔隙度和含油/气性正相关,孔隙度是甜点段优选的关键参数;源-储一体型页岩油气的TOC与含油/气性正相关,无论是TOC还是孔隙度均可作为甜点段优选的关键参数;源-储共生型页岩油气的含油/气性受TOC和孔隙度共同控制,综合考虑TOC和孔隙度才能优选甜点段。

3) 源-储单元内是否发育良好储集层段,是页岩油气甜点段评价、优选时应考虑的核心内容,储集条件的优劣在参数评价体系中应得到更多重视。建议在标

准的制订和修订工作中,增加孔隙-裂缝-纹层系统和孔隙连通性等参数的定性、定量刻画,同时加强地质与地球物理的结合,构建更加科学、合理的甜点评价体系,进一步提高甜点优选的准确性。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.
- [2] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [3] 周德华, 焦方正. 页岩气“甜点”评价与预测——以四川盆地建南地区侏罗系为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 109-114.
ZHOU Dehua, JIAO Fangzheng. Evaluation and prediction of shale gas sweet spots: A case study in Jurassic of Jiannan area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(2): 109-114.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [7] 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.
- [8] LAW B E. Basin-centered gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1891-1919.
- [9] 王红岩, 施振生, 周天琪, 等. 海相黑色页岩甜点类型、特征及页岩气勘探意义——以四川盆地南部五峰组—龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2023, 43(10): 1-13.
WANG Hongyan, SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, et al. Types and characteristics of sweet spots of marine black shale and significance for shale gas exploration: A case study of Wufeng-Longmaxi in southern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(10): 1-13.
- [10] CROMBEZ V, KUNZMANN M, FAIZ M, et al. Stratigraphic architecture of the 1420-1210 Ma Velkerri and Kyalla Formations (Beetaloo Sub-basin, Australia)[J]. AAPG Bulletin, 2023, 107(11): 1901-1932.
- [11] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [12] 梁兴, 王高成, 徐政语, 等. 中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术——以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 33-42.
LIANG Xing, WANG Gaocheng, XU Zhengyu, et al. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, South China: A case study from Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 33-42.
- [13] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 166-178.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178.
- [14] 何希鹏. 四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 59-71.
HE Xipeng. Sweet spot evaluation system and enrichment and high yield influential factors of shale gas in Nanchuan area of eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 59-71.
- [15] 李阳, 曹小朋, 赵清民, 等. 济阳拗陷陆相断陷盆地页岩油开发的几点思考[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(4): 1-7.
LI Yang, CAO Xiaopeng, ZHAO Qingmin, et al. Thoughts on shale oil development in continental fault basin in Jiyang Depression [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 1-7.
- [16] 赵文智, 卞从胜, 蒲秀刚, 等. 中国典型咸化湖盆页岩油富集与流动特征及在“甜点”评价中的意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 25-37.
ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, PU Xiugang, et al. Enrichment and flow characteristics of shale oil in typical salinized lake basins in China and its significance for “sweet spot” evaluation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 25-37.
- [17] CHANG Jiaqi, JIANG Zhenxue, JIN Zhehui, et al. Complementary laboratory experiments and molecular dynamics simulation method to investigate the mobility of shale oil: The

- Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 167: 106974.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] HAN Yuanjia, HORSFIELD B, MAHLSTEDT N, et al. Factors controlling source and reservoir characteristics in the Niobrara shale oil system, Denver Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(9): 2045–2072.
- [21] 程强, 翟常博. 深化页岩认识推动页岩革命 [N]. *中国石化报*, 2023–07–17(05).
- CHENG Qiang, ZHAI Changbo. Deepening the understanding of shale and promoting the shale revolution [N]. *China Petrochemical News*, 2023–07–17(05).
- [22] 胡宗全, 杜伟, 朱彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组–龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1024–1038.
- HU Zongquan, DU Wei, ZHU Tong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng–Longmaxi formations in the Sichuan Basin and on its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1024–1038.
- [23] WANG Guanping, JIN Zhijun, HU Zongquan, et al. Sedimentary evolution characteristics of fine-grained lithofacies under the high-resolution isochronous shelf system: Insights from the Wufeng–Longmaxi shales in the Sichuan Basin [J]. *Lithosphere*, 2021, 2021(S1): 6628867.
- [24] 王冠平, 朱彤, 王红亮, 等. 海相页岩综合层序地层划分及垂向分布特征——以川东南地区五峰组–龙马溪组为例 [J]. *沉积学报*, 2019, 37(2): 330–344.
- WANG Guanping, ZHU Tong, WANG Hongliang, et al. Integrated sequence stratigraphic division and vertical distribution characteristics of marine shale: A case study of the Wufeng Formation–Long-maxi Formation in southeastern Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(2): 330–344.
- [25] 郭旭升, 赵永强, 申宝剑, 等. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望 [J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 172–182.
- GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, SHEN Baojian, et al. Marine shale gas exploration theory in southern China: Review and prospects [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 172–182.
- [26] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题 [J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 821–835.
- JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 821–835.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势 [J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(4): 638–648.
- SONG Yan, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 638–648.
- [30] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选 [J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1702–1716.
- FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1702–1716.
- [31] 王香增. 鄂尔多斯盆地延长探区低渗致密油气成藏理论进展及勘探实践 [J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 143–155.
- WANG Xiangzeng. Low permeability tight oil and gas in Yanchang area, Ordos Basin: Advances in accumulation theory and exploration practice [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 143–155.
- [32] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7₃亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油主富集类型 [J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 12–23.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, LI Yongxin, et al. Organic matter transformation ratio, hydrocarbon expulsion efficiency and shale oil enrichment type in Chang 7₃ shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 12–23.
- [33] WANG Guanping, JIN Zhijun, LIU Guangxiang, et al. Pore system of the multiple lithofacies reservoirs in unconventional lacustrine shale oil formation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 273: 104270.
- [34] WANG Guanping, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Geological controls on the pore system of lacustrine unconventional shale reservoirs: The Triassic Chang 7 member in the Ordos Basin, China [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 111139.
- [35] 潘松圻, 郭秋雷, 邹才能, 等. 页岩型与粉砂岩型“页岩油系统”甜点段判识——以鄂尔多斯盆地长7段为例 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2023, 53(7): 1663–1678.
- PAN Songqi, GUO Qiulei, ZOU Caineng, et al. Identification of sweet spots in shale-type and siltstone-type “shale oil systems”: A

- case study of the Chang 7 Member in Ordos Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(7): 1663-1678.
- [36] 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.
- [37] 高波, 刘忠宝, 舒志国, 等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 284-294.
- GAO Bo, LIU Zhongbao, SHU Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 284-294.
- [38] 梁峰, 姜巍, 戴贻, 等. 四川盆地威远—资阳地区筇竹寺组页岩气富集规律及勘探开发潜力[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(5): 755-763.
- LIANG Feng, JIANG Wei, DAI Yun, et al. Enrichment law and resource potential of shale gas of Qiongzhusi Formation in Weiyan-Ziyang areas, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(5): 755-763.
- [39] 刘忠宝, 王鹏威, 聂海宽, 等. 中上扬子地区寒武系页岩气富集条件及有利区优选[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(9): 3694-3707.
- LIU Zhongbao, WANG Pengwei, NIE Haikuan, et al. Enrichment conditions and favorable prospecting targets of Cambrian shale gas in Middle-Upper Yangtze [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3694-3707.
- [40] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 225-235.
- SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 225-235.
- [41] 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.
- [42] 王鑫, 刘惠民, 张顺, 等. 济阳坳陷博兴洼陷页岩油微运移特征[J]. *地质论评*, 2023, 69(增刊1): 270-272.
- WANG Xin, LIU Huimin, ZHANG Shun, et al. Micro-migration characteristics of shale oil in Boxing Subsag of Jiyang Depression [J]. *Geological Review*, 2023, 69(S1): 270-272.
- [43] 郑爱维, 孟志勇, 李凯, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩储层纵向非均质性特征及其发育主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9): 1500-1514.
- ZHENG Aiwei, MENG Zhiyong, LI Kai, et al. Vertical heterogeneity characteristics and main controlling factors of the Permian Wujiaping Formation shale reservoir in Hongxing area, eastern Sichuan [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9): 1500-1514.
- [44] 包汉勇, 赵帅, 梁榜, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气富集高产主控因素与勘探启示[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 71-82.
- BAO Hanyong, ZHAO Shuai, LIANG Bang, et al. Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan and its exploration implications [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 71-82.
- [45] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 521-535.
- LIU Bo, SUN Jiahui, ZHANG Yongqing, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 521-535.
- [46] 张水昌, 张斌, 王晓梅, 等. 松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规——非常规油有序分布[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(5): 911-923.
- ZHANG Shuichang, ZHANG Bin, WANG Xiaomei, et al. Gulong shale oil enrichment mechanism and orderly distribution of conventional-unconventional oils in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(5): 911-923.
- [47] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 1-14.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 1-14.
- [48] 万成祥, 郭旭升, 申宝剑, 等. 深层页岩孔隙结构及游离气传输特征——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(6): 1204-1214.
- WAN Chengxiang, GUO Xusheng, SHEN Baojian, et al. Pore structure and free gas transport characteristics of deep shale: Taking Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin as an example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(6): 1204-1214.
- [49] HILL R J, ZHANG Etuan, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 501-521.
- [50] MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, DROBNIK A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(10): 1621-1643.
- [51] 唐令, 宋岩, 陈晓智, 等. 页岩气选区评价关键参数及上下限——以四川盆地五峰组—龙马溪组为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(1): 153-168.
- TANG Ling, SONG Yan, CHEN Xiaozhi, et al. Key parameters and the upper-lower limits of shale gas selection evaluation: Case study from the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(1): 153-168.
- [52] LIU Kun, LU Jing, HU Song, et al. Non-resistivity-based saturation evaluation methods in shale gas reservoirs [J]. *Energy*

- Geoscience, 2023, 4(2): 100078.
- [53] CHANG Jiaqi, FAN Xiaodong, JIANG Zhenxue, et al. Differential impact of clay minerals and organic matter on pore structure and its fractal characteristics of marine and continental shales in China[J]. Applied Clay Science, 2022, 216: 106334.
- [54] HU Zongquan, LIU Zengqin, DU Wei, et al. Key geological factors governing sweet spots in the Wufeng-Longmaxi shales of the Sichuan Basin, China[J]. Energy Geoscience, 2024, 5(3): 100268.
- [55] 胡涛, 姜福杰, 庞雄奇, 等. 页岩油微运移识别、评价及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 114-126.
- HU Tao, JIANG Fujie, PANG Xiongqi, et al. Identification and evaluation of shale oil micro-migration and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 114-126.
- [56] 刘惠民, 李政, 包友书, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1405-1417.
- LIU Huimin, LI Zheng, BAO Youshu, et al. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1405-1417.
- [57] 王濡岳, 胡宗全, 赖富强, 等. 川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 366-378.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LAI Fuqiang, et al. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 366-378.
- [58] 冯动军. 川东南二叠系龙潭组海-陆过渡相页岩气甜点评价及意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 778-788.
- FENG Dongjun. Sweet spot assessment and its significance for the marine-continental transitional shale gas of Permian Longtan Fm. in southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 778-788.
- [59] 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.
- [60] FENG Weiming, LI Rong, ZHAO Zhan, et al. Geological characterization and exploration potential of shale gas in the Carboniferous Jiusi Formation, northern Guizhou and Yunnan provinces, SW China[J]. Energy Geoscience, 2023, 4(3): 100177.
- [61] 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.
- [62] 张顺, 刘惠民, 张鹏飞, 等. 东营凹陷中低成熟度富碳酸盐页岩地质特征——以牛庄洼陷沙四段上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1138-1151.
- ZHANG Shun, LIU Huimin, ZHANG Pengfei, et al. Geological characteristics of shale oil enrichment in Niuzhuang sag, Dongying depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1138-1151.
- [63] 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.
- [64] LI Jinbu, WANG Min, LU Shuangfang, et al. A new method for predicting sweet spots of shale oil using conventional well logs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104097.
- [65] CHEN Sheng, WANG Xiujiao, LI Xinyu, 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.
- [66] JAISWAL P, VARACCHI B, EBRAHIMI P, et al. Can seismic velocities predict sweet spots in the Woodford Shale? A case study from McNeff 2-28 Well, Grady County, Oklahoma[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 104: 26-34.
- [67] LIU Jiong, HE Zhiliang, LIU Xiwu, et al. Using frequency-dependent AVO inversion to predict the “sweet spots” of shale gas reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 283-291.
- [68] 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.
- [69] WU Yuqi, JIANG Fujie, HU Tao, et al. Shale oil content evaluation and sweet spot prediction based on convolutional neural network[J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 167: 106997.
- [70] 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.
- [71] 刘喜武, 王心宇, 刘宇巍, 等. 中国陆相页岩油地震勘探技术现状及发展方向[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2270-2285.
- LIU Xiwu, WANG Xinyu, LIU Yuwei, et al. Current status and development direction of seismic prospecting technology for continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2270-2285.

(编辑 张玉银)