

引用: 刘羽汐, 白斌, 曹健志, 等. 海陆相页岩型页岩油地质特征的差异与甜点评价: 以北美二叠盆地 Wolfcamp D 页岩油与松辽盆地古龙页岩油为例 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 55-65.
Liu Yuxi, Bai Bin, Cao Jianzhi, et al. Differences in geological characteristics and sweet spots evaluation of marine and continental shale oil: a comparative case study between Wolfcamp D shale oil in Permian Basin in north America and Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 55-65.

海陆相页岩型页岩油地质特征的差异与甜点评价 ——以北美二叠盆地 Wolfcamp D 页岩油与松辽盆地古龙页岩油为例

刘羽汐¹ 白斌¹ 曹健志² 王瑞³ 朱如凯¹ 孟思炜¹ 侯秀林¹

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中化石油勘探开发有限公司; 3 中国石油大庆油田公司勘探开发研究院)

摘要: 全球页岩油技术可采资源量为 $2512 \times 10^8 \text{t}$, 2021 年页岩层系原油累计产量达 $3.9 \times 10^8 \text{t}$, 已成为全球油气勘探开发的重要领域之一。根据地质条件和沉积特征, 中国陆相页岩层系储层“甜点”分为夹层型、混积型与页岩型 3 类, 其中夹层型、混积型已是国内外页岩油勘探开发主体。近期, 页岩型页岩油也实现了勘探突破, 但急需深化甜点评价, 为实现效益开发提供依据。因此, 文章尝试以北美二叠盆地海相石炭系 Wolfcamp D 段和松辽盆地古龙陆相白垩系青山口组两套页岩型页岩油地质特征对比为基础, 探讨页岩型页岩油甜点评价关键指标, 为中国陆相页岩型页岩油勘探开发提供借鉴。对比认为两套页岩岩性均以高黏土矿物、高石英的长英质页岩和黏土质页岩为主, 具有地层超压、油质偏轻且脆性矿物含量较高的相近地质特征; 但古龙页岩储集空间为与大量黏土矿物相关的有机质孔—页理缝复合的双重空间, 连通性较 Wolfcamp D 段页岩好, 有机碳丰度则略低于 Wolfcamp D 段页岩。Wolfcamp D 页岩油地质甜点为有机碳丰度较高的黏土质泥页岩和硅质泥页岩, 结合页岩压裂效果, 工程甜点确定为富含生物硅的富有机质硅质泥页岩。同样, 中国古龙陆相页岩油将滞留烃作为地质甜点评价依据, 提出富有机质的黏土质页岩和长英质页岩均为地质甜点, 而工程甜点则应聚焦富含硅质的长英质页岩。

关键词: 北美; 二叠盆地; Wolfcamp D; 古龙; 页岩型页岩油; 甜点特征; 靶体优选

中图分类号: TE112.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.006

Differences in geological characteristics and sweet spots evaluation of marine and continental shale oil: a comparative case study between Wolfcamp D shale oil in Permian Basin in north America and Gulong shale oil in Songliao Basin

Liu Yuxi¹, Bai Bin¹, Cao Jianzhi², Wang Rui³, Zhu Rukai¹, Meng Siwei¹, Hou Xiulin¹

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 Sinochem Petroleum Exploration & Production Co., Ltd.; 3 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Daqing Oilfield Company)

Abstract: The global technical recoverable shale oil resources are $2512 \times 10^8 \text{t}$, and the cumulative crude oil output from shale series has reached up to $3.9 \times 10^8 \text{t}$ in 2021, which has grown to be one of the major fields for global petroleum exploration and development. Based on

基金项目: 国家自然科学基金“鄂尔多斯长 7 富有机质(泥)页岩生烃演化过程中源储非均质特征及其对滞留烃的控制作用”(42072186); 黑龙江省揭榜挂帅项目“古龙页岩油相态、渗流机理及地质工程一体化增产改造研究”, “古龙页岩储层成岩动态演化过程与孔缝耦合关系研究”; 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术项目“致密油有效储层成因机制及定量表征技术”(2021-DJ2203)。

第一作者简介: 刘羽汐(1998—), 女, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事非常规油气地质、页岩储层表征与评价等方面研究工作。地址: 北京市海淀区中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: liuyuxi_125@petrochina.com.cn

通信作者简介: 白斌(1981—), 男, 陕西武功人, 博士, 2008 年毕业于西北大学, 高级工程师, 主要从事致密油/页岩油形成条件与甜点评价研究工作。地址: 北京市海淀区中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: baibin81@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-04-25; 修改日期: 2023-06-26

the geological conditions and sedimentary characteristics, the “sweet spot” reservoir of continental shale oil in China is classified into three categories, i.e., interlayer type, mixed type and shale type, among which the interlayer type and mixed type shale oil are the main targets for global shale oil exploration and development. Recently, breakthrough has been achieved in the exploration of shale type shale oil. However, the sweet spot evaluation urgently needs to be deepened to provide a basis for achieving benefit shale oil development. Therefore, the geological characteristics between the Carboniferous Wolfcamp D marine shale oil in Permian Basin in north America and the Cretaceous Qingshankou Formation Gulong continental shale oil in China are compared, and the key indicators for sweet spot evaluation of shale type shale oil are discussed, so as to provide reference for the exploration and development of continental shale type shale oil in China. The comparative study indicates that the two sets of shales are dominated by felsic shale and clayey shale with high clay minerals and quartz contents, and show similar geological characteristics of formation overpressure, relatively light oil quality and high brittle mineral content; The reservoir space of Gulong shale oil is dominated by composite organic matter pores and bedding joints related to a large number of clay minerals, showing better connectivity than Wolfcamp D shale oil but slightly poorer organic carbon abundance. The geological sweet spot of Wolfcamp D shale includes organic-rich clayey shale and siliceous shale, while the engineering sweet spot is the organic-rich siliceous shale based on the fracturing results. Similarly, the geological sweet spot of Gulong continental shale oil includes organic-rich clayey shale and felsic shale by using evaluation indicator of retained hydrocarbon, and the engineering sweet spot is the silicic felsic shale.

Key words: north America, Permian Basin, Wolfcamp D, Gulong, shale type shale oil, sweet spot characteristics, target optimal selection

0 引言

全球非常规页岩油资源丰富,技术可采资源量约为 $2512 \times 10^8 \text{t}$ ^[1]。其中,美国页岩层系原油产量为 $3.62 \times 10^8 \text{t}$,已占其原油总产量的 51%^[2]。2022 年,中国页岩层系原油产量也已超 $300 \times 10^4 \text{t}$,未来勘探开发潜力值得期待。目前全球投入大规模开发生产的页岩层系原油主要来自赋存于页岩层系内的碳酸盐岩、粉/细砂岩、混积岩等石油资源^[3-9],如北美四大页岩层系产区的二叠(Permian)盆地石炭系一二叠系 Wolfcamp 组页岩油和墨西哥湾盆地的上白垩统 Eagle Ford 组页岩油产层主要为钙质页岩夹砂岩,Williston 盆地上泥盆统一石炭统 Bakken 组页岩油与 Denver 盆地上白垩统 Niobrara 组页岩油产层均为生物碎屑灰岩夹钙质粉砂岩。根据地质条件和沉积特征,中国陆相页岩层系储层“甜点”分为夹层型、混积型与页岩型 3 类。其中,页岩型为具有生油能力的纯页岩中原位滞留的页岩油资源,“甜点”层段具有一定的有效孔隙空间和渗流能力,既是生油层也是含油层^[10],是未来页岩油勘探开发的重要领域。

目前,北美二叠盆地 Midland 次盆石炭系 Wolfcamp D 段位于主力产层 Wolfcamp 组底部,呈现海相页岩型页岩油地质特征,可采储量为 $(300 \sim 350) \times 10^8 \text{bbl}$ 油当量^[11]。自 2008 年,Laredo Petroleum(拉雷多石油公司)、Firewheel、Apache Corporation(阿帕奇公司)和 Pioneer Natural Resources(先锋自然资源公司)等石油公司相继开展油气勘探开发,单井初期日产峰值达 47~500t,5 口井的单段 EUR 达 1350t,初步实现了勘探突破^[12-14]。

2020 年,中国松辽盆地古龙凹陷 GYYP1 井在白垩系青山口组纯页岩获日产油 30.5t、日产气 13032m^3 的高产工业油气流,已生产超 900 天,累计产油气达 $1.4 \times 10^4 \text{t}$ ^[15-16],实现了陆相页岩型页岩油重大勘探突破。但古龙页岩油仍面临有机质来源和成烃机理、储集空间类型和结构、矿物学演化特征、力学性质与增产改造机制、页岩油产状和相态、页岩油油品性质评价与提高采收率六大科学问题,以及地质甜点优选、工程优化设计、开发技术政策优化与提高采收率 3 项关键技术挑战^[17],特别是页岩极强的非均质性决定了页岩油甜点的复杂性^[18-19],成为影响规模勘探与效益开发的关键问题。

因此,本文以北美二叠盆地石炭系 Wolfcamp D 页岩油和松辽盆地古龙白垩系青山口组页岩油作为解剖对象,对比海相、陆相页岩油地质特征的差异,借鉴北美二叠盆地 Wolfcamp D 页岩油勘探开发实践经验,明确页岩型页岩油甜点与靶体优选依据,为中国陆相页岩型页岩油勘探开发提供依据。

1 地质概况

松辽盆地处于中国东北境内,其面积约为 $26 \times 10^4 \text{km}^2$,为典型陆相断陷—坳陷叠合盆地,具有先断后坳的双层结构。中央坳陷区包括齐家—古龙凹陷、大庆长垣凹陷和三肇凹陷等二级构造单元(图 1),在白垩纪两期最大湖泛时期分别沉积了青山口组和嫩江组,广泛发育厚层暗色泥页岩,是页岩油勘探的重点层系^[20-22]。页岩油主要分布在松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段(青一段)和二段(青二段)下部的富有机质页岩层系内,在中央坳陷区沉积厚度为 90~270m,分布面积约为 $3 \times 10^4 \text{km}^2$ 。

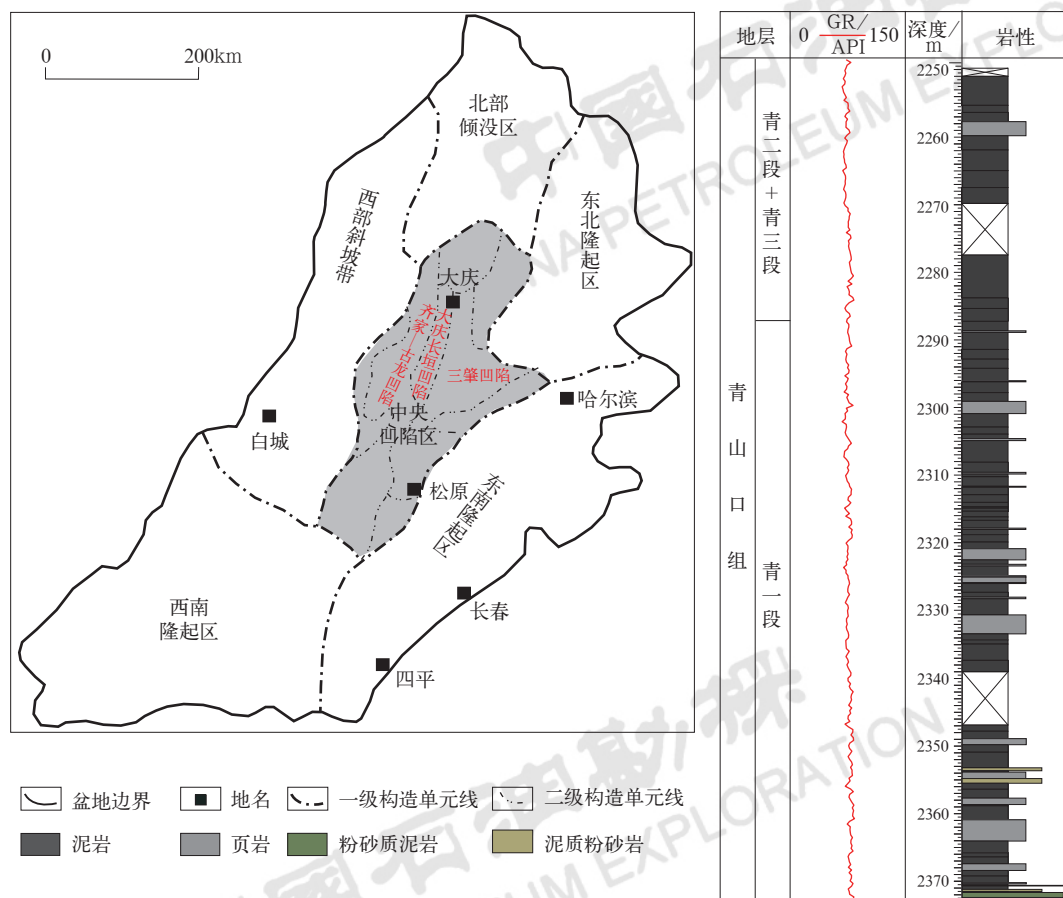


图1 松辽盆地构造单元划分图(左)及岩性柱状图(右)(据文献[17—18]修改)

Fig.1 Division of structural units in Songliao Basin (left) and lithologic column (right)
(modified after references [17—18])

二叠盆地位于美国西南部得克萨斯州和新墨西哥州,在构造上划分为 Delaware 次盆、Midland 次盆、中央台地隆起与 Val Verde 次盆(图2左)。石炭系—二叠系 Wolfcamp 组是主要的非常规油气勘探开发层系,主体分布在 Delaware 次盆和 Midland 次盆,厚度约为 600m。依据沉积旋回和岩石组成特征从上到下可分为4段,分别为 Wolfcamp A、Wolfcamp B、Wolfcamp C 和 Wolfcamp D。其中, Wolfcamp D 段页岩型页岩油层系发育于宾夕法尼亚纪晚期,根据沉积旋回进一步划分出上、中、下3段(图2右);主要分布在 Midland 次盆南部和东部,地层厚度为 500~600m,靠近盆地中心厚度约为 80m,呈现次盆边缘埋深浅、中心埋深大的单斜特征,埋深为 1900~2900m。

2 海陆相页岩型页岩油地质特征对比

松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组主要为陆相淡水半深湖—深湖环境下形成的高有机质页岩层系,北美二叠盆地石炭系 Wolfcamp D 段页岩则为海相前

陆盆地下形成的一套富有机质泥岩为主的硅质碎屑细粒沉积与少量碳酸盐岩夹层泥页岩沉积体。二者在矿物组成、岩性组合、油气地球化学参数等方面相似,而在孔隙类型、优势岩性脆性矿物成因等方面存在明显差异(表1)^[12,20,22~26]。

2.1 岩石学特征

从页岩矿物组成看,古龙页岩和 Wolfcamp D 段页岩均以高黏土矿物含量、高石英含量为基本特征,黏土矿物以伊利石为主,伊/蒙混层为辅,绿泥石含量低。其中,二叠盆地 Wolfcamp D 段海相页岩黏土矿物含量为 4%~61%,平均为 40%,石英含量为 3%~66%,平均为 34%^[12,24~27],松辽盆地古龙凹陷青山口组陆相页岩黏土矿物含量为 17.4%~58.9%,平均为 47%,石英含量为 19.2%~35.5%,平均为 30.4%。总体看,黏土矿物含量与石英含量之和均超 70%,方解石、白云石等碳酸盐矿物只在局部赋存。

从页岩岩石类型看,古龙页岩和 Wolfcamp D 段页岩主体均为长英质页岩和黏土质页岩(图3)。

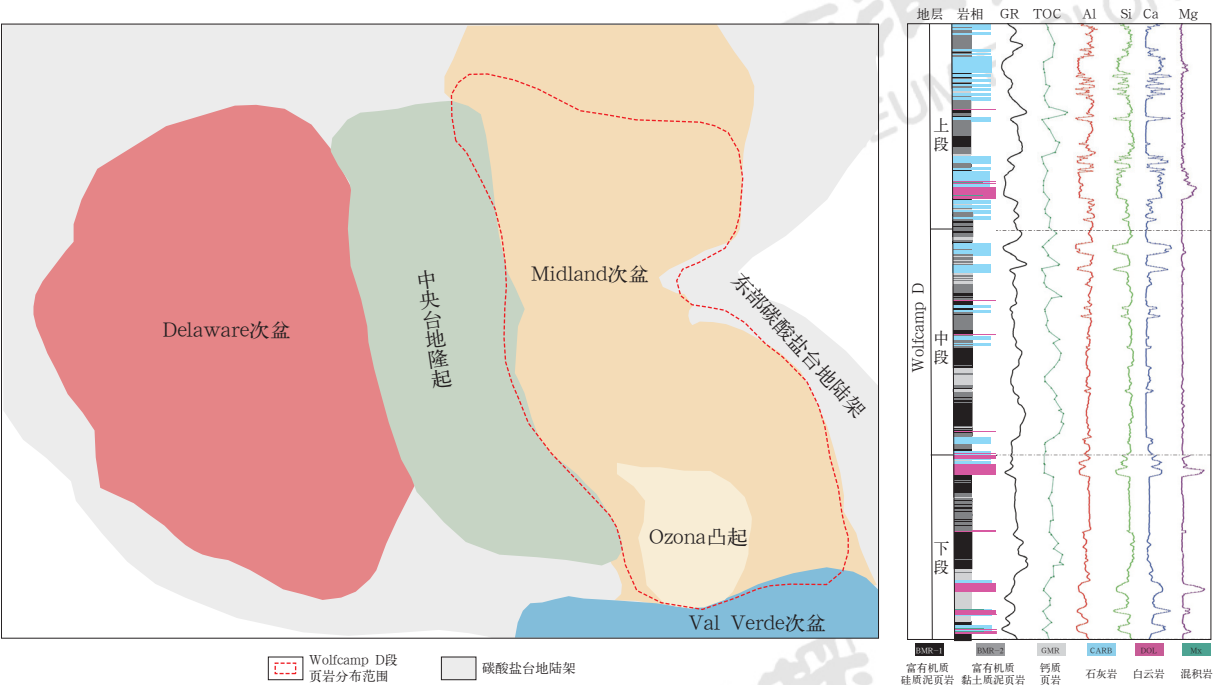
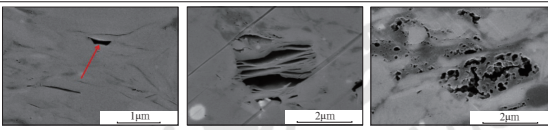
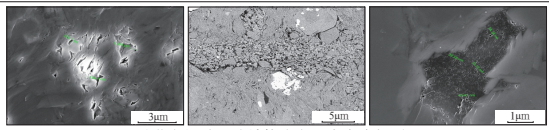
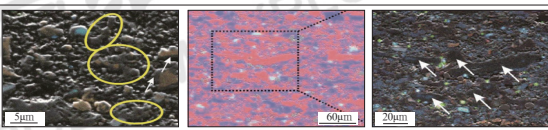
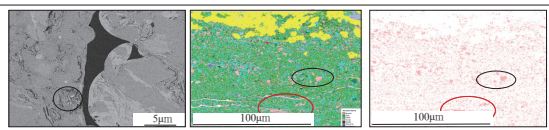


图 2 二叠盆地主要构造单元划分图 (左) 及 Wolfcamp D 段地层单元划分图 (右) (据文献[12,26] 修改)

Fig.2 Division of main structural units in Permian Basin (left) and stratigraphic units of Wolfcamp D member (right) (modified after references [12,26])

表 1 Wolfcamp D 页岩油和古龙页岩油源储特征对比表

Table 1 Comparison of source rock and reservoir characteristics between Wolfcamp D shale oil and Gulong shale oil

参数		Wolfcamp D页岩油	古龙页岩油
岩石学特征	矿物组成	黏土矿物 石英 长石 碳酸盐 黄铁矿	黏土矿物 石英 长石 碳酸盐 黄铁矿
	岩性组合	富有机质硅质泥页岩 富有机质黏土质泥页岩 钙质页岩 碳酸盐岩 白云岩 混积岩	黏土质页岩 长英质页岩 混合质页岩 白云岩
烃源岩特征	TOC/%	0.13~9.88	0.10~5.11
	R_o /%	0.9~1.5	0.75~1.67
	I_H /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	45~351	600~800
	S_V /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.13~5.66	0.04~7.13
	干酪根类型	I、II、III型	I、II型
储层特征	孔隙度/%	2~12	2~12
	孔隙类型	 发育粒间孔、晶间孔和有机质孔	 以黏土相关孔缝结构为主,发育有机质孔
	渗透率/mD	<0.005	0.00007~0.75
可压裂性	脆性矿物	 可见陆源碎屑石英、生物成因硅和少量黏土微晶硅质	 可见陆源碎屑石英和黏土矿物转化过程中释放的硅质
流动性	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.80~0.83	0.76~0.84
	地层压力	超压	超压

古龙页岩可分长英质页岩、黏土质页岩、混合质页岩，局部发育白云岩，其中黏土质页岩、长英质页岩与混合质页岩占比超 90%。古龙页岩非均质性强（图 3a—c），长英质页岩可见毫米级纹层，主要为浅棕色粉砂级—泥质粉砂黏土，存在少量分散有机质，发育脉状和软沉积变形，碎屑次棱角状、分选中等—好；黏土质页岩为灰黑色—黑色，页理发育，多发育纹层结构（<1mm），部分为块状结构，黏土矿物含量极高（平均可达 61%），可见胶磷矿和草莓状黄铁矿；混合质页岩以含介壳纹层状页岩为主，表现出纹层状页岩夹薄层介壳生物层和粉砂质碎屑特征，几乎无完整生物，多呈碎片状定向排列，黏土矿物含量有所下降（平均 48%），石英和长石平均含量有所增加。

同样，Wolfcamp D 段页岩存在富有机质硅质泥页岩（BMR-1）、富有机质黏土质泥页岩（BMR-2）、钙质页岩（GMR）、石灰岩（CARB）、白云岩（DOL）与混积岩（Mx）6 种岩性^[12,24-27]，富有机质硅质泥页岩和富有机质黏土质泥页岩分别约占地层整体厚度的 28.23% 和 32.5%，不同岩性沉积厚度、矿物成分、微观结构等地质特征存在差异（图 3d—l、表 2）：富有机质硅质泥页岩，石英含量高、黏土矿物含量低，多呈块状结构，发育少量纹层状结构，可见透镜状生物硅；富有机质黏土质泥页岩，石英含量较富有机质硅质泥页岩低、黏土矿物含量较高，仅存在少量化石碎片；钙质页岩方解石含量增大，基质中存在大量的化石碎片。

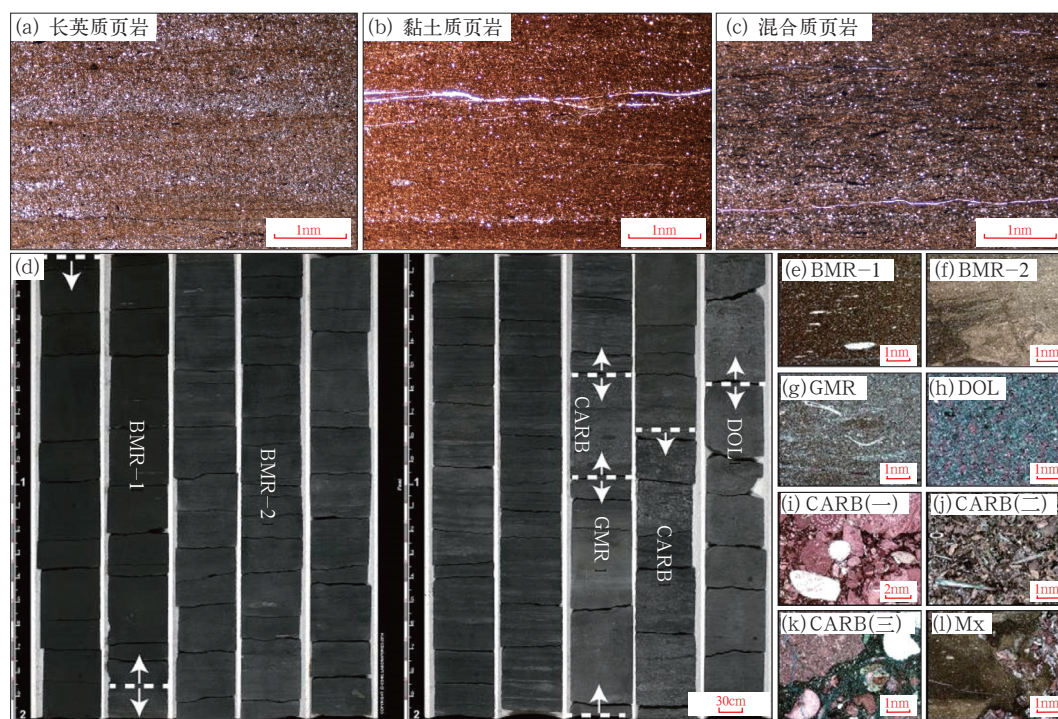


图 3 古龙页岩和 Wolfcamp D 段页岩不同岩性特征图

Fig.3 Characteristics of various lithologies of Gulong shale and Wolfcamp D shale

(a) 至 (c) 为古龙页岩主要岩性，单偏光镜下薄片；(d) Wolfcamp D 段页岩，手标本特征；(e) 至 (l) 为 Wolfcamp D 段页岩不同岩性，镜下薄片。(d) 至 (l) 据文献 [26] 修改

表 2 Wolfcamp D 段页岩不同岩性特征统计表^[12,24-27]

Table 2 Characteristics of various lithologies of Wolfcamp D shale^[12,24-27]

岩性	特征
富有机质硅质泥页岩 (BMR-1)	石英含量高 (33%~72%，平均为 53%)、黏土矿物含量低 (平均为 29%)，多呈块状结构，发育少量纹层状结构，可见生物硅
富有机质黏土质泥页岩 (BMR-2)	石英含量较富有机质硅质泥页岩低 (21%~64%，平均为 50%)、黏土矿物含量较富有机质硅质泥页岩增高 (平均为 35%)，泥质含量较高，存在少量的钙质化石碎片
钙质页岩 (GMR)	石英含量较富有机质硅质泥页岩和富有机质黏土质泥页岩更低 (平均为 43%)，黏土矿物含量平均为 30%，方解石含量明显增高 (平均为 21%) 且分布于基质中

续表

岩性	特征
石灰岩 (CARB)	分布在 Wolfcamp D 段页岩中上部, 以夹层形式出现, 厚度较小, 方解石多以胶结物和不同粒径化石碎片的形式富集, 根据矿物粒径划分为粒泥灰岩、泥粒灰岩、颗粒灰岩
白云岩 (DOL)	方解石 (平均为 20%) 和白云石 (平均为 31%) 含量均相对较高, 以块状粗晶白云岩为主, 偶尔可见化石碎片
混积岩 (Mx)	中等分选, 发育变形层理, 主要为滑塌沉积

2.2 地球化学特征

古龙页岩沉积时期, 湖相浮游藻类勃发, 有机质以层状藻类体为主, 干酪根类型为 I、II 型, 具有有机质丰度高、生油潜力大、优质烃源岩集中且厚度大的特征^[16]。有机质丰度最高的层段位于青一段下部的 Q1—Q4 段, TOC 为 0.10%~5.11%, S_1 为 0.04~7.13mg/g, R_o 为 0.75%~1.67%^[16], T_{max} 介于 374~499℃。

Wolfcamp D 段页岩的有机质类型主要为 I、II 型, 存在部分 III 型干酪根^[24]。TOC 为 0.13%~9.88%, R_o 介于 0.9%~1.5%, I_H 为 45~351mg/g; T_{max} 介于 392~474℃, S_1 为 0.13~5.66mg/g, 平均为 1.29mg/g^[24]。不同岩性的有机质富集程度存在差异^[12,28]: 富有机质硅质泥页岩有机碳含量高, 为 1.22%~9.88%, 平均为 5.07%; 富有机质黏土质泥页岩有机碳含量为 1.17%~8.42%, 平均为 4.97%; 石灰岩和白云岩有机碳含量较低, 平均分别为 0.75%和 0.77%; 钙质页岩有机碳含量变化范围较大, 多在 0.26%~8.32%, 平均为 1.53%~1.74%。

Wolfcamp D 段页岩硅质含量更高的富有机质硅质泥页岩比富有机质黏土质泥页岩具有更高的 TOC, 主要受沉积时的气候和水体环境影响, 存在“最小含氧带扩张, 强有机碳埋藏”的富有机碳页岩形成模式。晚宾夕法尼亚世中大陆海环流模式导致 Midland 次盆中部缺氧, 而陆缘温暖淡水覆盖了强环流带来的缺氧水, 形成了温跃层^[29]。季风性气候、上升流等附带大量营养物质使上覆温暖水层藻类大量繁殖, 初级生产力上升, 有机质的沉降量大幅增加。富有机质硅质泥页岩沉积期间盆地属于饥饿性状态, 沉积速率较低, 碎屑流注入量少, 因而有机碳稀释程度较小^[30]; 且温跃层的水界面促进了有机质保存^[31-32], 致使富有机质硅质泥页岩有机碳含量更高^[33]。

2.3 储集特征

古龙页岩和 Wolfcamp D 段页岩的总孔隙度相近, 普遍在 2%~12%, 渗透率均较低, 但储集空间类型存

在较大差异。其中, 古龙页岩孔隙度平均为 7.9%, 热演化成熟度高, R_o 最高可达 1.67%, 页理缝与有机质孔及相关黏土矿物孔喉发育, 呈现微米—纳米级孔喉与页理缝—微裂缝双重储集空间。整体来看, 黏土矿物相关的孔隙结构对储集空间贡献大, 有机质孔及与黏土矿物复合体形成的孔隙, 孔径小、数量多^[16-17]

(图 4)。其中, 长英质页岩发育微裂缝、溶蚀孔和粒内孔, 物性好; 黏土质页岩中以有机质孔和黏土矿物粒内孔、粒内溶孔为主, 有机质孔增多, 孔隙小, 呈海绵状或离散气泡状; 混合质页岩中几乎不发育微裂缝。

二叠盆地石炭系 Wolfcamp D 段页岩孔隙度平均为 6.5%^[20], 储集空间以有机质孔为主, SEM (扫描电镜) 下可见粒间孔、粒内孔和有机质孔^[28] (图 4) 3 种类型。有机质孔在镜下可根据形态、大小、分布特征进一步划分为和矿物伴生的有机质孔、复杂簇状孔、离散球形孔、离散海绵孔^[12]。其中, 富有机质页岩平均孔隙度较高, 富有机质硅质泥页岩孔隙度平均为 6.03%, 富有机质黏土质泥页岩孔隙度平均为 5.92%, 石灰岩和白云岩等碳酸盐岩孔隙度最低, 孔隙度平均为 2.74%。总有机碳含量越高, 有机质孔的占比越高^[12]。

3 海陆相页岩型页岩油可动性对比

3.1 流动性特征

古龙页岩油和 Wolfcamp D 页岩油同样处于地层高压且油质较轻。古龙页岩地层压力系数大于 1.2, 折算地层压力为 33.69MPa, 原油密度为 0.76~0.84g/cm³; 井下样品 PVT 分析, 地层原油饱和和压力为 13.31MPa, 地层原油黏度为 0.80mPa·s, 原始气油比为 76.46m³/m³, 总体具有低黏度、低密度、中—高气油比、偏高地层压力的特点^[34]。

Wolfcamp D 段页岩 R_o 介于 0.9%~1.5%, 处于晚期生油阶段^[23], 原油密度为 0.80~0.83g/cm³, 密度相对较小, 属于轻质油。此外, Wolfcamp D 页岩油原油黏度恢复实验结果也表明其轻质油的特征^[35]。二叠盆地纵向地层压力实测表明, Wolfcamp

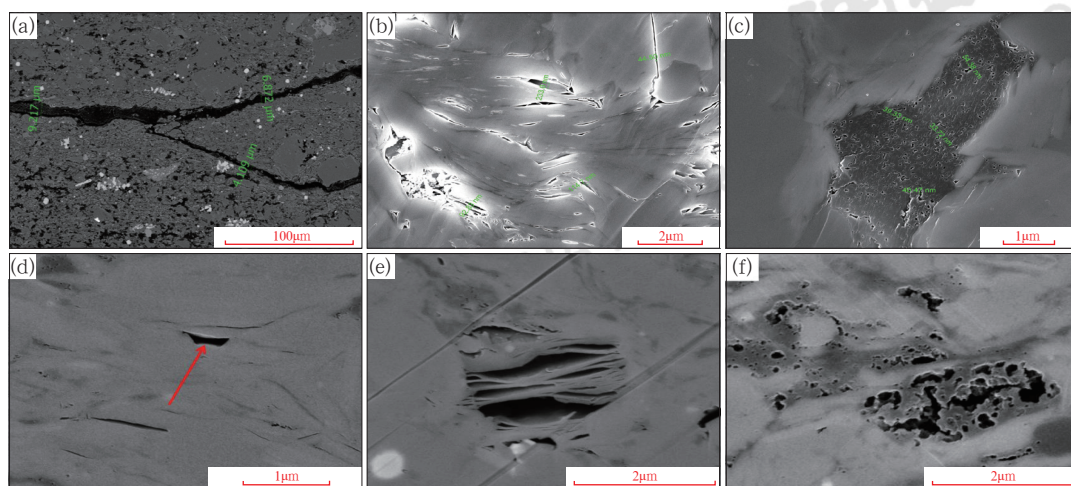


图4 古龙页岩和 Wolfcamp D 段页岩典型储集空间类型图

Fig.4 Types of typical reservoir spaces of Gulong shale and Wolfcamp D shale

(a) 古龙页岩, 微裂隙; (b) 古龙页岩, 黏土矿物粒内孔; (c) 古龙页岩, 有机质孔; (d) Wolfcamp D 段页岩, 粒间孔; (e) Wolfcamp D 段页岩, 粒内孔; (f) Wolfcamp D 段页岩, 有机质孔。(d) 至 (f) 据文献[12]修改

组处于异常高压带, 生产实践表明, 异常高压不仅对原油流动性有影响, 更是油气高产与稳产的重要控制因素^[36-39]。

3.2 可压裂性特征

石英是页岩可压裂性评价中重要的脆性矿物。高石英含量, 预示高脆性指数、高杨氏模量及低泊松比的岩石力学特征。但陆相页岩中往往存在陆源输入的碎屑石英及次生加大、生物成因、黏土转化、长石溶蚀、热液成因的自生石英(硅质), 不同成因的石英(硅质)对可压裂性的贡献也存在差异^[17]。从脆性矿物含量看, 尽管古龙页岩和 Wolfcamp D 段页岩在

石英含量上基本保持一致, 但其来源存在一定差异, Wolfcamp D 段页岩在形成时, 表层水体藻类大量繁殖, 大量发育硅质有孔虫, 为富有机质硅质泥页岩提供生物硅来源, 生物硅成层分布, 可压裂性整体较好。Wolfcamp D 段页岩 Si—Al 含量表明存在过量硅(图 5a), 背散射图和阴极发光图(图 5b、c)表示主要为陆源碎屑石英及自生石英, 且自生石英以生物硅为主, 富集在化石碎片含量较高的钙质页岩、富有机质硅质泥页岩中^[25-27]。生物成因石英主要富集于微体生物化石中, 其形成的粒间孔与之中的有机质孔形成网络, 在压裂过程中往往更容易被压开, 形成连通性较好的沟通体系。

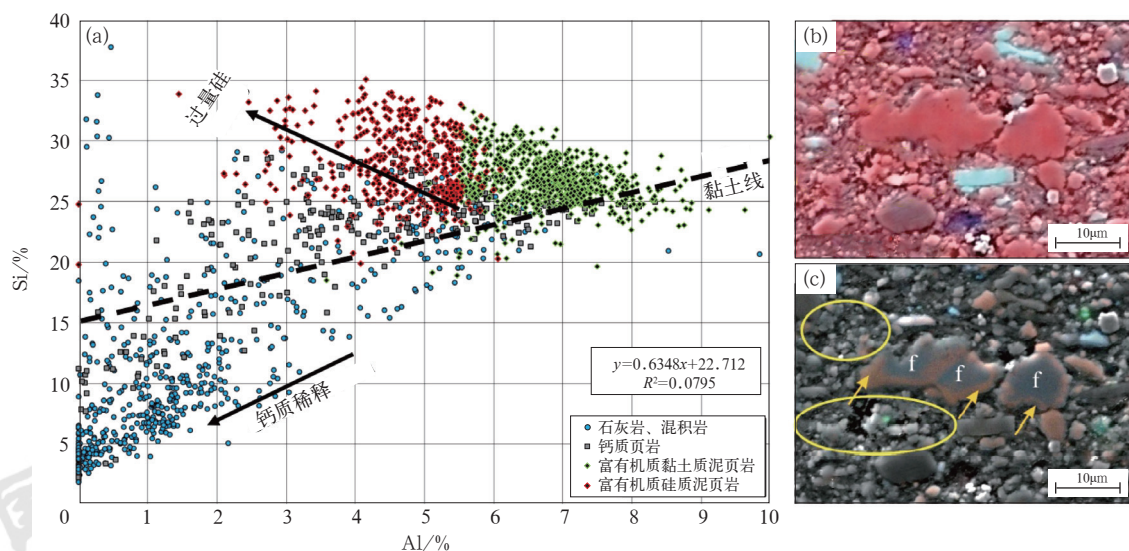


图5 Wolfcamp D 段页岩 Si—Al 含量图 (a) 及背散射图 (b)、阴极发光图 (c) (据文献[25]修改)

Fig.5 Si—Al content cross plot (a), backscatter image (b), and cathodoluminescence image (c) of Wolfcamp D shale (modified after reference [25])

(c) 中黄圈为阴极发光下散布基质中的灰白色微晶石英, f 处为化石碎片, 外围为红棕色生物硅

但古龙页岩中石英存在陆源碎屑输入和黏土转化成因。黏土转化成因硅通常以硅质胶结物形态散布于黏土基质当中，对压裂改造效果贡献弱。随着黏土质页岩中碎屑石英含量减少，同时存在由黏土矿物转化及长石的溶蚀形成自生硅质，呈微纳米级小晶

片状镶嵌于黏土矿物或呈斑点状和细脉状分布，成层性较差（图 6a），使得黏土质页岩改造效果相对不够理想；长英质页岩中碎屑石英含量相对较高，碎屑颗粒粒径大、集中成层分布（图 6b），可压裂性好于黏土质页岩。

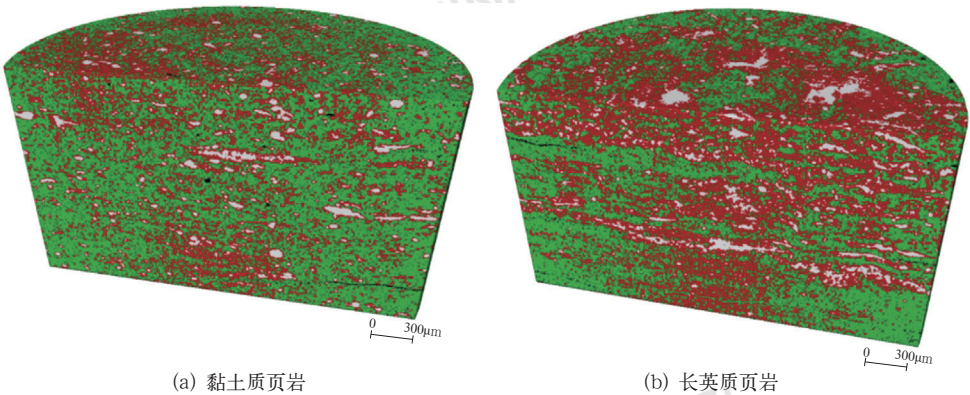


图 6 基于 CT 扫描的古龙页岩矿物空间分布图
Fig.6 Mineral spatial distribution of Gulong shale by CT scanning
图中红色代表石英，绿色代表黏土，灰色代表黄铁矿

4 海陆相页岩型页岩油靶体

4.1 海相页岩油靶体

综合地质甜点、可压裂性和流动性等因素，Wolfcamp D 页岩油纵向上勘探开发的靶体（Midland 次盆中南部）为 Wolfcamp D 段下段和中段两个相邻层段，主体为富有机质硅质泥页岩（表 3、图 7）。尽管富有机质硅质泥页岩和富有机质黏土质泥页岩均具有较好的原地滞留资源量，达到地质甜点的门限，但前者更有利于后期的压裂改造。Wolfcamp D 段中段和下段整体厚度在 40~50m，实际开发中，选择 Wolfcamp D 段中段的下部 2 号旋回作为靶窗，

采用大液量压裂规模，一层井网整体开发。Pioneer Natural Resources（先锋自然资源公司）全盆地范围内的 3 口作业井，均选取中段和下段的富有机质硅质泥页岩作为靶体目标^[26,40-41]。通过对页岩型页岩油靶体优选，部分实现了效益开发，2013 年作业的 7-43 10H 井记录显示 Wolfcamp D 段页岩油日产量最高可达 573m³^[12]；2018 年作业的 Wolfcamp D 段页岩油水平开发井，日产油气当量达 400m³，4 年累计产油气当量可达近 10×10⁴m³（图 8）；并在 2020 年 Midland 次盆部署的新井中，规划目的层为 Wolfcamp D 段页岩的开发井为 62 口（30%），与目前的主力产层 Wolfcamp A 段和 Wolfcamp B 段规划新井持平。此外，Anadarko Petroleum（阿纳达科

表 3 Wolfcamp D 页岩油甜点特征表
Table 3 Sweet spots characteristics of Wolfcamp D shale oil

评价参数		富有机质硅质泥页岩	富有机质黏土质泥页岩
地质甜点	TOC	1.22%~9.88%，平均 5.07%	1.17%~8.42%，平均 4.97%
	滞留烃含量	S _i 为 0.42~5.66mg/g	S _i 为 0.25~4.33mg/g
	储集空间	孔隙度平均为 6.03%	孔隙度平均为 5.92%
工程甜点	流动性	原油密度为 0.80~0.83g/cm ³ ；油质轻，流动性强	
	可压裂性	高 Si 含量、低黏土矿物含量的特征，尤其生物成因石英发育	Al 高、Si 相对高的特征，Si 主要以黏土转化过程释放的自生硅质形式散布于基质中

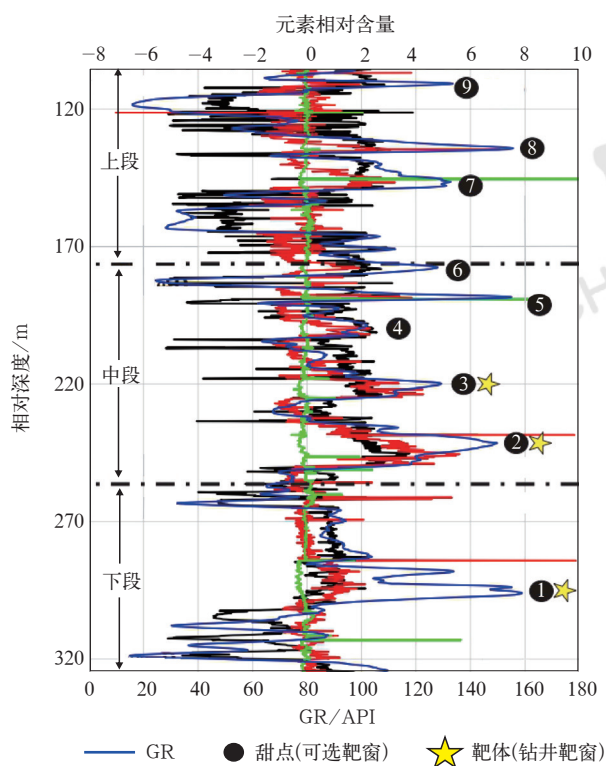


图7 Wolfcamp D段旋回特征与靶体优选综合图

(据文献[26,40-41]修改)

Fig.7 Comprehensive diagram of sedimentary cycle characteristics and target selection of Wolfcamp D shale (modified after references [26,40-41])

根据X-射线荧光光谱分析结果,将影响岩性的关键元素进行数据维度化分析得到元素的相对含量。黑线正值代表Al、Si、K、Ti相对含量,指示陆相沉积强度高,负值代表Ca相对含量,指示钙质生物沉积强度高;红线代表Cr、Fe、Mo和S相对含量,追踪盆地底部氧化还原条件,正值趋于还原环境,负值趋于氧化还原环境;绿线代表Mg和P的相对元素含量,与成岩矿化有关,如磷酸盐沉积和海绿石矿化

石油公司)、Apache Corporation (阿帕奇公司)、BHP Billiton (必和必拓公司)、Cimarex Energy (西莱能源公司)、Devon Energy (杜克能源公司)、EOG Resources (依欧格资源公司) 和 Laredo Petroleum (拉雷多石油公司) 等石油公司初期也实现了 Wolfcamp D 段页岩油商业开发,证明了页岩型页岩油实现效益开发的可行性。

4.2 陆相页岩型页岩油靶体

目前古龙地区的典型井 GYYP1 并以青一段 Q2、Q3 油层为靶层,试油阶段自喷日产油 30.5t、日产气 13032m³,见油生产 905 天累计产油 1.02×10⁴t、累计产气 542×10⁴m³,获得高产工业油气流,实现了页岩油勘探的重大突破^[42]。通过开展海相 Wolfcamp D 页岩型页岩油和陆相古龙页岩型页岩油对比分析,认为两者具有很好的可比性,尽管在靶体选取过程中关键参数——脆性矿物的来源存在差异,但 Wolfcamp D 页岩油开发靶体的优选思路仍具有较高的借鉴意义。页岩型页岩油开发靶体的选取应从地质甜点和工程甜点两个方面综合评价,强调在原地滞留资源量达到一定的门限的情况下,着重考虑脆性矿物含量对后期压裂改造的影响。对于同为地质资源甜点的黏土质页岩和长英质页岩,黏土质页岩油气资源含量参数较好但工程开发难度较高,与其紧邻的长英质页岩易于改造,具有更好的开发价值,可将富有机质的长英质页岩作为靶层。

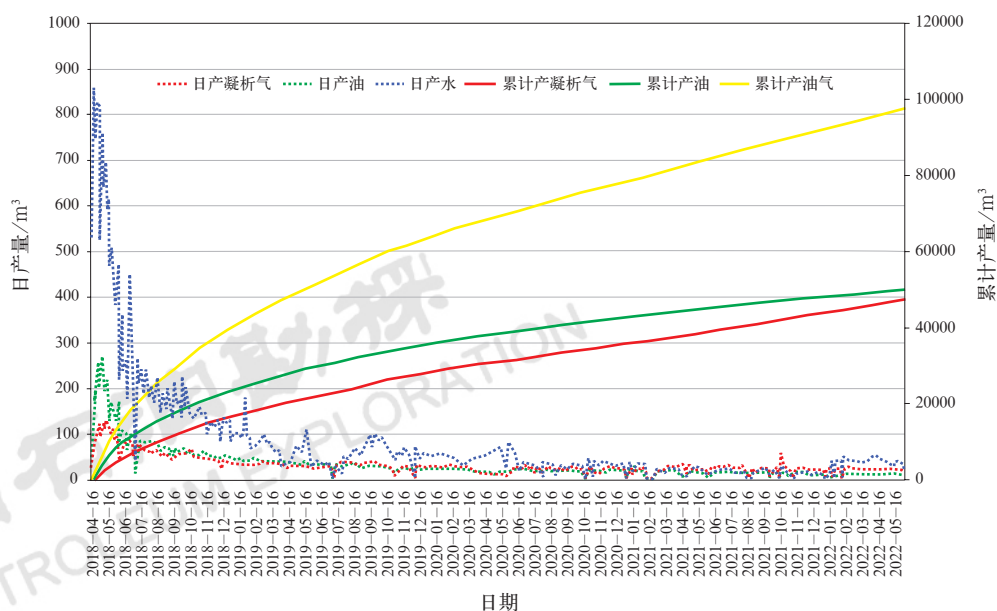


图8 二叠盆地 Midland 次盆内某水平井产量图

Fig.8 Production curve of a horizontal well in Midland sub-basin in Permian Basin

5 结论与认识

(1) 北美海相 Wolfcamp D 段页岩依据矿物组成特征分为 6 种岩性, 富有机质硅质泥页岩、富有机质黏土质泥页岩、钙质页岩、石灰岩、白云岩、混积岩, 为一套硅质页岩与黏土质页岩及碳酸盐岩重力流体系复合沉积体系。地质甜点为富有机质硅质泥页岩和富有机质黏土质泥页岩, 具有有机质含量高、孔隙发育、滞留烃含量高的特征; 富有机质硅质泥页岩中碎屑石英含量相对较高, 且生物硅发育, 整体可压裂性较富有机质黏土质泥页岩更佳, 是目前开发靶体。

(2) 陆相青山口组古龙页岩为陆相半深湖—深湖沉积环境, 主体以长英质页岩、黏土质页岩、混合质页岩为主, 存在少量碳酸盐岩。地质甜点为富有机质黏土质页岩和长英质页岩, 发育黏土矿物相关孔—页理缝复合的双重储集空间, 滞留烃含量高且油质较轻。富有机质长英质页岩中碎屑石英含量和粒径增大, 成层分布, 可压裂性更强, 有利于压裂改造。

(3) 海陆相页岩型页岩油地质甜点与工程甜点均存在差异, 既要从滞留烃量和有机质丰度筛选地质甜点段, 也要兼顾压裂改造难易程度, 作为工程甜点优选的参考。靶体优选应寻找地质甜点和工程甜点的最佳组合单元, 在达到资源量门限的情况下, 重视地质工程一体化的评价思路, 着重考虑页岩油的流动性、压裂后缝网的有效性, 最终对高富烃地质甜点实现改造体积最大化。

参考文献

- [1] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128–142.
Zou Caineng, Ma Feng, Pan Songqi, *et al.* Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128–142.
- [2] Administration U S–Energy–Information. Annual energy outlook 2021[EB/OL]. [2023–03–26]. https://www.eia.gov/pressroom/presentations/AEO2021_Release_Presentation.pdf.
- [3] 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.
- [4] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184–196.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, *et al.* Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184–196.
- [5] 罗承先. 页岩油开发可能改变世界石油形势[J]. 中外能源, 2011, 16(12): 22–26.
Luo Chengxian. Shale oil development may change the landscape in the world's oil market[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(12): 22–26.
- [6] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 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.
- [7] 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 Jinhui, 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.
- [8] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737–748.
Hu Suyun, Zhu Rukai, Wu Songtao, *et al.* Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 737–748.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Trent J. Cracking the cline: a new shale play develops in the Permian Basin [DB/OL]. [2023–04–08]. <https://jpt.spe.org/cracking-cline-new-shale-play-develops-permian-basin>.
- [12] Zheng Hanyue. Sedimentology and reservoir characterization of the Upper Pennsylvanian Cline shale, Midland Basin, Texas[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2016.
- [13] Trent J. Cracking the Cline: a new shale play develops in the Permian Basin[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(11): 70–77.
- [14] Reynolds. The cline shale: another Texas giant? oil and gas investigator[DB/OL]. [2023–03–26]. <https://www.hartenergy.com/exclusives/cline-shale-another-texas-giant-13384>.
- [15] 孙龙德. 古龙页岩油(代序)[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 1–7.
Sun Longde. Gulong shale oil(preface)[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 1–7.
- [16] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 441–454.
Sun Longde, Cui Baowen, Zhu Rukai, *et al.* Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 441–454.
- [17] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 453–463.
Sun Longde, Liu He, He Wenyan, *et al.* An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and

- Development, 2021,48(3):453–463.
- [18] 白斌, 戴朝成, 侯秀林, 等. 陆相湖盆页岩自生硅质特征及其油气意义[J]. 石油勘探与开发, 2022,49(5):896–907.
- Bai Bin, Dai Chaoheng, Hou Xiulin, *et al.* Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(5):896–907.
- [19] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 2022,49(2):224–237.
- Hu Suyun, Bai Bin, Tao Shizhen, *et al.* Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(2):224–237.
- [20] 崔宝文, 陈春瑞, 林旭东, 等. 松辽盆地古龙页岩油甜点特征及分布[J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3):45–55.
- Cui Baowen, Chen Chunrui, Lin Xudong, *et al.* Characteristics and distribution of sweet spots in Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(3):45–55.
- [21] 侯杰, 冯子辉, 黄清华. 松辽盆地白垩纪缺氧地质事件的地质地球化学特征[J]. 现代地质, 2003,17(3):311–317.
- Hou Dujie, Feng Zihui, Huang Qinghua. Geological and geochemical evidences of anoxic event in the Songliao Basin, China[J]. Geoscience, 2003,17(3):311–317.
- [22] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3):20–34.
- Wang Yuhua, Liang Jiangping, Zhang Jinyou, *et al.* Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(3):20–34.
- [23] 王广昀, 王凤兰, 蒙启安, 等. 古龙页岩油战略意义及攻关方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3):8–19.
- Wang Guangyun, Wang Fenglan, Meng Qi'an, *et al.* Strategic significance and research direction for Gulong shale oil[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3):8–19.
- [24] Reed S R. Regional stratigraphic and core-based characterization of the Cline shale, Midland Basin, Texas[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2015.
- [25] Peng Junwen. Heterogeneity characterization and genetic mechanism of deepwater fine-grained sedimentary rocks during icehouse period: a case study from the Cline shale in the Midland Basin, west Texas[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2021.
- [26] Patrick W B. Lithostratigraphic and geochemical characterization of the Upper Pennsylvanian 'Wolfcamp D' shale, Midland Basin[D]. Lexington: University of Kentucky, 2016.
- [27] Peng Junwen, Milliken K L, Fu Qilong, *et al.* Grain assemblages and diagenesis in organic-rich mudrocks, Upper Pennsylvanian Cline shale (Wolfcamp D), Midland Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2020,104(7):1593–1624.
- [28] Zheng Hanyue, Hamlin H S. Stratigraphic cyclicity and reservoir potential of Upper Pennsylvanian Cline shale, Midland Basin, Texas [C]//AAPG Proceedings of the 4th Unconventional Resources Technology Conference, 2016.
- [29] Algeo T J, Heckel P H. The Late Pennsylvanian midcontinent sea of north America: a review[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008,268(3):205–221.
- [30] Algeo T J, Barry M J. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. Chemical Geology, 2004,206(3):289–318.
- [31] Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, *et al.* A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle–Upper Devonian, Appalachian Basin[J]. Chemical Geology, 2003,195(1):229–273.
- [32] Bohacs K M, Remus Lazar O, Demko T M. Parasequence types in shelfal mudstone strata—quantitative observations of lithofacies and stacking patterns, and conceptual link to modern depositional regimes[J]. Geology, 2014,42(2):131–134.
- [33] Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, *et al.* Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania[J]. AAPG Bulletin, 2013,97(2):177–200.
- [34] 庞彦明, 王永卓, 王瑞, 等. 松辽盆地古龙页岩油水平井试采分析及产能预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3):137–146.
- Pang Yanming, Wang Yongzhuo, Wang Rui, *et al.* Production test analysis and productivity prediction of horizontal wells in Gulong shale oil reservoirs, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(3):137–146.
- [35] Downey R, Venepalli K, Erdle J, *et al.* A superior shale oil EOR method for the Permian Basin[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2021.
- [36] Liang Baosheng, Du Meilin, Yanez P P. Subsurface well spacing optimization in the Permian Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,174:235–243.
- [37] Luo Ming, Baker M R, LeMone D V. Distribution and generation of the overpressure system, eastern Delaware Basin, western Texas and southern New Mexico[J]. AAPG Bulletin, 1994,78(9):1386–1405.
- [38] Swarbrick R E. Distribution and generation of the overpressure system, eastern Delaware Basin, western Texas and southern New Mexico: discussion[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(12):1817–1824.
- [39] Heller J, Anantharamu V. Integration of rock physics modelling to improve pore pressure prediction in unconventional shales[C]. SPE Unconventional Resources Technology Conference, 2020.
- [40] Perlman Z S. Stratigraphic, geochemical, and geochronological analysis of the Wolfcamp–D interval, Midland Basin, Texas[D]. Lexington: University of Kentucky, 2017.
- [41] Ryan P T. Stratigraphic, geochemical, and well log analysis of the Wolfcamp–D unconventional play in the Central Midland Basin, Texas[D]. Lexington: University of Kentucky, 2016.
- [42] 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.