

# 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组 超深层断控型碳酸盐岩储集层测井识别\*

吴兴能<sup>1,2,3,4</sup> 张承森<sup>1,2,3</sup> 唐保勇<sup>1</sup> 李红斌<sup>5</sup>  
陈旭<sup>1</sup> 康鹏飞<sup>1</sup> 邵临波<sup>5</sup>

1 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000

2 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000

3 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000

4 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

5 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

**摘要** 塔里木盆地富满地区奥陶系超深层断控型碳酸盐岩储集层近年来取得了重大突破, 油气资源丰富, 勘探潜力巨大, 是中国目前已建成规模最大的超深层油田之一。然而, 奥陶系一间房组埋藏深度大, 经历多期构造演化, 储集空间复杂, 储集层非均质性极强, 亟需在厘清储集空间特征的基础上, 明确储集层类型, 建立单井不同类型储集层的测井划分识别方法。依托岩心、薄片等地质资料, 厘清一间房组岩石学特征与储集空间特征, 归纳总结出孔洞型、裂缝型、裂缝—孔洞型和洞穴型 4 种类型储集层, 辅以常规测井和成像测井资料, 建立了相应的“常规+成像+模式图”的测井响应特征图版。基于不同类型储集层的成像测井特征, 利用孔洞缝剥离技术实现单井储集层的识别划分, 明确不同类型储集层的规模与物性差异。结果表明, 洞穴型储集层规模大, 物性好, 对油气产能起主要贡献作用, 裂缝—孔洞型储集层规模与物性次之, 在作为油气运移通道的同时也可以储存油气, 裂缝型储集层与孔洞型储集层规模与物性相对较差, 因此, 洞穴型储集层是研究区优质的储集层, 同时也是现阶段勘探开发的重点。研究成果为富满地区奥陶系超深层断控型碳酸盐岩储集层的识别提供了解决思路和技术支撑。

**关键词** 超深层 断控型 碳酸盐岩 储集层 测井识别 富满地区 塔里木盆地

**第一作者简介** 吴兴能, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 从事测井新技术处理方法研究及解释评价工作。E-mail: wuxingneng-tlm@petroChina.com.cn。

**通讯作者简介** 唐保勇, 男, 1988 年生, 硕士, 高级工程师, 从事测井新技术处理方法研究及解释评价工作。E-mail: tangby-tlm@petroChina.com.cn。

中图分类号: P588.24<sup>+</sup> 5 文献标志码: A

## Logging identification of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

WU Xingneng<sup>1,2,3,4</sup> ZHANG Chengsen<sup>1,2,3</sup> TANG Baoyong<sup>1</sup> LI Hongbin<sup>5</sup>  
CHEN Xu<sup>1</sup> KANG Pengfei<sup>1</sup> SHAO Linbo<sup>5</sup>

\* 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心攻关项目(编号: YF202402)和中国石油天然气集团有限公司科技项目(编号: 2023ZZ16YJ04)联合资助。[Co-funded by the R & D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC (No. YF202402) and the Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation (No. 2023ZZ16YJ04)]

收稿日期: 2025-03-21 改回日期: 2025-06-24

1 *Tarim Oilfield Company, PetroChina, Xinjiang Korla 841000, China*

2 *R & D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Xinjiang Korla 841000, China*

3 *Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Korla 841000, China*

4 *School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China*

5 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

**Abstract** Significant breakthroughs have been achieved in the Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs in the Fuman area, Tarim Basin in recent years. This area is rich in oil and gas resources and has tremendous exploration potential, being one of the largest ultra-deep oilfields established in China at present. Nevertheless, the Fuman area has a deep burial depth and has undergone multiple tectonic evolution stages, leading to complex reservoir spaces and extremely strong heterogeneity. Thus, it is urgently necessary to clarify the characteristics of the reservoir spaces in the Yijianfang Formation of the study area and determine the types of reservoirs, establishing a logging identification method for reservoirs in a single well. Relying on geological data such as cores and thin sections, the petrological and reservoir space characteristics of the Yijianfang Formation were clarified, and four types of reservoirs were summarized: vug type, fracture type, fracture-vug type, and cave-type. With the aid of conventional logging and image logging data, the logging response characteristic chart of “conventional+imaging+pattern” was established. According to the image logging characteristics of different types of reservoirs, the technique of vug, cave and fracture stripping was utilized to achieve the identification of reservoirs in a single well and clarify the scale and physical property differences. The results indicate that the cave type reservoirs have a large scale and excellent physical properties, contributing mainly to oil and gas productivity. The fracture-vug type reservoirs have a medium scale and physical properties, serving as both an oil and gas migration channel and a storage space. The fracture type and vug type reservoirs have relatively poor scale and physical properties. Therefore, the cave type reservoirs are high-quality reservoirs in the study area and also the focus of current exploration and development. The research results provide a solution approach and technical support for the identifying Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs in the Fuman area.

**Key words** ultra-deep layers, fault-controlled, carbonate, reservoirs, logging identification, Fuman area, Tarim Basin

**About the first author** WU Xingneng, born in 1983, is a master and senior engineer. He is engaged in the research and evaluation of new logging technology processing methods. E-mail: wuxingneng-tlm@petroChina.com.cn.

**About the corresponding author** TANG Baoyong, born in 1988, is a master and senior engineer. He is engaged in the research and evaluation of new logging technology processing methods. E-mail: tangby-tlm@petroChina.com.cn.

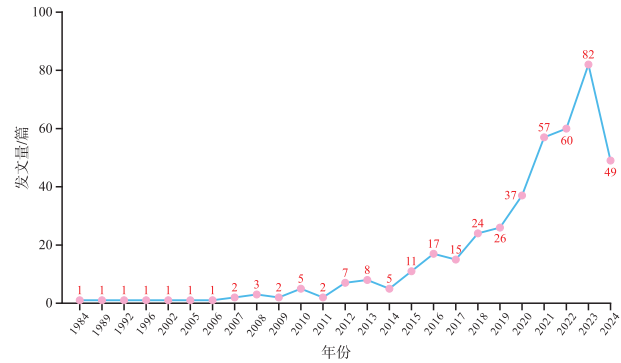
## 0 引言

碳酸盐岩地层是全球重要的油气储集层, 在 1000 多个大型油气田中, 碳酸盐岩油气田占 30% 以上 (张宁宁等, 2014), 其储量约占全球油气总储量的 35% (马永生等, 2020)。在中国油气勘探

开发实践中将埋深 3500~4500 m (东部) 和 4500~6000 m (西部) 的地层定义为深层, 将埋深大于等于 4500 m (东部) 和大于等于 6000 m (西部) 的地层分别定义为超深层领域 (李阳等, 2020)。深层—超深层碳酸盐岩储集层是近年来油气勘探的重点领域 (Laubach *et al.*, 2019; 赖锦等, 2021;

Qiao *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2024), 数量多且储量大, 全球已发现深层油气田 9423 个, 油气储量约为  $1.865 \times 10^{11}$  t (韩剑发等, 2024)。目前, 中国海相碳酸盐岩储集层主要有“沉积相控型”、“岩溶改造型”与“断控型”(鲁新便等, 2015; 王清华等, 2021)。沉积相控型储集层的形成受到沉积相带展布的控制, 不同沉积环境下形成的储集层原生孔隙发育程度存在差异(赵文智等, 2015)。岩溶改造型储集层储集空间多样, 非均质性极强(赵文智等, 2013), 受控于岩溶相带, 具有明显的垂向分带、横向分区特征(Wang *et al.*, 2020)。深层—超深层海相碳酸盐岩基质储集层致密(田军等, 2021a), 而断裂是形成深层—超深层优质储集体的重要条件(Zhao *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024)。断裂对储集层的控制作用主要表现为断裂与其伴生的裂缝可作为油气储集空间改善储集层(Graham *et al.*, 2003; 焦方正, 2018), 同时也可作为运移通道促进大气淡水和深部热液等流体对储集层进行改造(金之钧等, 2006; Ramadhan *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2021), 从而形成断控型碳酸盐岩储集层(Lu *et al.*, 2017; 马永生等, 2023)。

近年来, 断控型碳酸盐岩储集层逐渐成为研究热点(Hu *et al.*, 2023; Zeng *et al.*, 2024)(图1), 断控缝洞体油藏更是现阶段塔里木盆地碳酸盐岩层系增储上产的重要领域(王清华等, 2022), 因而备受关注。自1984年SC2井发现以来, 塔里木盆地经历了潜山构造、礁滩相控、层间岩溶和断控缝洞体4个阶段的油气勘探历程(田军等, 2021b; 王清华等, 2021), 塔河油田、塔中油田、哈拉哈塘油田和富满油田等相继被发现(Li *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2020)。富满油田是全球陆上首个超深层年产原油超  $200 \times 10^4$  t 的走滑断控油田, 落实了  $10 \times 10^8$  t 级储量区(王清华等, 2023), 奥陶系一间房组与鹰山组是富满油田主要勘探层位。作为典型断控型大油田, 目前大量研究集中在利用地震资料刻画断裂分级分段特征, 以明确走滑断裂样式与变形特征对储集层成因的控制机制(Deng *et al.*, 2022; 王清华等, 2022; 宋兴国等, 2023; 张银涛等, 2023)。富满地区经历多期构造演化, 储集层内流体期次复杂, 具有“多期充注、大面积成藏、早油晚气”的成藏特点和油



资料来源: 中国知网; 输入“断控型, 碳酸盐岩”为搜索词

图1 断控型碳酸盐岩储集层研究1984—2024年发文量

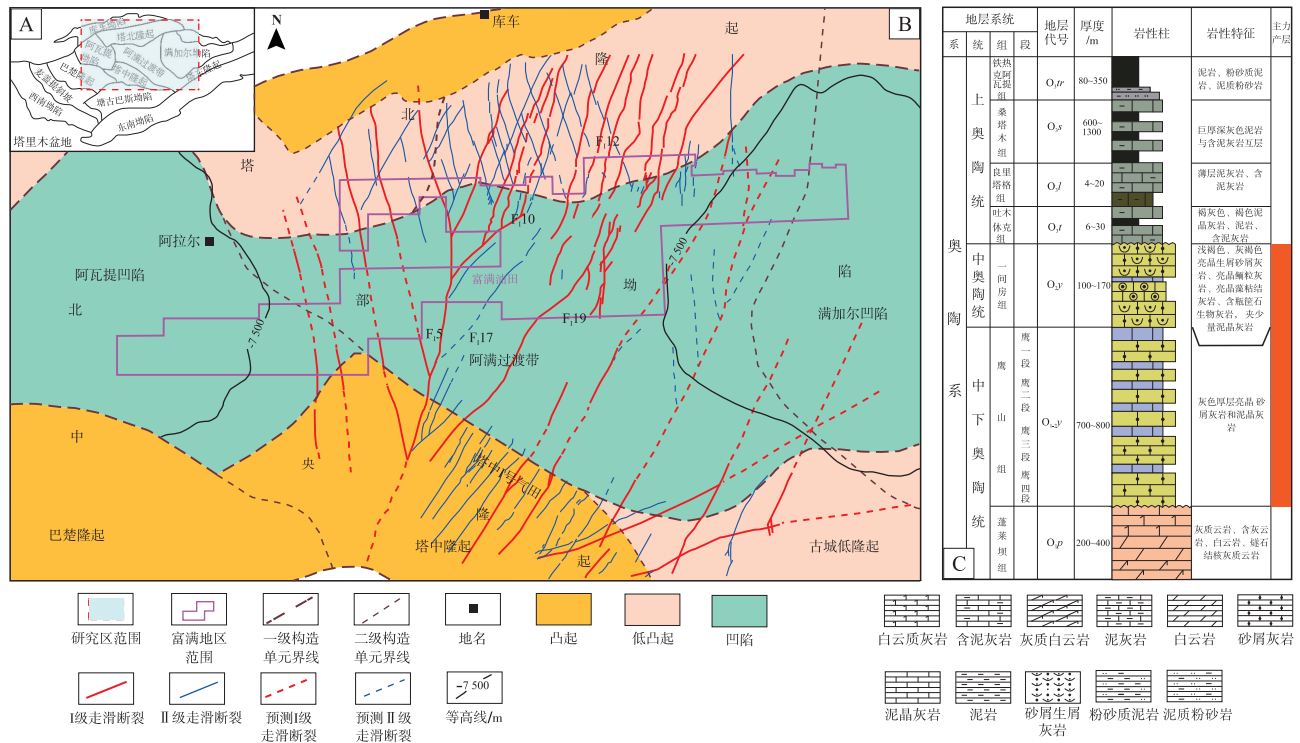
Fig. 1 Annual number of publications during 1984–2024 about the fault carbonate reservoirs

气藏多相态的成因模式(Wang *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2024)。然而, 富满地区奥陶系一间房组具有埋藏深度大、成岩作用强烈、基质孔隙度低等特征, 经历多期构造活动, 形成储集空间以孔、洞和缝为主的断控型碳酸盐岩储集体(Zeng *et al.*, 2024), 储集层非均质性极强(韩剑发等, 2024)。目前针对缝洞体内部储集体类型、特征及连续识别划分研究较少, 忽略了储集层非均质性对油气产能的影响, 因此, 应厘清富满地区奥陶系一间房组储集体类型及其发育特征, 建立不同类型储集体的测井识别方法, 为研究区走滑断裂如何控储以及不同缝洞体产能差异起到指导作用。

以塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组超深层断控型碳酸盐岩储集体为例, 基于岩心、薄片等地质资料, 明确研究区主要的储集空间类型及发育特征, 结合其对产能的贡献程度, 划分储集体类型, 辅以常规测井和成像测井等测井资料, 建立不同类型储集体“常规+成像+模式图”的测井响应特征图版。在明确不同类型储集体测井响应特征后, 利用成像测井孔洞缝剥离技术完成单井纵向上不同类型储集体的划分, 结合气测资料, 探究不同类型储集体与产能的对应关系。

## 1 区域地质背景

塔里木盆地位于中国西北部新疆维吾尔自治区南部, 是一个大型含油气叠合盆地, 面积约为  $56 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 构造单元可划分为库车坳陷、北部坳陷、塔西南坳陷、塔北隆起和中央隆起等(Li *et al.*,



A—富满地区区域构造位置；B—邻区下古生界主要断裂分布；C—地层结构简图（据王清华等，2022；宋兴国等，2023；有修改）

图 2 塔里木盆地富满地区下古生界综合地质图

Fig. 2 Comprehensive geological map of the Lower Paleozoic in Fuman area, Tarim Basin

2024) (图 2-A)。富满油田位于塔北隆起与塔中隆起中间的阿满过渡带，西邻阿瓦提凹陷，东接满加尔凹陷。该地区经历了加里东期、海西期等多期构造演化阶段，发育多期多种类型的走滑断裂，I 级、II 级大型走滑断裂可达 70 条（王清华等，2021）（图 2-B），奥陶系碳酸盐岩在走滑断裂的作用下形成断裂破碎带，断裂破碎带遭受强烈的溶蚀改造可形成裂缝、洞穴等缝洞型储集体（邓兴梁等，2021）。阿满过渡带奥陶系发育完整，从下至上依次发育蓬莱坝组（O<sub>1p</sub>）、鹰山组（O<sub>1-2y</sub>）、一间房组（O<sub>2y</sub>）、吐木休克组（O<sub>3t</sub>）、良里塔格组（O<sub>3l</sub>）、桑塔木组（O<sub>3s</sub>）和铁热克阿瓦提组（O<sub>3tr</sub>）（宋兴国等，2023）。目前富满油田主力产层为一间房组（O<sub>2y</sub>）与鹰山组（O<sub>1-2y</sub>），与下寒武统玉尔吐斯组（ε<sub>1y</sub>）以及桑塔木组（O<sub>3s</sub>）可构成良好的生—储—盖组合（王清华等，2023）（图 2-C）。

## 2 岩石学及储集空间特征

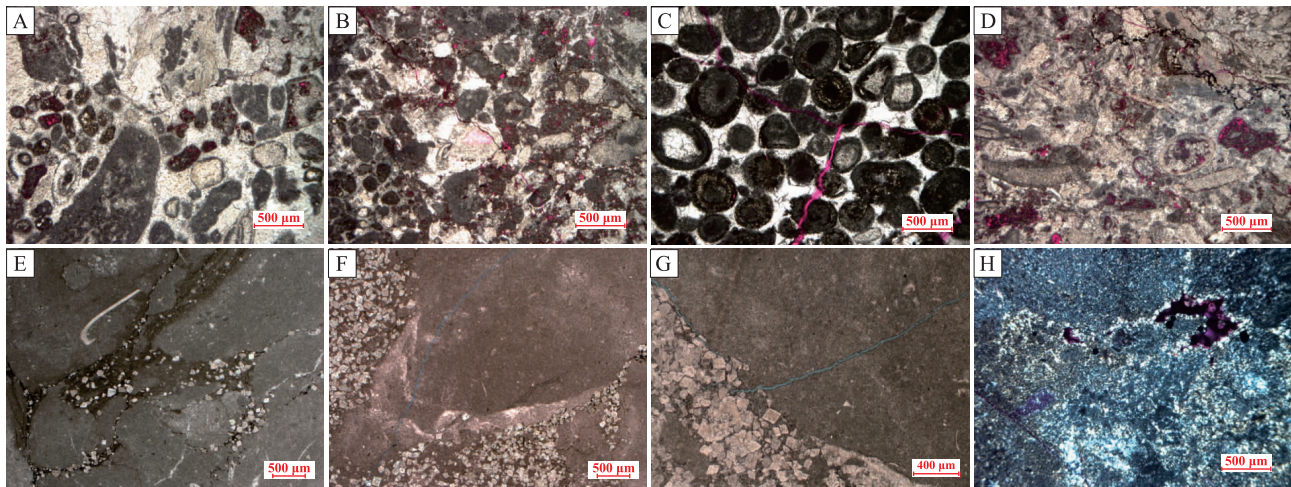
### 2.1 岩石学特征

富满地区奥陶系蓬莱坝组—一间房组沉积时

期，为退积型台地，具有良好的高能滩体沉积环境（杜仲元等，2024）。研究区多口井岩心观察与薄片鉴定结果显示，奥陶系一间房组储集层矿物成分主要为方解石，白云石次之，少见泥质、硅质和黄铁矿等非碳酸盐矿物，岩石类型主要为亮晶内碎屑灰岩（图 3-A，3-B）、鲕粒灰岩（图 3-C）、生屑灰岩（图 3-D）和泥晶灰岩（图 3-E），含云灰岩（图 3-F）、云质灰岩（图 3-G）次之，偶见硅质岩（图 3-H）。据薄片鉴定统计结果，研究区一间房组结构组分主要包括颗粒、灰泥、胶结物和晶粒，颗粒主要为内碎屑和生屑，鲕粒、球粒和藻团块等次之；晶粒主要为泥晶、粉晶，少见细晶、中晶和粗晶；胶结物主要为方解石胶结，白云石含量极低。

### 2.2 储集空间特征

富满地区走滑断裂发育，垂向上具有分层差异变形特征（刘雨晴和邓尚，2022），以一间房组顶面为界，其上为浅构造变形层，主要发育雁列式正断层，其下为深构造层，主要发育直立花状走滑断层（宋兴国等，2023）。碳酸盐岩储集层在深大断



A—亮晶砂砾屑灰岩, 井深 7381.60 m,  $O_2y$ , 富源 1 井 (-); B—亮晶内碎屑灰岩, 井深 7383.00 m,  $O_2y$ , 富源 1 井 (-); C—亮晶鲕粒灰岩, 井深 6675.30 m,  $O_2y$ , 玉科 1 井 (-); D—泥晶生屑灰岩, 井深 7373.30 m,  $O_2y$ , 富源 1 井 (-); E—泥晶灰岩, 井深 7778.93 m,  $O_2y$ , 满深 2 井 (-); F—泥晶含云灰岩, 井深 7785.85 m,  $O_2y$ , 满深 2 井 (-); G—粉—泥晶云质灰岩, 井深 7721.74 m,  $O_2y$ , 富源 302-H6 井 (-); H—生屑含灰硅(化)质岩, 井深 7381.00 m,  $O_2y$ , 富源 1 井 (+)

图 3 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储集层岩性特征

Fig. 3 Lithologic characteristics of carbonate reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

裂控制基础上, 发生构造破裂, 形成断裂破碎带, 叠加大气淡水与深部热液流体等多种流体的溶蚀作用, 形成裂缝、溶蚀孔洞和大型洞穴等多种类型的储集空间。不同类型的储集空间规模差异大, 大型洞穴尺寸可达几米至数十米不等, 溶蚀孔洞尺寸几厘米至几十厘米, 而镜下的粒间溶孔和粒内溶孔等储集空间仅为毫米级, 具有基质物性差、非均质性强烈的特点(田军等, 2021a)。岩心物性分析显示, 孔隙度分布在 0.22%~5.30% 之间, 平均为 1.57%, 主峰为 0%~3.5%; 渗透率分布在  $(0.00155 \sim 295) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均值为  $3.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 一般小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 基质孔渗普遍较低, 基本不具备有效储集空间, 在断裂和岩溶发育区孔渗会显著提高。基于岩心与薄片观察结果, 将富满地区奥陶系一间房组超深层碳酸盐岩储集层储集空间分为孔隙、溶蚀孔洞和裂缝三类, 其中构造破裂及次生溶蚀作用形成的溶蚀孔洞与裂缝作为主要的油气储集空间。

### 2.2.1 孔隙特征

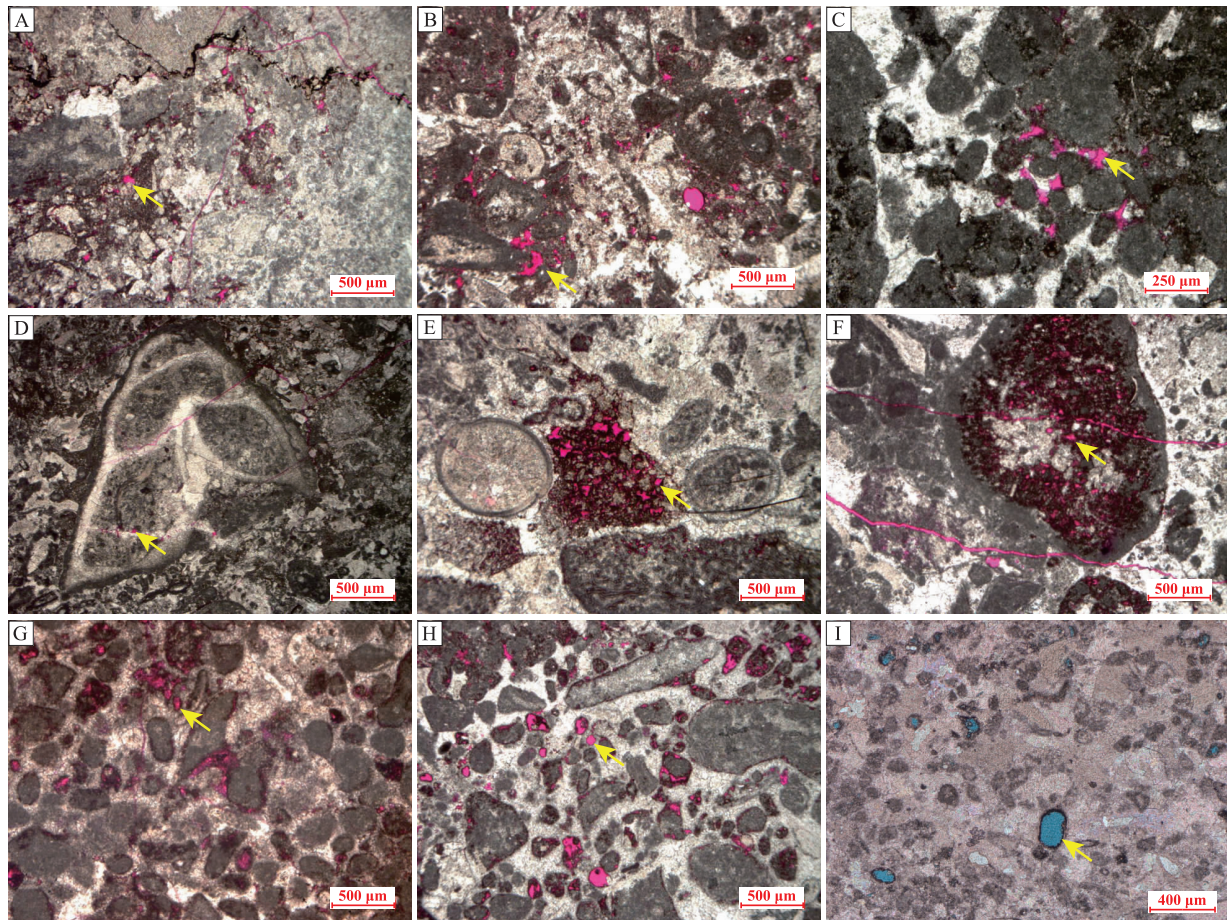
铸体薄片鉴定结果显示, 一间房组孔隙类型多样, 主要为次生的粒间溶孔(图 4-A, 4-B, 4-C)和粒内溶孔(图 4-D, 4-E, 4-F), 偶见铸模孔(图 4-G, 4-H, 4-I), 原生粒间孔几乎不可见。粒间溶孔、粒内溶孔与铸模孔多为组构选择性溶蚀

形成, 粒间溶孔(图 4-A, 4-B, 4-C)主要为生屑、藻砂屑与砂屑等颗粒间的胶结物发生溶蚀形成, 面孔率分布在 0%~2.5% 之间, 平均值为 0.1%; 粒内溶孔(图 4-D, 4-E, 4-F)为成岩过程中生屑、藻团块和砾屑中易溶组分被流体溶蚀形成, 面孔率分布在 0%~4% 之间, 平均值为 0.2%; 铸模孔(图 4-G, 4-H, 4-I)在一间房组较为少见, 主要为砂屑和藻砂屑等易溶颗粒在成岩过程受大气淡水和有机酸等流体溶蚀形成, 面孔率在 0%~0.3% 之间, 平均值为 0.004%。

### 2.2.2 裂缝特征

天然裂缝主要指储集层在成岩作用及后期构造作用中形成的面状构造。天然裂缝是研究区碳酸盐岩储集层主要的储集空间之一, 裂缝类型多样, 按照地质成因可分为构造裂缝与非构造裂缝, 非构造裂缝主要包括收缩裂缝与压溶缝等成岩裂缝, 按照裂缝产状可分为近水平裂缝、低角度裂缝、斜交裂缝和高角度裂缝。

富满地区经历多期构造运动, 构造裂缝是一间房组主要的裂缝类型, 然而受地层埋藏深度大, 上覆地层压力大等因素影响, 张开裂缝发育处岩心易破碎, 取心困难, 岩心上多为被泥质、沥青质和方解石等成分充填的构造裂缝(图 5-A, 5-B, 5-C), 张开构造裂缝较少。镜下可见构造破裂作用



A—粒间溶孔, 井深 7370.20 m, O<sub>2</sub>y, 富源 1 井 (-); B—粒间溶孔, 井深 7380.40 m, O<sub>2</sub>y, 富源 1 井 (-); C—粒间溶孔, 井深 6458.60 m, O<sub>2</sub>y, 哈得 301 井 (-); D—粒内溶孔, 井深 7312.80 m, O<sub>2</sub>y, 跃满 6 井 (-); E—粒内溶孔, 井深 7370.30 m, O<sub>2</sub>y, 富源 1 井 (-); F—粒内溶孔, 井深 7232.45 m, O<sub>2</sub>y, 富源 102 井 (-); G—铸模孔, 井深 7231.40 m, O<sub>2</sub>y, 富源 102 井 (-); H—铸模孔, 井深 7240.00 m, O<sub>2</sub>y, 富源 102 井 (-); I—铸模孔, 井深 7608.31 m, O<sub>2</sub>y, 满深 5 井 (-)

图 4 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储集层储集空间特征

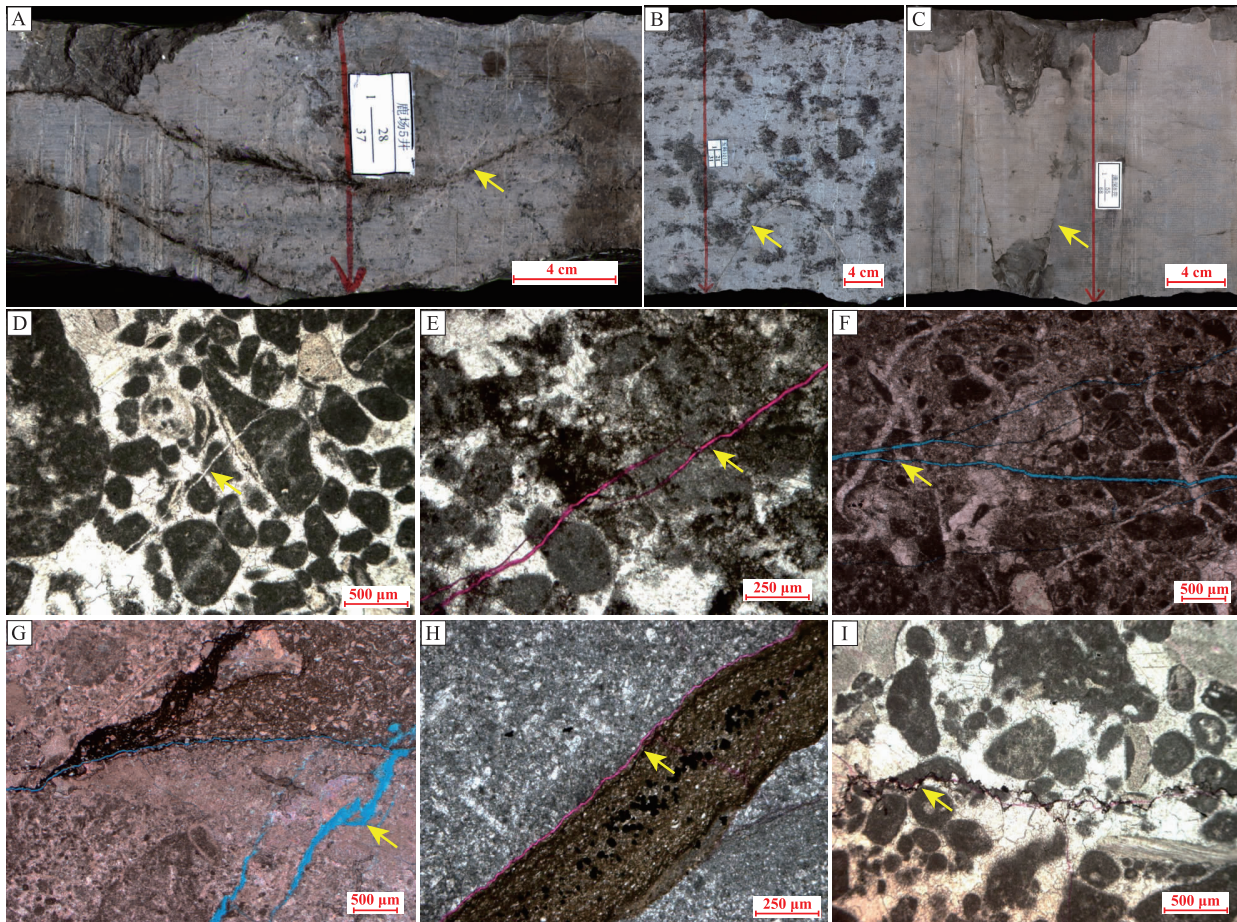
Fig. 4 Reservoir space characteristics of carbonate reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

导致形成微裂缝, 构造微裂缝可贯穿砂屑等颗粒, 较为平直, 边缘可略微呈现出锯齿状特征。同时构造微裂缝具有多期发育特征, 早期构造微裂缝易在后期成岩作用中被方解石胶结(图 5-D), 晚期构造微裂缝多为张开状态(图 5-E), 镜下可见多期构造微裂缝相互切割, 往往是成岩早期的方解石充填构造微裂缝被后期的张开构造微裂缝切割(图 5-F)。此外, 还可见收缩微裂缝和压溶微裂缝(缝合线)等成岩微裂缝(图 5-G, 5-H, 5-I), 以及构造微裂缝被溶蚀改造形成的构造成岩复合微裂缝。成岩收缩微裂缝主要是由于成岩过程中岩石经历脱水作用后体积缩小形成, 可发生在碳酸盐岩颗粒与黏土矿物边缘的缝隙(刘忠宝等,

2017)。一间房组黏土含量较低, 主要是由于早期的微裂缝被黏土矿物充填, 后经历脱水作用形成(图 5-H)。成岩压溶微裂缝(缝合线)是由于上覆岩层载荷负载引起的成岩期压实和压溶作用形成的与地层平行或近平行的微裂缝, 主要是受电化学过程驱动, 而不是压力驱动过程(Kristiansen *et al.*, 2011), 随着压溶作用的发生, 表面会变得粗糙呈锯齿状。化学压实作用所产生的流体可作为附近胶结作用的物质来源, 也就是矿物溶解的同时会造成矿物的沉淀, 而其导致孔隙度增加或减少则定论不一(Ehrenberg, 2022)。

### 2.2.3 溶蚀孔洞特征

溶蚀孔洞是指孔径大于 2 mm, 主要是经历溶



A—有机质充填低角度构造裂缝，井深 7679.82 m， $O_2Y$ ，鹿场 5 井；B—方解石充填斜交构造裂缝，井深 6499.46 m， $O_2Y$ ，玉科 101 井；C—有机质充填高角度构造裂缝，井深 8164.44 m， $O_2Y$ ，满深 8 井；D—方解石充填构造微裂缝，井深 6498.60 m， $O_2Y$ ，哈得 25 井（-）；E—未充填构造微裂缝，井深 6473.60 m， $O_2Y$ ，哈得 301 井（-）；F—多期构造微裂缝相互切割，井深 7679.25 m， $O_2Y$ ，鹿场 5 井（-）；G—未充填成岩微裂缝，井深 7520.05 m， $O_2Y$ ，富源 216H 井（-）；H—未充填成岩收缩微裂缝，井深 7197.50 m， $O_2Y$ ，跃满 2 井（-）；I—沥青质充填成岩压溶微裂缝，井深 7078.85 m， $O_2Y$ ，富源 201 井（-）

图 5 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储集层裂缝特征

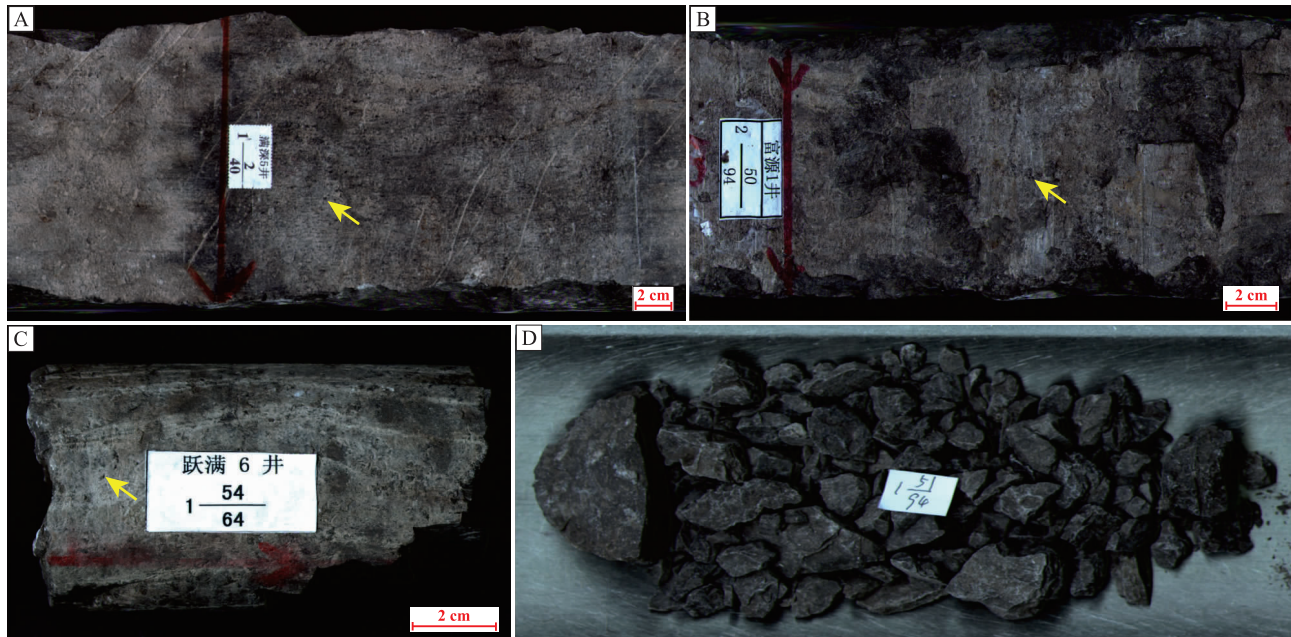
Fig. 5 Fractures characteristics of carbonate reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

蚀作用形成的肉眼可见的储集空间（曹建文等，2012），又可以将其细分为孔洞（孔径为 2 ~ 500 mm）和洞穴（孔径  $\geq 500$  mm）。溶蚀孔洞的溶蚀成因有 2 种，分别为自源溶蚀作用和他源溶蚀作用。自源溶蚀作用是石灰岩储集层自身产生的流体对其进行溶蚀作用，该溶蚀作用主要产生连通性较差的孤立溶蚀孔洞；他源溶蚀作用是石灰岩储集层本身之外的流体对其进行溶蚀，产生相互连通的规模较大的溶蚀孔洞（朱东亚等，2007）。岩心上可见几毫米的溶蚀孔洞（图 6-A，6-B，6-C），密集的针状溶孔较为少见。有学者认为塔里木盆地的溶蚀孔洞是受深部热液流体溶蚀改造形成，区别于岩

溶作用形成的大型洞穴，对未暴露地表的碳酸盐岩储集体至关重要（金之钧等，2006），可改善储集体的孔渗能力。研究区洞穴主要指受构造破裂作用及岩溶作用形成，岩心破碎（图 6-D），岩心尺度上无法识别，主要利用测井手段识别的储集空间，是富满地区断控型碳酸盐岩重要的储集空间之一。

### 3 不同类型碳酸盐岩储集层测井响应特征

碳酸盐岩储集层类型多样，有断控型、相控型和岩溶改造型等（赖锦等，2021）。塔里木盆地富



A—溶蚀孔, 井深 7606.17 m, O<sub>2</sub>y, 满深 5 井; B—溶蚀孔, 井深 7307.58 m, O<sub>2</sub>y, 跃满 6 井; C—溶蚀孔, 井深 7382.46 m, O<sub>2</sub>y, 富源 1 井; D—破碎状岩心, 井深 7374.10 m, O<sub>2</sub>y, 富源 1 井

图 6 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储集层溶蚀孔洞特征

Fig. 6 Dissolution vugs characteristics of carbonate reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

满地区奥陶系一间房组是典型的断控型碳酸盐岩储集层, 储集空间包括基质孔隙、溶蚀孔洞和裂缝等储集空间。断控型碳酸盐岩典型的特征是产能主要依靠洞穴和裂缝等规模较大的储集空间 (王清华等, 2021), 基质孔隙等传统上的孔隙占比极小。根据储集空间类型发育特征差异以及对产能的贡献程度, 结合常规和成像测井响应特征, 将储集层分为孔洞型储集层、裂缝型储集层、裂缝—孔洞型储集层与洞穴型储集层 4 种类型。不同类型碳酸盐岩储集层的测井响应特征存在差异, 然而, 微电阻率成像测井具有更精确、更直观、纵向分辨率较常规测井高等一系列优点 (王珺等, 2005), 包括 FMI、XRMI、MCI 等电成像测井仪器, 可直观反映地下孔、洞和缝等储集空间的形态和发育情况 (赖锦等, 2024)。因此, 本次综合利用岩心资料、常规测井和成像测井识别不同类型储集层, 由于研究区埋藏深度大, 取心困难并且目前已有的岩心较破碎, 采用“常规+成像+地质模式”的方法, 建立富满地区奥陶系一间房组超深层碳酸盐岩不同类型储集层的测井响应特征图版, 以实现单井不同类型碳酸盐岩储集层划分。

### 3.1 孔洞型储集层

孔洞型储集层主要由孔洞直径为 2~500 mm、溶蚀成因、杂乱分布或顺层分布的溶蚀孔洞组成, 利用常规测井和成像测井可以准确识别。常规测井表现出深浅电阻率测井值降低、声波时差测井值增大的特征; 成像测井表现为静态图像亮色背景下的暗色斑状特征 (图 7)。大多数孔洞呈杂乱分布特征, 受溶蚀程度不同影响尺寸大小不一, 溶蚀孔洞的发育可以增大地表水或深部热液流体与碳酸盐岩的接触面积, 扩大溶蚀范围, 进而形成优质的孔洞型储集层。

### 3.2 裂缝型储集层

裂缝型储集层指储集空间主要为较纯的裂缝系统及发育大量裂缝为特征, 不发育或发育极少的孔洞 (图 8)。根据裂缝成因, 可以将裂缝分为构造缝、成岩缝和溶蚀缝 3 种类型, 研究区主要以构造缝为主。裂缝可作为断控型油藏主要的渗流通道以及储集空间, 对富满地区油藏的生产开发具有重要意义。富满地区受多期构造运动影响, 发育多期多种类型的走滑断裂 (王清华等, 2021), 断裂活动

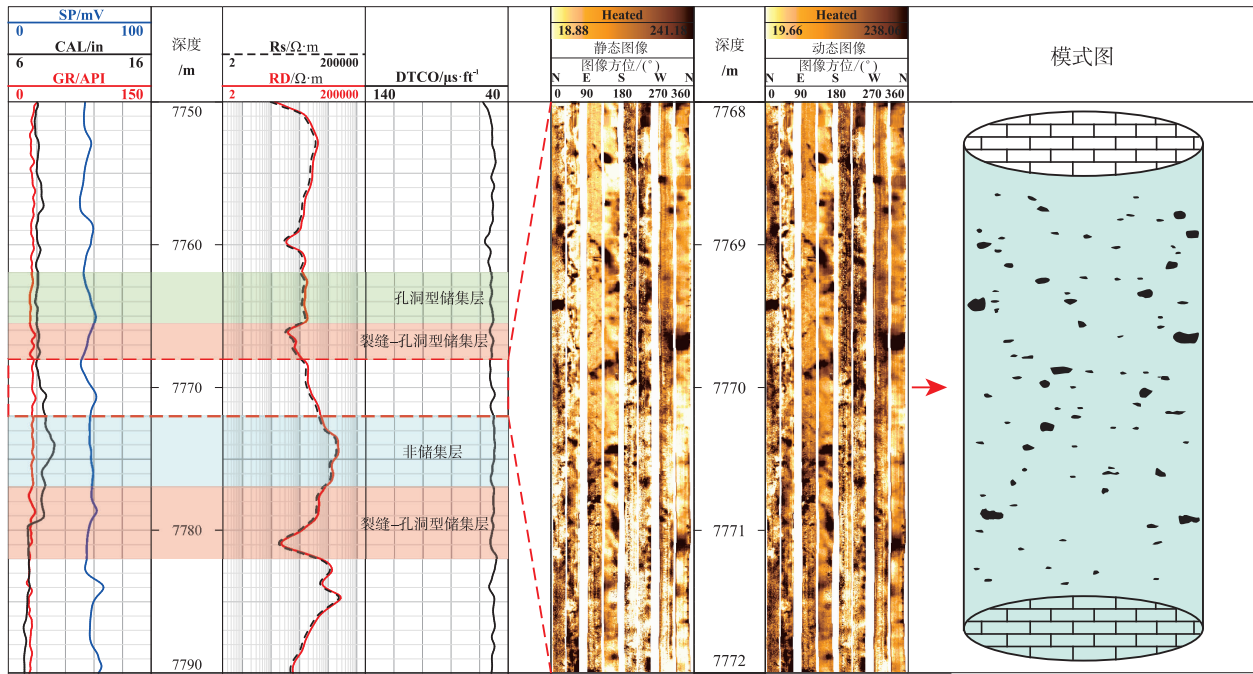


图 7 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩孔洞型储集层测井响应特征图版

Fig. 7 Logging response characteristic pattern of carbonate vug reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

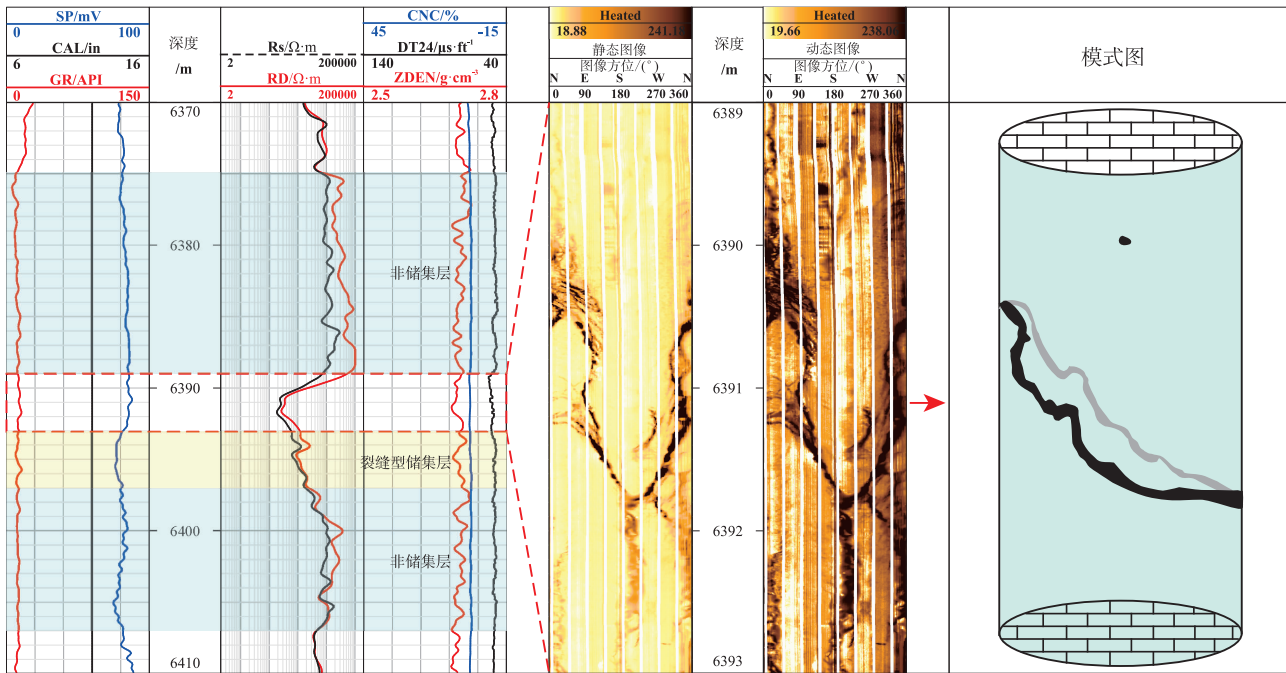


图 8 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩裂缝型储集层测井响应特征图版

Fig. 8 Logging response characteristic pattern of carbonate fracture reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

在两侧产生的复杂应力场，诱发大量裂缝切割围岩，从而形成破碎带（Caine *et al.*, 1996；贾茹等，2017）。因此，受走滑断裂“核一带”二元结构控

制，裂缝型储集层主要位于断层核两侧的破碎带（江同文等，2024）。与围岩相比，裂缝发育的部位，储集层孔隙度与渗透率明显提高，常规测井响

应特征表现为深浅电阻率测井值降低并且出现分离，密度测井值降低，声波时差测井值增大；成像测井动态图像与静态图像表现为暗色正弦曲线的高导特征。常规测井与成像测井相结合，可较好地拾取裂缝发育带。

### 3.3 裂缝—孔洞型储集层

裂缝—孔洞型储集层表现为孔洞和裂缝均发育，其中以次生溶蚀孔隙为主，裂缝其次，次生溶蚀孔隙是主要的储集空间，裂缝作为储集空间的同时也是渗流通道，裂缝—孔洞储集层是富满地区常见的一种储集层类型(图 9)。裂缝受后期溶蚀作用影响，多表现出溶蚀扩大现象，孔洞可分为与裂缝伴生的溶蚀孔洞以及裂缝周围岩石溶蚀形成的溶蚀孔洞。常规测井表现为自然伽马曲线值与围岩相差不大，深浅电阻率曲线值降低，声波时差曲线值增大；成像测井表现为动静态图像亮色背景下暗色正弦曲线与杂乱的暗色斑状同时出现，暗色正弦曲线可叠加暗色斑状宽度增大。

### 3.4 洞穴型储集层

洞穴型储集层表现为形态不规则、高度直径大于 0.5 m 的孔隙空间 (李阳等, 2016)，其是构造

作用和岩溶作用的产物 (Bagni *et al.*, 2022)，对产能的贡献最大。地层受构造运动影响发育断裂，断层滑动面产状变化致使地层发生垮塌可形成洞穴型储集层 (江同文等, 2024)。此外，大气淡水或深部热液流体沿断裂对碳酸盐岩进行溶蚀也可以形成洞穴型储集层，同时可扩大断裂作用形成洞穴的规模，一般情况下，溶蚀作用时间越长，形成大型洞穴的可能性越大。较大型的洞穴在钻井过程中会出现钻具放空和钻井液漏失等现象，钻时极低，取上来的岩心多呈破碎状。常规测井表现为深浅电阻率曲线值急剧降低，声波时差曲线值明显增大；成像测井表现为径向深和超深探测深度的图像上为高导特征的暗色层状，与围岩差异明显，并且顶、底界面不规则(图 10)。

## 4 利用基于成像测井的孔洞缝剥离技术识别划分储集层

富满地区埋藏深度大，构造应力强，取心破碎，无法连续全面反映出裂缝和洞穴等储集层的发育及分布特征，而成像测井可以很直观地反映地下孔洞型和裂缝型等不同类型储集层的发育情况 (Lai *et al.*, 2019)。因此，基于成像测井资料更直

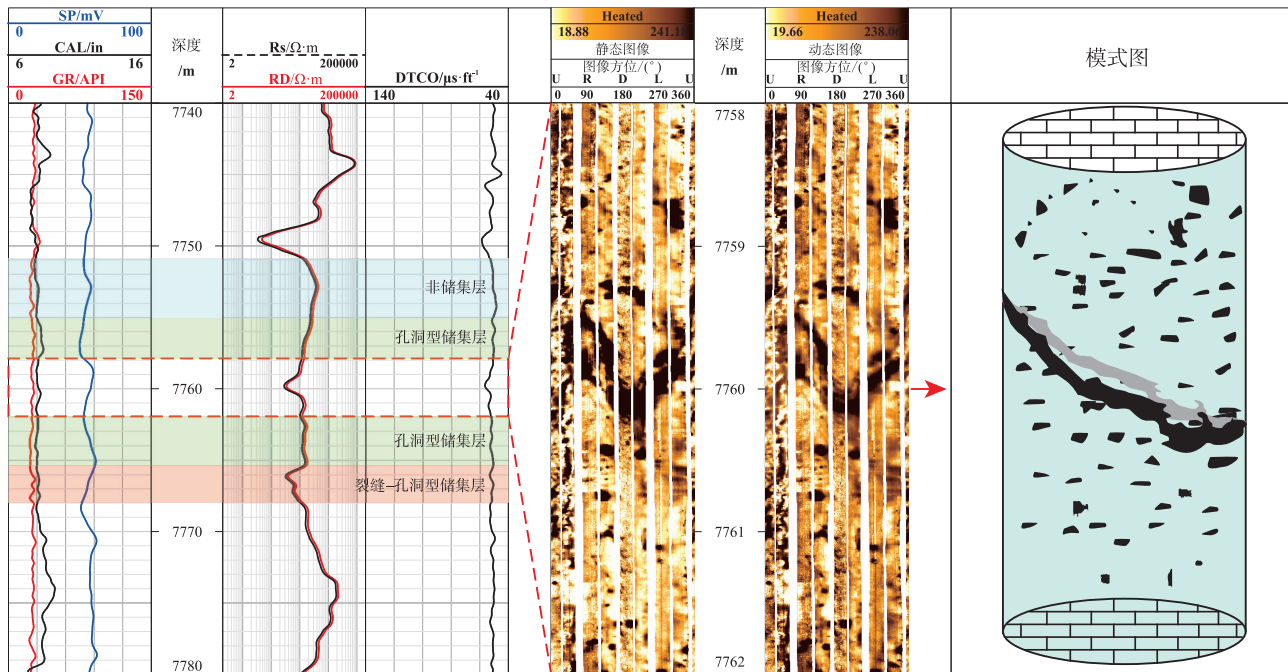


图 9 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩裂缝—孔洞型储集层测井响应特征图版

Fig. 9 Logging response characteristic pattern of carbonate fracture-vug reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

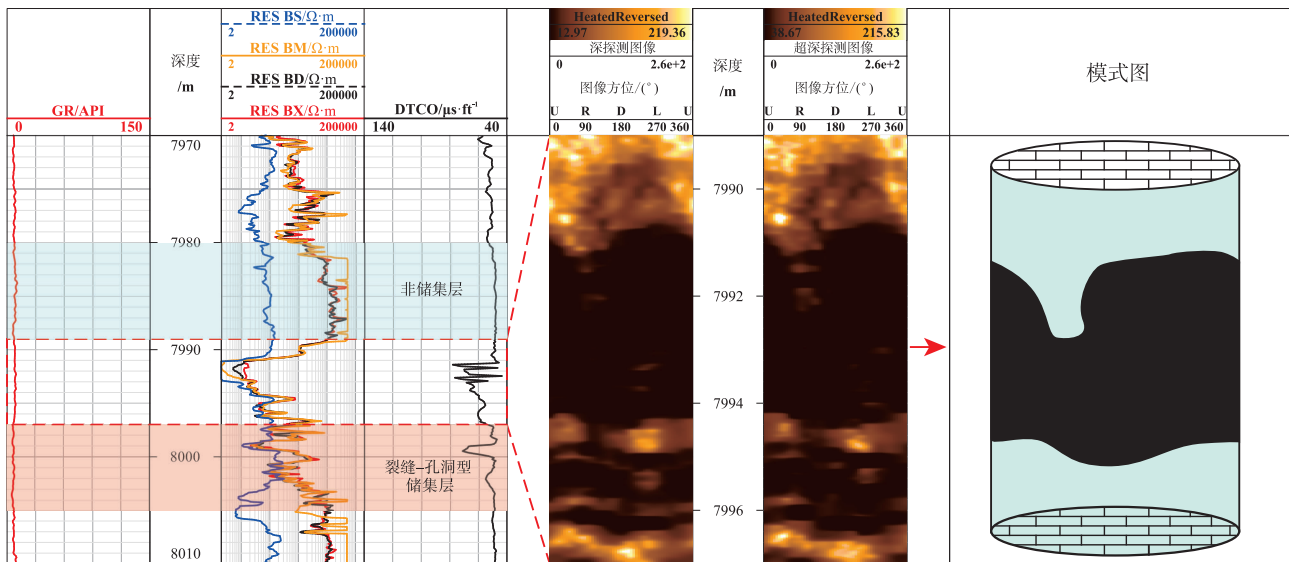


图 10 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩洞穴型储集层测井响应特征图版

Fig. 10 Logging response characteristic pattern of carbonate cave reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

观、纵向分辨率高和连续性强等优点，结合建立的不同类型储集层“常规+成像+模式图”的图版，利用成像测井孔洞缝剥离技术实现单井纵向上不同类型储集层的识别划分，以弥补研究区取心资料不足、无法实现单井不同类型储集层连续刻度的缺点。

#### 4.1 孔洞缝剥离技术流程

孔洞缝剥离技术主要是基于 Techlog 软件中的 Poro Tex 模块完成，处理流程主要包括 6 大部分，分别为：图像处理及刻度、层理和裂缝拾取、全井眼图像生成、基质提取、非均质性解释和孔隙度分类计算 (Yamada *et al.*, 2013)。首先通过深度校正、加速度校正、数据归一化等步骤对测得极板图像进行预处理，再利用浅电阻率刻度极板图像从而得到井壁的电导率图，之后在经过动静态平衡处理，可得到动静态图像 (赖锦等, 2024)。以动静态图像为主体，辅以常规测井响应特征进行单井裂缝拾取，为后面的非均质性解释及孔隙度分类计算奠定基础。

电缆微电阻率扫描成像测井仪通常由多个极板组成，每个极板上装有多组纽扣电极，不同系列的成像仪器极板与纽扣电极数量存在差异 (王珺等, 2005)，但都无法避免极板之间存在空隙，导致采集的图像无法实现井眼 100% 覆盖。Filtersim

是一种多点统计 (MPS) 算法，可以用来模拟离散和连续变量的训练图像，再对训练图像进行分类。使用滤波器分数，实现极板图像之间的间隙填充，生成全井壁图像 (Zhang *et al.*, 2006; Hurley and Zhang, 2011)。相较于微电阻率扫描成像测井仪，斯伦贝谢第三代 Microscope & Microscope HD 随钻高分辨电阻率成像测井仪提供 4 个探测深度 (浅、中、深及超深) 的侧向电阻率和井眼成像图，当地层真实电阻率和冲洗带电阻率比值为 10 的情况下，径向探测深度 (浅、中、深及超深) 大约是 2.5 cm、7.6 cm、13.0 cm 和 15.0 cm，128 扇区成像纵向分辨率达 10 mm (王邦伟等, 2017; 王延文和叶海超, 2024)，钻进时测井仪随着钻具在井下旋转，将井眼周围地层全覆盖的电阻率成像图实时传送至地面，不存在极板图像出现间隙的问题，因此可以省略全井眼图像生成步骤 (夏竹君等, 2019)。基质提取是利用灰度重构变换的方法，通过去除孔洞、裂缝等非交叉特征来实现的 (Vincent, 1993)，保留全井壁图像的背景，得到基质电导率图像。非均质性解释主要是利用分水岭变换进行图像分割，将原始图像处理为马赛克图像。通过进一步迭代分割，生成可以反映电导率变化的梯度图像。通过电导率、电阻率交会图与马赛克图像的交互式分析 (分为手动与自动分析 2 种)，选取合适的截止值以区分高导和高阻部分

(图 11)。缝洞处的电导率最高, 再结合先前拾取的裂缝以及马赛克块的连通情况, 将其细分为孤立、连通和裂缝 3 个部分 (Yamada *et al.*, 2013), 并可以得到相应的面孔率参数, 为了避免诱导缝、井壁崩落的影响, 可通过人机交互进行假象去除。孔隙度分类计算是基于常规或者核磁等计算的孔隙度作为约束, 结合非均质性解释步骤中的分类对孔隙度进行计算。

## 4.2 利用孔洞缝剥离技术划分储集层

利用孔洞缝剥离技术可以将 4 类储集层类型的成像特征更直观得表示出来(图 12), 孔洞型储集层在非均质性解释道表现为绿色孤立孔洞或者红色连通孔洞斑点状分布, 无橙色裂缝发育, 面孔率曲线幅度较低, 值较小(图 12-A)。裂缝型储集层表现为橙色裂缝部分呈完整或者断续的正弦曲线, 偶见或未见暗色斑状溶蚀孔洞, 同时裂缝受流体溶蚀影响较弱, 溶蚀扩大不强烈, 面孔率主要为裂缝贡献。高角度裂缝表现为低幅度且连续的面孔率曲线(图 12-B), 低角度裂缝表现为高幅度细长的尖峰状, 可包含极少低幅度的绿色或者红色孔洞部分(图 13), 同时, 受裂缝张开度的影响, 张开度小也会使面孔率曲线幅度较小, 如图 13 中 8003 m 处裂缝型储集层所示。裂缝—孔洞型储集层表现为红色或绿色斑状与橙色正弦状裂缝同时发育, 并且裂缝受溶蚀作用强烈呈溶蚀扩大现象, 面孔率曲线表现为低幅度的孤立孔洞或连通孔洞面孔率与裂缝面孔率叠加出现(图 12-C)。然而, 如果裂缝与孔洞区分性较差, 即只可见裂缝溶蚀扩大现象, 那么面孔率曲线表现为多个尖峰相连的中高幅度裂缝面孔

率(图 13)。洞穴型储集层表现为大段的绿色孤立孔洞部分或者红色连通孔洞部分, 面孔率曲线为大幅度的孤立孔洞面孔率或连通孔洞面孔率(图 12-D), 此时需要注意当出现上述识别特征时, 孤立或连通的特征不再适用, 直接将其定义为洞穴型储集层即可。

图 13 为富满地区满深 4 井一间房组的处理成果图。第 1 道为地质分层一间房组; 第 2 道为自然伽马; 第 3 道为深度; 第 4 道为纵波时差; 第 5 道为随钻电阻率, BS 至 BX 分别对应浅、中、深和超深的径向探测深度; 第 6 道为 Microscope 随钻成像图像, 并展示了拾取的高导缝; 第 7 道为非均质性解释得到的孤立孔洞(绿色)、连通孔洞(红色)和裂缝(橙色)3 部分的划分结果; 第 8 道分别为上述 3 部分的面孔率; 第 9 道为孔隙度分类计算步骤中得到的孔隙度平面分布图, 颜色越深的地方对应的孔隙度越高; 第 10 道为常规计算的孔隙度; 第 11 道为气测全烃; 第 12 道为不同类型储集层的划分结果。

根据储集层划分结果可以看出(图 13; 图 14), 裂缝—孔洞型储集层厚度占比较大, 裂缝型储集层厚度占比较小, 主要是由于一间房组曾经历构造抬升, 受大气淡水或地表水等流体溶蚀淋滤作用强烈, 裂缝多发生溶蚀扩大, 导致裂缝型储集层厚度占比较小。研究区构造应力强烈, 走滑断裂发育, 断裂破碎作用会使地层发生垮塌形成洞穴型储集层, 同时洞穴垮塌会使局部应力得到释放, 发育洞顶缝, 后期经历溶蚀形成裂缝—孔洞型储集层。不同类型储集层规模、连通性

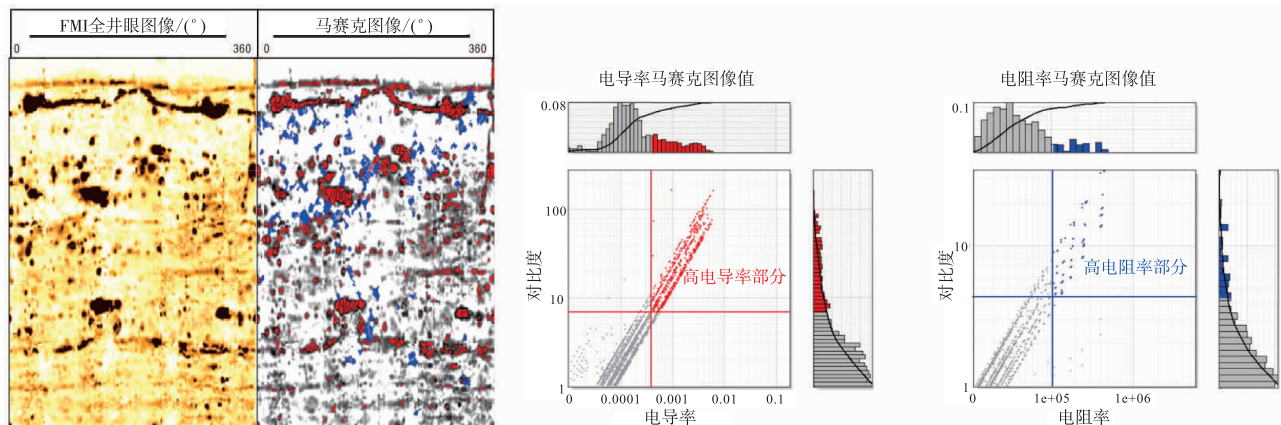


图 11 利用交会图与成像测井图像的交互式阈值选取 (据 Yamada *et al.*, 2013)

Fig. 11 Interactive threshold selection using cross-plot and image logging (after Yamada *et al.*, 2013)

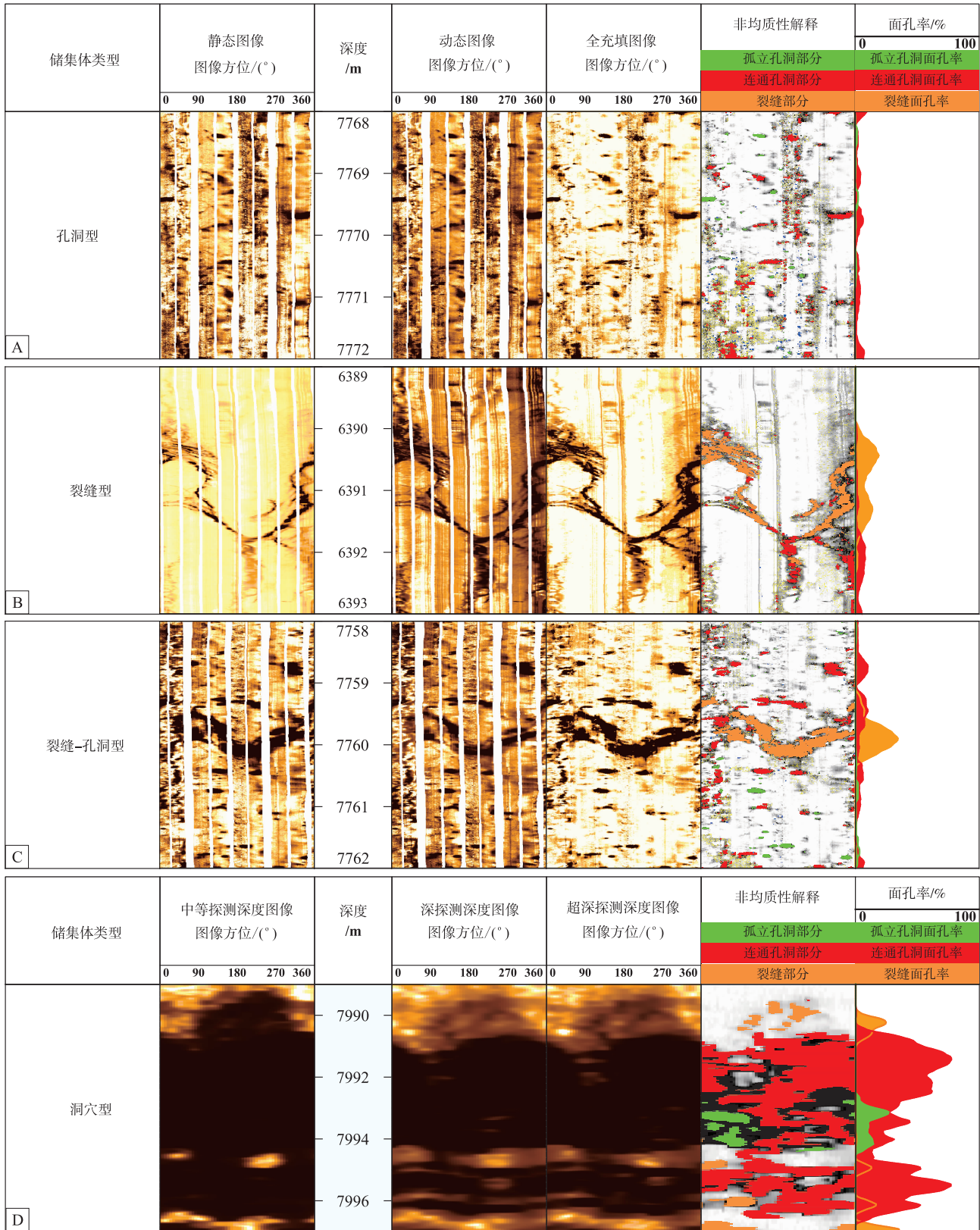


图 12 基于孔洞缝剥离技术处理的储集体类型特征

Fig. 12 Characteristics of reservoirs according to the technique of vug, cave and fracture stripping

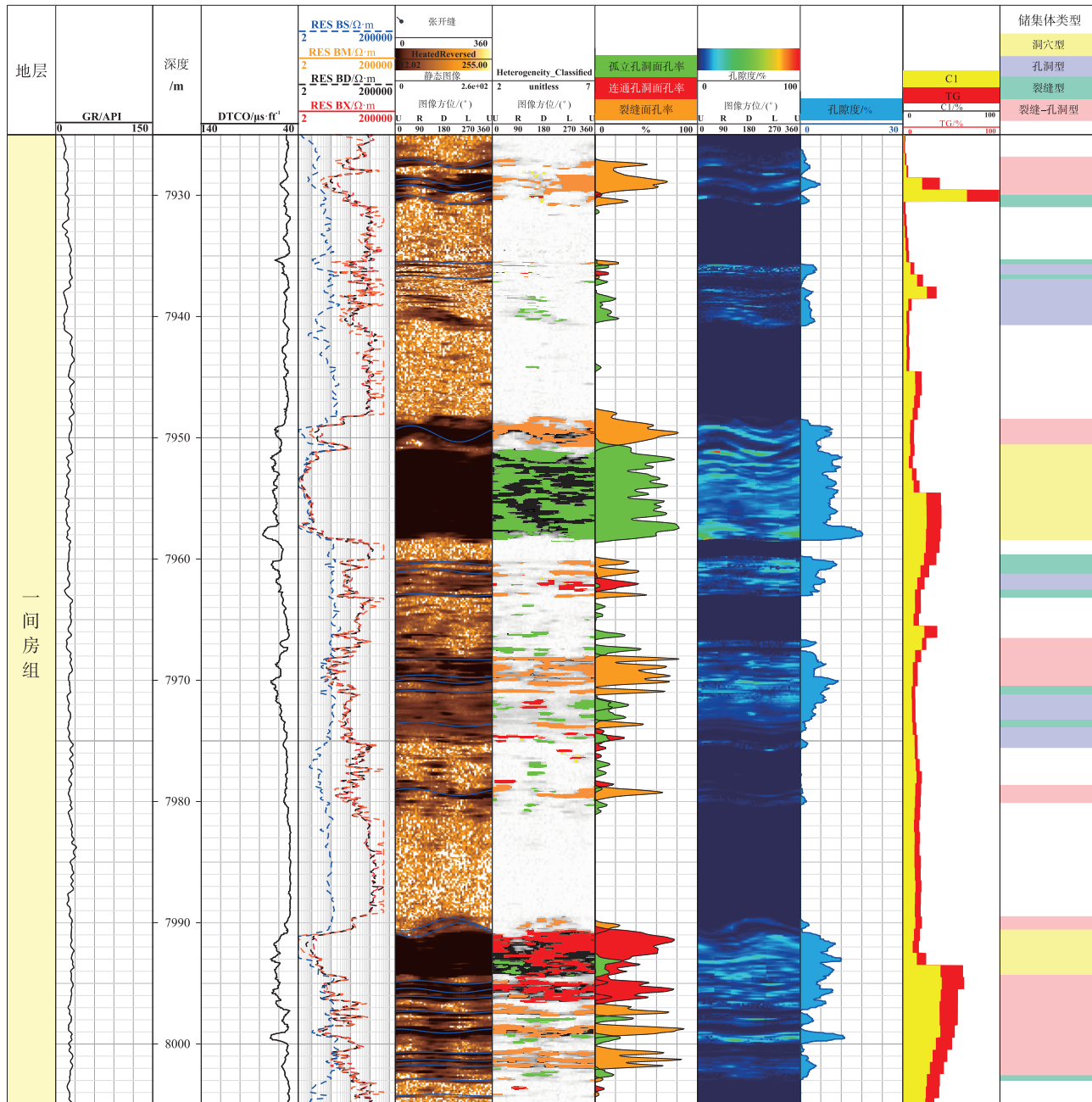


图 13 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组满深 4 井储集体类型划分

Fig. 13 Classification of Well MS4 reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

与物性均存在差异，导致其对油气的储集性也不尽相同。其中，洞穴型储集层规模大，物性好，总烃含量高，气测显示好，对油气产能起主要贡献作用。裂缝—孔洞型储集层规模与物性次之，在作为油气运移通道的同时也可以储存油气，裂缝型储集层与孔洞型储集层规模与物性相对较差，因此，洞穴型储集层是研究区优质的储集层，同时也是现阶段勘探开发的重点。

## 5 结论

1) 富满地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储集层岩性主要为亮晶内碎屑灰岩、鲕粒灰岩、生屑灰岩和泥晶灰岩，含云灰岩、云质灰岩次之，硅质岩极少；岩石结构组分中颗粒主要为内碎屑和生屑，晶粒主要为泥晶、粉晶，胶结物主要为方解石。储集空间可分为孔隙、裂缝和溶蚀孔洞 3 个部分，其

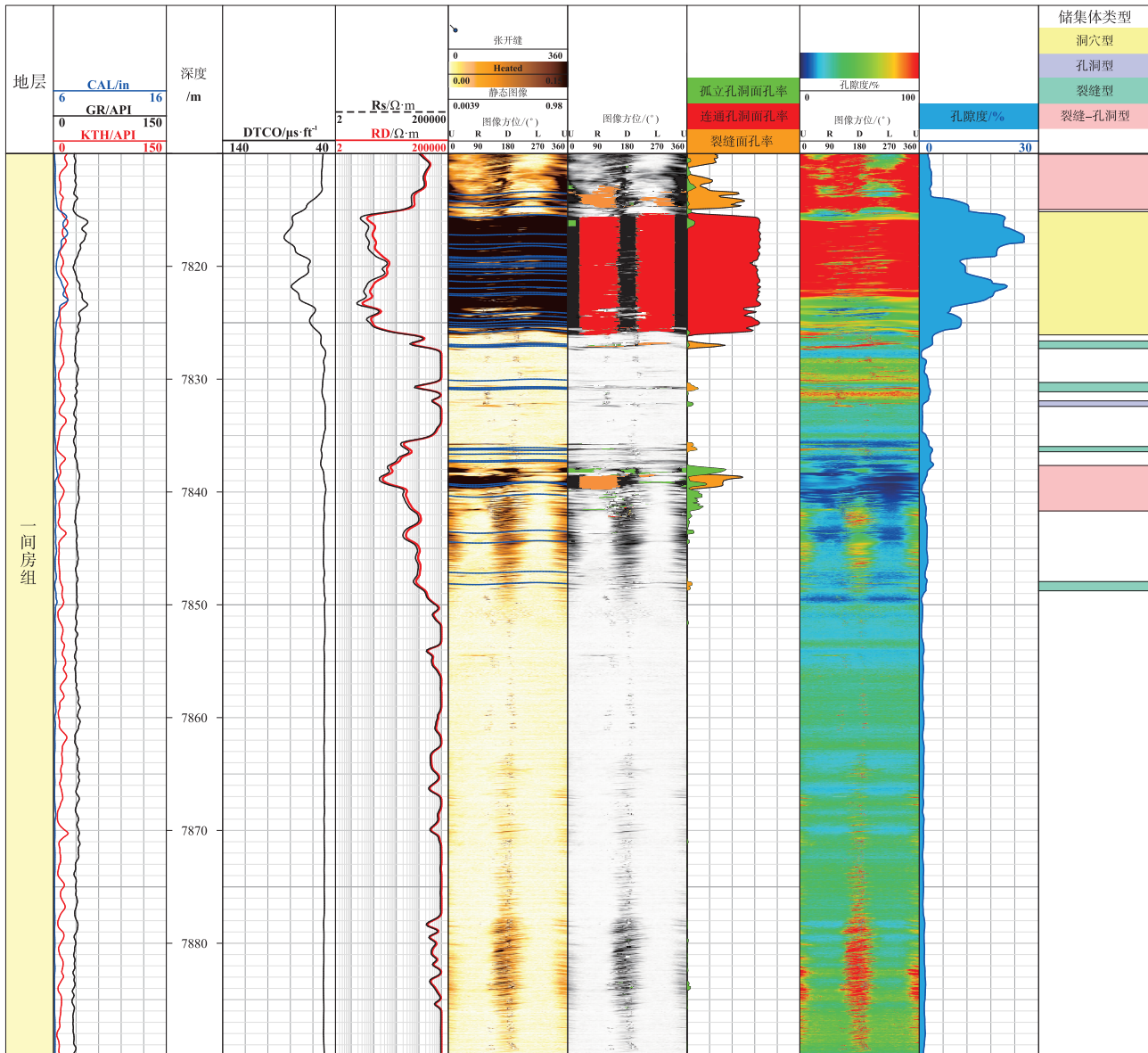


图 14 塔里木盆地富满地区奥陶系一间房组单井储集体类型划分

Fig. 14 Classification of single-well reservoir of the Ordovician Yijianfang Formation in Fuman area, Tarim Basin

中，裂缝和溶蚀孔洞为主要的油气储集空间。

2) 富满地区超深层断控碳酸盐岩不同储集层类型具有不同的测井相应特征，常规测井总体表现为密度测井值降低，声波时差和中子测井值增大，深浅侧向电阻率曲线大幅或同步缩小但成像测井差异明显，孔洞型储集层具有暗色斑状特征，裂缝型储集层具有暗色正弦曲线的高导特征，裂缝—孔洞型储集层同时具有暗色正弦曲线与杂乱的暗色斑状，洞穴型储集层具有与围岩差异明显的暗色层状高导特征。

3) 利用基于成像测井的孔洞缝剥离技术可快速实现单井储集层类型的识别和划分。洞穴型储集层规模大，物性好，对油气产能起主要贡献作用，裂缝—孔洞型储集层规模与物性次之，在作为油气运移通道的同时也可以储存油气，裂缝型储集层与孔洞型储集层规模与物性相对较差。

参考文献 (References)

邓兴梁, 闫婷, 张银涛, 万效国, 冯凯, 袁安意, 姚超, 肖春艳. 2021. 走滑断裂断控碳酸盐岩油气藏的特征与井位部署思路: 以塔里木盆地为例. 天然气工业, 41(3): 21-29. [Deng X L, Yan T,

- Zhang Y T, Wang X G, Feng K, Yuan A Y, Yao C, Xiao C Y. 2021. Characteristics and well location deployment ideas of strike-slip fault controlled carbonate oil and gas reservoirs: a case study of the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(3): 21-29]
- 杜仲元, 李相文, 李青霖, 孙冲, 李默涵, 张冠卿, 但光箭. 2024. 不同序级走滑断裂对碳酸盐岩储集层发育的控制差异. *新疆石油地质*, 45(4): 425-431. [Du Z Y, Li X W, Li Q L, Sun C, Li M H, Zhang G Q, Dan G J. 2024. Differential controls of strike-slip faults of different orders on carbonate reservoirs. *Xinjiang Petroleum Geology*, 45(4): 425-431]
- 韩剑发, 孙冲, 朱光有, 张银涛, 李国会, 侯佳凯, 李浩, 丁志文. 2024. 超深断控碳酸盐岩油藏空间结构表征技术与工程实践. *中国工程科学*, 26(2): 255-268. [Han J F, Sun C, Zhu G Y, Zhang Y T, Li G H, Hou J K, Li H, Ding Z W. 2024. Spatial structure characterization technology and engineering practice of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoir. *Strategic Study of China Academic Journal*, 26(2): 255-268]
- 贾茹, 付晓飞, 孟令东, 巩磊, 刘志达. 2017. 断裂及其伴生微构造对不同层储层的改造机理. *石油学报*, 38(3): 286-296. [Jia R, Fu X F, Meng L D, Gong L, Liu Z D. 2017. Transformation mechanism of fault and its associated microstructures for different kinds of reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 38(3): 286-296]
- 江同文, 邓兴梁, 曹鹏, 常少英. 2024. 塔里木盆地富满断控破碎体油藏储集类型特征与注水替油效果. *石油与天然气地质*, 45(2): 542-552. [Jiang T W, Deng X L, Cao P, Chang S Y. 2024. Storage space types and water-flooding efficiency for fault-controlled fractured oil reservoirs in Fuman Oilfield, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(2): 542-552]
- 焦方正. 2018. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景. *石油与天然气地质*, 39(2): 207-216. [Jiao F Z. 2018. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(2): 207-216]
- 金之钧, 朱东亚, 胡文瑛, 张学丰, 王毅, 闫相宾. 2006. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响. *地质学报*, 80(2): 245-253, 314. [Jin Z Y, Zhu D Y, Hu W X, Zhang X F, Wang Y, Yan X B. 2006. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 245-253, 314]
- 赖锦, 包萌, 刘士琛, 李栋, 王松, 杨科夫, 陈旭, 王贵文, 丁修建. 2021. 塔里木盆地深层、超深层白云岩优质储集层测井预测. *古地理学报*, 23(6): 1225-1242. [Lai J, Bao M, Liu S C, Li D, Wang S, Yang K F, Chen X, Wang G W, Ding X J. 2021. Prediction of high quality deep and ultra-deep dolostones reservoirs in Tarim Basin by well logs. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(6): 1225-1242]
- 赖锦, 肖露, 白天宇, 范旗轩, 黄玉越, 李红斌, 赵飞, 王贵文. 2024. 成像测井解释评价方法及其地质应用. *地质科技通报*, 43(3): 323-340. [Lai J, Xiao L, Bai T Y, Fan Q X, Huang Y Y, Li H B, Zhao F, Wang G W. 2024. Interpretation and evaluation methods of image logs and their geological application. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(3): 323-340]
- 李阳, 侯加根, 李永强. 2016. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模. *石油勘探与开发*, 43(4): 600-606. [Li Y, Hou J G, Li Y Q. 2016. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4): 600-606]
- 李阳, 薛兆杰, 程喆, 蒋海军, 王濡岳. 2020. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向. *中国石油勘探*, 25(1): 45-57. [Li Y, Xue Z J, Cheng Z, Jiang H J, Wang R Y. 2020. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China. *China Petroleum Exploration*, 25(1): 45-57]
- 刘雨晴, 邓尚. 2022. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析: 以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例. *中国矿业大学学报*, 51(1): 124-136. [Liu Y Q, Deng S. 2022. Structural analysis of intraplate strike-slip faults with small to medium displacement: a case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(1): 124-136]
- 刘忠宝, 高波, 胡宗全, 杜伟, 聂海宽, 姜涛. 2017. 高演化富有机质页岩储层特征及孔隙形成演化: 以黔南地区下寒武统9门冲组为例. *石油学报*, 38(12): 1381-1389. [Liu Z B, Gao B, Hu Z Q, Du W, Nie H K, Jiang T. 2017. Reservoir characteristics and pores formation and evolution of high matured organic rich shale: a case study of Lower Cambrian Jiumenchong Formation, southern Guizhou area. *Acta Petrolei Sinica*, 38(12): 1381-1389]
- 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 李新华, 李涛, 吕艳萍, 何新明, 杨德彬. 2015. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践. *石油与天然气地质*, 36(3): 347-355. [Lu X B, Hu W G, Wang Y, Li X H, Li T, Lu Y P, He X M, Yang D B. 2015. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 347-355]
- 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 徐旭辉, 胡东风, 曲寿利, 李根生, 何登发, 肖贤明, 曾义金, 饶莹. 2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题. *石油与天然气地质*, 41(4): 655-672, 683. [Ma Y S, Li M W, Cai Y X, Xu X H, Hu D F, Qu S L, Li G S, He D F, Xiao X M, Zeng Y J, Rao Y. 2020. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 655-672, 683]
- 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 朱东亚, 张军涛, 杨敏, 段金宝, 邓尚, 尤东华, 武重阳, 陈森然. 2023. 深层—超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向. *地学前缘*, 30(6): 1-13. [Ma Y S, Cai X Y, Li H L, Zhu D Y, Zhang J T, Yang M, Duan J B, Deng S, You D H, Wu C Y, Chen S R. 2023. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata. *Earth Science Frontier*, 30(6): 1-13]
- 宋兴国, 陈石, 谢舟, 康鹏飞, 李婷, 杨明慧, 梁鑫鑫, 彭梓俊, 史绪凯. 2023. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏. *石油与天然气地质*, 44(2): 335-349. [Song X G, Chen S, Xie

- Z, Kang P F, Li T, Yang M H, Liang X X, Peng Z J, Shi X K. 2023. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman Oilfield, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(2): 335-349]
- 田军,王清华,杨海军,李勇. 2021a. 塔里木盆地油气勘探历程与启示. *新疆石油地质*, 42(3): 272-282. [Tian J, Wang Q H, Yang H J, Li Y. 2021a. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(3): 272-282]
- 田军,杨海军,朱永峰,邓兴梁,谢舟,张银涛,李世银,蔡泉,张艳秋,黄腊梅. 2021b. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术. *石油学报*, 42(8): 971-985. [Tian J, Yang H J, Zhu Y F, Deng X L, Xie Z, Zhang Y T, Li S Y, Cai Q, Zhang Y Q, Huang L M. 2021b. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(8): 971-985]
- 王邦伟,张树东,吉人,赖剑. 2017. 高分辨率随钻电阻率成像测井在四川盆地碳酸盐岩储层的应用. *测井技术*, 41(3): 358-363. [Wang B W, Zhang S D, Ji R, Lai J. 2017. Application of micro-scope high resolution LWD resistivity in carbonate reservoirs in Sichuan Basin. *Well Logging Technology*, 41(3): 358-363]
- 王珺,杨长春,许大华,迟秀荣,谭茂金. 2005. 微电阻率扫描成像测井方法应用及发展前景. *地球物理学进展*, 20(2): 357-364. [Wang J, Yang C C, Xu D H, Chi X R, Tan M J. 2005. Application and prospect of the formation microresistivity image well logging. *Progress in Geophysics*, 20(2): 357-364]
- 王清华,杨海军,汪如军,李世银,邓兴梁,李勇,昌伦杰,万效国,张银涛. 2021. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新. *中国石油勘探*, 26(4): 58-71. [Wang Q H, Yang H J, Wang R J, Li S Y, Deng X L, Li Y, Chang L J, Wan X G, Zhang Y T. 2021. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 58-71]
- 王清华,杨海军,李勇,吕修祥,张银涛,张艳秋,孙冲,欧阳思琪. 2022. 塔里木盆地富满大型碳酸盐岩油气聚集区走滑断裂控储模式. *地学前缘*, 29(6): 239-251. [Wang Q H, Yang H J, Li Y, Lü X X, Zhang Y T, Zhang Y Q, Sun C, Ouyang S Q. 2022. Control of strike-slip fault on the large carbonate reservoir in Fuman, Tarim Basin: a reservoir model. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 239-251]
- 王清华,杨海军,张银涛,李勇,杨宪彰,朱永峰,韩剑发,谢舟. 2023. 塔里木盆地富满油田富东1井奥陶系重大发现及意义. *中国石油勘探*, 28(1): 47-58. [Wang Q H, Yang H J, Zhang Y T, Li Y, Yang X Z, Zhu Y F, Han J F, Xie Z. 2023. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(1): 47-58]
- 王延文,叶海超. 2024. 随钻测控技术现状及发展趋势. *石油钻探技术*, 52(1): 122-129. [Wang Y W, Ye H C. 2024. Current status and development trend of measurement & control while drilling technology. *Petroleum Drilling Techniques*, 52(1): 122-129]
- 夏竹君,张兰江,张贺举,杨坚,付琛. 2019. MicroScope 高分辨率成像测井技术及应用. *海洋石油*, 39(1): 54-60. [Xia Z J, Zhang L J, Zhang H J, Yang J, Fu C. 2019. Application of MicroScope high resolution imaging logging technology. *Offshore Oil*, 39(1): 54-60]
- 张宁宁,何登发,孙衍鹏,李浩武. 2014. 全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素. *中国石油勘探*, 19(6): 54-65. [Zhang N N, He D F, Sun Y P, Li H W. 2014. Distribution patterns and controlling factors of giant carbonate rock oil and gas fields worldwide. *China Petroleum Exploration*, 19(6): 54-65]
- 张银涛,陈石,刘强,冯光,谢舟,梁鑫鑫,李婷,宋兴国,康鹏飞,彭梓俊. 2023. 塔里木盆地富满油田 F\_I 19 断裂发育特征及演化模式. *现代地质*, 37(2): 283-295. [Zhang Y T, Chen S, Liu Q, Feng G, Xie Z, Liang X X, Li T, Song X G, Kang P F, Peng Z J. 2023. Development characteristics and evolution model of F\_I 19 Fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin. *Geoscience*, 37(2): 283-295]
- 朱东亚,胡文瑄,张学丰,金之钧. 2007. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征. *石油学报*, 28(5): 57-62. [Zhu D Y, Hu W X, Zhang X F, Jin Z J. 2007. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe Oilfield. *Acta Petrolei Sinica*, 28(5): 57-62]
- 赵文智,沈安江,潘文庆,张宝民,乔占峰,郑剑锋. 2013. 碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义:以塔里木盆地岩溶储层为例. *岩石学报*, 29(9): 3213-3222. [Zhao W Z, Shen A J, Pan W Q, Zhang B M, Qiao Z F, Zheng J F. 2013. A research on carbonate karst reservoirs classification and its implication on hydrocarbon exploration: cases studies from Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3213-3222]
- 赵文智,沈安江,胡安平,周进高,倪新锋. 2015. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探. *岩石学报*, 31(11): 3495-3508. [Zhao W Z, Shen A J, Hu A P, Zhou J G, Ni X F. 2015. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3495-3508]
- Bagni F L, Erthal M M, Tonietto S N, Maia R P, Bezerra F H, Balsamo F, Córdoba V C, de Souza F G, Brod J A, Fernandes C P, Fonseca J P T. 2022. Karstified layers and caves formed by superposed epigenetic dissolution along subaerial unconformities in carbonate rocks: impact on reservoir-scale permeability. *Marine and Petroleum Geology*, 138: 105523.
- Caine J S, Evans J P, Forster C B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11): 1025.
- Deng S, Zhao R, Kong Q, Li Y, Li B. 2022. Two distinct strike-slip fault networks in the Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin: hydrocarbon accumulation, distribution, and controlling factors. *AAPG Bulletin*, 106(1): 77-102.
- Ding Z, Wang R, Chen F, Yang J, Zhu Z, Yang Z, Sun X, Xian B, Li E, Shi T, Zuo C, Li Y. 2020. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-

- gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: a case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang oil-field, Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 306–317.
- Ehrenberg S N. 2022. The etiology of carbonate porosity. *AAPG Bulletin*, 106(12): 2351–2386.
- Graham B, Antonellini M, Aydin A. 2003. Formation and growth of normal faults in carbonates within a compressive environment. *Geology*, 31(1): 11.
- Hu X, Zheng W, Zhao X, Niu B. 2023. Quantitative characterization of deep fault-karst carbonate reservoirs: a case study of the Yuejin block in the Tahe oilfield. *Energy Geoscience*, 4(3): 100153.
- Hurley N F, Zhang T. 2011. Method to generate full-bore images using borehole images and multipoint statistics. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 14(2): 204–214.
- Kristiansen K, Valtiner M, Greene G W, Boles J R, Israelachvili J N. 2011. Pressure solution: the importance of the electrochemical surface potentials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(22): 6882–6892.
- Lai J, Pang X, Xiao Q, Shi Y, Zhang H, Zhao T, Chen J, Wang G, Qin Z. 2019. Prediction of reservoir quality in carbonates via porosity spectrum from image logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173: 197–208.
- Laubach S E, Lander R H, Criscenti L J, Anovitz L M, Urai J L, Pollyea R M, Hooker J N, Narr W, Evans M A, Kerisit S N, Olson J E, Dewers T, Fisher D, Bodnar R, Evans B, Dove P, Bonnell L M, Marder M P, Pyrak-Nolte L. 2019. The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 1065–1111.
- Li F, Lin C, Ren L, Zhang G, Zhang Y, Guan B. 2024. Fault system dynamics and their impact on ordovician carbonate karst reservoirs: outcrop analogs and 3D seismic analysis in the Tabei Region, Tarim Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 167: 106923.
- Li Y, Sun J, Wei H, Song S. 2019. Architectural features of fault-controlled karst reservoirs in the Tahe oilfield. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181: 106208.
- Lu X, Wang Y, Tian F, Li X, Yang D, L Tao, Lu Y P, He X. 2017. New insights into the carbonate karstic fault system and reservoir formation in the southern Tahe area of the Tarim Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 587–605.
- Lu Z, Ping H, Chen H, Chen Z, Zhang Y Q, Xie Z, Zhang Y T, Chen X. 2024. Characteristics of carbazole compounds in ultra-deep marine oil from Fuman oilfield, Tarim Basin: significance for thermal maturity assessment of crude oil. *Organic Geochemistry*, 198: 104895.
- Qiao Z, Shen A, Zhang S, Hu A, Liang F, Luo X, Shao G, Wang Y, Zhao J, Cao P, Jiang L. 2023. Origin of giant Ordovician cavern reservoirs in the Halahatang oil field in the Tarim Basin, northwestern China. *AAPG Bulletin*, 107(7): 1105–1135.
- Ramadhan A, Samudra A B, Jaenudin, Lestari E P, Saputro J, Sugiono H, Rosiadi Y, Amrullah I. 2018. Strike-slip fault deformation and its control in hydrocarbon trapping in Ketaling Area, Jambi Subbasin, Indonesia. *Earth and Environmental Science*, 132(1): 012025.
- Shen A, Hu A, Qiao Z, Zheng J, She M, Pan L. 2024. Development and preservation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoirs. *Science China Earth Sciences*, 67(11): 3367–3385.
- Sun Q, Fan T, Gao Z, Wu J, Zhang H, Jiang Q, Liu N, Yuan Y. 2021. New insights on the geometry and kinematics of the Shunbei 5 strike-slip fault in the central Tarim Basin. *Journal of Structural Geology*, 150: 104400.
- Vincent L. 1993. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2(2): 176–201.
- Wang S, Wang G, Lai J, Li D, Liu S, Chen X, Yang K, Song L. 2020. Logging identification and evaluation of vertical zonation of buried hill in cambrian dolomite reservoir: a study of Yingmai-Yaha buried hill structural belt, northern Tarim Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107758.
- Wang S, Liu H, Deng X, Zhu Y, Zhang Y, Zhao S, Su Y. 2023. Genetic mechanism of multiphase states of ordovician oil and gas reservoirs in fuman oilfield, Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 157: 106449.
- Yamada T, Quesada D, Etchecopar A, Nir I L, Russel-Houston J, Perdana T S P. 2013. Revisiting porosity analysis from electrical borehole images: integration of advanced texture and porosity analysis. *SPWLA Annual Logging Symposium, SPWLA-2013-E*.
- Zeng L, Shi J, Ma Q, Lyu W, Dong S, Cao D, Wei H. 2024. Strike-slip fault control on karst in ultra-deep carbonates, Tarim Basin, China. *AAPG Bulletin*, 108(2): 235–260.
- Zhang T, Switzer P, Journel A. 2006. Filter-based classification of training image patterns for spatial simulation. *Mathematical Geology*, 38(1): 63–80.
- Zhao X Q, Wu C D, Ma B S, Li F, Xue X H, Lu C C, Cai Q. 2023. Characteristics and genetic mechanisms of fault-controlled ultra-deep carbonate reservoirs: a case study of Ordovician reservoirs in the Tabei paleo-uplift, Tarim Basin, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 254: 105745.

(责任编辑 郑秀娟)