

四川盆地龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩 岩溶地层测井响应特征

杨琴琴^{1,2}, 司马立强^{1,2}, 王亮^{2,3}, 郭宇豪^{1,2}, 张浩^{1,2}, 温登峰⁴

1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 油气藏地质及开发工程国家重点实验室;
3 成都理工大学能源学院; 4 西南石油大学团委

摘要 以龙女寺构造龙王庙组碳酸盐岩岩溶地层为例,通过岩心标定成像测井,结合常规测井曲线识别岩溶地层,将龙女寺地区龙王庙组岩溶储层划分为裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型、孔隙型,并进一步研究了龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩岩溶地层的测井响应特征。结果表明:龙王庙组从风化壳顶部向下可划分为表层岩溶带、垂向渗流带和水平潜流带。表层岩溶带分布零星,厚度薄,溶洞全部被充填,测井显示为高伽马、低电阻率,电成像上见角砾状混杂堆积;垂向渗流带发育树枝状溶洞和溶缝,溶洞大部分被充填,测井显示为低伽马、较高电阻率,电成像见不规则分布的暗色斑点和正弦式的黑色条带;水平潜流带发育中—大型溶洞,溶蚀孔洞常见顺层状分布,测井显示为低伽马、低电阻率,电成像上见不规则的斑块或斑点和正弦式的黑色条带。

关键词 岩溶; 碳酸盐岩; 测井响应; 龙王庙组; 龙女寺地区; 四川盆地

中图分类号: P631.8⁴ **文献标识码:** A

0 前言

全球60%的油气资源来自于碳酸盐岩^[1],其中颗粒滩相岩溶型储层具有巨大的勘探潜力,如阿联酋Fateh油田^[2]、美国Yates油田^[3-4]、伊拉克米桑油田^[5-6]就是典型的颗粒滩相岩溶型油田。大型、特大型油气藏的发现对我国天然气工业的发展起着至关重要的作用。近年来,四川盆地中部下寒武统龙王庙组发现了国内现今为止最大的单体海相碳酸盐岩整装气藏^[7-8],使得四川盆地磨溪—高石梯地区成为国内外学者关注的天然气勘探热点,而与之相邻的龙女寺构造龙王庙组储层发育情况与磨溪—高石梯地区有较大差异。

目前,国内外学者针对四川盆地寒武系龙王庙组碳酸盐岩的研究主要集中在储层成因^[9-11]、颗粒滩特征及分布规律^[12-13]、岩溶储层主控因素和发育机制^[14-17]、储集空间类型^[18-20]、气藏地质特征^[21]及地震预测手段^[22]等方面,研究认为龙王庙

组颗粒滩相是储层形成的物质基础,储层受岩溶作用以及白云石化作用的控制,总体表现出低孔、中低渗,纵向分布稳定、横向连续性好,储量规模大的特征。但是,从测井角度针对岩溶储层的研究相对滞后。张松扬等^[23]利用自然伽马能谱测井识别碳酸盐岩风化面及其风化壳的深度和厚度;李昌等^[24]利用岩心描述结合FMI测井,建立精细解释图版,描述储层类型的纵向非均质性变化;杨柳等^[25]以成像测井为手段,研究岩溶古地貌表征和识别方法;刘兴礼等^[26]、林刚等^[27]、崔璐^[28]等以成像测井资料为基础,结合常规测井划分岩溶相带;张树东等^[29]在岩心标定的基础上,应用成像测井和常规测井资料识别裂缝类型、提取裂缝产状,根据识别结果研究岩溶裂缝的分布特征及其对储层的控制作用;吴丰等^[30]、张峰等^[31]在储层分类的基础上,结合岩溶发育模式,开展储层测井有效性评价研究。这些成果大多从某个角度利用测井资料识别部分岩溶储层。总体而言,利用测井资料

收稿日期:2021-04-27; 改回日期:2021-11-26; 网络出版日期:2022-05-17

本文受国家科技重大专项“四川盆地大型碳酸盐岩气田开发示范工程”(编号:2016ZX05052)和国家自然科学基金项目“热液作用下的深部含铀油蚀变砂岩地球物理响应及铀油兼探方法”(编号:U2003102)联合资助

第一作者: 杨琴琴,西南石油大学研究生在读,研究领域为油气测井方法、解释及地质应用。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号; E-mail: yqinqin8@163.com

通信作者: 王亮,博士,教授,主要从事油气测井方法、解释及地质应用方面的科研与教学工作。通信地址:610059 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号; E-mail: wangliang_swpu@163.com

龙王庙组经历多期成岩作用,主要有准同生期、表生期、埋藏期岩溶作用^[35]。龙王庙组储层中的基质微孔和针状溶孔与准同生期岩溶作用密切相关。大规模的溶蚀孔洞与表生期风化壳岩溶作用相关,尤其是顺层岩溶作用发生后,形成了大量以溶洞、溶孔和裂缝为主的储集空间,其中溶蚀孔洞是龙女寺地区龙王庙组白云岩储层重要的储集空间类型,大多呈顺层状,常见白云石、沥青充填或半充填,局部见自形的自生石英晶体部分充填,同时偶见溶渣和泥质或泥粉砂质等碎屑沉积物充填。埋藏期发生了酸性地层水对原有孔、洞、缝的再次改造,溶蚀孔洞中发育烃类充注及后期原油裂解形成的沥青残留。

2 岩溶储层的识别

2.1 岩心识别

通过对MX23井、MX39井、MX41井、MX56井、MX107井、MX207井等井的岩心资料、铸体薄片的观察,明确龙女寺地区龙王庙组表生期岩溶作用标志主要有:岩溶垮塌角砾(图2a)、高角度溶蚀缝(图2b)、近垂直溶沟(图2c)以及顺层状分布的溶蚀孔洞(图

2d)。由于碳酸盐岩中存在矿物成分、结构组分及裂缝的各向异性和成岩环境的差异性,岩溶作用始终沿易溶蚀的优势方向进行,表现出溶蚀产物的分布状态和孔洞发育分布具有明显的方向性,如:顺着水流方向形成的高角度溶蚀缝(孔洞)及近垂直溶沟(图2b,2c)和顺层状分布的溶蚀孔洞(图2d),溶蚀孔洞形态多呈长条状、椭圆状或近圆状;顺着岩相形成与层面基本平行的溶蚀孔洞(2e);顺着裂缝方向发育裂缝溶蚀扩大缝(图2f)和沿裂缝面方向排列的溶蚀孔洞。

2.2 常规测井识别

由于后期孔洞充填程度的不同,岩溶的常规测井响应特征也不同。未充填的岩溶洞穴井径扩径比较严重,但自然伽马值变化不大,孔隙度测井则呈现出“两高一低”的特征,即高声波时差、高中子、低密度,深浅双侧向电阻率降低幅度较大。白云石、沥青充填的溶蚀孔洞井径略有扩大,但自然伽马几乎不变,声波时差和中子升高,深浅侧向电阻率降低。被角砾岩或砂泥岩充填的溶蚀孔洞则表现为自然伽马明显增大,中子和声波时差相对升高,但密度降低,深浅双侧向电阻率降低。

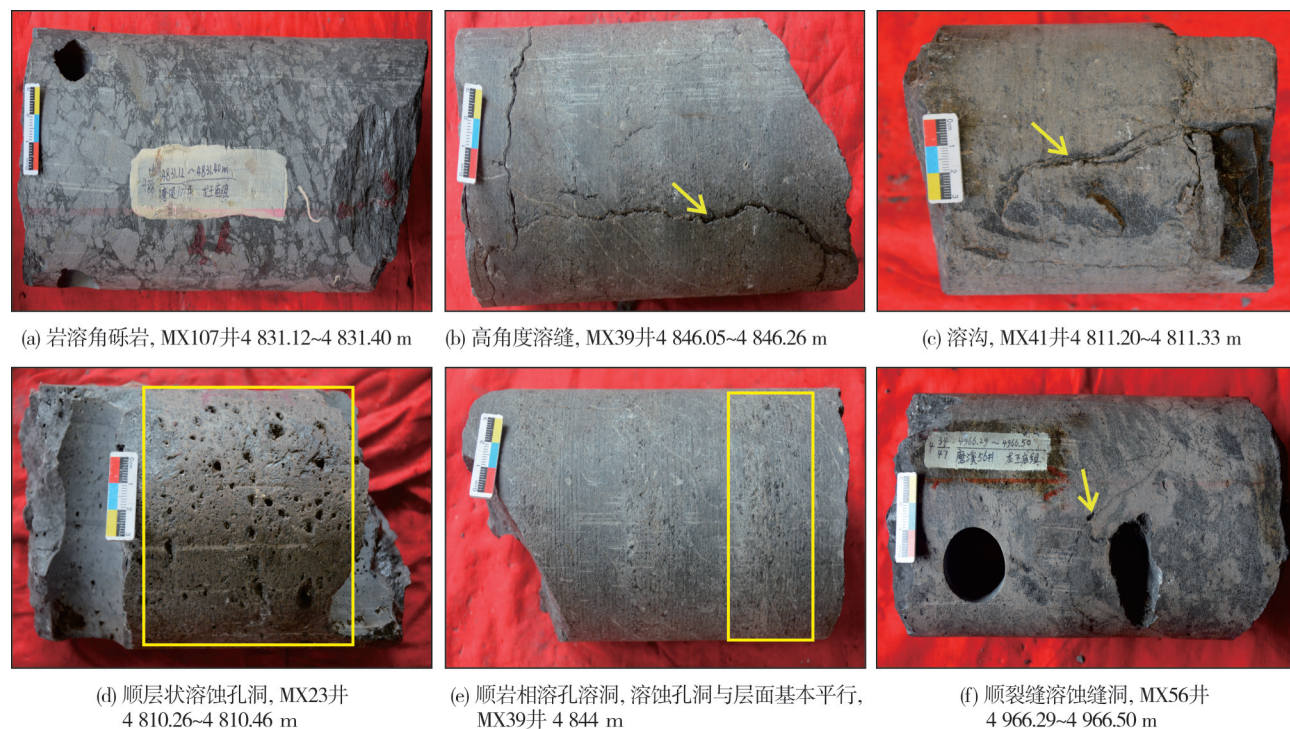


图2 四川盆地龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩岩溶作用在岩心上的特征

Fig. 2 Core characteristics of carbonate karstification of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin

2.3 成像测井识别

溶洞在电成像测井上显示为较大、不规则、零星分布的黑色团块(图3a);溶孔在电成像测井上表现为近似椭圆或黑色斑点状(图3b);裂缝则在成像测井上显示为近乎垂直或正弦曲线式的黑色条带(图3c);岩溶角砾在成像测井上显示为不规则亮色团块被暗色

包裹的特征。岩溶的方向性特征在成像测井上的显示更为明显,如:顺水流方向溶蚀可形成串珠状溶蚀孔洞(图3d)、网状分布孔洞和落水洞等井壁成像特征;顺岩相岩溶作用形成的溶蚀孔洞纵向上呈现几十厘米至几米的多套薄层状组合特征(图3e);顺裂缝岩溶对裂缝壁两侧进行溶蚀,使裂缝加宽(图3f)以及沿裂缝两侧溶蚀形成非常发育的溶蚀孔洞(图3a)。

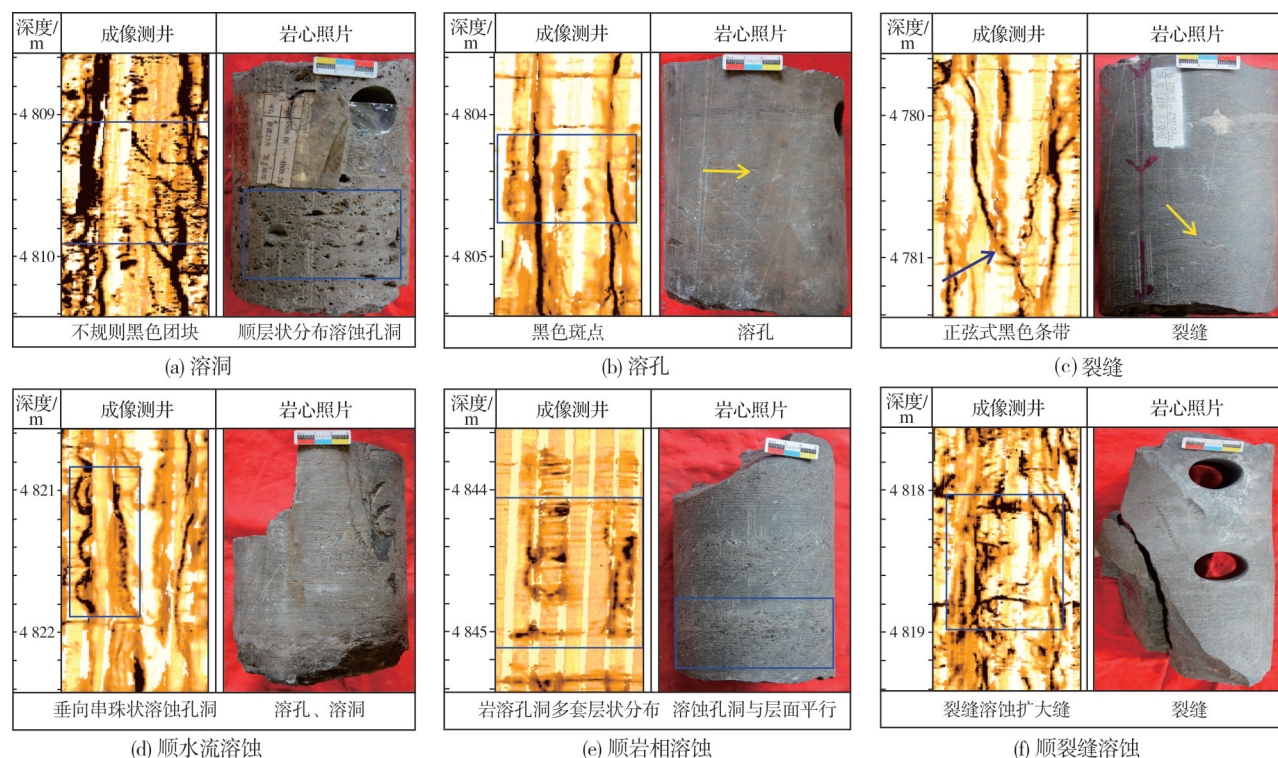


图3 四川盆地龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩岩溶作用在成像测井上的特征

Fig. 3 FMI characteristics of carbonate karstification of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin

3 岩溶相带测井响应特征

受地下水分布和运动的影响,岩溶在垂向上具有分带性,自上而下可划分为表层岩溶带、垂直渗流带和水平潜流带。由于不同岩溶相带的岩石类型、岩溶作用强度及孔洞缝发育程度的不同,其在常规测井、电成像测井响应上也存在明显差异。通过岩心标定电成像,选取龙女寺地区拥有龙王庙组完整测井资料的7口取心井作为典型井,分析不同岩溶相带的电成像测井特征,同时结合不同岩溶相带常规测井响应,进一步明确不同岩溶相带的发育特征及常规/成像测井响应特征(表1)。以MX53井为例,采用本文提出的识别方法,详细分析龙女寺地区龙王庙组古岩溶垂向分带特征(图4)

(1) 表层岩溶带

表层岩溶带(5 164.125~5 167.5 m)位于龙王庙组顶部,分布零星,厚度薄,为残坡积沉积物^[32];以地表水的径流为主,形成一些溶洞、溶沟等,后期往往全部遭受充填;其岩溶建造为风化残积物,主要由风化残积角砾与上覆沉积物混合组成。常规测井自然伽马表现为中—高值,三孔隙度测井中的声波时差和中子为高值、密度为中—低值,深浅双侧向电阻率幅度多为正差异;成像测井表现为角砾混杂堆积或不规则的斑块状分布。

(2) 垂直渗流带

垂直渗流带(5 167.5~5 190.125 m)位于侵蚀面与最高潜水面之间,以水的垂向运动通过早期发育的渗透性通道为特征。大气淡水及地下水通过垂

表1 四川盆地龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩垂向岩溶相带测井识别

Table 1 Logging identification of carbonate vertical karst zone of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin

岩溶相带	地质特征	常规测井特征					电成像特征
		自然伽马	声波时差	补偿中子	补偿密度	电阻率	
表层岩溶带	残积角砾岩、风化黏土层或垮塌充填等地表残积物	曲线呈锯齿状，中—高值	高值	高值	中—低值	低值	角砾状，不规则亮色团块被暗色包络
垂直渗流带	高角度溶缝、高角度串珠状的中小型溶蚀孔洞	相对较低且曲线近于平直或呈微齿状	较高值	较高值	低值	较高值	不规则分布暗色斑点，缝洞网状纵向延伸
水平潜流带	低角度、水平状溶缝，网状溶缝，圆形或椭圆形溶洞	曲线略呈锯齿状，中、低值	较高值	较高值	低值	低值	不规则的斑块或斑点，近水平分布的黑斑或黑色条带

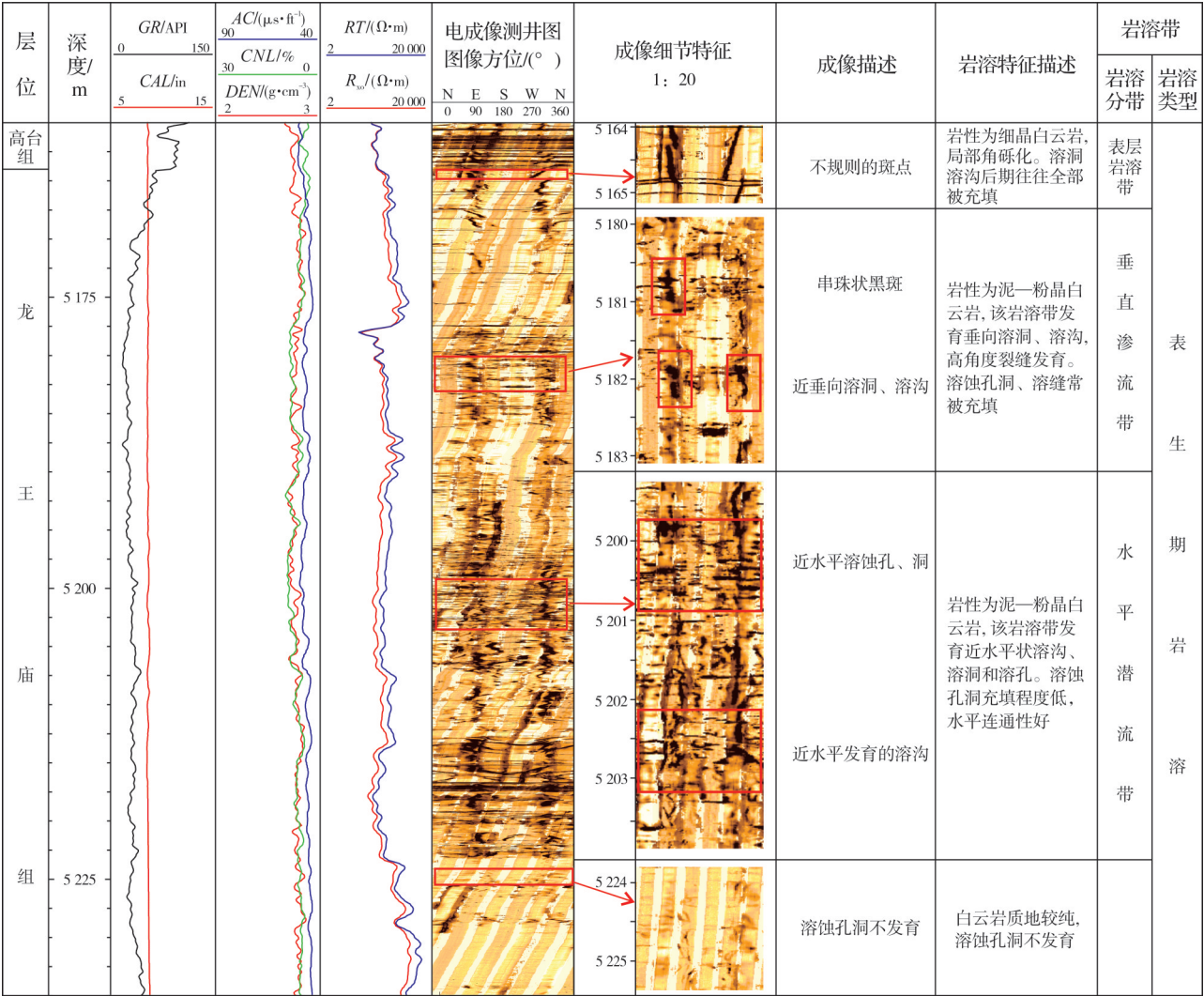


图4 四川盆地龙女寺地区MX53井龙王庙组碳酸盐岩岩溶作用测井响应特征及岩溶带划分

Fig. 4 Logging response characteristics and karst zone division of carbonate karst of Longwangmiao Formation of Well MX53 in Longnvsi area, Sichuan Basin

向的裂缝、断层或原生孔隙等通道向下渗透并发生溶蚀作用，对碳酸盐岩进行淋滤、溶蚀，形成一些树枝状溶洞和溶缝，这些溶蚀孔洞、溶缝常被角砾、砂泥质等机械渗流物质或白云石、沥青等化学物质充

填^[27]，且分布范围局限，非均质性强。常规测井表现为井径正常或局部略有扩径现象，当地层岩性较纯时，自然伽马值相对较低且稳定，三孔隙度曲线值比表层岩溶带有所降低，表现为中子、声波时差

为较高值,密度为低值,深浅双侧向电阻率为较高值,有明显的正差异;该岩溶带高角度裂缝发育,经后期溶蚀常形成溶沟或沿裂缝发育的溶蚀孔、洞,因此成像测井图像上可见大量近垂直或呈正弦曲线的长条黑带,沿黑带附近常发育串珠状黑斑或出现不规则分布的暗色斑点、斑块。

(3)水平潜流带

水平潜流带(5 190.125~5 223.25 m)位于垂直岩溶带以下,潜水面以上。由于压力梯度的影响,地下水流向以水平流动为主,流动区域发生的强烈机械破碎作用和化学溶蚀作用导致地层垮塌较严重,多见紊乱角砾岩。地层在水平流动的地下水作用下,发育近水平方向的溶沟、圆形或椭圆形溶洞及大型洞穴等,主要表现为顺层状分布的溶蚀孔洞和大型溶洞。该带发育的溶蚀孔洞充填程度较低,水平连通性较好,纵向连通性较差,岩石整体物性相对较好。对应未充填或部分充填溶蚀孔洞处,钻井过程中常出现钻速急剧加快、井涌、井漏、放空及井喷等现象。常规测井表现为井径基本正常,遇大型溶洞时局部扩径;由于上覆地层沉积物影响较

小,地层岩性为较纯的白云岩,自然伽马为中、低值;声波时差、中子值较高,与垂直岩溶带相比,密度值降低,深浅双侧向电阻率值降低,呈正差异特征;成像测井上溶蚀孔洞一般呈不规则斑块或斑点状,出现近水平分布的黑斑或黑色条带。

4 基于岩溶特征标志的储层类型划分与岩溶相带划分

4.1 基于岩溶特征标志的储层类型划分

碳酸盐岩通常具有强烈的非均质性,主要表现为储集空间构成复杂,分布不均;储层与非储层交互出现;储层的储集能力和渗流能力空间分布不均,差别较大。龙女寺地区龙王庙组由于岩溶相带、水流方向和裂缝等条件的控制,优质储层主要分布在垂直渗流带和水平潜流带。通过对7口典型取心井的岩心观察和测井响应特征统计分析,根据孔、洞、缝组合特征,将龙女寺地区龙王庙组岩溶储层划分为3种储层类型:裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型及孔隙型。各类型的测井响应特征见表2。

表2 四川盆地龙女寺地区龙王庙组不同类型碳酸盐岩岩溶储层测井响应特征

Table 2 Logging response characteristics of different types of carbonate karst reservoirs of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin

类型	储集空间	常规测井特征						电成像测井特征
		井径	声波时差	补偿中子	地层密度	自然伽马	深、浅侧向电阻率	
裂缝-孔洞型	中型孔洞、裂缝	通常具有扩径	明显增大,大于49 $\mu\text{s}/\text{ft}$	明显增大,大于7%	明显低值,小于2.72 g/cm^3	低值,一般小于20 API	明显低值,呈正差异	黑色团块及正弦式黑色条带
裂缝-孔隙型	溶孔、裂缝发育,少量小孔发育	井径均匀,少有扩径	较大,47~49 $\mu\text{s}/\text{ft}$	较大,5.5%~7%	曲线有较小幅度起伏,2.72~2.78 g/cm^3	一般小于20 API	高阻背景下降低,呈正差异,遇低角度裂缝、水层可能无差异	黑色斑点及正弦式黑色条带
孔隙型	孔洞、裂缝基本不发育,晶间孔发育	井径均匀,少有扩径	曲线平直,小于47 $\mu\text{s}/\text{ft}$	曲线平直	曲线有较小幅度起伏,2.78~2.85 g/cm^3	一般小于20 API	明显掉尖,呈尖刺状分布,双侧向呈无差异或小幅度正差异	无明显暗色斑点

裂缝-孔洞型储层 岩性包括晶粒白云岩、颗粒白云岩,缝、洞为主要储集空间,高角度裂缝发育,裂缝为渗滤通道,其中的孔洞相对较大^[36]。由于缝、洞的存在使得岩心常不完整。常规测井特征表现为:井径通常具有扩径的现象;声波时差、中子值异常大,密度值异常低;电阻率曲线与三孔隙度曲线具有较好的匹配关系,即电阻率曲线大幅度降低,且伴有“正差异”特征。地层微电阻率扫描成像静态图表现为明显的暗色斑状及条带状(图5)。

裂缝-孔隙型储层 岩性主要为晶粒白云岩,储

集空间以溶孔为主,发育少量溶洞,裂缝为主要的渗流通道,溶孔和裂缝同时发育,形成了比较优质的储层。常规测井特征表现为:井径较均匀,少有扩径;电阻率值在高阻背景下降低,双侧向电阻率呈正差异,遇低角度裂缝、水层时可能无差异或负差异;声波时差、中子值增大,密度值减小,指示孔隙发育。成像测井图上见暗色斑点,指示溶孔发育(图6)。

孔隙型储层 岩性以细晶白云岩为主,储集空间主要为溶孔,孔洞、裂缝基本不发育。常规测井曲线特征表现为:井径均匀;电阻率曲线有明显的

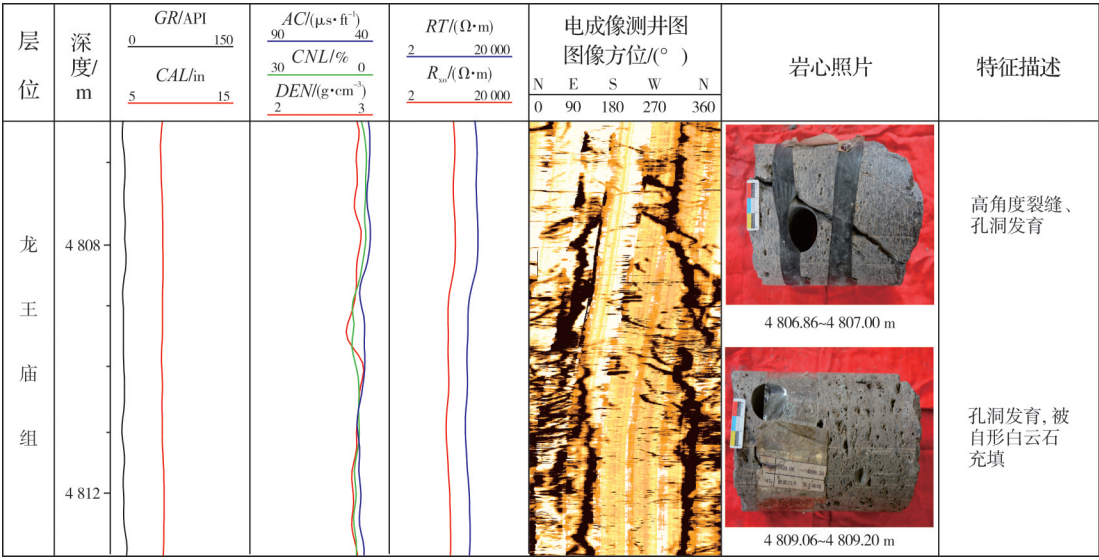


图5 四川盆地龙女寺地区龙王庙组裂缝-孔洞型碳酸盐岩储层测井响应图(MX23井)

Fig. 5 Logging response diagram of fractured-vuggy carbonate reservoir of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin(Well MX23)

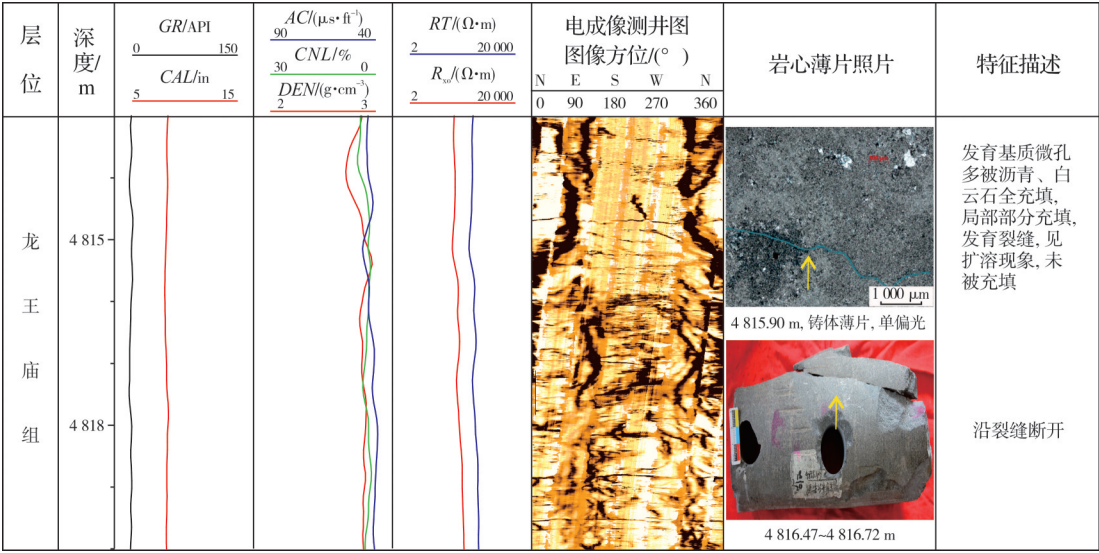


图6 四川盆地龙女寺地区龙王庙组裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层测井响应图(MX23井)

Fig. 6 Logging response diagram of fractured-porous carbonate reservoir of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin(Well MX23)

掉尖现象,呈尖刺状分布,深、浅侧向电阻率曲线无幅度差或小幅正差异。成像测井图上无明显暗色斑点(图7)。

4.2 基于岩溶特征标志的岩溶相带划分

通过大量数据对比分析,总结出四川盆地龙女寺地区龙王庙组岩溶储层垂向上具有如下发育特征(图8)。

表层岩溶带岩溶发育较弱,洞穴全部遭受充填,岩溶储层主要为孔隙型,测井响应特征表现为

较高伽马、低电阻率。该岩溶带在大部分井缺失或特征不明显。

垂直渗流带岩溶发育程度中等,大中型溶洞少见,以高角度溶缝和小型溶蚀孔洞为特征,岩溶储层属于裂缝-孔隙型、孔隙型;测井响应特征显示为低伽马、较高电阻率。

水平潜流带常发育大型溶洞,溶蚀孔洞常见顺层状分布,呈椭圆状或近圆状,孔洞长轴多与地层水平方向一致,岩溶储层多为裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型;测井响应特征显示为低伽马、低电阻率。

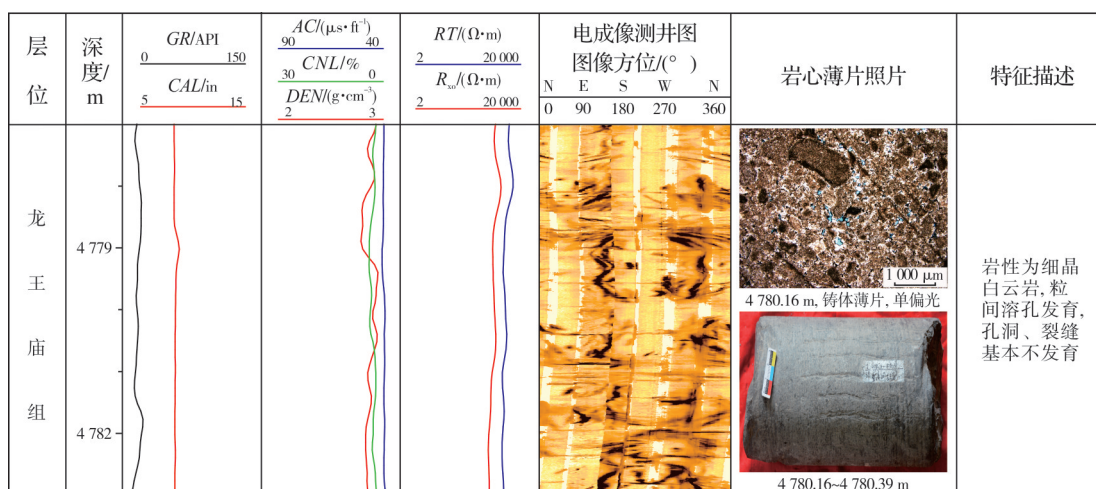


图7 四川盆地龙女寺地区龙王庙组孔隙型碳酸盐岩储层测井响应图(MX207井)

Fig. 7 Logging response diagram of porous carbonate reservoir of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin(Well MX207)

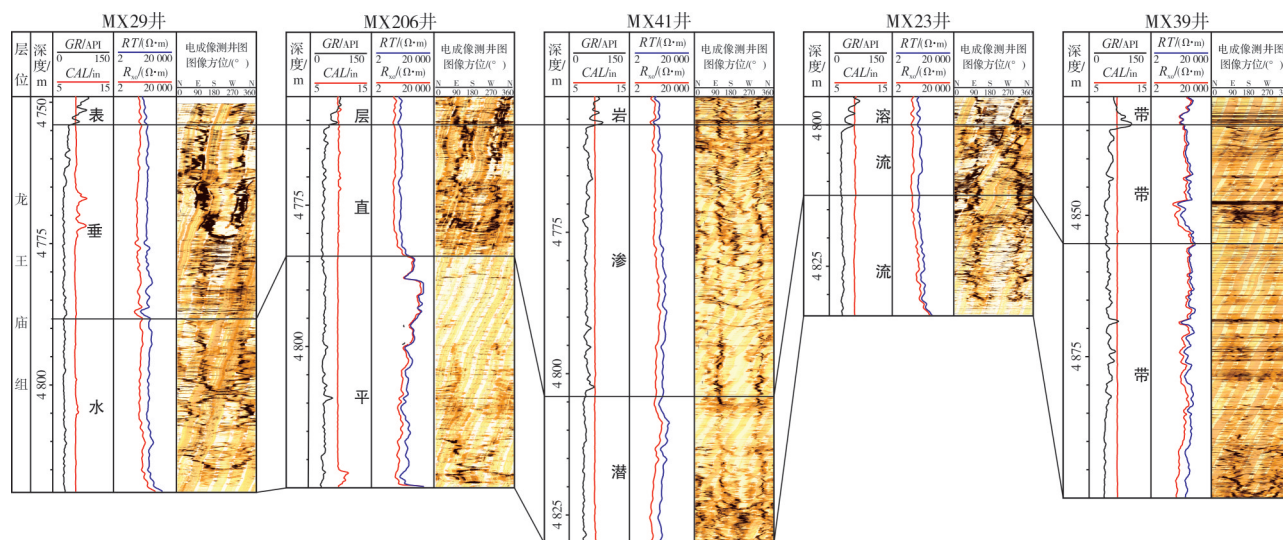


图8 四川盆地龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩岩溶带测井响应对比图

Fig. 8 Logging response comparison of carbonate karst zone of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin

5 结论

(1)利用岩心、薄片、成像测井等资料明确了四川盆地龙女寺地区龙王庙组岩溶作用的标志:在岩心上表现为岩溶角砾岩、溶沟、溶缝以及顺层状的溶蚀孔洞;在测井响应上主要表现为低伽马、低电阻率特征;在成像上测井上溶孔溶洞则表现为不规则的黑色斑点和团块状。

(2)龙女寺地区龙王庙组岩溶储层在垂向上可划分为表层岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带。表层岩溶带洞穴全部遭受充填,测井响应特征显示为较高伽马、低电阻率,电成像上见角砾状混杂堆积;垂

向渗流带发育树枝状溶洞和溶缝,溶洞大部分被充填,测井响应特征显示为低伽马、较高电阻率,电成像见不规则分布的暗色斑点和正弦式的黑色条带;水平潜流带发育大型溶洞,且溶蚀孔洞常见顺层状分布,测井响应特征显示为低伽马、低电阻率,电成像上见不规则的斑块或斑点和正弦式的黑色条带。

(3)通过岩心标定电成像,以井壁成像特征为依据,结合常规测井响应特征,将龙女寺构造龙王庙组岩溶储层划分为裂缝-孔洞型、裂缝-孔隙型、孔隙型等3种类型。龙女寺地区龙王庙组岩溶储层的分类以及岩溶相带的识别标准,可为研究区的储层评价提供支撑。

参考文献

- [1] ROEHL P O, CHOQUETTE P W. Perspectives on world-class carbonate petroleum reservoirs: abstract [J]. AAPG bulletin, 1985, 69(1): 148.
- [2] JORDAN C F, CONNOLLY T C, VEST H A. Middle Cretaceous carbonates of the Mishrif Formation, Fateh Field, offshore Dubai, U.A.E. [G]//ROEHL P O, CHOQUETTE P W. Carbonate petroleum reservoirs. New York: Springer-Verlag New York Inc, 1985: 425-442.
- [3] CRAIG D H. Caves and other features of Permian karst in San Andres dolomite, Yates Field Reservoir, west Texas [G]//JAMES N P, CHOQUETTE P W. Paleokarst. New York: Springer-Verlag New York Inc, 1988: 342-363.
- [4] TINKER S W, MRUK D H. Reservoir characterization of a Permian giant: Yates Field, west Texas [G]//STOUDT E L, HARRIS P M. Hydrocarbon reservoir characterization: geologic framework and flow unit modeling. Tulsa: SEPM Society for sedimentary geology, 1995: 51-128.
- [5] SADOONI F N. The nature and origin of Upper Cretaceous basin-margin rudist buildups of the Mesopotamian Basin, southern Iraq, with consideration of possible hydrocarbon stratigraphic entrapment [J]. Cretaceous research, 2005, 26(2): 213-224.
- [6] AQRAWI A A M, HORBURY A D. Predicting the Mishrif reservoir quality in the Mesopotamian Basin, southern Iraq [J]. GeoArabia, 2008, 13(1): 127-128.
- [7] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.
- ZOU Caineng, DU Jinhui, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(3): 278-293.
- [8] 谭磊, 刘宏, 唐昱哲, 等. 四川盆地龙女寺构造龙王庙组储层特征及地震响应 [J]. 天然气地球科学, 2020, 31(12): 1802-1813.
- TAN Lei, LIU Hong, TANG Yuzhe, et al. Reservoir characteristics and seismic response of Longwangmiao Formation of Longnvsi structure in Sichuan Basin [J]. Natural gas geoscience, 2020, 31(12): 1802-1813.
- [9] 田艳红, 刘树根, 赵异华, 等. 四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 671-683.
- TIAN Yanhong, LIU Shugen, ZHAO Yihua, et al. Diagenesis of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central area of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2014, 41(6): 671-683.
- [10] 谢武仁, 杨威, 李熙喆, 等. 四川盆地川中地区寒武系龙王庙组颗粒滩储层成因及其影响 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(12): 1715-1726.
- XIE Wuren, YANG Wei, LI Xizhe, et al. The origin and influence of the grain beach reservoirs of Cambrian Longwangmiao Formation in Central Sichuan area, Sichuan Basin [J]. Natural gas geoscience, 2018, 29(12): 1715-1726.
- [11] 陈娅娜, 张建勇, 李文正, 等. 四川盆地寒武系龙王庙组岩相古地理特征及储层成因与分布 [J]. 海相油气地质, 2020, 25(2): 171-180.
- CHEN Yana, ZHANG Jianyong, LI Wenzheng, et al. Lithofacies paleogeography, reservoir origin and distribution of the Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(2): 171-180.
- [12] 姚根顺, 周进高, 邹伟宏, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律 [J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 1-8.
- YAO Genshun, ZHOU Jingao, ZOU Weihong, et al. Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beach in Sichuan Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2013, 18(4): 1-8.
- [13] 金民东, 谭秀成, 李凌, 等. 四川盆地磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律 [J]. 古地理学报, 2015, 17(3): 347-357.
- JIN Mindong, TAN Xiucheng, LI Ling, et al. Characteristics and distribution of grain bank of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin [J]. Journal of palaeogeography, 2015, 17(3): 347-357.
- [14] 朱东亚, 张殿伟, 李双建, 等. 四川盆地组合碳酸盐岩多成因岩溶储层发育特征及机制 [J]. 海相油气地质, 2015, 20(1): 33-44.
- ZHU Dongya, ZHANG Dianwei, LI Shuangjian, et al. Development genesis and characteristics of karst reservoirs in lower assemblage in Sichuan Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2015, 20(1): 33-44.
- [15] 金民东, 曾伟, 谭秀成, 等. 四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 650-660.
- JIN Mindong, ZENG Wei, TAN Xiucheng, et al. Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(6): 650-660.
- [16] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地安岳大气田震旦系—寒武系储层的发育机制 [J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 36-44.
- ZHOU Jingao, YAO Genshun, YANG Guang, et al. Genesis mechanism of the Sinian-Cambrian reservoirs in the Anyue Gas Field, Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2015, 35(1): 36-44.
- [17] 韩波, 何治亮, 任娜娜, 等. 四川盆地东缘龙王庙组碳酸盐岩储层特征及主控因素 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 75-85.
- HAN Bo, HE Zhiliang, REN Nana, et al. Characteristics and main controlling factors of carbonate reservoirs of Longwang-

- miao Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2018, 30(1): 75-85.
- [18] 高树生, 胡志明, 安为国, 等. 四川盆地龙王庙组气藏白云岩储层孔洞缝分布特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 103-109. GAO Shusheng, HU Zhiming, AN Weiguo, et al. Distribution characteristics of dolomite reservoir pores and caves of Longwangmiao Formation gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural gas industry, 2014, 34(3): 103-109.
- [19] 司马立强, 陈志强, 王亮, 等. 基于滩控岩溶型白云岩储层分类的渗透率建模方法研究: 以川中磨溪—高石梯地区龙王庙组为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 92-102. SIMA Liqiang, CHEN Zhiqiang, WANG Liang, et al. Permeability modeling based on the classification of beach-controlled karst dolomite reservoirs: a case from Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2017, 29(3): 92-102.
- [20] 王蓓, 刘向君, 司马立强. 四川盆地磨溪地区寒武系龙王庙组缝洞型储集层分级评价及预测[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 290-301. WANG Bei, LIU Xiangjun, SIMA Liqiang. Grading evaluation and prediction of fracture-cavity reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation of Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(2): 290-301.
- [21] 李熙喆, 郭振华, 万玉金, 等. 安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 398-406. LI Xizhe, GUO Zhenhua, WAN Yujin, et al. Geological characteristics and development strategies for Cambrian Longwangmiao Formation gas reservoir in Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2017, 44(3): 398-406.
- [22] 沈安江, 陈娅娜, 潘立银, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组沉积相与储层分布预测研究[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1176-1190. SHEN Anjiang, CHEN Yana, PAN Liyin, et al. The facies and porosity origin of reservoirs: case studies from Longwangmiao Formation of Cambrian, Sichuan Basin, and their implications to reservoir prediction[J]. Natural gas geoscience, 2017, 28(8): 1176-1190.
- [23] 张松扬, 范宜仁, 李会银. 基于自然伽马能谱测井的岩溶型碳酸盐岩储层划分与对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(6): 35-41. ZHANG Songyang, FAN Yiren, LI Huiyin. Karst carbonate reservoir division and contrast based on natural gamma ray spectrometry logging in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2006, 30(6): 35-41.
- [24] 李昌, 周肖, 寿建峰, 等. FMI测井技术在川东北地区碳酸盐岩溶孔溶洞型储层评价中的应用[J]. 海相油气地质, 2010, 15(3): 59-64. LI Chang, ZHOU Xiao, SHOU Jianfeng, et al. The application of FMI logging method in evaluation of dissolution pored/caved carbonate reservoirs[J]. Marine origin petroleum geology, 2010, 15(3): 59-64.
- [25] 杨柳, 李忠, 吕修祥, 等. 塔中地区鹰山组岩溶储层表征与古地貌识别: 基于电成像测井的解析[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 265-275, 293. YANG Liu, LI Zhong, LÜ Xiuxiang, et al. Paleotopographic characterization and reconstruction of karst reservoirs in Yingshan Formation, Tazhong area, Tarim Basin: a research based on borehole image log interpretation[J]. Acta petrolei sinica, 2014, 35(2): 265-275, 293.
- [26] 刘兴礼, 张贵斌, 李多丽, 等. 塔中地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶测井特征[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 194-196. LIU Xingli, ZHANG Guibin, LI Duoli, et al. The karst log response of carbonate rocks of Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2009, 30(2): 194-196.
- [27] 林刚, 王兴志, 刘志尧, 等. 川中灯影组碳酸盐岩岩溶地层测井响应特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(4): 59-67. LIN Gang, WANG Xingzhi, LIU Zhiyao, et al. Well logging interpretation of the carbonate karst strata in the Dengying Formation in central Sichuan[J]. Sedimentary geology and Tethyan geology, 2014, 34(4): 59-67.
- [28] 崔璐. 大牛地气田奥陶系上组合岩溶地层测井响应特征[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(5): 26-30, 35. CUI Lu. Logging response characteristics of karst formation in upper Ordovician assemblage of Daniudi gas field[J]. Petroleum geology and engineering, 2019, 33(5): 26-30, 35.
- [29] 张树东, 任兴国, 罗利, 等. 阿姆河右岸东部地区岩溶裂缝的测井识别与评价[J]. 天然气工业, 2018, 38(6): 53-58. ZHANG Shudong, REN Xingguo, LUO Li, et al. Logging-based identification and evaluation of karst fractures in the eastern Right Bank of the Amu Darya River of Turkmenistan[J]. Natural gas industry, 2018, 38(6): 53-58.
- [30] 吴丰, 习研平, 张亚, 等. 川东—川南地区茅口组岩溶储层分类识别及有效性评价[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 90-99. WU Feng, XI Yanping, ZHANG Ya, et al. Classification and effectiveness evaluation of karst reservoirs of Maokou Formation in eastern and southern Sichuan Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2020, 32(2): 90-99.
- [31] 张峰, 罗少成, 李震, 等. 四川盆地茅口组岩溶缝洞型储层有效性测井评价[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 116-122. ZHANG Feng, LUO Shaocheng, LI Zhen, et al. Logging evaluation on the effectiveness of karst fractured-vuggy reservoirs in the Maokou Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum drilling techniques, 2020, 48(6): 116-122.
- [32] 王宁. 川中地区震旦系一下古生界储层地质特征及控藏作用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.

- WANG Ning. Reservoir characteristics and control effects of Sinian-Lower Palaeozoic Erathem in the central of Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.
- [33] 吴煜宇,谢冰,赖强. 四川盆地磨溪—龙女寺区块下寒武统龙王庙组测井相划分及分布规律研究[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(4): 28–32, 36.
- WU Yuyu, XIE Bing, LAI Qiang. Electrofacies division and distribution rules of Lower Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Longnvsi Block, Sichuan Basin[J]. Natural gas exploration and development, 2015, 38(4): 28–32, 36.
- [34] 孙豪飞. 磨溪—龙女寺地区龙王庙组储层特征及发育主控因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- SUN Haofei. Study on reservoir characteristics and main control factors of Longwangmiao Formation in Moxi-Longnvsi area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [35] 张满郎, 郭振华, 张林, 等. 四川安岳气田龙王庙组颗粒滩岩溶储层发育特征及主控因素[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 235–248.
- ZHANG Manlang, GUO Zhenhua, ZHANG Lin, et al. Characteristics of and main factors controlling the karst shoal reservoir of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the Anyue gas field, central Sichuan Basin, China [J]. Earth science frontiers, 2021, 28(1): 235–248.
- [36] 李清. 高石梯—磨溪地区龙王庙组碳酸盐岩储层测井评价方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- LI Qing. Study on logging evaluation method of carbonate reservoir of Longwangmiao Formation in Gaoshiti-Moxi area [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

编辑: 黄革萍

Logging response characteristics of carbonate karst strata of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin

YANG Qinqin, SIMA Liqiang, WANG Liang, GUO Yuhao, ZHANG Hao, WEN Dengfeng

Abstract: Anyue gas field of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin is the largest carbonate gas reservoir discovered so far in China. With the promotion of gas exploration, many gas wells with daily production capacity of million cubic meters have appeared in Moxi-Gaoshiti area in Central Sichuan. However, the reservoir development of Longwangmiao Formation in the adjacent Longnvsi structure is quite different from that in Moxi-Gaoshiti area, and the logging response characteristics of different karst facies zones in carbonate karst strata of Longwangmiao Formation in Longnvsi area are not clear. Taking the carbonate karst formation of Longwangmiao Formation in Longnvsi structure as an example, based on core calibration imaging logging and conventional logging curves, the identification mode of dissolution vugs and fractures is established to identify the karst formation. The karst reservoir of Longwangmiao Formation in Longnvsi area is divided into three types, including fracture-vug, fracture-pore and pore. The logging response characteristics of carbonate karst strata of Longwangmiao Formation in Longnvsi area are further studied. The results show that the carbonate karst facies zones of Longwangmiao Formation in Longnvsi area can be divided into superficial karst zone, vadose karst zone and underflow karst zone. The superficial karst zone is sporadically distributed with thin thickness, and all karst vugs are filled. The logging data show high gamma and low resistivity, and breccia mixed accumulation can be seen on the electrical imaging. Dendritic karst caves and fractures are developed in the vadose karst zone, most of the karst vugs are filled. The logging data show low gamma and high resistivity, and irregular dark spots and sinusoidal black bands are seen in electrical imaging. Medium-large karst vugs are developed in the underflow karst zone, and the dissolution vugs are commonly distributed along the layer. The logging data show low gamma and low resistivity, and irregular patches or spots and sinusoidal black strips are seen on the electrical imaging.

Key words: karst; carbonate rock; logging response; Longwangmiao Formation; Longnvsi area; Sichuan Basin

YANG Qinqin, First author: Master candidate at Southwest Petroleum University, major in oil and gas logging method, interpretation and geological application. Add: No. 8 Xindu Avenue, Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China

WANG Liang, Corresponding author: PhD, Professor, engaged in research and teaching of oil and gas logging methods, interpretation and geological application. Add: No. 1 East Third Rd., Erxianqiao, Chenghua District, Chengdu, Sichuan 610059, China