

文章编号: 1009-3850(2014)04-0059-09

## 川中灯影组碳酸盐岩岩溶地层测井响应特征

林刚<sup>1</sup>, 王兴志<sup>1</sup>, 刘志尧<sup>2</sup>, 谢林<sup>3</sup>, 杨雪飞<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中国石油 川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司, 陕西 西安 710018; 3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 川中磨溪-高石地区震旦系灯影组受桐湾运动 I 幕和 II 幕的影响, 致使灯二段及灯四段顶部遭受风化剥蚀, 区内大规模发育的溶蚀孔洞在测井曲线上具有明显的响应特征。通过对研究区的钻井、常规测井及 FMI 成像等资料分析, 将研究区岩溶剖面从上而下分为地表岩溶带、垂直渗流岩溶带、水平潜流岩溶带及深部缓流岩溶带。研究表明, 地表岩溶带由风化残余物杂乱堆积而成, 水平潜流岩溶带顺层孔洞发育, 二者是研究区储层最为发育层位; 渗流岩溶带储层较发育, 深部潜流带储层不发育。从区域上看, 研究区位于古岩溶斜坡带, 从南西向北东方向, 岩溶作用逐渐增强。

**关键词:** 磨溪-高石地区; 灯影组; 岩溶; 测井响应

中图分类号: TE122.2<sup>+4</sup>

文献标识码: A

### 引言

四川盆地自 20 世纪 60 年代发现威远气田、资阳气区以来, 对震旦系灯影组的勘探一直未取得重大突破<sup>[1]</sup>。究其原因, 主要是由于灯影组地层埋藏较深 (>5000m)、时代古老、成岩作用复杂、演化时间长<sup>[2]</sup>, 寒武-震旦系含油气系统遭受多种后期地质作用的影响<sup>[3]</sup>, 此外, 还受到古气候、海平面升降、构造运动和古隆起等外部因素的制约<sup>[4]</sup>。其中, 震旦纪中期及末期的两幕桐湾运动导致灯影组在整个盆地遭受溶蚀<sup>[5]</sup>, 致使灯二段及灯四段顶部地层遭受风化、剥蚀, 为后期溶蚀作用提供了物质基础。

垂向上, 岩溶相带常分为地表岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带及深部缓流带, 各个岩溶相带产物截然不同。平面上, 岩溶地貌根据地势相对高低划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地。岩溶高地处于相对高部位, 是岩溶、风化作用最为强烈的

地区, 岩溶水以垂向运动为主, 洞穴发育规模不大; 岩溶斜坡为岩溶高地与岩溶洼地之间的过渡地带, 既有垂向渗流, 也有近水平径流, 洞穴发育规模较大, 并具成层性; 岩溶洼地是地表水与岩溶水的汇聚区, 水动力明显减弱, 次生孔隙欠发育<sup>[6]</sup>。因此, 本文重点对川中灯影组岩溶带进行了划分, 弄清不同岩溶相带在测井相应上的特征, 预测储层发育规律, 为以后的研究提供有益资料。本文所指岩溶主要指表生岩溶作用, 是碳酸盐岩在大气淡水条件下, 遭受化学溶蚀作用和机械侵蚀作用而形成的特有的岩溶现象<sup>[7]</sup>。

### 1 地质概况

磨溪-高石地区位于乐山-龙女寺古隆起东段上斜坡部位(图 1 左), 在加里东运动后开始形成, 喜山晚期运动形成了大型圈闭<sup>[8]</sup>。灯影组经历了两期桐湾运动的构造抬升, 致使灯二段及灯四段顶部

收稿日期: 2013-12-23; 改回日期: 2014-02-24

作者简介: 林刚(1989-), 男, 硕士研究生。研究方向: 沉积学及储层地质学。E-mail: 568606890@qq.com

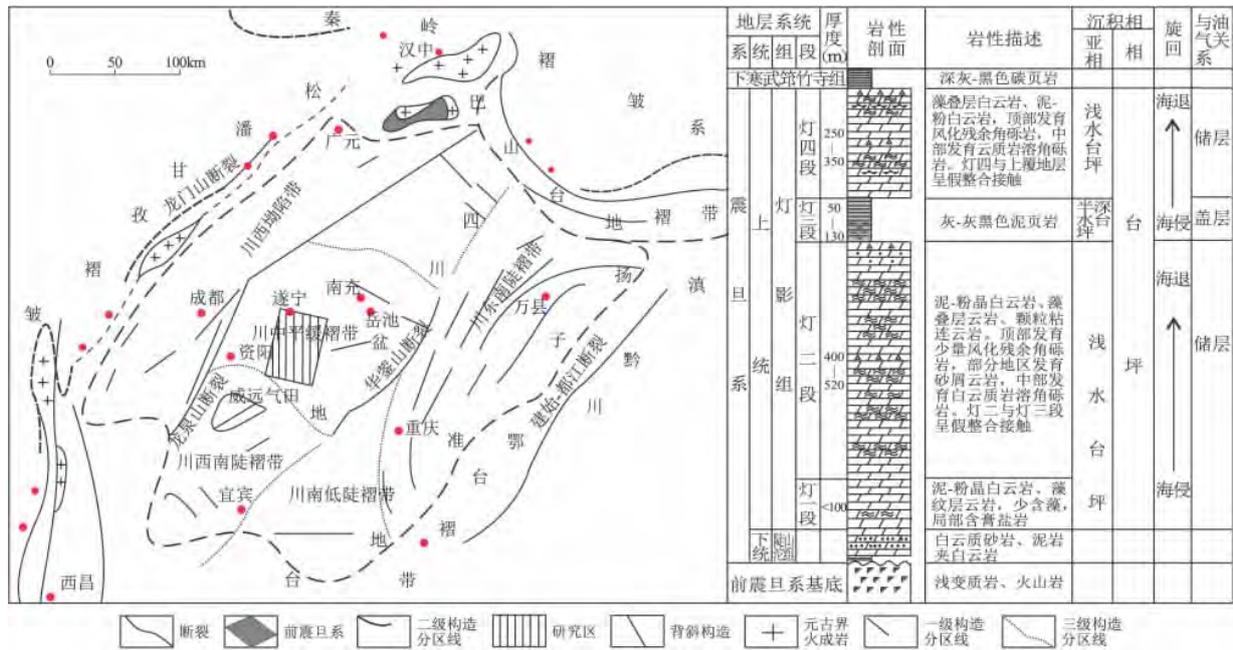


图1 研究区构造位置(左据王宓君等,1989)及地层柱状图(右)

Fig.1 Tectonic setting (left) and stratigraphic column (right) of the study area

遭遇风化剥蚀,也为后期的岩溶作用的发生提供了物质基础。区内灯影组沉积时,波浪作用标志较多,而潮汐作用的标志少见<sup>[9]</sup>。四川盆地及邻区无大型古陆的存在,为台坪沉积环境。灯影组从下到上分为一到四段(图1右),灯二段与上覆灯三段及灯四段与筇竹寺组均呈平行不整合接触。

### 1.1 岩溶在岩心上的特征

通过对GS1、GS2、GS6、MX8、MX9、MX10、AP1等十余口井岩心、薄片观察,发现研究区灯影组岩溶作用的标志主要有:大规模的岩溶角砾岩发育,角砾间常被上覆地层沉积物、剥蚀残积物及黄铁矿充填(图2a);围绕角砾、洞穴常发育“葡萄花边”构造(图2b);高角度溶蚀缝及近垂直溶沟较为发育(图2c、d),常有渗流粉砂、白云石及上覆地层沉积物等充填(图2e);灯二段、灯四段中部发育溶塌角砾岩(图2f、g);沿藻叠层云岩富屑纹层发育顺层方向的溶蚀孔洞(图2h、i)等。

### 1.2 钻、录井过程中的岩溶标志

钻井遇严重的井漏、放空和钻时降低时,通常揭示大型裂缝、溶洞及不整合侵蚀面、断层、地应力破碎带等现象的出现。在区内井漏和放空也较为常见,据现有资料统计,区内有7口钻井有钻井液漏失情况(表1),表明表生期岩溶作用对地层孔洞的发育贡献巨大。

## 2 岩溶带测井响应特征

### 2.1 常规测井识别岩溶

不同岩溶相带的常规测井响应特征亦有所不同,其主要是由于后期孔洞、充填程度及油气水的充注等原因引起。未充填岩溶洞穴层井径扩径较为严重,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,即高中子、高声波时差、低地层密度,深浅双侧向电阻率降低幅度较大。被白云石、沥青部分充填的孔洞层则表现为井径略有扩大,但自然伽马值几乎不变;密度和钻时降低,中子和声波时差升高,深浅侧向电阻率降低。角砾岩或砂泥岩部分充填的洞穴层段表现为自然伽马值增大;被角砾岩、上覆地层沉积物近全充填的洞穴层段,井径基本正常,自然伽马值明显增大,中子和声波时差相对升高,但地层体积密度有所降低,深浅双侧向电阻率降低<sup>[10]</sup>(图3)。

### 2.2 岩溶作用成像测井上响应

任何地质体只要与相邻地层的岩石电阻率有一定差异,FMI图像就会有反映<sup>[11]</sup>(图3)。溶洞在FMI成像测井上显示为不规则黑斑团块状不规则分布,在MX8、MX9及GS1井的灯四段顶部表现尤为明显;而溶孔表现为黑色斑点状,如藻云岩溶蚀孔洞在成像测井上显示为顺层分布的斑点、具一定的定向性;溶沟在成像测井上则表现为黑色带状;近乎垂直、正弦曲线式、“V”字形的条带,则为裂缝的响应特征。

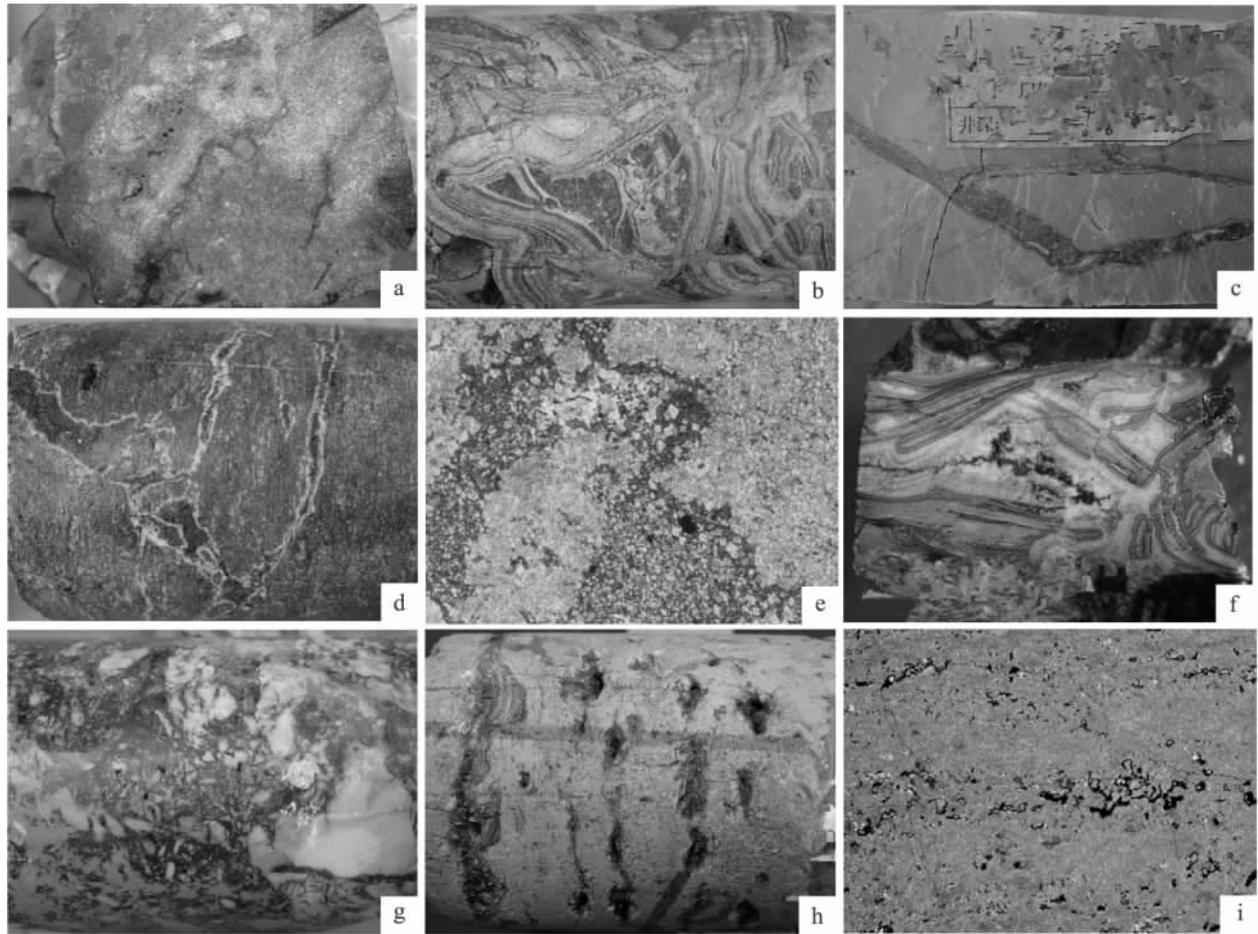


图 2 岩溶作用在岩心薄片上的特征

a. 灰色风化残余角砾岩,角砾大小不一,分选磨圆差,砾间充填风化残余物及上覆地层沉积物等,黄铁矿发育,API井,5035.40m; b. 深灰色岩角砾岩,围绕角砾发育“葡萄花边”构造,残余的孔洞被白云石、沥青等半充填,Z6井,3711.08m; c. 深灰色砂屑云岩,高角度裂缝较为发育,缝宽约3~1mm,裂缝被白云石、沥青及上覆沉积物近全充填,Z4井,4526.5m; d. 灰黑色砂屑云岩,晚期溶沟被沥青、白云石半充填,API井,5048m; e. 溶蚀假角砾岩,沿裂缝溶蚀扩大,局部出现渗流粉砂,并发育较为自形的白云石,GS1井,4966.06m,单偏光; f. 溶塌角砾岩,溶洞内充填长条状角砾被葡萄花边包裹,角砾间洞被晶粒白云石充填,GS6井,5368.28~5368.39m; g. 岩溶(假)角砾,砾间被有机质、沥青等近全充填,GS1井,4977.30m; h. 灰白色藻纹层云岩,顺层方向溶蚀孔洞发育,被白云石、沥青等半充填,MX9井,5046.15m; i. 藻叠层白云岩,近顺层溶孔被少量沥青半充填,MX11井,5482.16m,单偏光

Fig. 2 Karstification indicated by the thin sections

表 1 川中磨溪-高石地区钻井放空漏失统计

Table 1 Statistics for the drilling vent leakages in the boreholes in the Moxi-Gaoshi region, central Sichuan

井名	井段(m)	距顶(m)	放空厚度(m)	漏失量(m <sup>3</sup> )
GS1	5143.5~5150.0	距灯四顶 189.1	0.11m	38.4
GS2	5208.0~5214.8	距灯四顶 274	无	101.8
GS6	4959.5~4959.8	距灯四顶 14.5	无	501.3
NJ	5238.0~5239.0	距灯四顶 36.5	约 1m	704.0
HS1	5179.0~5180.1	无	约 1m	187.0
MX8	5681.5~5682.5	距灯二顶 261.5	无	103.7
MX9	5451.0~5452.5	距灯二顶 40.0	无	44.8
MX10	无	无	无	无
MX11	无	无	无	无
API	无	无	无	无

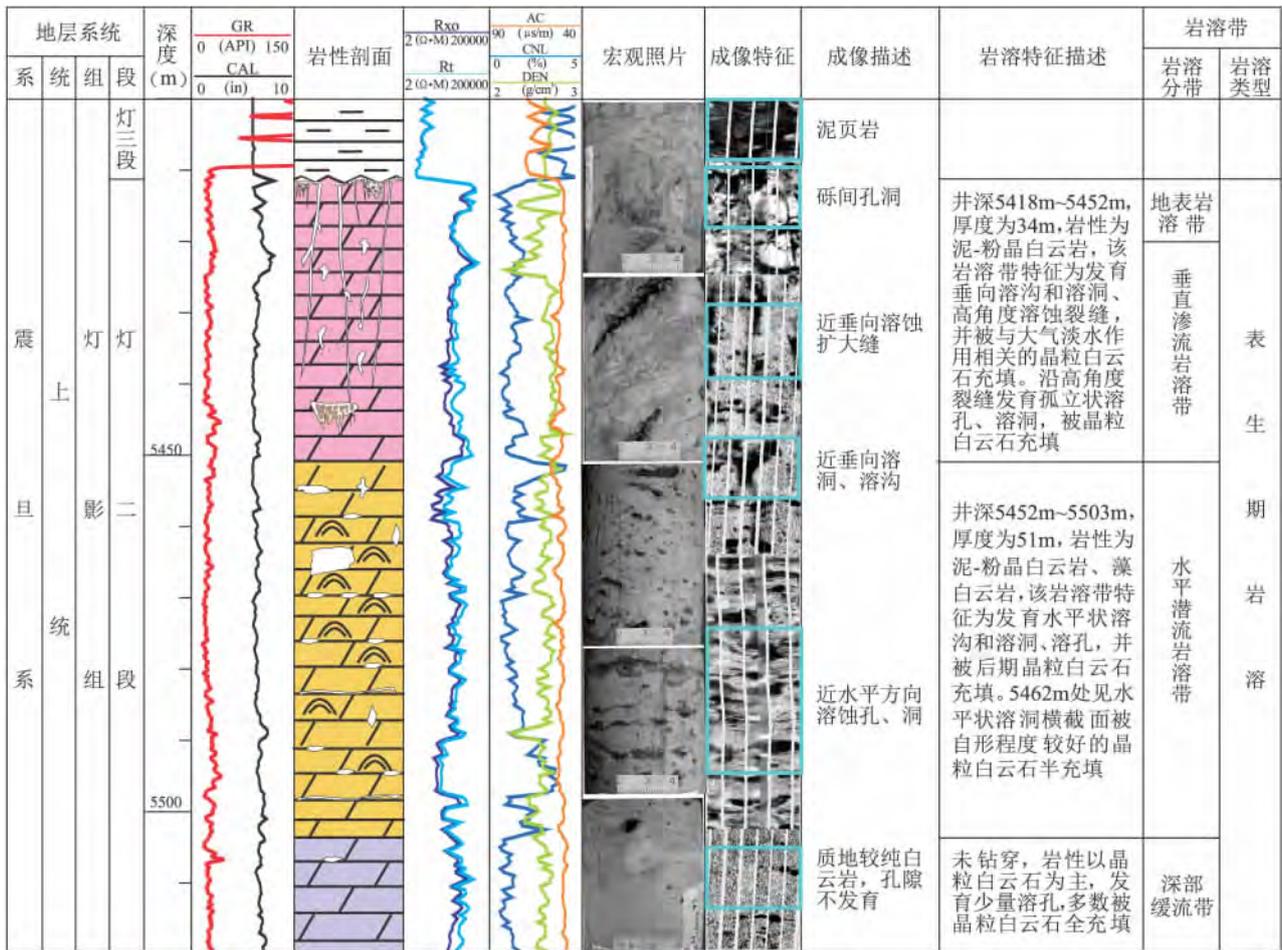


图3 MX9井测井响应特征及岩溶带划分

Fig. 3 Well logs and division of the karst zones in the MX9 well

### 3 岩溶期次及岩溶带测井特征

根据垂向上各岩溶相带测井响应特征的不同, 可将灯影组从上到下分为地表岩溶带、垂直渗流岩溶带、水平潜流岩溶带和深部缓流岩溶带(图3、4)。

研究发现, 风化壳以下约100m深度范围内是岩溶作用最为发育层段, 岩溶作用最大影响深度可达300m。顺层溶孔(洞)、溶沟、溶缝及岩溶角砾岩等均为岩溶作用的产物。

#### 3.1 地表岩溶带

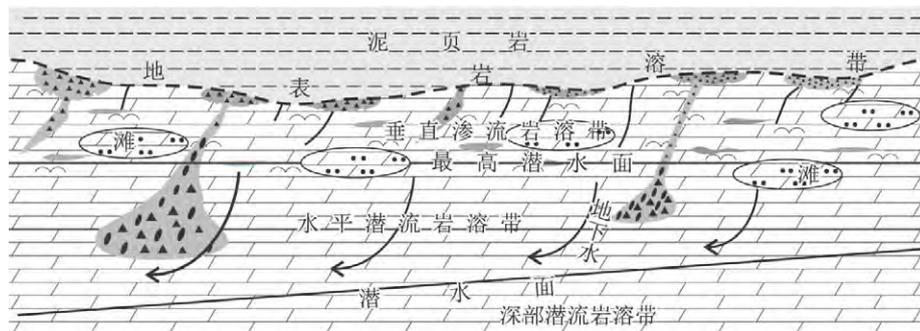


图4 川中地区岩溶相带模式图

Fig. 4 Model for the karst facies zones in central Sichuan

地表岩溶带位于灯二段及灯四段顶部约20m的深度范围内, 以地表水的径流为主, 形成一些溶

沟、溶洞、溶蚀洼地等, 其往往被后期沉积的泥、砂、砾岩等充填<sup>[12]</sup>。该带中绝大多数洞穴堆积物是由

强烈的侵蚀和碳酸盐岩母岩的切蚀作用造成的<sup>[13]</sup>。溶蚀孔、洞及缝中常被地表风化残留物、上覆地层沉积物或坍塌物(图 2a)等充填,也常见一些渗流粉砂充填溶沟、裂缝(图 2c、d、e)。岩心上以泥质或风化破碎物充填的洞穴、风化残余角砾岩及黄铁矿伴生(图 2a)等特征。

该相带自然伽马明显高于灯影组白云岩地层,但低于筇竹寺泥页岩或灯三段蓝灰色泥页岩,一般为 50~70API;深浅双侧向电阻率幅度多为正差异,一般可到达数百欧米;三孔隙度测井中,密度有所降低(2.5~2.8g/cm<sup>3</sup>);声波具由高时差向白云岩低时差过渡特征(45~50μs/ft);中子孔隙度相对较

高(1%~6%)。在成像测井上见斑块状黑斑分布无规律,浅色角砾岩杂乱堆积(图 3、5)。

### 3.2 垂直渗流岩溶带

垂直渗流带常位于侵蚀面与最高潜水面之间<sup>[14]</sup>,主要发育在距风化壳顶约 100m 深度范围内,以水的垂向运动通过先存的渗透性通道为特征<sup>[13]</sup>。大气淡水及地下水通过垂向的裂缝、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,形成一些垂直或近于垂直的溶蚀缝或串珠状小型溶洞<sup>[15]</sup>。渗流带的溶解作用是通过沉淀作用来平衡的,一方面会产生一些溶解孔洞;另一方面,原生粒间孔隙的部分充填,又使孔隙吼道

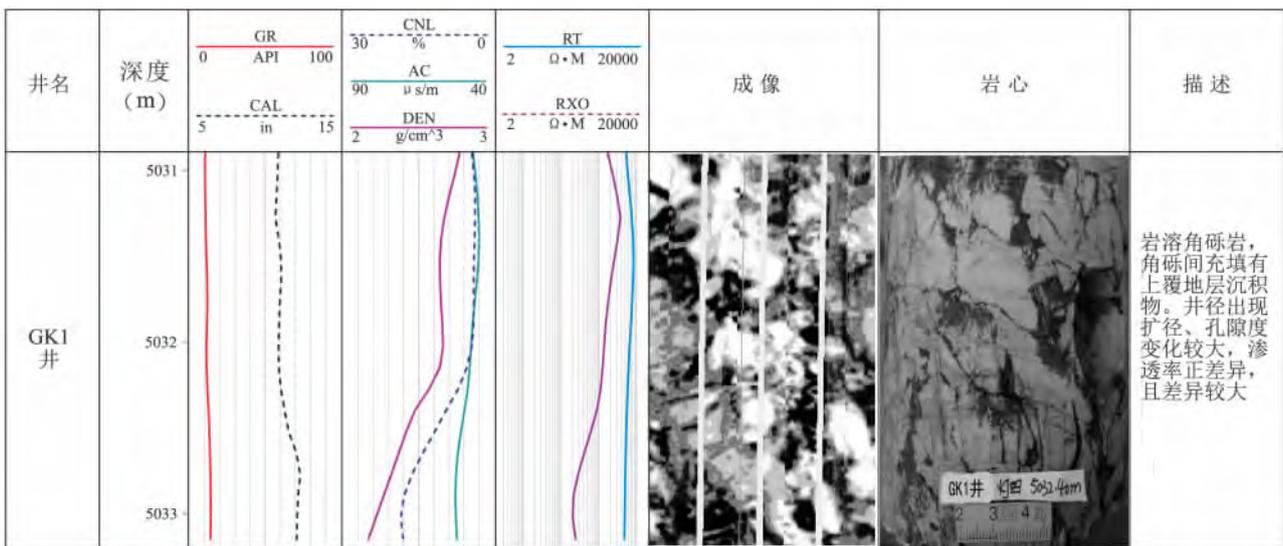


图 5 GK1 井岩溶角砾岩测井响应特征

Fig. 5 Well logs for the karst breccias in the GK1 well

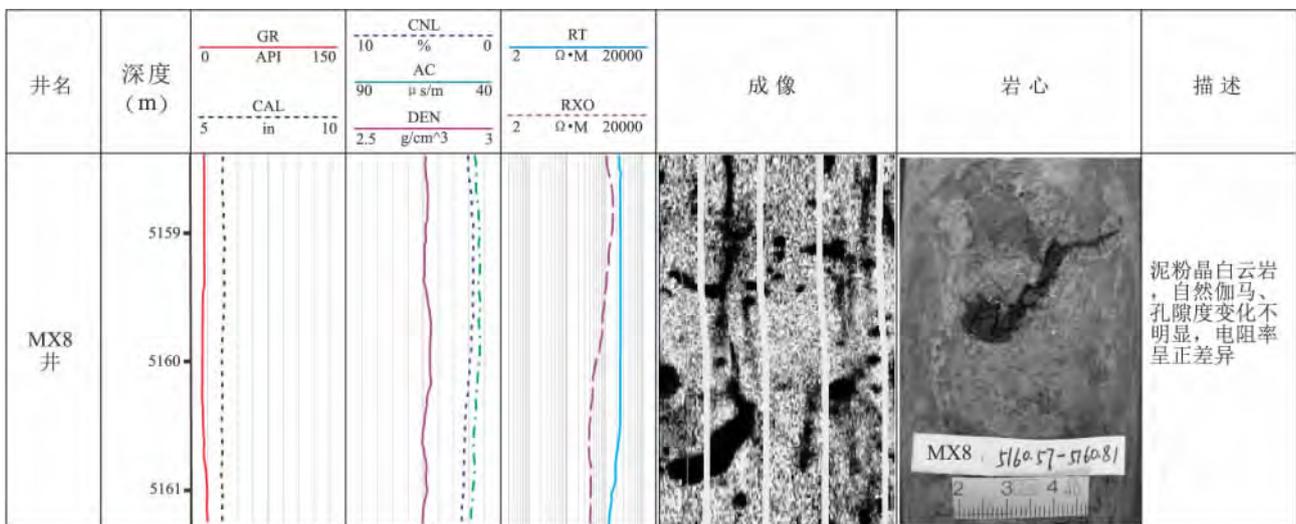


图 6 MX8 井溶沟发育处测井响应特征

Fig. 6 Well logs for the karren intervals in the MX8 well

变差<sup>[14]</sup>。该岩溶带主要发育垂直或近于垂直的溶缝、溶沟或串珠状的小型孔、溶洞及孤立的落水洞等产物,其常被角砾、砂泥质等机械渗流物质(图2g)或白云石、沥青(图2d)及硅质等化学物质充填。相对于水平潜流带,该带由于水流较快,溶蚀作用不及水平潜流带发育,导致储集空间发育程度不及水平潜流带。

该带井径正常或局部略有扩径现象。地层岩性较纯时,自然伽马值相对较低且稳定,范围集中在50~100API;深浅双侧向电阻率有所升高(1000~20000 $\Omega \cdot m$ ),正差异,当孔洞发育且含气时,差异十分明显;孔隙度变化并不明显,但有向下逐渐减小的趋势(0.4%~4%);声波变化较小,密度略有增高。区内发育大量高角度裂缝,经后期溶蚀常形成溶沟或沿裂缝发育的溶蚀孔、洞,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(图3.6)。渗流带的大型溶洞一般呈垂向向下的纺锤形<sup>[10]</sup>,或出现杂乱斑块状。

### 3.3 水平潜流带

水平潜流带位于垂直渗流带之下,地下潜水面之上,地下水受压力梯度的影响,其流向以水平流动为主,距顶约100~200m。因此,该带以由混合溶解作用和增强的水力压力所导致的水力侵蚀和溶解作用所造成的水平溶蚀孔洞的大量形成为主要特征<sup>[14]</sup>。地层在水平流动的地下水作用下,发育近水平方向的溶沟、串珠状溶洞、圆形或椭圆形溶洞及大型洞穴等,以沿藻白云岩富屑纹层溶蚀形成的

近水平方向的溶蚀孔洞最为典型(图2h、i)。因溶蚀致使地层垮塌形成的溶塌角砾岩,沿溶洞壁发育“葡萄花边”(图2f)。该带中发育的溶蚀空间充填程度较低,水平连通性较好,垂向连通性较差,整体岩石物性相对较好。对应未充填或部分充填溶洞处,钻井中常出现钻速急剧加快、井涌、井漏、放空及井喷等现象<sup>[15]</sup>。

水平潜流带井径基本正常,遇大型溶洞局部扩径;受上覆地层沉积物较小,且为质地较纯白云岩,自然伽马值为10~50API;深浅双侧向电阻率测井曲线呈波状特征(42~57 $\mu s/ft$ ),正差异,局部差异较小,说明溶蚀孔、洞连通性较好。孔隙度比地表岩溶带小,较垂直渗流带略有升高(1%~5%);密度值集中在2.6~2.9 $g/cm^3$ 。FMI成像测井上溶蚀孔洞一般呈不规则斑块或斑点状,在藻叠层云岩中则出现近水平分布的黑斑或黑带(图3.7)。

### 3.4 深部缓流带

该岩溶带位于水平潜流带之下,其最大底界是岩溶作用的下限<sup>[16]</sup>,地层水呈现饱和状态,受排泄基准面控制较小,导致其流速和交替极为缓慢,岩溶作用较弱,该带仅见一些小型的溶孔和零星溶缝,并被化学沉淀的晶粒白云石、沥青充填,成像测井图像可偶见少量沿裂缝分布的较小溶蚀孔隙。测井孔隙度、声波有所降低,密度有所增高,自然伽马相对较小,电阻率有所升高。深部缓流岩溶带整体孔隙度、渗透率相对较低(图3.8),对储层贡献极小。

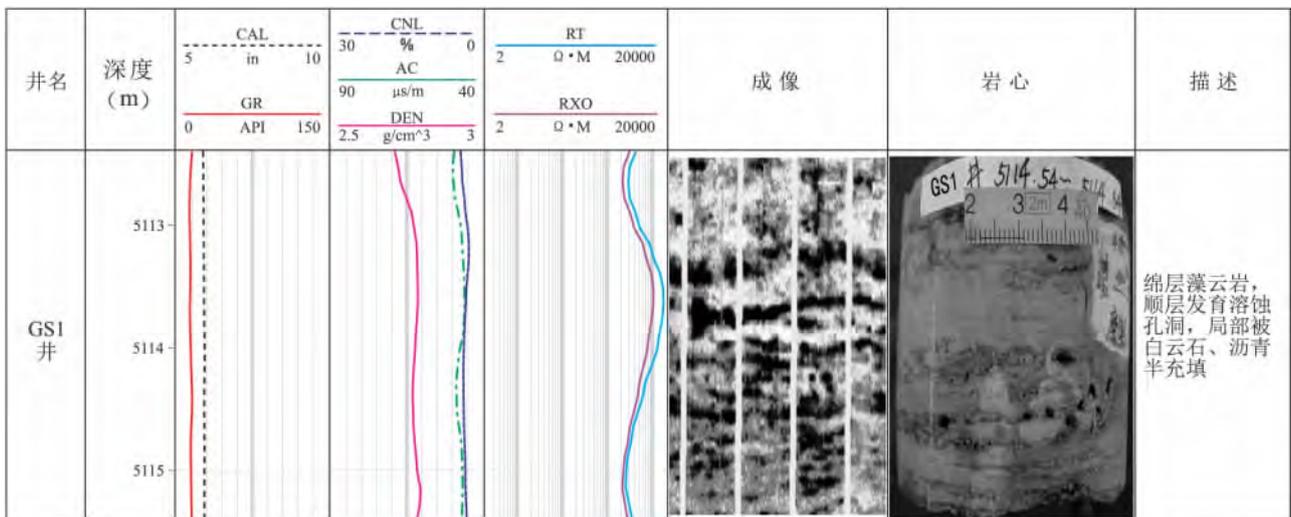


图7 GS1井近水平溶蚀发育处测井响应特征

Fig. 7 Well logs for the subhorizontal dissolution intervals in the GS1 well

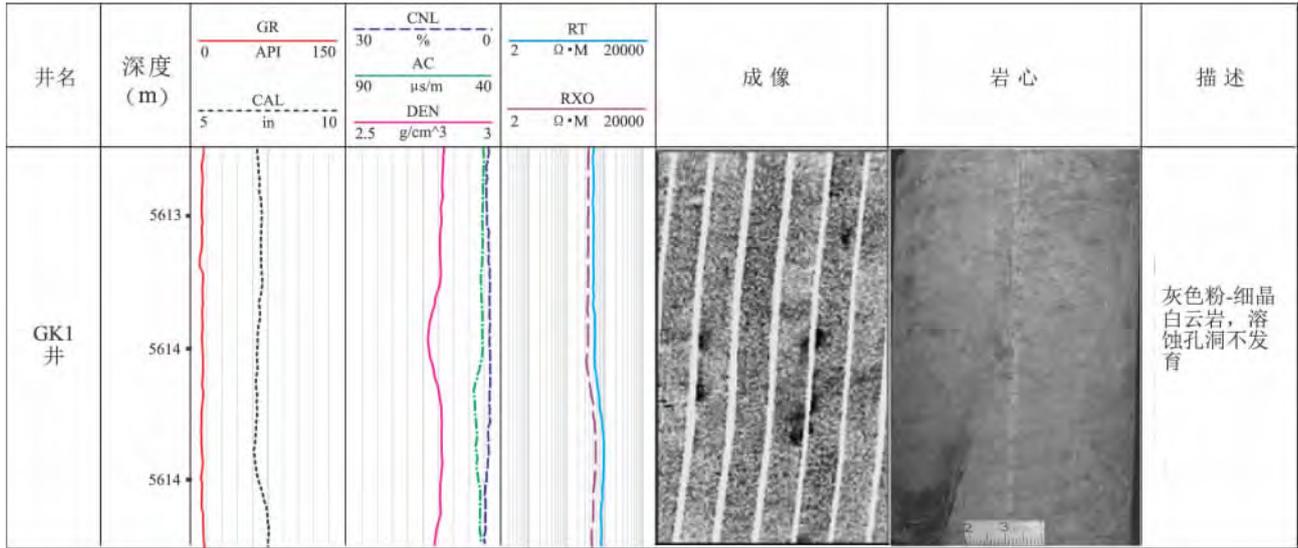


图8 GS1 井深部缓流带层段测井响应

Fig. 8 Well logs for the deep sluggish flow zone in the GS1 well

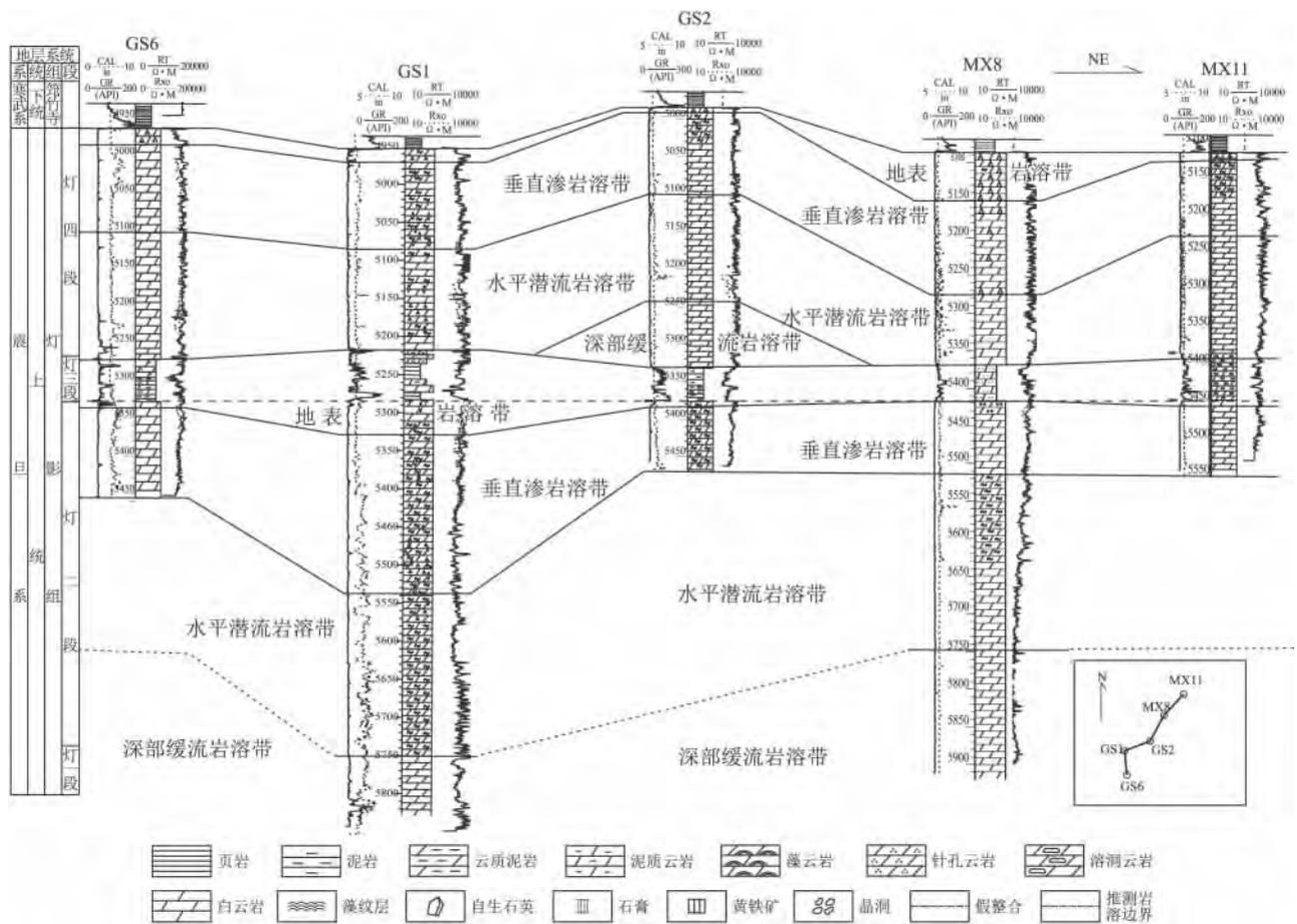


图9 川中灯影组岩溶带测井响应与连井对比

Fig. 9 Correlation of well logs and well-tie sections in the karst zones in the Dengying Formation, central Sichuan

## 4 岩溶平面分布特征

四川盆地震旦系灯影组沉积末期岩溶古地貌表现为:自西向东依次可以划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地,其中岩溶高地分布在雅安-资中-成都-绵阳以西区域,岩溶洼地分布在遵义-石柱-万县以东地区,二者之间的区域为岩溶斜坡分布区(王振宇,2011)。

研究区整体上位于岩溶斜坡带,溶蚀作用以水平潜流为主,垂直渗流岩溶带分布范围不大,发育横向连通性良好的溶蚀孔洞,岩溶储集层发育程度高<sup>[17]</sup>。相对岩溶高地及岩溶洼地而言,岩溶斜坡区白云岩在地下水的改造下,更易改造成有效储集空间,但不同岩溶带之间岩溶作用差异较大。区内除MX8井外,其余井地表岩溶厚度均小于20m或者未见风化壳。垂直渗流岩溶带及水潜流岩溶带纵向发育深度范围最大,且地下水以渗流和潜流为主,为典型的岩溶斜坡特征。总体上看,岩溶作用从南西到北东强度略有减弱,渗流带稍有减薄,潜流带略有增加。因此,古岩溶作用强度向北东方向岩溶作用逐渐增强。

## 5 结论

(1) 研究区除地表岩溶带以外,其它岩溶相带自然伽马值相对较低。在孔洞发育处,电阻率相对较低,多具正差异,孔隙度有所升高。成像测井上,溶洞为黑色斑块状,溶孔为黑色斑点状,溶扩大缝及溶沟呈黑色条带状。

(2) 区内储渗空间主要为构造缝及后期岩溶作用形成的溶蚀孔、洞。其中,岩溶作用是储集空间形成的主要控制因素之一。岩溶作用影响范围主要集中在距风化壳顶100m以内。地表岩溶带孔隙度、渗透率均较好,为最有利储层发育部位;潜流岩溶带形成的水平溶蚀孔洞发育,充填程度较低;渗流岩溶带常发育近垂向的溶沟、溶蚀孔洞,其常被上部渗流物充填,储集性比潜流带及地表岩溶带

差;深部缓流带孔洞发育较少,不具储集性。

### 参考文献:

- [1] 王兴志,侯方浩,黄继祥,等.四川资阳地区灯影组储层的形成与演化[J].矿物岩石,1997,17(2):55-60.
- [2] 王兴志,穆曙光,方少仙,等.四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J].沉积学报,2000,18(4):549-554.
- [3] 罗志立,刘顺,徐世琦.四川盆地震旦系含气层中有利勘探区块的选择[J].石油学报,1998,19(4):1-7.
- [4] 李启桂,李克胜,周卓铸,等.四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测[J].石油与天然气地质,2013,34(4):516-521.
- [5] 黄文明,刘树根,马文辛,等.深层海相碳酸盐岩优质储层的形成、保存和破坏机制[J].地质科学,2011,46(3):69-73.
- [6] 马晓强,侯加根,胡向阳,等.论古岩溶洞穴型储层三维地质建模——以塔河油田四区奥陶系储层为例[J].地质评论,2013,59(2):315-324.
- [7] 吕海涛,张达景,杨迎春.塔河油田奥陶系油藏古岩溶表生作用期次划分[J].地质科技情报,2009,28(6):71-83.
- [8] 张林,魏国齐,汪泽成,等.四川盆地高石梯-磨溪构造带震旦系灯影组的成藏模式[J].天然气地球科学,2004,15(6):875-895.
- [9] 王兴志,黄继祥,侯方浩,等.四川资阳及邻区震旦系灯影组储层段沉积及层序地层学特征[J].西南石油学院学报,1996,18(3):1-8.
- [10] 刘之的,苗福全,候庆宇,等.塔河油田五区奥陶系碳酸盐岩岩溶地层测井响应特征[J].地球物理学进展,2013,28(3):1483-1489.
- [11] 贾文玉,田素月,孙耀庭,等.成像测井技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [12] 张晓辉.塔河油田碳酸盐岩岩溶测井响应特征[J].新疆地质,2005,23(4):406-409.
- [13] 强子同.碳酸盐岩储层地质学[M].东营:中国石油大学出版社,2007.296-297.
- [14] 邬长武,蒋春雷,郑志祥,等.塔中16-24井区奥陶系碳酸盐岩古岩溶研究[J].矿物岩石,2002,22(2):69-73.
- [15] 景建恩,梅忠武,李舟波.塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育模式的测井分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(2):236-241.
- [16] 庞雯,史鸿祥.轮南地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶特征[J].新疆石油地质,2008,29(1):37-40.

## Well logging interpretation of the carbonate karst strata in the Dengying Formation in central Sichuan

LIN Gang<sup>1</sup>, WANG Xing-zhi<sup>1</sup>, LIU Zhi-yao<sup>2</sup>, XIE Lin<sup>3</sup>, YANG Xue-fei<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China*; 2. *Changqing Downhole Technology Company, Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Xi'an 710018, Shaanxi, China*; 3. *School of Earth Sciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China*)

**Abstract:** Affected by the episodes I and II of the Tongwan movement, the topmost parts of the 2nd and 4th members of the Dengying Formation were subjected to the weathering and denudation, which gave rise to the widespread dissolution of the carbonate rocks in the Sinian Dengying Formation in the Moxi-Gaoshi region, central Sichuan. The distribution of hydrocarbon reservoirs may be predicted on the basis of boreholes, well logging and FMI images. The karst sections in the study area may be divided, in a descending order, into surficial karst weathering zone, vertical infiltration karst zone, horizontal subsurface flow karst zone and deep sluggish flow karst zone. The surficial karst weathering zone accumulated by chaotic accumulation of the weathered residual materials and the horizontal subsurface flow karst zone with developed pore spaces are believed to be the best favourable horizons for the development of the reservoir rocks, followed by the vertical infiltration karst zone. Regionally, the karstification becomes progressively stronger from southwest to northeast in the study area in the palaeokarst slope zone.

**Key words:** Moxi-Gaoshi region; Dengying Formation; karst; well logs