

胡修权, 鲁洪江, 易驰, 等. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组储层构型研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 847-859.

DOI: [10.11932/karst20220601](https://doi.org/10.11932/karst20220601)

# 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组储层构型研究

胡修权<sup>1,2</sup>, 鲁洪江<sup>1,2</sup>, 易驰<sup>1</sup>, 李江寒<sup>1</sup>, 陈克勇<sup>1,2</sup>, 鲁杰<sup>3</sup>, 肖陈静<sup>4</sup>

(1. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059; 2. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川成都 610059; 3. 中国石油西南油田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041;  
4. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 川中高石梯—磨溪地区是我国迄今为止发现的单体规模最大碳酸盐岩整装气藏, 震旦系灯影组受多期构造运动改造的影响, 具有成岩和成藏演化复杂的特点。结合野外、岩芯、测井以及生产动态将储层构型划分4种, 层状溶洞构型FMI成像测井为高亮背景下暗色斑点顺层分布; 葡萄花边状溶洞构型为亮色背景下暗色斑块零星分布; 角砾间溶洞构型为高亮背景下暗色斑点、暗色短线状影像杂乱分布; 缝洞组合构型为高亮背景下暗色正弦线状影像和暗色斑点分布。层状溶洞构型推测为埋藏期外来酸性流体的溶蚀作用形成, 角砾间溶洞构型、缝洞组合构型推测为表生喀斯特岩溶作用形成, 葡萄花边状溶洞构型推测为次生成因, 海平面下降时形成缝洞体系, 海平面上升时海水充填缝洞, 形成葡萄花边胶结物。不同储层构型在常规测井特征上也存在差异。通过多测井系列建立相应的判别模型, 能在一定程度上将4类储层构型进行区分。利用测井构型解释成果, 在地震反演约束的条件下开展了灯影组储层构型建模, 分别在高石梯地区和磨溪地区, 探讨灯四段储层构型平面展布规律。钻井试气结果表明层状溶洞构型厚度对油气产能有一定的控制作用, 层状溶洞构型较发育区为勘探潜力较大的区域。

**关键词:** 储层建模; 灯影组; 储层构型; 判别模型; 高石梯—磨溪地区

中图分类号: P618.13 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)06-0847-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

四川盆地是中国西部一个大型而古老的含油气叠合盆地, 面积约  $19 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>, 呈NE向菱形展布, 全盆地共发育20多套含油气层系<sup>[2]</sup>。震旦系灯影组是四川盆地最古老的碳酸盐岩天然气储层, 且受多期构造运动改造影响, 具有成岩和成藏演化复杂特点。1964年, 四川盆地在威远构造首次发现了灯影组气藏, 该气藏受控于加里东时期形成的乐山—龙女寺古

隆起<sup>[3]</sup>, 探明储量达到了  $400 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上<sup>[4]</sup>, 证实了四川盆地深层古老碳酸盐岩油气勘探的巨大潜力。其后的近50年时间, 一直未在灯影组有大的勘探突破, 直到2011年7月, 高石1井灯影组经酸化测试获日产上百万方的高产工业气流。目前, 针对高石梯—磨溪地区震旦系的完钻井64口, 灯四段储层累计测试57口, 获工业气井46口, 日产气  $1529 \times 10^4 \text{ m}^3$  累计获气  $80 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[5]</sup>。高石梯—磨溪地区成为“十三五”以来我国天然气勘探开发最炙热的地区。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172175); 国家科技重大专项(2016ZX05052); 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助项目(PLC201710)

第一作者简介: 胡修权(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事地震地层及储层预测研究。E-mail: [huxiuquan15@cdut.edu.cn](mailto:huxiuquan15@cdut.edu.cn)。

通信作者: 鲁洪江(1969—), 男, 副教授, 主要从事油气田地质、地质建模及油气田开发研究。E-mail: [719436941@qq.com](mailto:719436941@qq.com)。

收稿日期: 2021-12-03

自 20 世纪 70-80 年代, Allen 和 Miall 提出的储层构型概念以来<sup>[6-8]</sup>, 国内外学者对储层构型的层次、要素、模式、沉积机理等做了大量开拓性的探究工作<sup>[9-15]</sup>。前人多以沉积相对储层构型进行划分<sup>[16]</sup>, 没有总结不同构型类型的岩电特征和识别标志。加之川中高石梯—磨溪地区灯影组白云岩复杂多变, 储层非均质性强, 钻井分布不均。本次研究在前人的基础上, 结合测井、岩芯、测试等资料, 讨论碳酸盐岩储层构型的岩电特征及识别方法, 总结储层构型类型; 建立储层构型判别模型, 开展钻井储层构型识别; 在地震反演约束的条件下, 通过储层构型建模, 探讨储层构型平面展布规律, 实现储层构型的定性及定量表征, 对油气勘探阶段有利储集体预测和开发阶段剩余油挖潜都具有十分重要的意义。碳酸盐岩储层构型研究丰富了川中地区灯影组白云岩储层研究的手段和内容, 应用前景十分广阔。

## 1 地质背景

川中高石梯—磨溪地区位于四川省遂宁市、资阳市及重庆市潼南区境内, 面积 5 288 km<sup>2</sup>(图 1)<sup>[17]</sup>。四川盆地主要经历了晋宁—澄江期复杂基底的形成阶段、桐湾期隆坳构造形成与裂陷填平补齐阶段、加里东期大面积隆升与剥蚀阶段、海西期持续隆升与剥蚀阶段, 并在印支期初步呈现盆地雏形, 后经喜马拉雅运动, 盆地全面褶皱形成了现今的构造面貌<sup>[18-20]</sup>。盆地主要构造变革期间, 形成了多期构造不整合<sup>[21]</sup>。

震旦系灯影组是 1924 年由李四光等在湖北宜昌附近创建的“灯影石灰岩”演变而来<sup>[22]</sup>。四川盆地震旦系灯影组最新的地层划分方案经过中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院各位专家商讨后确定<sup>[23-24]</sup>。自下而上分为四个层段, 灯一段主要为泥微晶白云岩, 蓝细菌类不发育; 灯二段为富含蓝细菌白云岩段, “葡萄花边”构造非常发育, 这是四川盆地灯二段的典型标志<sup>[25]</sup>; 灯三段为以碎屑岩为主的砂泥岩, 厚度差异大, 几十厘米至几十米不等, 如峨边先锋剖面厚度约为 40 cm; 江杨坝剖面则有 50 m<sup>[24]</sup>; 灯四段以含硅质泥微晶白云岩为主, 蓝细菌纹层局部发育。在灯影组内共识别出局限台地相、混积台地相、台地边缘相、台缘斜坡相和陆棚相, 其中泻湖、藻坪和台内丘滩亚相是研究区内最为发育的亚相类型<sup>[26-27]</sup>(图 2)。储层主要发育在灯二段及灯四段, 沉积期末经过抬升暴露溶蚀(表层岩溶), 后期又经过几亿年地质历史时期的埋藏压实、构造运动及多期次的溶蚀、充填等复杂的成岩作用。储层纵横向非均质性强, 物性差异大。因此, 灯影组二段和灯影组四段的储层构型是研究的重点内容。

## 2 储层构型划分及特征

### 2.1 储层构型划分

储层构型是指不同级次储层构成单元的形态、规模、方向及其叠置关系<sup>[28]</sup>。结合野外、岩芯、电性以及生产动态特征将储层构型划分为层状溶洞构型、

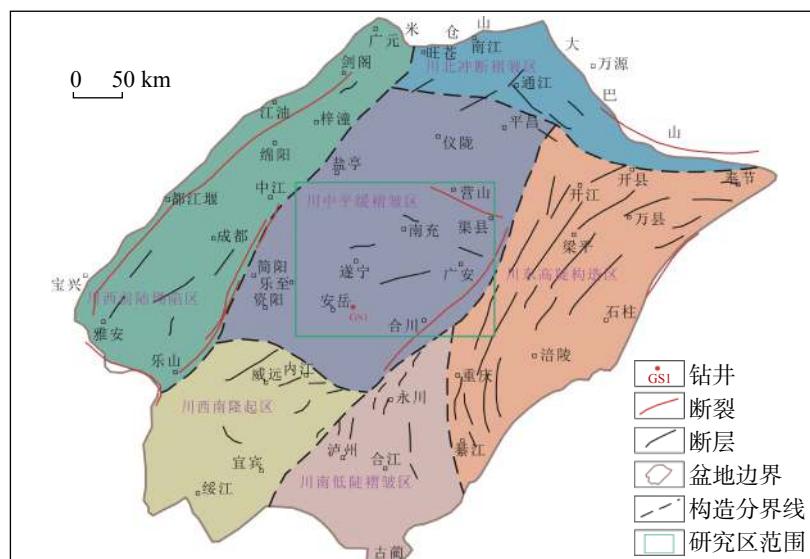


图 1 川中高石梯—磨溪地区构造纲要图

Fig. 1 Structural outline of Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan

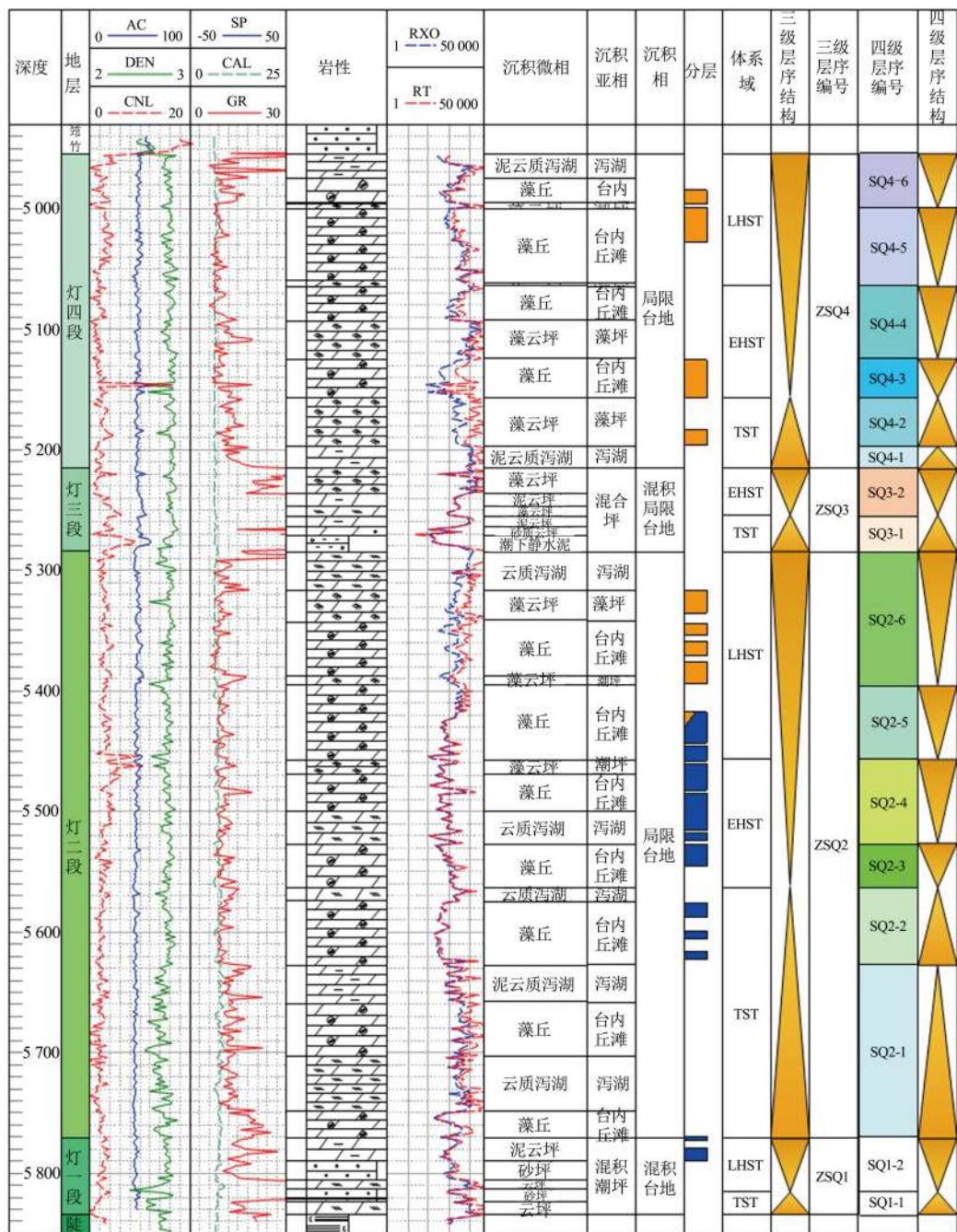


图 2 GS1 井沉积相综合柱状图(据参考文献 [17] 修改)

Fig. 2 Comprehensive histogram of Well GS1 (modified from reference [17])

葡萄花边状溶洞构型、角砾间溶洞构型、缝洞组合构型。其中, 层状溶洞构型主要为顺层分布的高密度、连通性好、扁平或者不规则洞体的储层构型(图 3a); 葡萄花边状溶洞构型主要指孤立、充填程度高、残余有效洞体的储层构型(图 3b); 角砾间溶洞构型主要为充填角砾之间的溶蚀孔洞(图 3c); 缝洞组合构型指的是裂缝+溶洞的情况(图 3d), 除以上 4 种储层构型以外, 其余的认为是基质。

## 2.2 储层构型特征

通过岩芯、FMI 成像测井、常规测井资料, 分析 4 种储层构型与基质特征差异(表 1)。下面分别进行叙述:

层状溶洞构型为溶蚀孔洞较发育、孔洞分布较为密集层段; 岩芯上观察到毫米至厘米级溶洞顺层发育, 分布相对均一; FMI 为高亮背景下暗色斑点顺层分布, 主要有斑杂分布暗斑模式、杂乱分布暗斑模

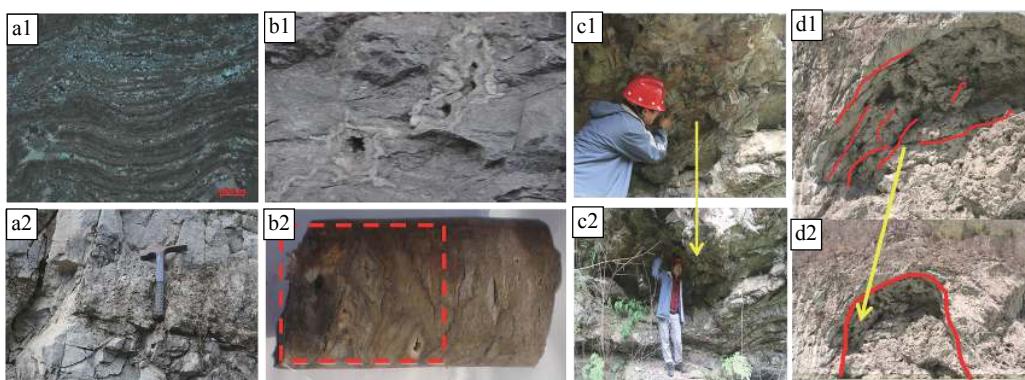


图 3 不同储层构型的微观/宏观特征

a1. 纹层状云岩, 顺层溶蚀孔洞被后期沥青充填, GS18 井(5 147.7 m) a2. 层状溶洞构型, 金口河剖面, 灯四段  
b1. 低充填葡萄花边溶洞构型, 峨边先锋剖面  
b2. 低充填葡萄花边溶洞构型, MX11, 灯二段 c1、c2. 角砾间溶洞构型, 金口河剖面 d1、d2. 缝洞组合构型, 金口河剖面

Fig. 3 Micro/macro characteristics of different reservoir architectures

式、蜂窝状模式、溶洞模式和“暗斑+蜂窝状模式”；常规测井表现为中低电阻、深浅电阻幅度差大、低自然伽马、中—高声波时差、中低密度、中—高中子特征。层状溶洞构型推测是在埋藏期, 由于外来酸性流体的溶蚀作用而形成, 属于埋藏岩溶。

葡萄花边状溶洞构型岩石比较致密, 岩芯上可见葡萄花边状溶洞发育, 洞体为未完全充填残余溶洞; FMI 为亮色背景下暗色斑块零星分布, 一般为零散分布暗斑、连续条带模式、断续条带状模式、条纹模式、杂乱模式、花斑模式; 在常规测井上表现为中—低电阻、低自然伽马、中—低声波时差、中—低密度、中—低中子特征。葡萄花边状成因的主流认识有两种: 一是原生成因, 准同生期沉积成因; 二是次生成因, 强调混合水作用, 或强调大气淡水淋滤以及表生岩溶作用<sup>[29]</sup>。本次以野外露头和岩芯样品的宏观、微观特征为基础, 推测研究区灯影组葡萄花边应为次生成因。形成过程如下: 当海平面下降时, 已经固结的岩层暴露, 在溶蚀等作用下会形成一些裂缝—洞穴, 海平面再上升时, 若裂缝—洞穴体系被海水充满, 均匀分布的等厚环边形态为主的葡萄花边胶结物便开始形成。

角砾间溶洞构型的岩芯可观察沿角砾之间溶蚀形成大小不均、无一定分布规律的溶洞; FMI 为高亮背景下暗色斑点、暗色短线状影像杂乱分布; 常规测井表现为中—低电阻、低自然伽马、中—低声波时差、中高密度值、中等中子特征。角砾间溶洞构型推测是灯影组发育多期表生岩溶作用形成, 岩溶期、近地表流体压力小, 仅沿易流通道溶蚀和冲蚀, 形成非均质极强的相对高渗通道, 为后期埋藏岩溶储层

发育提供了重要的流体输运通道。

缝洞组合构型地层岩芯上可见破碎、裂缝发育、基质溶蚀孔洞发育; FMI 为高亮背景下暗色正弦线状影像和暗色斑点分布; 常规测井表现为低电阻、低自然伽马、高声波时差、低密度值、高中子特征。推测缝洞组合构型是灯影组发育多期表生岩溶作用形成, 岩溶期、裂缝发育, 近地表流体压力小, 仅沿易流通道溶蚀和冲蚀发育, 形成非均质极强的相对高渗通道, 为后期埋藏岩溶储层发育提供了重要的流体输运通道。

基质岩石致密, 基本不发育溶蚀孔洞, 以泥晶、粉晶白云岩为主; FMI 为亮色背景, 基本不含暗色斑点或斑块, 一般为亮色块状模式、硅质块状模式、暗色块状模式和“硅质块状+条带状模式”; 在常规测井上表现为高电阻、低自然伽马、低声波时差、高密度、低中子特征。

### 3 储层构型测井识别

#### 3.1 测井判别模型建立

利用电阻率、中子、密度和声波等测井资料进行交汇分析, 可以将基质和其他储层构型明显区分, 但对基质以外的储层构型类型识别能力降低, 不能将 4 种储层构型相互区分(图 4, 图 5), 需要依靠多测井系列联立建立相应的识别模型。

在测井标准化和储层构型测井响应特征分析基础上, 以岩芯构型对应测井信号作为典型样本, 采用判别分析方法建立了判别模型(式(1)~式(4))。在模型回判过程中, 判别正确率为 75.6%, 能在一定程度

表1 高石梯—磨溪地区储层构型划分表

Table 1 Division of reservoir architectures in Gaoshiti-Moxi area

储层构型类型	岩芯 特征	照片	FMI成像测井		常规测井 图片
			特征	图片	
层状溶洞构型	毫米至厘米级溶洞顺层发育, 分布相对均一		高亮背景下暗色斑点 顺层分布	 4961	中—低电阻、深浅电阻幅度差大、低自然伽马、中—高声波时差、中—低密度、中—高中子
葡萄花边状溶洞构型	葡萄花边状溶洞发育, 洞体为未完全充填残余溶洞		亮色背景下暗色斑块 零星分布	 5457	中—低电阻、低自然伽马、中—低声波时差、中—低密度、中—低中子
角砾间溶洞构型	沿角砾之间溶蚀形成大小不均、无一定分布规律的溶洞		高亮背景下暗色斑点、 暗色短线状影像杂乱分布	 4892 4893	中—低电阻、低自然伽马, 中—低声波时差, 中—高密度, 中等中子
缝洞组合构型	岩心破碎、裂缝发育、基质溶蚀孔洞发育		高亮背景下暗色正弦线状影像和暗色斑点分布	 5392 5394	中—低电阻、低自然伽马, 高声波时差, 低密度值, 高中子
基质	岩石致密, 基本不发育溶蚀孔洞, 以泥晶、粉晶白云岩为主		亮色背景, 基本不含暗色斑点或斑块	 4966	高电阻、低自然伽马、低声波时差、高密度、低中子

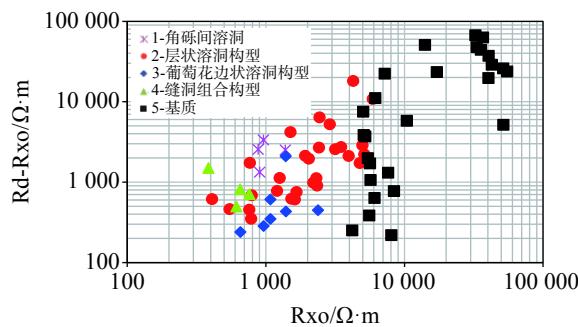


图 4 电阻率差与浅侧向电阻率交汇图

Fig. 4 Crossplot of resistivity difference and  
shallow lateral resistivity

上将 4 类储层构型进行区分。

按照基于常规测井建立的储层构型判别模型对

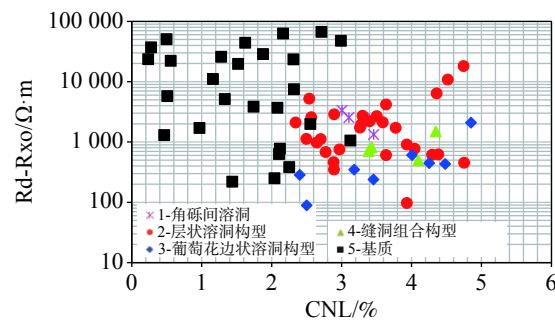


图 5 电阻率差与中子交汇图

Fig. 5 Crossplot of resistivity difference  
and neutron

研究工区 17 口钻井灯四段、灯二段进行了储层构型识别(图 6),作为气藏地质建模工作的基础。

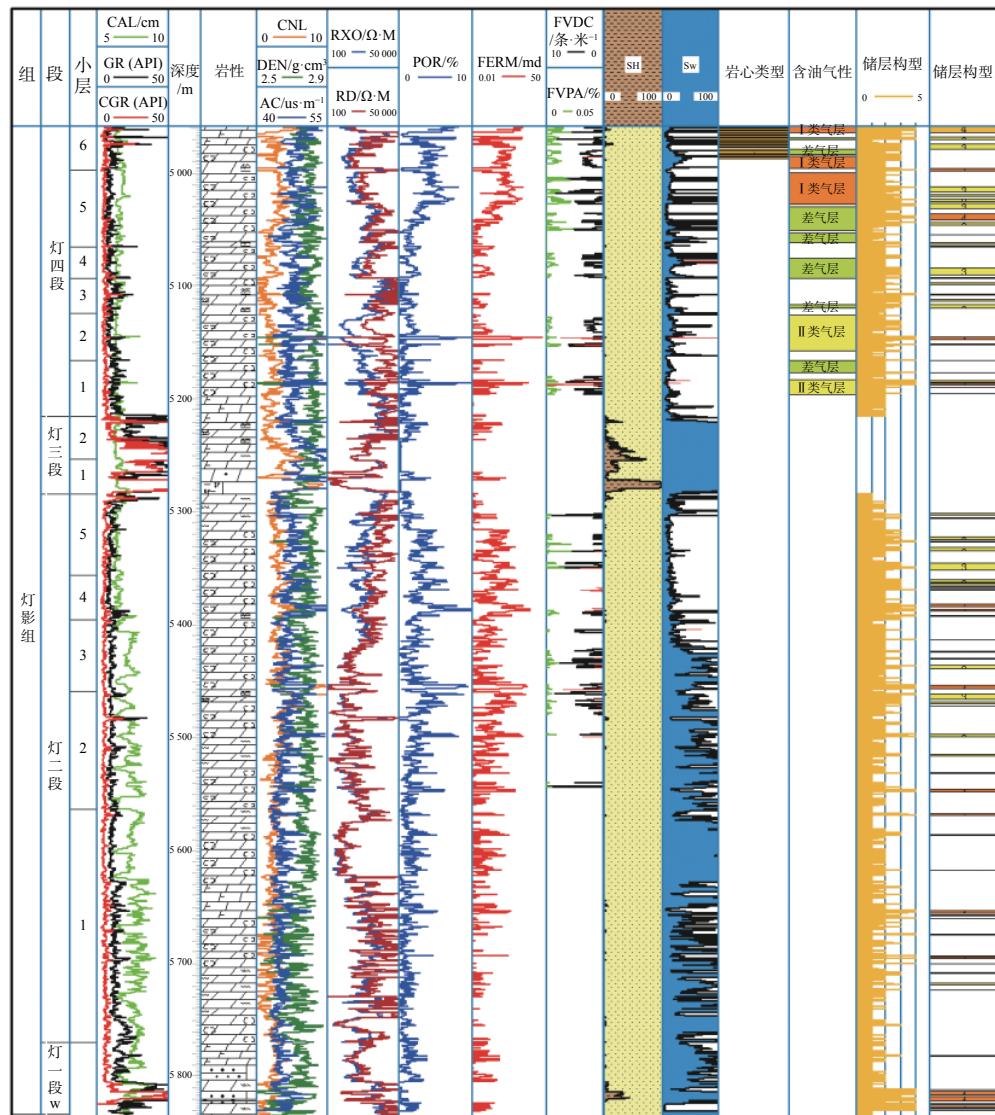


图 6 GS1 井储层构型识别

注: CAL-井径/cm GR-自然伽玛(API) CGR-(API) CNL-补偿中子/% DEN-密度/g·cm⁻³ AC-声波时差/μs·m⁻¹ Rxo-冲洗带电阻率/Ω·m RD-深侧向电  
阻率(Ω·M) POR-孔隙度/% PERM-渗透率/md FVDC-裂缝密度/条·m⁻¹ FVPA-裂缝孔隙度/% SH-泥质含量/% Sw-含水饱和度/%

Fig. 6 Reservoir architecture identification of Well GS1

$$\begin{aligned} Y_{\text{层状溶洞构型}} = & 58.385CAL + 7.68510^{-5}Rxo - \\ & 6.19510^{-3}RD + 13.746AC - \\ & 10.188DEN + 2.609CNL - 503.741 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Y_{\text{葡萄花边状溶洞构型}} = & 61.562CAL + 7.72510^{-5}Rxo - \\ & 6.62810^{-3}RD + 13.236AC - \\ & 10.962DEN + 3.51CNL - \\ & 500.584 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_{\text{角砾间溶洞构型}} = & 59.215CAL + 6.02610^{-5}Rxo - \\ & 5.95210^{-3}RD + 13.977AC - 11.843 \\ & DEN + 2.258CNL - 514.047 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_{\text{缝洞组合构型}} = & 57.71CAL + 6.52910^{-5}Rxo - \\ & 6.15310^{-3}RD + 13.718AC - \\ & 9.949DEN + 3.445CNL - 500.17 \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.2 储层构型物性数值特征

在储层构型测井识别基础上,根据100个全直径岩芯物性分析结果,统计了储层构型物性数值分布特征表明(表2):层状溶洞构型和缝洞组合储层构型孔隙度优于葡萄花边状溶洞构型,缝洞组合构型无论垂直渗透率或者水平渗透率明显优于其它储层构型。将储层构型划分结果与生产情况对比发现,缝洞组合构型与层状溶洞构型测试段产气量远大于其他构型测试时段产气量。

## 4 储层构型建模

储层地质建模是指运用计算机建模软件来建立高精度的储层地质模型,对油气储层内部结构进行精细解剖,进一步解释、研究油气的三维空间分布规律,表征储层的属性及特征,为下一步的油藏数值模拟提供数据<sup>[30]</sup>。本次通过储层地质建模技术来表征储层构型平面展布规律。

### 4.1 储层建模思路

由于工区井距过大,储层构型随机建模在横向预测上必须给予适当的约束条件,才能保证储层构型模型的可靠性。为了确定和选取适当的约束条件,

笔者对储层构型的关联性进行了分析。研究发现储层构型与沉积亚相的关系不是很明显,难以用沉积相来控制储层构型,因此,采用现有的沉积亚相分布来约束储层构型分布难度较大。寻找储层构型与三维地震资料的关系,研究发现:将三维地震均方根振幅属性与储层构型进行关联,各类储层构型均方根振幅差异很小,难以进行有效的区分;地震反射强度属性和地震瞬时频率属性与储层构型进行拟合,各属性的横向预测具有相似性,对于不同的构型,地震属性有差异,但彼此也有叠置,不宜使用;提取三维地震平均振幅属性与储层构型进行关联,统计表明,葡萄花边状溶洞构型平均振幅值最高,其次为基质,层状溶洞构型和缝洞组合构型比较接近,均较低,角砾间溶孔平均振幅值最低,效果相对较好。为了更加直接的反映构型空间分布特征,采用波阻抗反演成果来横向约束研究区储层构型建模。

本次构型建模总体思路为:对高石梯地区、磨溪地区的灯四段开展储层构型建模,首先,开展三维地震波阻抗反演;然后,通过层位标定建立地震波速度模型,并利用速度模型对波阻抗反演数据体进行时深转换,建立波阻抗参数深度域三维分布模型;最后,根据单井解释的储层构型,通过区域变差函数分析储层构型与波阻抗参数的非线性相关关系,运用序贯指示模拟方法,实现储层构型三维地质建模。

### 4.2 储层构型平面展布

在完成构型建模之后,从储层构型模型中(以磨溪地区灯四段为例)提取了连井对比剖面(图7,图8),从剖面可知,储层构型顺层发育特征明显,以层状溶洞构型为主,横向延伸远,纵向变化快,差异大,上部储层构型连续性更好,与井间构型对比认识一致。

根据构型分布模型,按小层分别提取各种构型平面分布(灯四段划分了6个小层,从下至上分别为D4-1~D4-6),并绘制厚度等值线图。磨溪地区灯

表2 储层构型物性统计表  
Table 2 Physical property statistics of reservoir architecture

构型	物性统计					
	孔隙度均值	孔隙度方差	垂直渗透率均值	垂直渗透率方差	水平渗透率均值	水平渗透率方差
层状溶洞构型	4.9	4.546	1.02	3.543	3.9	3.952
葡萄花边状溶洞构型	3.68	4.61	0.345	0.11	1.98	3.83
缝洞组合构型	4.26	4.512	2.255	3.134	32.43	15.58
基质	1.56	3.876	0.0353	0.008	0.182	0.084

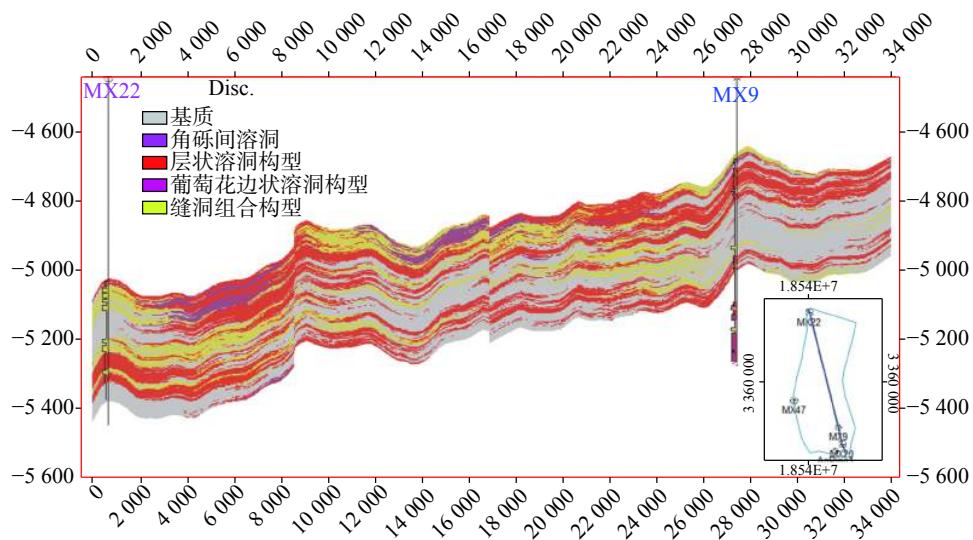


图 7 磨溪地区北西—南东向连井对比剖面

Fig. 7 Contrastive profile of connected wells in NW-SE direction in Moxi area

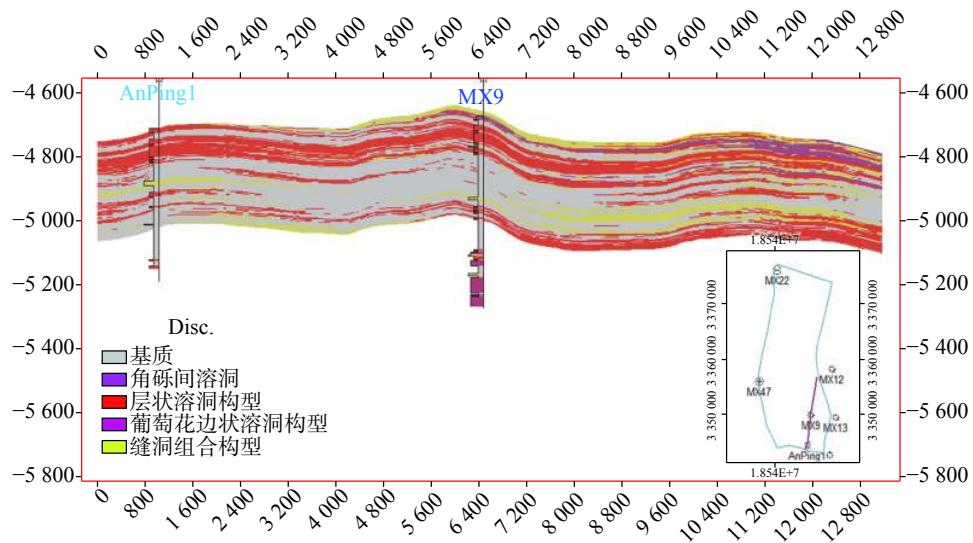


图 8 磨溪地区南西—北东向过井剖面

Fig. 8 Contrastive profile of connected wells in SW-NE direction in Moxi area

四段, 层状溶洞构型在各小层都有较大厚度的分布, 平面分布面积广, 连续性好(图 9); 葡萄花边状溶洞构型在 D4-6 和 D4-4 小层相对较发育, 其他各小层基本不发育, D4-1 小层无分布; 角砾间溶洞主要发育在 D4-6 小层, 平面上分布在工区的中部至北部, 最大厚度 38 m, 平均 8 m, 在 D4-4、D4-3 和 D4-1 小层有零星分布, 厚度薄, D4-5 和 D4-2 小层无分布; 缝洞组合构型在 D4-6 小层最发育, D4-4 和 D4-3 小层次之, D4-5 和 D4-2 小层发育较少, D4-1 小层发育最少。

高石梯地区灯四段, 层状溶洞构型在各小层都有较大厚度的分布, 平面分布面积广, 连续性好(图 10);

葡萄花边状溶洞构型总体厚度薄, 呈零星分布, D4-5 和 D4-3 小层无分布; 角砾间溶洞构型各层总体分布较少, 主要在 D4-5、D4-2 和 D4-1 小层, 平面上分布在工区的中部至北部, 在 D4-6、D4-4 和 D4-3 小层有零星分布, 厚度薄; 缝洞组合构型在各层均有较大面积分布, 主要在工区的中部和南部。

高石梯和磨溪地区的 D4-3 小层层状溶洞构型厚度均较厚, 故以该小层为例, 对钻遇灯四段的钻井试气结果与层状溶洞构型建模结果进行相关性分析(表 3), 发现磨溪地区的 MX22 井层状溶洞构型厚度在 D4-3 小层最厚, 为 46 m, 无阻流量高达  $217.58 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ; MX105 井 D4-3 小层的层状溶洞构型厚度

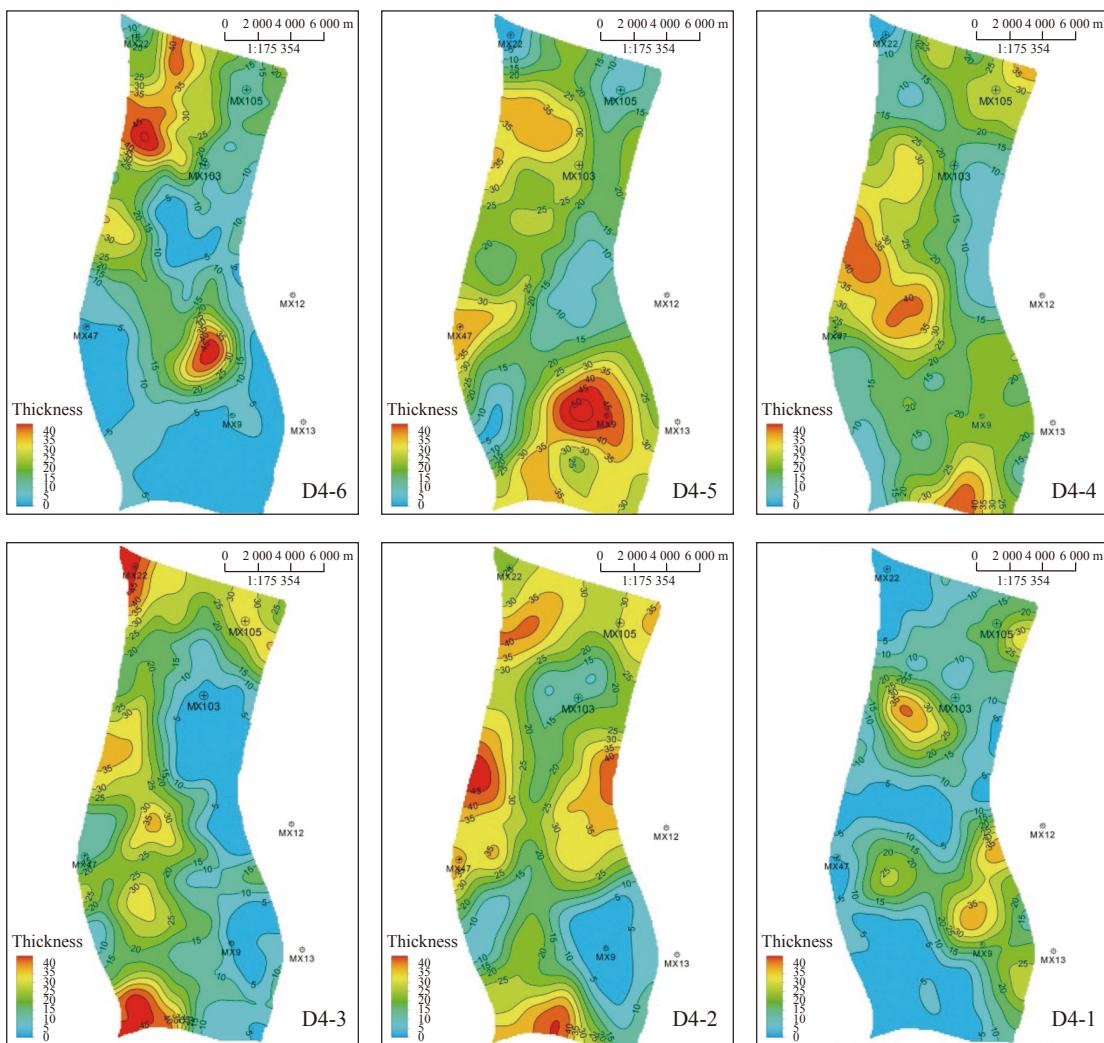


图9 磨溪地区灯四段层状溶洞构型厚度分布等值线图

Fig. 9 Contour map of the thickness distribution of layered cavitation configuration in No.4 segment of Dengying formation in Moxi area

为32 m, 无阻流量高达 $45.51 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ; MX103井D4-3小层的层状溶洞构型厚度为3 m, 无阻流量为 $33.95 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。整体上表明磨溪地区D4-3小层层状溶洞构型厚度较厚区, 其试气结果较好; 在高石梯地区, D4-3小层层状溶洞构型厚度与钻井无阻流量交会图表明二者之间存在一定的线性正相关关系, 层状溶洞构型厚度越大, 无阻流量越高(图11)。综合分析认为高石梯—磨溪地区层状溶洞构型厚度对油气产能有一定的控制作用, 层状溶洞构型较发育区, 埋藏溶蚀作用相对较强, 储集空间发育, 油气储量可能较大, 故为勘探潜力较大区域。

## 5 结 论

(1)结合野外、岩芯、测井以及生产动态特征将

储层构型划分4种, 分别为层状溶洞构型、葡萄花边状溶洞构型、角砾间溶洞构型、缝洞组合构型。其中, 层状溶洞构型推测为埋藏期外来酸性流体的溶蚀作用形成, 角砾间溶洞构型、缝洞组合构型推测为表生喀斯特岩溶作用形成, 葡萄花边状溶洞构型推测为次生原因, 海平面下降时形成缝洞体系, 海平面上升时海水充填缝洞, 形成葡萄花边胶结物;

(2)层状溶洞构型 FMI 成像测井为高亮背景下暗色斑点顺层分布; 葡萄花边状溶洞构型表现为亮色背景下暗色斑块零星分布; 角砾间溶洞构型表现为高亮背景下暗色斑点、短暗色线状影像杂乱分布; 缝洞组合构型表现为高亮背景下暗色正弦线状影像和暗色斑点分布。不同储层构型在常规测井特征上也存在差异;

(3)利用电阻率、中子、密度和声波等测井资料

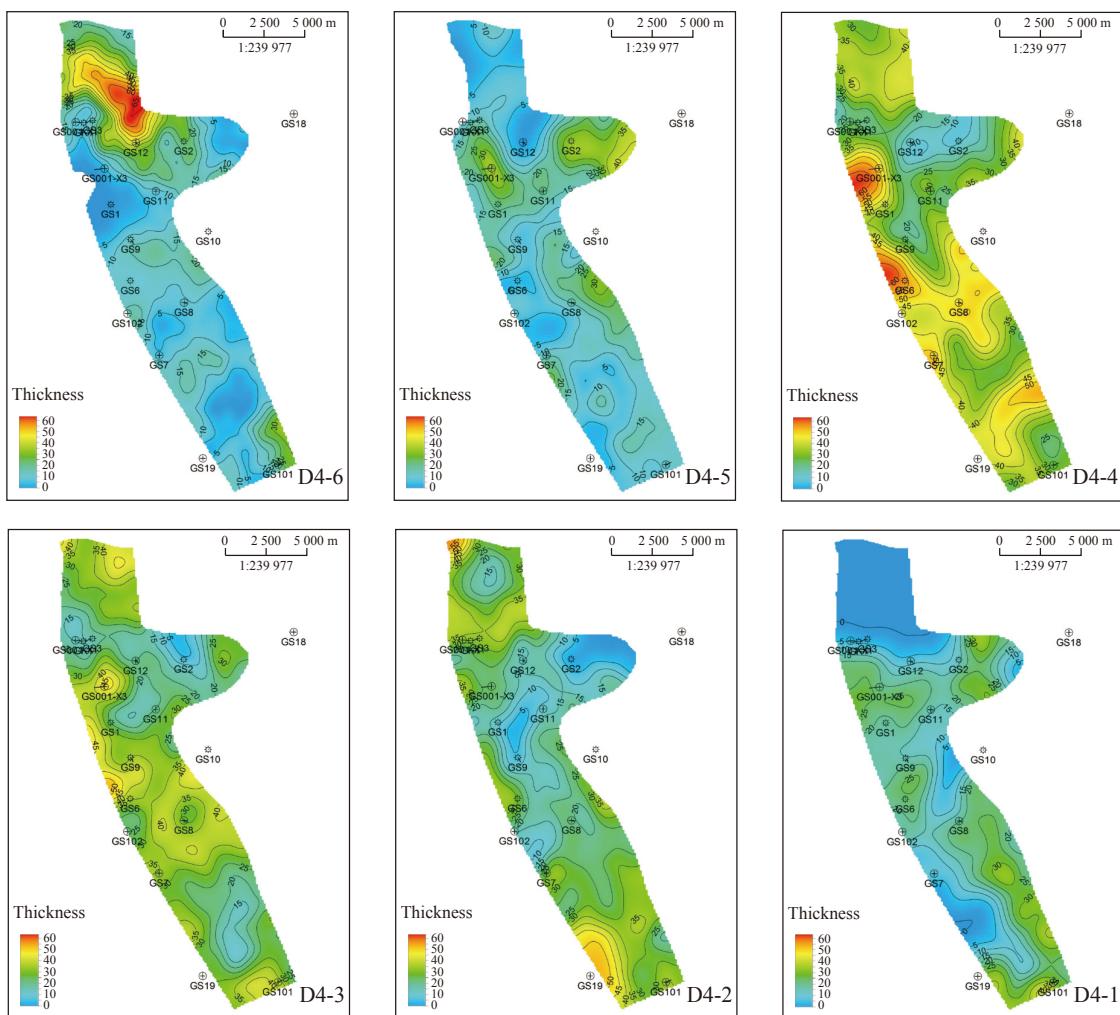


图 10 高石梯地区灯四段层状溶洞构型厚度分布等值线图

Fig. 10 Contour map of the thickness distribution of layered cavitation configuration in No.4 segment of Dengying formation in Gaoshiti area

表 3 高石梯—磨溪地区灯四段试气结果与层状溶洞构型相关性统计表

Table 3 Correlation between gas test results of No.4 segment of Dengying formation and layered cavitation configuration in Gaoshiti-Moxi area

地区	井名	灯四段无阻流量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	灯四段测试气产量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	D4-3小层层状溶洞构型厚度/m
磨溪	MX22	217.58	105.61	46
	MX105	45.51	24.461 4	32
	MX103	33.95	14.87	4
	GS7	531.01	105.65	34
	GS6	459.86	209.64	36
	GS102	190.53	62.63	24
	GS9	178.49	126.66	35
	GS12	117.40	61.675 5	20
	GS8	117.34	76.72	30
	GS1	77.99	36.001 6	25
高石梯	GS11	7.77	5.34	20

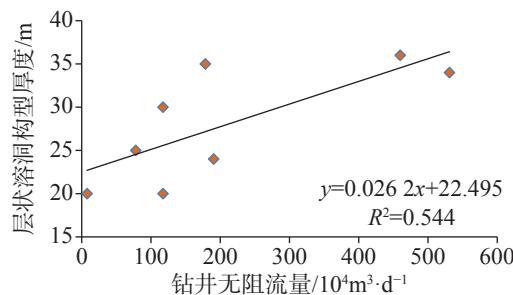


图 11 高石梯地区钻井无阻流量与 D4-3 小层  
层状溶洞构型厚度交汇图

Fig. 11 Crossplot of impedanceless drilling flow and architecture thickness of D4-3 layered cavitation configuration in Gaoshiti area

交汇, 可以将基质构型和其他储层构型明显区分, 但对基质以外的储层构型类型识别能力降低, 依靠多测井系列联立建立相应的判别模型, 回判率为 75.6%, 能在一定程度上将 4 类储层构型进行区分;

(4) 在地质与地球物理研究基础上, 利用单井测井构型解释成果, 通过变差函数分析, 运用基于象元的序贯指示模拟方法, 在地震反演约束的条件下实现碳酸盐岩储层构型建模、分析储层构型展布规律是可行的。综合分析认为高石梯—磨溪地区层状溶洞构型厚度对油气产能有一定的控制作用, 层状溶洞构型较发育区, 为勘探潜力较大区域。

## 参考文献

- [1] 冉隆辉. 论四川盆地天然气勘探前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 42-44.
- [2] RAN Longhui. Natural gas exploration prospect in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(12): 42-44.
- [3] 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 谢增业, 曾富英, 莫午零, 沈珏红, 金惠. 四川盆地震旦系-寒武系大气田形成条件: 成藏模式与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 785-795.
- [4] WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, XIE Zengye, ZEN Fuying, MO Wuling, SHEN Juehong, JIN Hui. Formation conditions, accumulation models and exploration direction of large gas fields in Sinian-Cambrian, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 785-795.
- [5] 蔡珺君, 彭先, 李骞, 占天慧, 朱占美, 李文, 甘笑非, 邓庄, 王家树. 强非均质性碳酸盐岩气藏储集层再划分及不同生产阶段技术对策: 以四川盆地磨溪—高石梯地区震旦系为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(6): 851-860.
- [6] CAI Junjun, PENG Xian, LI Qian, ZHAN Tianhui, ZHU Zhanmei, LI Wen, GAN Xiaofei, DENG Zhuang, WANG Jiashu. Subdivision of strongly heterogeneous carbonate gas reservoir and technical countermeasures in different production stages: Case study of Sinian in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(6): 851-860.
- [7] Allen J R L. The plan shape of current ripples in relation to flow conditions[J]. *Sedimentology*, 1997, 24(1): 53-62.
- [8] Allen J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar complexes and sandstone sheets(lower-sinuosity braided streams) in the Broun stones (L. Devonian), Welsh Borders[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 33(4): 237-293.
- [9] Miall Andrew D. Architecture elements analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth Science Review*, 1985, 22(2): 261-308.
- [10] Miall Andrew D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 74-98.
- [11] Miall A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: a reality check[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(7): 989-1002.
- [12] Nilsen Tor Helge. Atlas of deep-water outcrops[M]. Tulsa: pro Type Graphics, 2007: 52-86.
- [13] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 51-63.
- [14] XUE Peihua. An introduction to reservoir patterns of river dyke[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 51-63.
- [15] 于兴河, 王德发, 郑俊茂, 孙志华. 辫状河三角洲砂体特征及砂体展布模型: 内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察[J]. 石油学报, 1994, 15(1): 26-37.
- [16] YU Xinghe, WANG Defa, ZHENG Junmao, SUN Zhihua. 3-D extension models of braided deltaic sandbody in terrestrial facies—an observation on deposition of modern deltas in daihai lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1994, 15(1): 26-37.
- [17] 马世忠, 杨清彦. 曲流点坝沉积模式、三维构型及其非均质模型[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 241-247.
- [18] MA Shizhong, YANG Qingyan. The depositional model, 3-D architecture and heterogeneous model of point bar in meandering channels[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 241-247.
- [19] 贾爱林, 穆龙新, 陈亮, 黄石岩. 扇三角洲储层露头精细研究方法[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 105-108.

- JIA Ailin, MU Longxin, CHEN Liang, HUANG Shiyan. Approach for detailed study of reservoir outcrop[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(4): 105-108.
- [16] 陈欢庆, 赵应成, 舒治睿, 孙作兴. 储层构型研究进展[J]. *特种油气藏*, 2013(5): 7-13, 151.
- CHEN Huanqing, ZHAO Yingcheng, SHU Zhirui, SUN Zuoxing. Advances in Study on reservoir structure[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2013(5): 7-13, 151.
- [17] 刘营, 龚燕秀, 黄纯虎, 侯绪林, 吴康军, 罗蓉, 刘勇. 川中高石梯—磨溪地区产层天然气地球化学特征[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2019, 21(4): 17-22.
- LIU Ying, GONG Yanxiu, HUANG Chunhu, HOU Xulin, WU Kangjun, LUO Rong, LIU Yong. Geochemical characteristics of natural gas production layers in Gaoshiti-Moxi Region, Central Sichuan, China[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition)*, 2019, 21(4): 17-22.
- [18] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 鲁卫华, 谷志东, 徐安娜, 杨雨, 徐兆辉. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 1(3): 305-312.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, LU Weihua, GU Zhidong, XU An'na, YANG Yu, XU Zhaozhi. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 1(3): 305-312.
- [19] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志: 卷十一四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 82-86.
- Editorial Committee of Petroleum Geology on Oil & Gas Zones in Sichuan Basin. Petroleum Geology of China(Vol. 10): Oil & Gas Zones in Sichuan Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 82-86.
- [20] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 徐春春, 邹才能, 谢武仁, 曾富英, 武赛军. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. *天然气工业*, 2015, 35(1): 24-35.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, XU Chunqun, ZOU Caineng, XIE Wuren, ZENG Fuying, WU Sajun. Geological characteristics of the Simian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 24-35.
- [21] 李启桂, 李克胜, 唐欢阳. 四川盆地不整合发育特征及其油气地质意义[J]. *天然气技术*, 2010, 4(6): 21-25.
- LI Qigui, LI Kesheng, TANG Huanyang. Unconformity characteristics of Sichuan Basin and its geological implication[J]. *Natural Gas Technology*, 2010, 4(6): 21-25.
- [22] 四川省地质矿产局. 全国地层多重划分对比研究: 四川省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- Sichuan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Study on the nationwide multifold stratigraphic division and correlation: Sichuan oil and gas regions [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.
- [23] 姚根顺, 郝毅, 周进高, 蒋伟雄, 文龙, 倪超, 潘立银, 张建勇. 四川盆地震旦系灯影组储层储集空间的形成与演化[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 31-37.
- YAO Genshun, HAO Yi, ZHOU Jingao, JIANG Weixiong, WEN Long, NI Chao, PAN Liyin, ZHANG Jianyong. Formation and evolution of reservoir spaces in the Simian Dengying Formation of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 31-37.
- [24] 斯春松, 郝毅, 周进高, 倪超, 潘立银. 四川盆地灯影组储层特征及主控因素[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014(3): 266-273.
- SI Chunsong, HAO Yi, ZHOU Jingao, NI Chao, PAN Liyin. Reservoir characteristics and main controlling factors of Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2014(3): 266-273.
- [25] 李旭兵, 刘安, 危凯, 赵灿. 雪峰山西侧地区震旦系灯影组碳酸盐岩储集特征及分布[J]. *地质通报*, 2012, 31(11): 1872-1877.
- LI Xubin, LIU An, WEI Kai, ZHAO Can. Reservoir characteristics and distribution characteristics of the carbonate in Dengying Formation on the western side of the Xuefeng Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(11): 1872-1877.
- [26] 何德军. 川东南地区灯影组沉积、储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- HE Dejun. The research of Sedimentary and reservoir characteristics of the Dengying Formation in Southeastern Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [27] 王鹏万, 陈子焯, 李娴静, 程刚, 贺训云, 徐政语, 马立桥, 董庸, 黄羚. 黔南坳陷上震旦统灯影组地球化学特征及沉积环境意义[J]. *现代地质*, 2011(6): 1059-1065.
- WANG Pengwan, CHEN Ziliao, LI Xianjing, CHEN Gang, HE Xunyun, XU Zhengyu, MA Liqiao, DONG Yong, HUANG Ling. Geochemical characteristics and environmental significance of Dengying Formation of Upper Sinian in Qiannan depression[J]. *Geoscience*, 2011(6): 1059-1065.
- [28] 吴胜利. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 136-174.
- WU Shenghe. Reservoir characterization and reservoir modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 136-174.
- [29] 郝毅, 周进高, 陈旭, 潘立银, 胡圆圆, 胡安平. 四川盆地灯影组“葡萄花边”状白云岩成因及地质意义[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(04): 57-64.
- HAO Yi, ZHOU Jin'gao, CHEN Xu, PAN Liyin, HU Yuanyuan, HU An'ping. Genesis and geological significance of upper Sinian Dengying Dolostone with grape-lace shaped cement, Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(04): 57-64.
- [30] 李振华. 复杂断块油藏储层地质建模研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- LI Zhenhua. Geological modeling on the reservoir of complicated fault block [J]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

## A study of reservoir architecture of Dengying formation in Gsoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

HU Xiuquan<sup>1,2</sup>, LU Hongjiang<sup>1,2</sup>, YI Chi<sup>1</sup>, LI Jianghan<sup>1</sup>, CHEN Keyong<sup>1,2</sup>, LU Jie<sup>3</sup>, XIAO Chenjing<sup>4</sup>

( 1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;  
4. Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China )

**Abstract** There is a largest complete carbonate gas reservoir so far found in the mid of Sichuan Gaoshiti-Moxi area. Influenced by multi-period tectonic movement, this reservoir presents complex characteristics of diagenesis and reservoir formation. Combined with the field, lithologic, logging and production dynamic, the reservoir architecture can be divided into four types. The FMI of layered cavitation configuration shows layered distribution with dark spots on light background; the FMI of grape-lacelike cavitation configuration shows sporadic distribution of dark patches on light background; the FMI of the inter-breccia cavitation configuration shows clutter distribution of dark patches and short line images; and the FMI of cavitation configuration combined with crevices shows distribution of dark sinusoidal line images and patches on light background. The layered cavitation configuration is supposed to be formed by the dissolution of external acidic fluids during the burial period. The inter-breccia cavitation configuration and cavitation configuration combined with crevices are supposed to be formed by supergene karstification, and the grape-lacelike cavitation configuration is presumed to be a secondary cause—When the sea level rises, seawater fills the cracks and holes, forming grape lace cement. Different reservoir configurations are also different in conventional logging characteristics. The establishment of a corresponding discriminant model by multiple logging series can, to a certain extent, distinguish these four types of reservoir configurations.

In this study, the single well logging, the variance function analysis, and the sequential indicator simulation method based on pixel are adopted to carry out the reservoir structure modeling of Dengying formation under the condition of seismic inversion constraint. The distribution law of reservoir configuration in No.4 segment of Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area is discussed. The method of reservoir structure analysis that enriches the methods and studies of carbonate rocks has a wide range of application prospects. The results of drilling gas test show that the thickness of layered cavitation configuration has a certain control effect on oil and gas productivity, and the areas where the layered cavitation configuration is relatively developed are of great exploration potential.

**Key words** reservoir modeling, Dengying formation, reservoir architecture, discriminant model, Gsoshiti-Moxi area

( 编辑 张玲杨杨 )