

关宝珠, 刘俊锋, 杨茂川, 等. 轮古西区块鹰山组岩溶储层地震响应特征及储层分布预测[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 370-381.

DOI: 10.11932/karst20250214

轮古西区块鹰山组岩溶储层地震响应特征及储层分布预测

关宝珠¹, 刘俊锋¹, 杨茂川², 杨新影¹

(1. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

2. 北京锐浪石油技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 碳酸盐岩岩溶储层的定性预测是岩溶地震解释技术的关键之一。针对轮古西区块奥陶系鹰山组岩溶储层地震预测难点, 通过提取轮古西区块奥陶系鹰山组碳酸盐岩岩溶储层地震响应特征, 基于均方根振幅、瞬时能量、微分振幅、最大曲率、瞬时振幅和方向加权增强相干等多地震属性对比分析研究, 探讨适合该区块碳酸盐岩岩溶储层准确预测的方法。结果表明: 鹰山组碳酸盐岩岩溶储层可划分为表层岩溶储层、暗河岩溶储层和断控岩溶储层; 表层岩溶储层地震特征为以杂乱强反射为主, 一般位于残丘高部位, 在古潜山风化面 0~40 m 以内分布; 暗河岩溶地震特征主要为地震剖面连续强反射, 阻抗属性为低值异常体, 横向展布范围较大, 有典型的河道特征; 断控岩溶地震特征为沿断裂展布的串珠反射、杂乱反射, 纵向延伸大, 平面沿断裂线性展布。开展轮古西区块奥陶系鹰山组岩溶储层地震响应特征研究, 基于地震属性特征对表层岩溶、暗河岩溶和断控岩溶分布进行半定量预测, 结果可为厘清奥陶系鹰山组优质储层和油气分布规律提供一定支持。

关键词: 轮古西; 鹰山组; 储层预测; 岩溶; 地震响应特征

创新点: 对比均方根振幅、瞬时能量、微分振幅等多种岩溶地震属性, 组合优选碳酸盐岩岩溶储层预测方法, 理清不同类型岩溶储层地震响应模式, 并基于多地震属性综合预测轮古西鹰山组岩溶储层分布。

中图分类号: P618.13; P631.4 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2025) 02-0370-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

迄今全世界已发现碳酸盐岩油气藏 279 个, 分布在 39 个国家和地区, 地质储量约占全球油气资源总量的一半, 油气产量占 60% 以上^[1]。我国主要发育大型海相碳酸盐岩油气藏, 以岩性—地层圈闭为主, 油气藏埋藏深度普遍大于 5 500 m, 主要集中在塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地等大型含油气盆地。我国石油工业快速发展促使我国原油进口

量逐年增加, 日趋复杂的国际形势导致我国石油供给稳定遭受挑战, 碳酸盐岩岩溶油气藏的勘探与开发是端稳能源饭碗的现实保障途径之一, 其已由石油战略储备区转变为石油资源开发接替区。因此, 准确预测和精细评价碳酸盐岩岩溶储层越来越受到石油地质工作者的关注。

地震波是地震对地表地貌产生破坏的主要能量载体, 同时也可以利用地震波预测地质灾害、勘查地下水资源和勘探石油天然气等战略性矿产资源。地

第一作者简介: 关宝珠 (1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事碳酸盐岩古岩溶储层、缝洞型碳酸盐岩油藏描述工作。E-mail: guanbz-tlm@petrochina.com.cn。

收稿日期: 2024-05-24

震勘探技术是一种基于地震波传播和反射特性,识别地下地质构造和岩石岩性的地球物理勘探方法,其原理是通过可控地震源激发地震波,通过地震数据采集仪记录地震波在不同介质中的传播速度、衰减和反射信号等特性^[2],通过对原始地震数据的精细解释得到高分辨率的地下岩层图像,进而推断地下岩层的岩性、构造、厚度、物性等重要地质数据。高分辨率的地下岩层图像是石油地质从业者确定碳酸盐岩油气藏位置、形态和规模的基础资料之一,有助于对勘探区进行全面、准确的分析和评价。因此,优选适合岩溶储层地震响应预测方法对碳酸盐岩油气藏的勘探开发至关重要。

1 研究区概况

轮南古潜山(简称“轮古”)位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起中部地区^[3],是塔里木盆地轮南古隆起的主体部位,东连草湖凹陷,西邻哈拉哈塘凹陷^[4],南达满加尔凹陷,北接轮台古陆。工区有利勘探面积约为2 450 km²^[5],是东、西、南3个方向凹陷构造油气长期运移的指向区,构造位置非常有利于油气聚集,已探明奥陶系古潜山油气藏石油地质储量超6×10⁸ t^[6]。轮古西区块位于轮古油气田西部,主要包括:轮古15井区,轮古47控制区及轮古9—40井区,有利勘探面积约为221.5 km²(图1)。轮古西区块特别是其北部地区,已钻的低效及失利开发井较多,目的层钻遇率低可能是造成这一现象的主要原因,亟需解决碳酸盐岩岩溶储层准确预测和精细评价的

问题。

轮古西区块目的层段为奥陶系鹰山组(O₁₋₂y),岩石类型以颗粒灰岩为主,其次为泥晶灰岩、云质灰岩、岩溶岩(主要包括石灰岩、白云岩和盐岩)及硅质岩类,其形成于晚加里东—早海西期,海平面变化控制排泄基准面并决定岩溶储层纵向分带特征。轮南奥陶系古潜山是加里东构造各幕次运动事件、海西早期运动等多期强烈构造运动叠加形成的古隆起^[7],地质历史上经历了表生成岩环境下的暴露、埋藏和抬升,造成碳酸盐岩多期次、多类型的溶蚀^[8],形成了叠加的古风化壳型岩溶储层,因此,轮古西区块碳酸盐岩岩溶储层具有较好的油气勘探开发潜力。

轮古西区块构造背景复杂、岩溶作用发育,其奥陶系鹰山组碳酸盐岩储层准确预测和精细评价面临以下问题:①构造活动期次多,活跃的构造活动形成复杂的断裂系统,增加了岩溶储层的复杂性和识别难度。②岩溶作用期次多,表层岩溶发育强烈,古地貌起伏变化大,明河和暗河空间展布错综复杂,岩溶储层分布立体化。③有效缝洞储集空间类型多^[9],主要有溶蚀孔隙、裂缝、溶洞三大类型(表1),可见洞穴、孔洞、构造缝、网状微裂缝、缝合线、伴生溶孔、晶间孔和晶间溶孔、粒间溶孔等。

2 岩溶储层类型

根据岩溶缝洞发育特征及形成的岩溶水动力条件,结合现代岩溶地质理论认为碳酸盐岩岩溶储层可划分为表层岩溶储层、暗河岩溶储层和断控岩溶

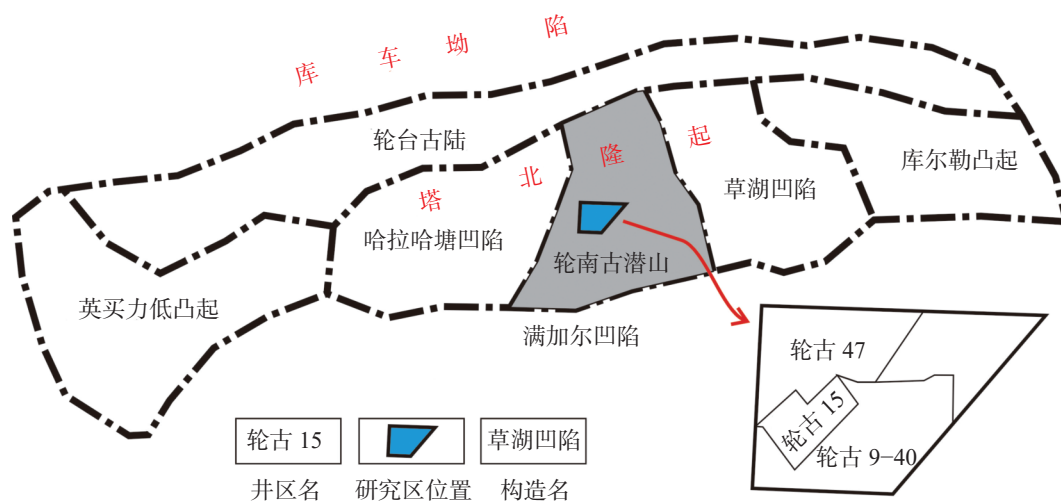


图1 塔里木盆地轮古西区块构造纲要图

Fig. 1 Structural outline of the Lunguxi block in the Tarim Basin

表 1 碳酸盐溶蚀孔隙、溶洞、裂缝级别划分表（据塔里木油田公司，2012）
Table 1 Classification of carbonate dissolution pores, caves and fractures (according to Tarim Oilfield, 2012)

溶蚀孔隙		溶洞		裂缝	
类型	孔径/mm	类型	洞径/mm	类型	缝宽/mm
大孔	0.50~2.00	巨洞	>1 000	大缝	>10
中孔	0.25~0.50	大洞	500~1 000	中缝	1~10
小孔	0.01~0.25	中洞	20~500	小缝	0.1~3
微孔	<0.01	小洞	2~20	微缝	<0.1

储层三种主要类型。

2.1 表层岩溶储层

主要发育高角度构造(扩溶)缝、溶蚀孔洞和小型溶洞等,溶蚀孔缝以垂向沟通为主,横向沿裂缝可短距离连通;裂缝及小规模溶洞呈面状展布,调整能力强。同时,表层岩溶带发育与古地貌类型及古水动力条件关系密切,古地貌类型或水动力条件不同,表层岩溶带发育厚度、岩溶形态与岩溶缝洞系统发育规模、岩溶缝洞系统充填特征也不同^[6]。一般来说,溶峰和溶丘等正向微地貌个体表层岩溶储层厚度较大、储层较为发育,而沟谷和洼地等负向微地貌个体表层岩溶储层发育较弱^[1]。

2.2 暗河岩溶储层

暗河系统包括地下河、落水洞、竖井、天窗、厅堂型和廊道型溶洞、暗河出水口和入水口等,沿地下水径流方向连通性较好,普遍存在明暗河互相转化现象,地下水最终转入明河或岩溶泉^[7-8]。已开发井(轮古 42 井、轮古 15-1 井、轮古 15-12 井、轮古 15-2 井)钻探揭示:暗河溶洞储层是油气高产的主要储集类型,也是研究区最主要的储集体类型之一。

2.3 断控岩溶储层

该储层发育受控于断裂活动,是成岩流体沿断裂面或构造缝溶蚀、改造形成的缝洞集合体,沿着断裂带纵向发育,深度范围变化较大,垂向连通性较好,横向非均质性强,以溶蚀缝洞为主,地下水沿着断裂(裂缝)发生垂向流动,在地下水位附近转为水平径流为主^[9]。断控岩溶储层主要由不同组系的构造裂缝与非构造裂缝或溶蚀裂隙,在三维空间范围内形成一定规模的似网状裂缝网络系统而构成的有效储集空间,裂缝发育区域发育溶蚀孔洞,断控岩溶沿断裂展布。断控岩溶储层类型的裂缝既是主要的储集空间,又是重要的渗滤通道^[10],一般具有较低的孔隙

度与较高的渗透率,其储渗能力主要受裂缝的发育程度、分布、连通状况的控制^[11],同时断控岩溶沿断裂展布,具有较为明显的分段性与分隔性,纵向连通优于横向。

3 岩溶储层识别

地震响应勘探技术是一种非常有效的地质勘探方法,其凭借较低的成本、不破坏储层的前提下能够获取高精度、高分辨率地质信息的优势,在油气地质勘探开发领域得到广泛应用,提高了勘探成功率实现了节本增效^[12]。地震响应勘探技术在岩溶层位解释、岩溶类型预测和岩溶储层发育区评价等方面已进行了广泛应用^[13],提取岩溶储层地震响应属性,进而判别岩溶储层类型、描述岩溶储层空间展布特征,是岩溶储层预测和勘探开发的工作基础^[12]。碳酸盐油藏勘探开发不断向精细化方向发展,碳酸盐岩岩溶及构造形成的中小型缝洞体预测,已经从定性向半定量、量化方向发展,因此这对碳酸盐岩油气藏的地震响应勘探技术提出了更高的要求。

3.1 岩溶储层识别方法

研究区岩溶储层形成的主要原因是多期构造运动相互叠加,断裂裂缝系统成“立体网状”,而且裂缝与断裂伴生,形成裂缝发育带。因此,优选地震均方根振幅、瞬时振幅以及方向加权增强相干(AFE)等识别方法,从不同尺度和不同方向开展研究区岩溶储层地震响应预测。

(1)均方根振幅原理:均方根振幅是将振幅平方的平均值再开平方处理。由于均方根振幅值在取平均值之前已经进行了平方计算,所以均方根振幅对特别大的振幅响应非常敏感^[10,14]。一般用于识别地层砂泥岩百分比含量、地层岩性相变、连片岩溶等特殊构造。

(2)瞬时振幅原理: 瞬时振幅反映了地震波能量的瞬时变化情况, 与地震相位无关, 可用于判断与岩性有关的地质体^[15]。

(3)方向加权增强相干(AFE)原理: 通过比较相邻地震道间的地震波相似性(相干性)或者不相干性来凸显地下岩体的岩溶、断裂或裂缝特征并得到相干数据体。在相干数据体的基础上, 通过方向滤波器保留有利方向的相干线性特征, 去除条纹干扰(线性噪音)等其他方向非构造因素影响的相干特征, 增强沿有利方向的断裂, 提高断裂和断裂之间的接触

关系合理性, 增强平面特征。

3.1.1 表层岩溶储层

LG9C 井位于轮古西井区西部小残丘高部位上, 钻至 5 760~5 840 m 过程中无放空现象, 钻进至 5 836.55 m 发生井漏, 累计漏失 2 236.9 m³, 测井解释综合判断为钻遇“表层岩溶”层段(图 2), 同时地震属性上无明显反射变化(图 2)。原始地震数据及简单解释, 在分辨研究区奥陶系鹰山组碳酸盐岩表层岩溶储层方面已不能完全适用。

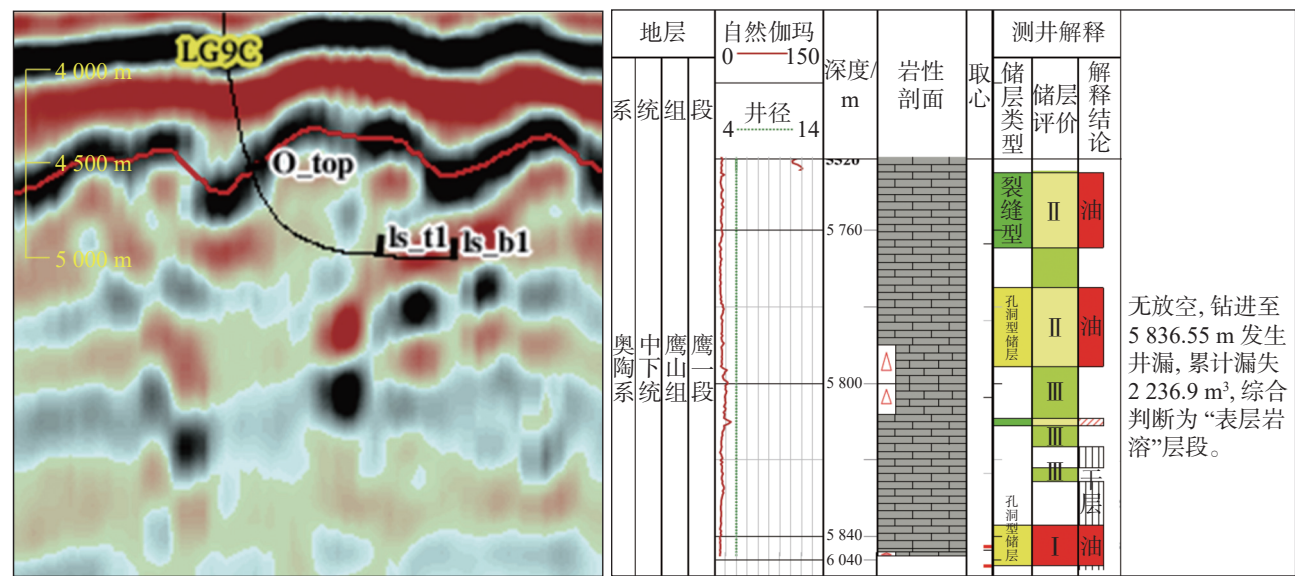


图 2 LG9C 井周原始地震剖面图和测井解释综合柱状图

Fig. 2 Original seismic section around Well LG9C well and its comprehensive logging interpretation histogram

基于 ParaDigm 公司解释系统的第三代相干模块(图 3), 在对地震数据进行相干体处理之后经过线性增强等方法处理成为 AFE 数据体^[16], 之后沿目的层提取不同的属性进行分析比较, 解释奥陶系鹰山组碳酸盐岩的表层岩溶。

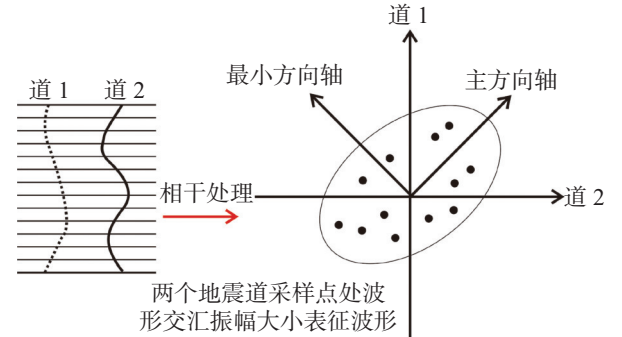


图 3 C3 相干算法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of C3 coherence algorithm

通过对 LG9C 井周均方根振幅、瞬时振幅和方向加权增强相干(AFE)等多属性对比分析, 得到 LG9C 井周均方根振幅剖面图和平面图(图 4a, 图 4d), LG9C 井周瞬时振幅剖面图和剖面图(图 4b, 图 4e), LG9C 井周 AFE 属性剖面图和剖面图(图 4c, 图 4f), 结果显示:“振幅类属性+AFE 属性”与 LG9C 井钻井揭示结果吻合度较高, 可很好表征潜山高部位发育的表层岩溶储层。

通过对 LG903 井周均方根振幅、瞬时振幅和方向加权增强相干(AFE)等多属性对比分析, 原始地震属性无明显变化、AFE 属性有响应, 认为: 方向加权增强相干(AFE)属性可以很好的表征潜山高部位发育的表层岩溶储层, 解释结果显示垂厚为 36 m, 与钻井钻遇的表层岩溶带(垂厚为 36 m)吻合度较高(图 5)。统计结果表明研究区内表层岩溶发育厚度较薄, 为 8.5~40.0 m。

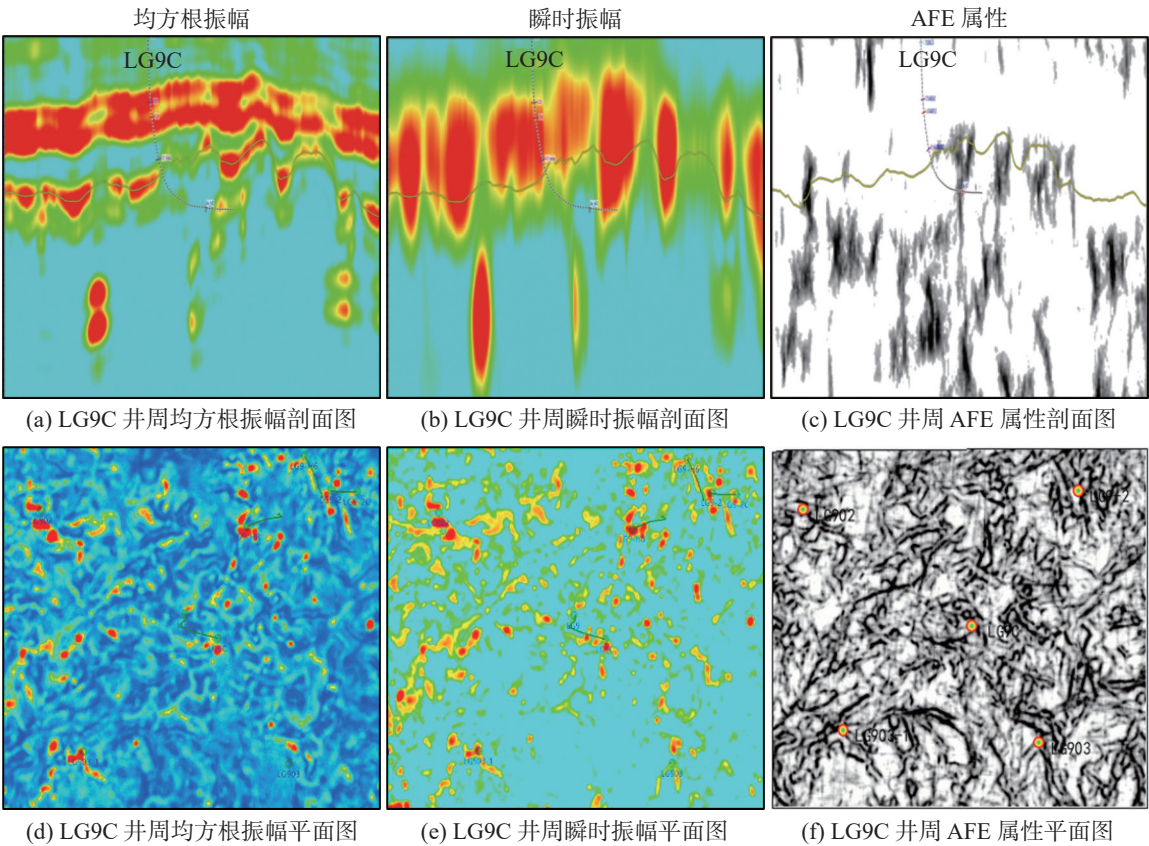


图 4 表层岩溶储层地震响应特征

Fig. 4 Seismic response characteristics of surface karst reservoirs

3.1.2 暗河岩溶储层

按照上文表层岩溶地震响应对比分析方案,以

LG15-3 井剖面为例,对比井的振幅微分属性、均方根振幅属性和瞬时能量属性(图 6),多种地震响应对比分析识别出顺暗河管道。多属性识别对比后认为:

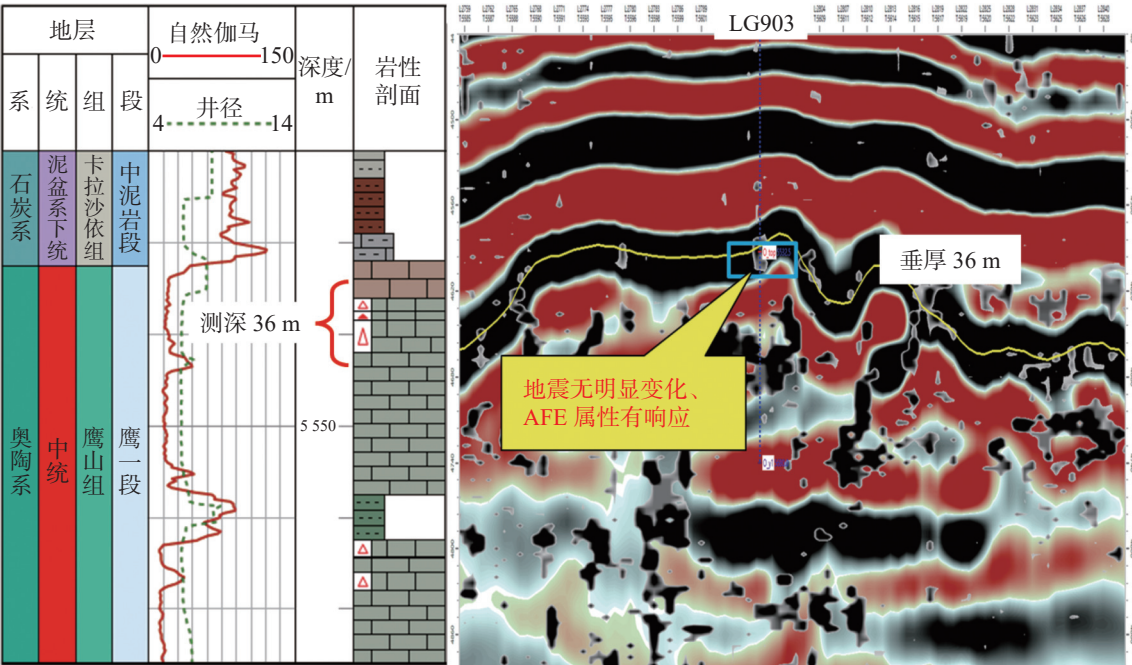


图 5 LG903 钻井钻遇表层岩溶与地震剖面对比图

Fig. 5 Comparison between the surface karst drilled in Well LG903 and its seismic profile

微分振幅及均方根等属性对强连续反射的暗河刻画更好、可以系统识别暗河,暗河刻画的更加聚焦、河道显示的更加连续。根据暗河属性识别结果,刻画出轮古西区块暗河 49 条,暗河主要发育在轮古西区块的岩溶谷地区(图 7)。

3.1.3 断控岩溶储层

前人研究成果显示,原始地震剖面在分辨研究区奥陶系鹰山组碳酸盐岩断控储层方面已不能完全适用^[4]。以 LG9-H8 井地震剖面为例,对原始地震数据(图 8a)进行结构张量(图 8b)、频谱不连续检测

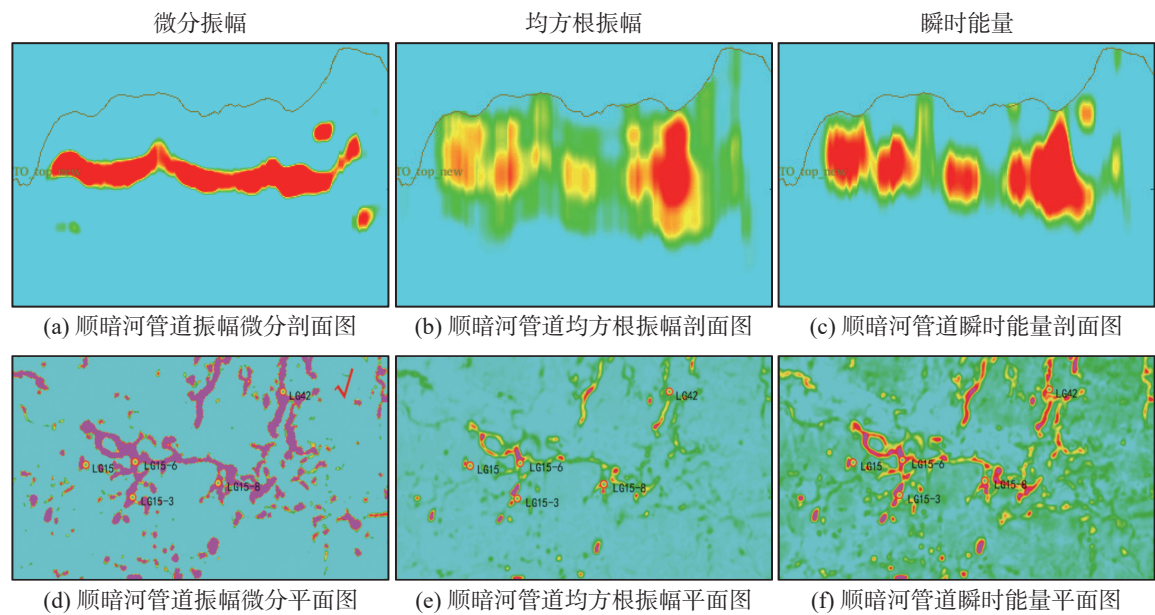


图 6 顺暗河管道岩溶储层地震响应特征

Fig. 6 Seismic response characteristics of karst reservoirs along underground river conduits

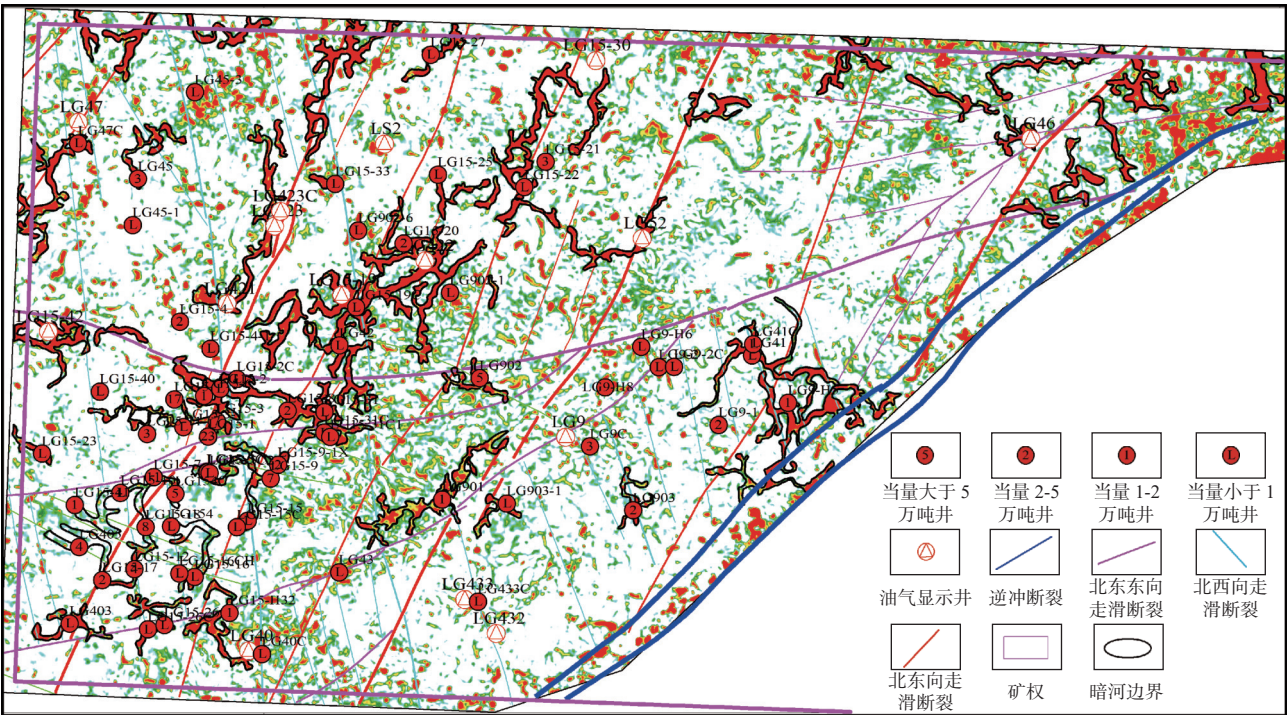


图 7 轮古西区块奥陶系灰岩顶—鹰二段微分振幅平面图

Fig. 7 Differential amplitude plan from the top of Ordovician limestone to the second member of Yinghe in the Lunguxi block

(图 8c)和最大曲率处理(图 8d)分析,多属性对比分析后认为:结构张量可表征断裂的轮廓,频谱分解不

连续检测可表征断裂破碎带内部细节,为基于地震响应预测断控岩溶储层的最优解。

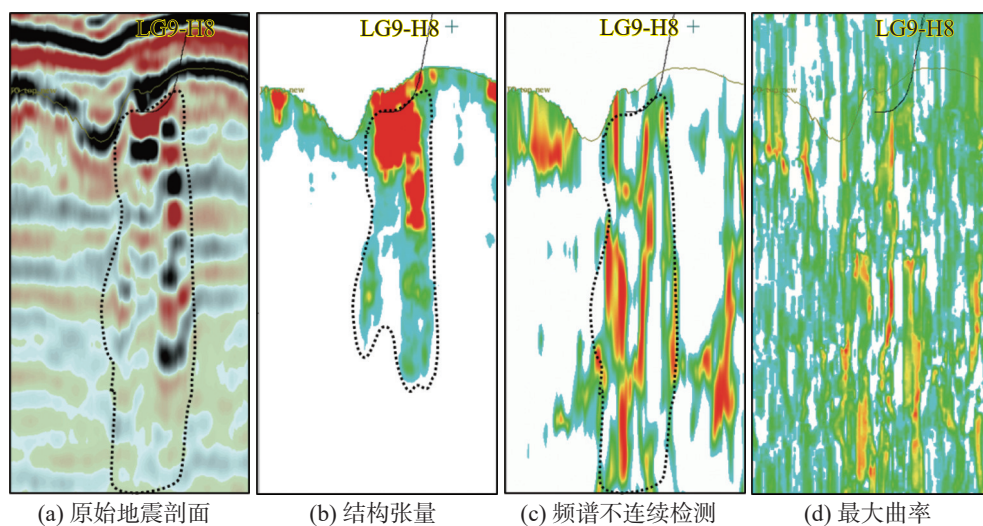


图 8 轮古西区块断控岩溶储层地震多属性响应特征

Fig. 8 Multi-attribute seismic response characteristics of fault-controlled karst reservoirs in the Lunguxi block

3.2 不同类型储层地震响应模式

轮古西区块奥陶系鹰山组碳酸盐岩岩溶储层的孔隙系统复杂多样、多种地质因素并存且交互作用,储层非均质性强;小缝洞体地震反射异常较弱或不明显、隐蔽性强,识别难度大;断层和古河道内部的低序次断裂的发育特征及其与小缝洞体的关系,难以定量确定。因此本文基于前期勘探开发资料划分研究区储层类型后,明确其地震响应特征。

已有研究表明,古潜山顶部发育“串珠”时,在古潜山波阻抗界面处出现相位上移现象;在古潜山顶部发育洞穴时,古潜山顶界面处地震表现为弱反射现象。随着洞穴距离古潜山顶面距离的增大,“串珠状”地震反射逐渐下移,古潜山顶面也逐渐由弱反射过渡为强波峰反射^[6-7]。

结合上述研究成果,通过对典型井 LG9C、LG15-3 以及 LG9-H8 的地震剖面解释,对轮古西区块奥陶系鹰山组钻探揭示的表层岩溶、暗河岩溶、断控岩溶三种岩溶类型地震属性响应特征进行对比研究,可知:表层岩溶地震特征主要以杂乱强反射为主,一般位于残丘高部位,在古潜山面 0~40 m 以内分布;暗河岩溶地震特征主要为连续强反射,横向展布范围较大,有典型的河道特征;断控地震特征主要为沿断裂展布的串珠反射、杂乱反射,纵向延伸大,平面沿断裂线性展布(表 2)。

4 岩溶储层分布预测

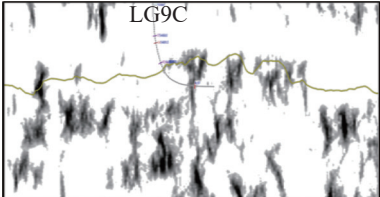
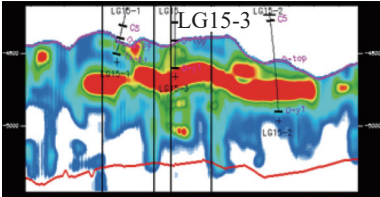
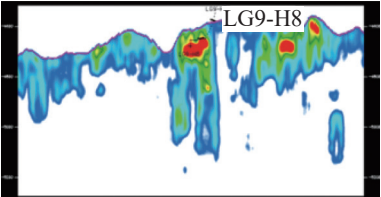
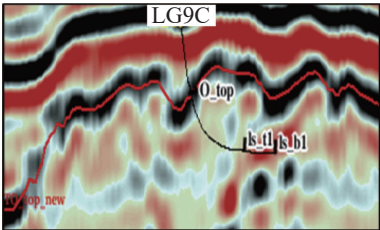
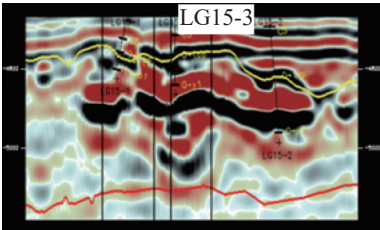
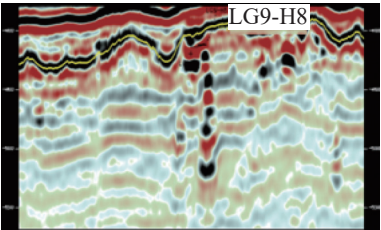
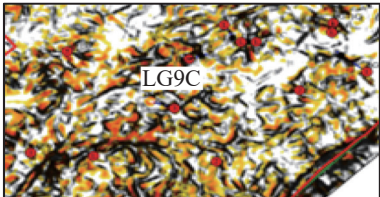
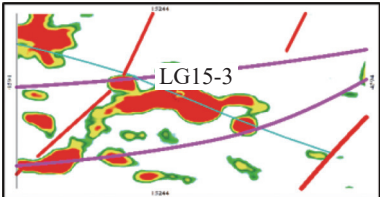
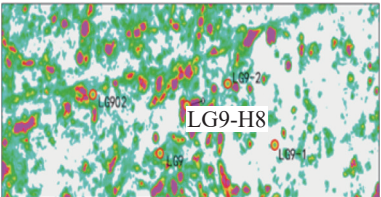
碳酸盐岩岩溶储层非均质性极强,塔里木盆地北部轮古油气田多期构造活动形成的复杂断裂体系,进一步增强了轮古西区块岩溶储层空间的复杂性。奥陶系鹰山组岩溶储层发育期次多,特别是表层岩溶作用强烈,导致古地貌起伏变化大,岩溶分布具有明显的“立体网状”特征;岩溶储层类型多,也造成地震响应特征多样、纵横向变化大;加之奥陶系鹰山组岩溶储层埋藏深($H > 5\,000\text{ m}$)等因素,最终造成轮古西区块奥陶系鹰山组岩溶储层地震预测难度大。

轮古西区块岩溶储层主要受三种岩溶作用复合控制,同时不同主控因素的岩溶作用形成的岩溶储层在储集空间、空间展布特征和地震响应特征上存在差异。根据上述(表 2)表层岩溶储层地震响应特征,基于“振幅类属性+AFE 属性”表征潜山高部位发育的表层岩溶储层(图 9)。结果表明:轮古西区块表层岩溶普遍发育、构造高部位更发育;在不同区域厚度差异较大,西北区域和中部区域的岩溶谷地、岩溶斜坡表层岩溶发育厚度较小(厚度为 5~15 m),东南区域的岩溶台地表层岩溶发育厚度大(厚度为 20~50 m)。

断控岩溶储层在鹰二段内部受暗河等影响,根据上述(图 8)断控岩溶储层地震响应特征,结合深层结构张量属性刻画断溶体展布。结果显示:轮古西

表 2 轮古西区块奥陶系鹰山组岩溶储层地震响应特征表

Table 2 Seismic response characteristics of karst reservoir of Ordovician Yingshan Formation in the Lunguxi block

储层类型	表层岩溶型	暗河岩溶型	断控岩溶型
主控因素	顶部储层表层岩溶作用为主	暗河岩溶作用为主	断控岩溶作用为主
典型井	LG9C	LG15-3	LG9-H8
储层剖面			
地震剖面			
平面特征			

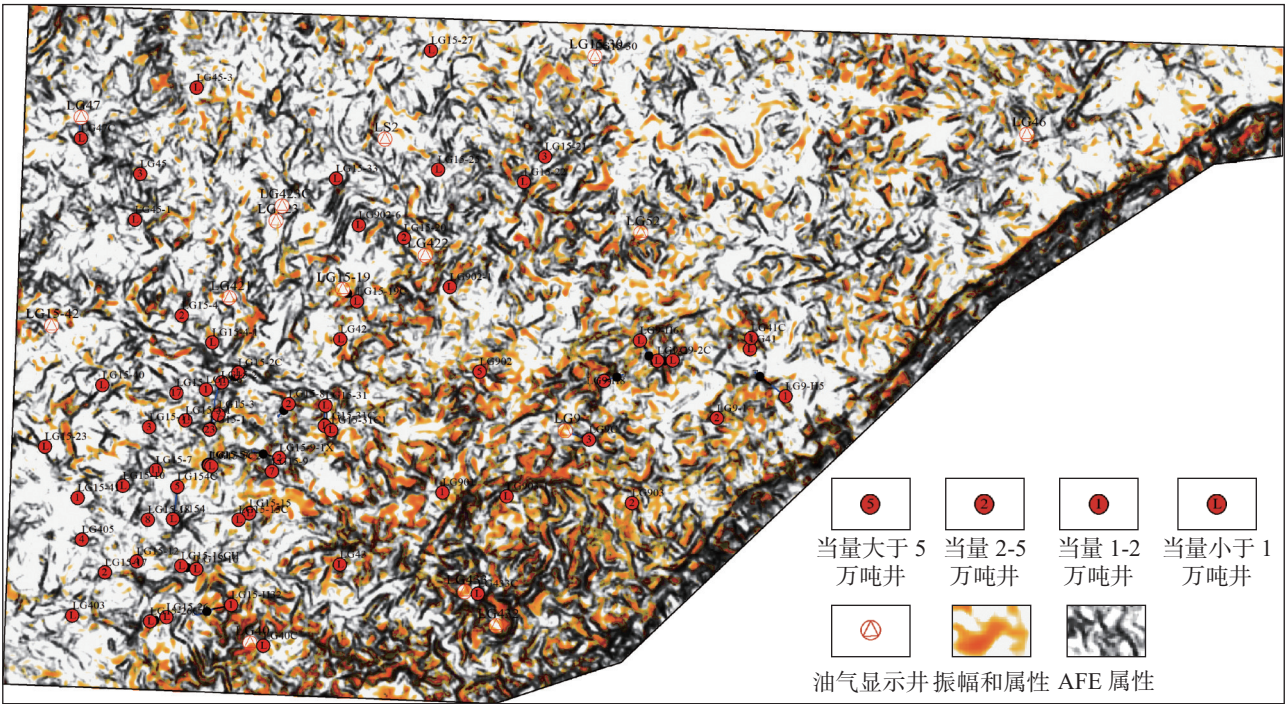


图 9 轮古西区块奥陶系灰岩顶面 AFE+振幅和属性(0-40 m)图

Fig. 9 AFE+ amplitudes and properties (0-40 m) of the top face of Ordovician limestone in the Lunguxi block

区块“振幅类属性+结构张量属性”可很好表征地下水沿古断裂垂直向下溶蚀、扩溶形成以洞穴孔洞为

主的断控岩溶储层，断控岩溶储层主要发育在轮古 9-40 井区(图 10)。

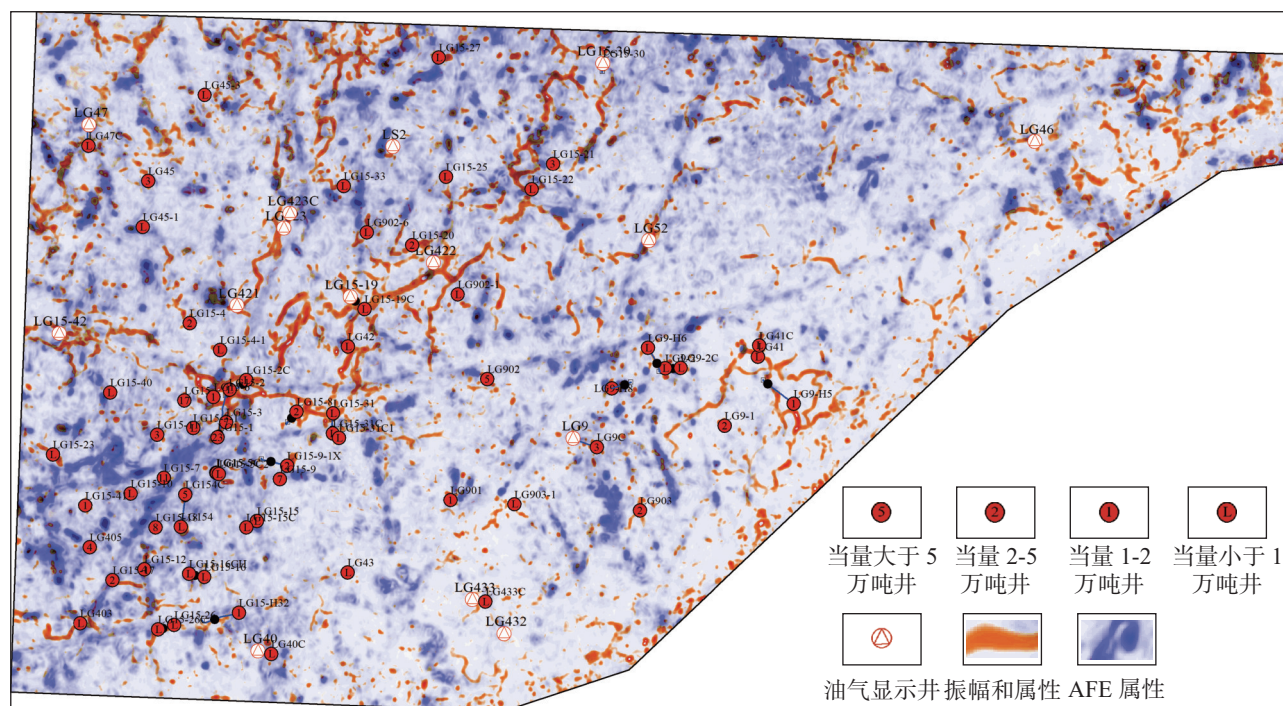


图 10 轮古西区块奥陶系(鹰二段-鹰山底)结构张量+(40 m-鹰二底)均方根振幅平面图

Fig. 10 Plan of structure tensor and root-mean-square amplitude of the Ordovician (Ying II-Yingshan Bottom) in the Lunguxi block

5 结论与认识

轮古西区块奥陶系碳酸盐岩油藏是受岩溶和断裂共同控制的缝洞型碳酸盐岩油藏。紧邻满加尔凹陷生烃中心之上,是油气长期运移的指向区和聚集区,奥陶系整体含油气,古潜山区具有“岩溶控储、断裂控藏、残丘控富”的特征;油气受走滑断裂控制作用明显,油气主要沿走滑断裂向岩溶储层充注,本区块高产、稳产井主要沿主干走滑断裂分布。通过对轮古西区块奥陶系碳酸盐岩油藏岩溶储层地震响应方法优选,形成以下 3 点认识。

(1) 鹰山组碳酸盐岩岩溶储层可划分为表层岩溶储层、暗河岩溶储层和断控岩溶储层;表层岩溶地震特征主要为以杂乱强反射为主,一般位于残丘高部位,在古潜山风化面 0~40 m 以内分布;暗河岩溶地震特征主要为地震剖面连续强反射,阻抗属性为低值异常体,横向展布范围较大,有典型的河道特征;断控地震特征主要为沿断裂展布的串珠反射、杂乱反射,纵向延伸大,平面沿断裂线性展布。

(2) 优选地震均方根振幅、瞬时振幅以及方向加权增强相等识别方法,从不同尺度和不同方向开展研究区岩溶储层地震响应预测。结果显示:“振幅类属性+AFE 属性”可以很好的表征潜山高部位发育

的表层岩溶储层;微分振幅及均方根等属性可以系统识别暗河岩溶储层;结构张量可表征断裂的轮廓,频谱分解不连续检测可表征断裂破碎带内部细节,为基于地震响应预测断控岩溶储层的最优解。通过对地震勘探响应技术的研究和优化,可以更加准确地预测岩溶储层的分布,从而更好地开发利用碳酸盐岩油气藏。

(3) 轮古西区块表层岩溶普遍发育、构造高部位更发育,断控岩溶储层主要发育在轮古 9-40 井区;西北区域和中部区域的岩溶谷地、岩溶斜坡表层岩溶发育厚度较小,东南区域的岩溶台地表层岩溶发育厚度大;断控岩溶储层的识别可以借助“振幅类属性+结构张量属性”表征。

参考文献

- [1] 但光箭,刘永雷,张磊,高绪永,张亮亮,毕皎莹,李炎.塔里木盆地轮古油田古暗河系统地震识别与预测[J].河南科学,2019,37(10):1645-1650.
DAN Guangjian, LIU Yonglei, ZHANG Lei, GAO Xuyong, ZHANG Liangliang, BI Jiaoying, LI Yan. Seismic Identification and Prediction of Palaeo-subterranean River System in Lungu Oilfield, Tarim Basin[J]. Henan science, 2019, 37(10): 1645-1650.
- [2] 严侠,黄朝琴,李阳,姚军,樊冬艳.基于离散缝洞网络模型的缝洞型油藏混合模型[J].中南大学学报(自然科学版),2017,

- 48(9): 2474-2483.
- YAN Xia, HUANG chaoQin, LI Yang, YAO Jun, FAN Dongyan. An efficient hybrid model for fracture-cavity reservoir based on discrete fracture-vug network model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(9): 2474-2483.
- [3] 李波. 综合物探技术在矿山水文地质中的应用[J]. 神华科技, 2017, 15(6): 32-34.
- LI Bo. Integrated Geophysical Technique's Application in Mine Hydrogeology[J]. Energy Science and Technology, 2017, 15(6): 32-34.
- [4] 张庆玉, 梁彬, 秦凤蕊, 曹建文, 淡永, 李景瑞. 塔里木盆地奥陶系古潜山碳酸盐岩岩溶储层评价与预测—以轮古7井区以东为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 32-41.
- ZHANG qingyu, LIANG bin, QIN Fengru, CAO Jianwen, DAN Yong, LI Jingrui. Evaluation and prediction of carbonate karst reservoirs in the Ordovician buried hills beneath the Tarim basin: An example east of the Lungu7 well block[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 32-41.
- [5] 柳琼瑶, 吴朝东, 胡天跃, 莫午零, 张顺, 刘化清, 苏明军. 松辽盆地茂兴地区滑塌扇地震属性识别与沉积学分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 487-496.
- LIU Qiongyao, WU Chaodong, HU Tianyue, MO Wuling, ZHANG Shun, LIU Huaqing, SU Mingjun. Seismic attribute recognition and sedimentology analyses of slump fan in Maoxing region, Songliao Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(3): 487-496.
- [6] 邓兴梁, 李世银, 梁彬, 李保华, 裴广平, 刘俊锋. 轮古奥陶潜山油水界面识别方法及油气分布特征评价: 以轮古LG7井区为例[J]. 中国岩溶, 2013, 32(3): 339-344.
- DENG Xingliang, LI Shiyin, LIANG Bin, LI Baohua, PEI Guangping, LIU Junfeng. Identification of oil-water interface and evaluation of oil and gas distribution in Ordovician buried hill reservoir in Lungu: A case in Lungu-well block7[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(3): 339-344.
- [7] 陈利新, 潘文庆, 梁彬, 罗日升, 张庆玉, 高翔. 轮南奥陶系潜山表层岩溶储层的分布特征[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 327-333.
- CHEN Lixin, PAN Wenqing, LIANG Bin, LUO Risheng, ZHANG Qingyu, GAO Xiang. The distribution characteristics of the epikarst reservoir in Lunnan Ordovician buried hill[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 327-333.
- [8] 杨海军, 韩剑发, 孙崇浩, 王福焕, 正岩, 吉云刚. 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层发育模式与油气勘探[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 199-205.
- YANG Haijun, HAN Jianfa, SUN Chonghao, WANG Fuhuan, ZHENG Yan, JI Yungang. A development model and petroleum exploration of karst reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong palaeouplift[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 199-205.
- [9] 曹建文, 梁彬. 轮古7井以东地区前石炭纪古地貌恢复及识别[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(27): 15273-15276, 15285.
- CAO Jianwen, LIANG Bin. The Rehabilitation and Identification of Ancient Topography in Pre-Carboniferous to the East of the 7th Well in Lungu[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(27): 15273-15276, 15285.
- [10] 张小芳. 轮古7地区奥陶系碳酸盐岩缝洞系统精细研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- ZHANG Xiaofang. Detailed study on fracture-cavity system of Ordovician carbonate rocks in Lungu 7 area [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [11] 陈广坡. 碳酸盐岩岩溶型储层地质模型及储层预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- CHEN Guangpo. Carbonate rock karst reservoir geological model and reservoir prediction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [12] 孙钰. 惠民凹陷西部沙一段湖相碳酸盐岩沉积及储层特征研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- SUN Yu. Study on lacustrine carbonate deposits and reservoir characteristics of Sha-1 member, Western Huimin Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.
- [13] 杨培杰. 基于地震频相融合的智能高分辨率反演[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(3): 548-557.
- YANG Peijie. Intelligent high-resolution seismic inversion based on frequency-phase fusion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(3): 548-557.
- [14] 傅海成, 张承森, 赵良孝, 李玉兰, 袁仕俊, 郭海霞. 塔里木盆地轮南奥陶系碳酸盐岩储层类型测井识别方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(5): 8-41, 91.
- FU heicheng, ZHANG chenshen, ZHAO liangxiao, LI Yunlan, YUAN Shijun, GUO Haixia. Identification of the reservoir space types of the carbonate reservoir in Lunnan area of Tarim basin by means of logging data[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2006, 21(5): 8-41, 91.
- [15] 洪余刚, 陈景山, 成世琦, 代宗仰, 李凌. 瞬时振幅相干法在储层预测中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(2): 25-27, 5.
- HONG Yugang, CHEN Jingshan, CHENG Shiqi, DAI Zongyang, LI Ling. The application of instantaneous amplitude coherence analysis method to reservoir prediction[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2005, 27(2): 25-27, 5.
- [16] 刘小平, 吴欣松, 张祥忠. 轮古西地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层碳、氧同位素地球化学特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 69-71, 76, 7.
- LIU Xiaoping, WU Xinsong, ZHANG Xiangzhong. Geochemistry characteristics of carbon and oxygen isotopes of Ordovician carbonate palaeokarst reservoir in the western region of Lungu, Tarim Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(4): 69-71, 76, 7.

Seismic response characteristics and reservoir distribution prediction of karst reservoirs in the Yingshan Formation of the Lunguxi block

GUAN Baozhu¹, LIU Junfeng¹, YANG Maochuan², YANG Xinying¹

(1. Tarim Oilfield Company, PetroChina Company Limited, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. Beijing Ruilang Petroleum Technology Co., LTD., Beijing, 100085, China)

Abstract Globally, 279 carbonate oil and gas reservoirs have been discovered across 39 countries and regions. Notably, large marine carbonate oil and gas reservoirs are primarily distributed in China, mainly featuring lithological-stratigraphic traps. The buried depth of oil and gas reservoirs is generally greater than 5,500 m, and they are mainly concentrated in large oil-and-gas-bearing basins, such as the Tarim Basin, Sichuan Basin, Ordos Basin, etc. The rapid development of China's petroleum industry has resulted in a growing volume of crude oil imports each year. The increasingly complex international landscape has posed challenges to the stability of China's petroleum supply. The exploration and development of carbonate karst oil and gas reservoirs is one of the ways to ensure a stable energy supply. The relevant areas have been transforming from strategic oil reserve zones to regions for oil resource replacement. Therefore, accurate prediction and precise evaluation of carbonate karst reservoirs are increasingly receiving attention from petroleum geologists. Lunnan ancient buried hill is located in the central area of the Lunnan low uplift within the Tabei uplift of the Tarim Basin, which is the main part of the Lunnan paleo-uplift in the Tarim Basin. The Lunguxi block is located in the west of the Lungu oil and gas field. In the Lunguxi block, especially in its northern area, many wells have been drilled; however, their exploitation has been inefficient and unsuccessful. The low drilling rate of the target layer may be the main reason for these phenomena. Therefore, it is urgent to address the challenges of accurate prediction and precise evaluation of carbonate karst reservoirs.

According to the characteristics of karst fracture-cavity development and the karst hydrodynamic conditions, and in conjunction with modern karst geological theory, carbonate karst reservoirs can be classified into three main types, surface karst reservoir, underground river karst reservoir, and fault-controlled karst reservoir. High-angle structural fractures, dissolution pores, and small caves are mainly developed in surface karst reservoirs. The dissolution pores and fractures are primarily connected vertically, with the potential for lateral interconnection over short distances along the fractures. The fractures and small-scale caves are distributed in a planar arrangement and exhibit a strong capacity for adjustment. Underground river systems of karst reservoirs, including underground rivers, sinkholes, vertical shafts, skylights, hall-type and corridor-type caves, underground river outlets and inlets, etc., exhibit good connectivity along the direction of groundwater runoff. Existing wells for exploitation show that the underground river karst reservoirs are the main reservoir type for oil and gas production, and are also one of the most important reservoir types in the study area. The development of fault-controlled karst reservoirs is influenced by fault activities. These reservoirs are formed by the dissolution and transformation of diagenetic fluids along fault surfaces or structural fractures, resulting in a collection of fracture-cavity complexes. They are developed vertically along fault zones, with a large range of depths, good vertical connectivity, strong lateral heterogeneity, mainly characterized by dissolution fracture-cavities.

The carbonate reservoirs in the Ordovician Yinshan Formation of the Lunguxi block exhibit a complex and diverse pore system, with multiple coexisting and interacting geological factors, resulting in strong reservoir heterogeneity. The seismic reflection anomaly of the small fracture-cavity is weak or not easily discernible, exhibiting high concealment, which complicates identification. The development characteristics of low-order faults within faults and ancient river channels, as well as their relationship with the small fracture-cavities, are challenging to quantify. Therefore, based on previous exploration and development data, this study aims to clarify the reservoir types in the study area and subsequently elucidate the seismic response characteristics of these reservoirs. The results show,(1)The

seismic characteristics of surface karst primarily exhibit chaotic strong reflections, typically found in the high part of the residual hills and distributed within 0 to 40 meters of the weathering surface of the ancient buried hills. In contrast, the seismic characteristics of underground river karst are characterized by continuous strong reflections in the seismic profile, with the impedance attribute presenting as a low-value anomaly. This anomaly has a broad lateral distribution range and displays typical river channel characteristics. Additionally, the fault-controlled seismic characteristics are predominantly represented by beaded and chaotic reflections that are distributed along the fault. These reflections exhibit large longitudinal extension and linear distribution patterns along the fault line in a plane view. (2)The seismic response prediction of karst reservoirs in the study area has been conducted from various scales and directions. The research findings indicate that the combination of amplitude attributes and AFE attributes can well characterize the surface karst reservoirs developed in the high part of the buried hill. Additionally, attributes such as differential amplitude and root mean square can systematically identify underground river karst reservoirs. Furthermore, spectrum decomposition discontinuity detection can elucidate the internal details of the fault fracture zone, providing an optimal approach for predicting fault-controlled karst reservoirs based on seismic response. (3)The surface karst is generally developed in the Lunguxi block, particularly in the structurally elevated parts. The fault-controlled karst reservoir is mainly developed in the area of Lungu Wells 9–40. In the northwest and central regions, the thickness of surface karst in karst valleys and slopes is relatively small, whereas in the southeast region, the thickness of surface karst on the karst platforms is substantial. The identification of fault-controlled karst reservoirs can be accomplished through the integration of amplitude attributes and structural tensor attributes.

Key words the Lunguxi block, the Yingshan Formation, reservoir prediction, karst, seismic response characteristics

(编辑 张玲)