

海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展 及应用实效

常少英^{1,2}, 李昌^{1,2}, 陈娅娜^{1,2}, 熊冉^{1,2}, 谷明峰^{1,2},
邵冠铭^{1,2}, 朱茂^{1,2}, 丁振纯^{1,2}, 张豪^{1,2}, 王小芳^{1,2}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

摘要 针对碳酸盐岩储层非均质性强、平面分布复杂的特点,基于碳酸盐岩储层分布主要受大型不整合面、层间岩溶面、断裂系统、礁滩相带和膏质白云岩相带等地质要素控制的认识,通过储层测井识别和评价图版的标定,开展了地质-测井-地震一体化的碳酸盐岩储层地震预测技术攻关,形成了以储层地质模型为约束、测井储层识别和评价图版标定为基础,以台地类型/岩相、层序界面、岩溶储层、断裂系统、礁滩体、白云岩体识别为核心的6项储层地震预测技术。这些技术在塔北轮古西奥陶系潜山岩溶储层、哈拉哈塘油田奥陶系潜山内幕断溶体储层、四川盆地震旦系—寒武系礁滩储层、中二叠统栖霞组晶粒白云岩储层、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组上组合白云岩风化壳储层的预测中取得了良好的应用实效,储层预测吻合率提高了20%以上。

关键词 碳酸盐岩; 储层地质模型; 储层测井识别; 地震预测技术

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

0 前言

碳酸盐岩在全球油气勘探与开发中占有重要地位,近50%的油气资源分布在碳酸盐岩中,近60%的油气产量来自于碳酸盐岩。然而,由于受不整合面(或层序界面)、断裂、岩相和后期成岩改造等因素的影响,造成了碳酸盐岩储层非均质性强、平面分布复杂,因此,碳酸盐岩储层地震预测一直是油气勘探面临的关键科学问题之一。虽然经历了多年的攻关,但目前地震储层预测主要关注数学-地球物理算法的改进,大多缺乏地质模型的约束,人们还没有建立基于碳酸盐岩储层成因和分布地质认识的地震储层预测技术。随着海相碳酸盐岩地质研究的深化,迫切需要基于储层地质模型约束的地质-测井-地震相结合的储层预测技术,以解决复杂碳酸盐岩储层预测难题。

碳酸盐岩地震储层预测是一个“找规律、提信息、做解释”的过程。“找规律”是储层预测的基础,即需要建立基于储层成因认识的地质模型,明确储层

发育主控因素和分布规律,为地震储层预测提供约束条件;“提信息”是关键,就是在储层地质模型指导下,通过储层测井识别和评价图版的标定,把储层与非储层的差异信息从地球物理信号中提取出来;“做解释”是目的,即依据差异信息解释储层的空间展布形态和分布^[1]。

通过塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地储层地质模型研究,构建碳酸盐岩地震储层预测技术知识库,形成针对不同类型碳酸盐岩储集体的预测技术。主要技术内涵包括地震层序识别、地震岩石物理分析、全方位纵波地震资料分析和不同类型碳酸盐台地纵横向地震沉积结构描述,提取受不整合面(或层序界面)、断裂、礁滩相和膏质白云岩相带等因素控制的储层相关地震信息,刻画礁滩体外形及内部结构发育特征,提取能刻画多孔介质特征的地震信息,预测和评价断溶体储层。该技术在塔北奥陶系岩溶储层和内幕断溶体储层、四川盆地震旦系—寒武系礁滩储层、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组上组合白云岩风化壳储层的预测中取得了良好的应用

收稿日期: 2019-09-18; 改回日期: 2020-01-31

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”下属课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号: 2016ZX05004-002)和国家科技重大专项课题“南海中建海域深水油气地质条件及目标评价”(编号: 2017ZX05026-006)共同资助

第一作者: 常少英,高级工程师,主要从事地质-地球物理储层预测工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西溪路 920 号中国石油杭州地质研究院; E-mail: changsy_hz@petrochina.com.cn

实效,储层预测吻合率提高20%以上。

1 地震储层预测的地质基础

碳酸盐岩储层成因和分布规律认识以及储层地质模型是地震储层预测的基础,是地球物理信息和储层地质信息之间衔接的关键,而储层测井识别和评价图版则是实现这种衔接的桥梁。碳酸盐岩储层地震预测应建立在储层地质模型约束、储层测井识别和评价图版标定的基础上。

1.1 碳酸盐岩储层分布规律及其控制因素

碳酸盐岩储层可划分为岩溶储层、礁滩储层和白云岩储层等3种类型^[2-3],储层的分布受大型不整合面、层间岩溶面、断裂系统、台地类型、礁滩和白云岩体分布等地质要素的控制,储集空间可划分为大型岩溶缝洞(直径>1 m)、小型岩溶缝洞(直径为50~1 000 mm)、溶蚀孔洞(直径为2~50 mm)、孔隙(直径为0.01~2 mm)和微孔隙(直径为<0.01 mm)。

1.1.1 岩溶储层

本文主要研究3类岩溶储层:①石灰岩潜山岩溶储层。储集空间以大型的岩溶缝洞为主,分布于碳酸盐岩潜山区,储层往往与大型不整合面密切相关^[3],主要在不整合面之下50~100 m的深度范围内发育,其围岩为致密的石灰岩。②层间岩溶储层。储集空间以小型的岩溶缝洞及溶蚀孔洞为主,与内幕层间岩溶面密切相关^[3],位于内幕层间岩溶面之下0~50 m的范围,岩溶作用强度不如潜山区,围岩也为致密的石灰岩。③断溶体储层。储集空间以岩溶缝洞和溶蚀孔洞为主,与不整合面没有必然的联系,而是与纵横交错的复杂断裂系统有关^[3],围岩为石灰岩。岩溶缝洞、溶蚀孔洞、断裂及伴生的裂缝构成了断溶体储层复杂的缝洞系统,储层发育跨度达200~300 m。

1.1.2 礁滩储层

礁滩储层的岩性可以是石灰岩,也可以是保留或残留原岩结构的白云岩,但经历白云石化的礁滩储层,物性要远好于灰岩礁滩储层。中国古老深层海相碳酸盐岩以沉积原生孔隙为主,如经历表生和埋藏溶蚀作用,则可伴生溶蚀孔洞,构成多重孔喉结构的储集体。优质储层主要位于向上变浅旋回上部的礁滩体中^[3-4],这类储层一般在镶边台缘及台内裂隙周缘以礁滩体呈条带状分布,厚度较大,而在碳酸盐

缓坡以颗粒滩呈准层状大面积分布^[3]。

1.1.3 白云岩储层

白云岩储层包括2类,储集空间均以孔隙和溶蚀孔洞为主:①埋藏-热液改造型白云岩储层,为连续地层序列中的晶粒白云岩储层。据沈安江等^[3]研究认为细—中晶白云岩的原岩绝大多数为礁滩相沉积,其特征和分布规律与礁滩储层相似,白云石化往往与发育的断裂系统有关。②白云岩风化壳储层,为不整合面(或层间岩溶面)之下的白云岩储层,包括膏质白云岩储层、礁滩白云岩储层和晶粒白云岩储层。其中,膏质白云岩储层沿膏盐湖周缘呈环带状分布,孔隙以膏模孔为主,位于不整合面之下0~50 m的深度范围;不整合面之下的礁滩白云岩储层和晶粒白云岩储层的分布范围和深度不受不整合面控制,是先存白云岩储层被抬升到不整合面之下,但表生溶蚀作用可以进一步改善储层物性^[3]。

1.2 储层测井识别特征

以塔北轮南奥陶系潜山岩溶储层、四川盆地二叠系茅口组顶部层间岩溶储层、塔北哈拉哈塘奥陶系断溶体储层、四川盆地震旦系—寒武系礁滩储层、四川盆地中二叠统栖霞组晶粒白云岩储层、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组膏质白云岩储层为例,建立5种类型碳酸盐岩储层的测井识别方法(表1),为地震储层预测提供依据。

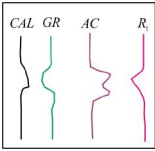
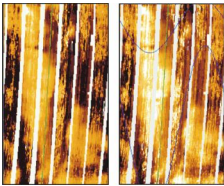
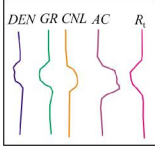
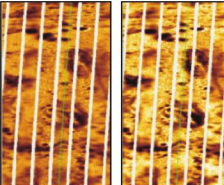
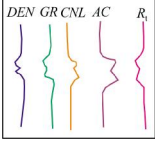
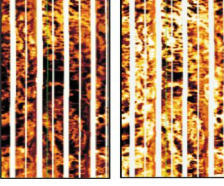
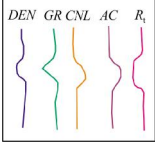
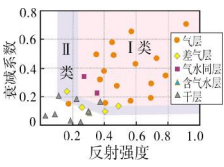
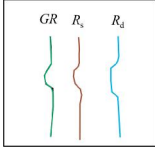
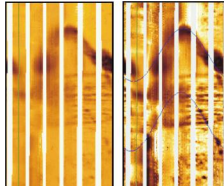
岩溶储层和断溶体储层主要以岩溶缝洞为储集空间,测井响应特征与岩溶缝洞的充填程度与发育程度有关:未充填溶洞电阻率明显降低(高阻背景下的低电阻特征),并且井径扩径严重,当砂泥质充填溶洞时,则自然伽马值较高^[5];溶蚀孔洞越发育,密度降低幅度越大,电成像上不规则、较大面积的暗色斑状或团块状显示越明显^[6-7]。礁滩储层主要以基质孔为储集空间,发育少量溶蚀孔洞,常规测井响应特征表现为低自然伽马、低密度、低电阻率和高声波时差、高中子,成像测井动态图上分布不规则的黑色暗斑,反映溶蚀孔洞发育,孔隙度高、连通性强^[8-9]。晶粒白云岩储层主要以晶间孔和晶间溶孔为储集空间,发育少量溶蚀孔洞,常规测井曲线一般表现为圆滑的“W”型^[10](“两高三低”)(表1),当溶蚀孔洞发育时,电成像测井表现为“豹斑”状离散不规则分布的黑色星点。膏质白云岩储层主要以膏模孔为储集空

间,一般深侧向电阻率小于 $1000\Omega\cdot\text{m}$,浅侧向电阻率小于 $500\Omega\cdot\text{m}^{[11]}$ 。基于对这些储层的常规测井响应特

征、成像测井特征和斯通利波响应特征(表1)的综合分析,通过井-震标定,为储层地震预测提供依据。

表 1 碳酸盐岩不同类型储层测井响应特征

Table 1 Logging response characteristics of different types of carbonate reservoirs

储层类型	岩性	储集空间特征	常规测井响应特征	成像测井/斯通利波测井响应特征	典型实例
岩溶储层	石灰岩为主	大型或小型岩溶缝洞	 <p>GR 低值, AC 增高, R_t 降低, 未充填溶洞 R_t 明显降低, 并且 CAL 扩径严重, 砂泥质充填溶洞时 GR 较高</p>	 <p>裂缝呈现较暗的正弦曲线特征; 溶洞显示为较大的不规则棕色—黑色团块呈星点分布</p>	塔北地区轮南油田 LN15 井
礁滩储层	白云岩	以基质孔隙为主, 少量小型溶蚀孔洞	 <p>低 GR、低 DEN、低 R_t、高 AC、高 CNL</p>	 <p>表现为团块状高电导异常, 且异常边缘呈浸染状, 裂缝发育时则呈不规则正弦曲线状高电导异常</p>	四川盆地龙岗地区长兴组—飞仙关组 LG1 井
晶粒白云岩储层	白云岩	以晶间孔和晶间溶孔为主, 少量溶蚀孔洞	 <p>测井曲线形状为圆滑的“W”型, 测井值为“两高三低”特征: AC 和 CNL 高, GR 和 DEN 低, R_t 相对围岩降低</p>	 <p>静态图显示为暗黄色—深褐色, 反映 R_t 低; 动态图可见不规则的黑色暗斑发育, 反映溶蚀孔洞发育, 孔隙度高、连通性强</p>	川东栖霞组—茅口组 WT1 井
膏质白云岩储层	膏质白云岩	以溶蚀孔洞、孔隙、微孔隙为主	 <p>GR 低值, CNL 增大, DEN 降低, AC 增大, R_t 相对降低</p>	 <p>斯通利波具有一定幅度衰减, 且衰减系数与反射强度具有一致性</p>	鄂尔多斯盆地东南部马家沟组榆9井塔里木盆地方1井
断溶体储层	石灰岩	大型岩溶缝洞、小型岩溶缝洞, 溶蚀孔洞发育	 <p>GR 值较低, R_s 与 R_d 降低</p>	 <p>具有明显的、较大面积的暗色斑块</p>	塔北地区哈拉哈塘油田 H601 井

2 地震储层预测技术进展

由于储层的分布受大型不整合面、层间岩溶面、断裂系统、台地类型、礁滩体和白云岩体分布等地质要素的控制, 因此准确的地质模型是碳酸盐岩储层预测的关键。结合中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室关于我国海相碳酸盐岩储层成因^[3]、多尺度的储层地质建模^[12]及构造-岩相古地理特征的研究成果^[13], 笔者开展了基于储层地质模型约束、测井储

层识别和评价图版标定的6项地震储层预测技术攻关(表2), 取得了重要进展, 为碳酸盐岩储层预测提供了技术支撑。

2.1 台地类型及岩相特征地震识别技术

2.1.1 技术现状

台地类型判识对相控型礁滩(白云岩)储层的分布预测十分重要。长期以来, 碳酸盐台地类型识别主要利用“相面法”(即利用台地的地震反射特征, 包括

表 2 基于储层地质模型的碳酸盐岩储层地震预测技术
Table 2 Seismic prediction technologies for carbonate reservoir based on reservoir geological model

序号	技术类别	地质目标	技术难点	关键技术内涵	实例
1	台地类型及岩相特征地震识别技术	台地类型控制的礁滩(白云岩)储层	台地类型判识标准存在争议;台地层序地层的地震同相轴响应特征的等时性识别;碳酸盐岩岩相受多因素控制	①量化地震识别标准,构建地震沉积结构类型及识别参数知识库; ②基于露头资料约束的碳酸盐台地地震分频层序地层划分技术; ③碳酸盐缓坡低幅度古地貌恢复技术; ④基于岩石结构数计算的碳酸盐岩多参数岩相识别技术	塔中地区良里塔格组储层预测 四川盆地龙岗地区飞仙关组储层预测 川中磨溪—高石梯地区龙王庙组储层预测
2	层序界面地震识别技术	层序界面(不整合面、岩溶界面)控制的岩溶储层	层间岩溶界面缺乏地质模型指导,地震反射能量衰减、分辨率低;弱振幅储层地震信息难以提取;薄储层存在地震波调谐效应	①高级别层序界面“三步法”识别方案; ②层序界面控制下储层弱振幅提取技术; ③去除薄层地震反射调谐效应的分频融合技术	川东地区茅口组储层预测 川中高石梯地区灯影组储层预测
3	岩溶储层地震识别技术	岩溶储层	非均质性强,空间连通性识别;杂乱状弱振幅反射特征的储层识别;小型洞穴和孔洞的地震响应特征不明显	①“三步骤”分层解释评价技术; ②地震波趋势异常储层预测技术; ③相干加权能量变化属性和多子波分解与重构技术; ④基于地震属性组合的岩溶缝洞储层预测新方法	塔里木盆地轮古西奥陶系岩溶储层预测
4	断溶体储层地震识别技术	不同尺度断裂及断溶体储层边界	易受地震波调谐效应影响的小断距逆冲断层识别;弱地震响应的微裂缝系统识别;受断裂及岩性双重影响的复杂断溶体储层边界识别	①主成分分析属性融合技术、最大似然法断裂系统预测技术、OVT域数据五维地震裂缝预测技术; ②自适应 AVO 叠前各向异性检测技术; ③各向异性高斯滤波器的梯度结构张量分析技术	塔北哈拉哈塘奥陶系断溶体储层预测
5	礁滩体地震识别技术	礁滩储层	礁滩体预测的多解性及地震表征精细化	①台地边缘礁滩体沉积构型地震描述技术; ②台内泛滩储层地震弹性参数贝叶斯分类预测技术; ③台内相带分异地震多属性分析技术	四川盆地龙女寺地区寒武系龙王庙组礁滩储层预测
6	白云岩体地震识别技术	白云岩储层	非均质性强,地层结构复杂;晶粒白云岩与泥灰岩薄互层界面之间地震反射波彼此干涉;缺乏井-震数据的有效结合	①地震岩石物理敏感参数分析技术; ②白云石化滩的贝叶斯-蒙特卡洛随机模拟相构建模和大数据分析技术; ③内幕白云岩波阻抗-Q吸收因子双属性优化融合参数岩溶储层预测技术	川东栖霞组晶粒白云岩储层预测 鄂尔多斯盆地马家沟组上组合白云岩储层预测

反射结构、反射振幅、反射频率、反射同相轴的连续性等地震参数),分析地质体的古地貌形态、坡度、封闭性、镶边性及断控特征,依据镶边、缓坡、陡坡、开放、封闭等要素将碳酸盐台地划分为 9 种类型^[14]。同样利用“相面法”,对台缘、台内洼地、台内滩等相带进行划分,总结不同类型碳酸盐台地地震沉积学特征,建立沉积模式和地震反射响应特征模版^[15]。

2.1.2 技术进展

本文在碳酸盐台地识别标准、沉积结构特征、古地貌恢复、台内沉积微相划分等方面取得 4 项进展:

(1)量化地震识别标准,构建镶边台地台缘带、台内裂隙、碳酸盐缓坡地震沉积结构类型及识别参数知识库。

(2)建立了基于露头资料约束的碳酸盐台地地震分频层序地层划分技术^[12,16],以表征地震层序的级别、数目、样式及层序演化与控制因素,通过对露头-岩心-测井等资料的综合分析,得到更加符合碳酸盐岩沉积结构发育规律的结论。

(3)建立了碳酸盐缓坡低幅度古地貌恢复技术。如图1所示:首先根据现今构造图数据确定现今构造趋势面图数据,进而确定各井间网格点的拟构造幅度,该拟构造幅度为现今构造图上的点相对于现今构造趋势面的竖直方向幅度(图1a);接着根据现今构造图的剥蚀线数据确定待推算地区沉积期的构造趋势面图数据(图1b);然后根据沉积期构造趋势面数据和拟构造幅度确定沉积期构造的相对高低数据

(图1c);最后根据沉积期构造的相对高低数据生成沉积期微幅度古地貌。这为碳酸盐台地沉积微相划分提供了依据。

(4)形成了基于岩石结构数计算的碳酸盐岩沉积多参数岩相识别技术。通过改进的Lucia岩石结构

组分测井识别技术,采用基于岩石结构数计算的多参数岩相识别技术,实现对碳酸盐岩岩相横向展布特征的识别。该技术发挥了地质认识与井-震资料结合的优势,克服了常规单一地震属性分析遇到的多解性难题^[17]。

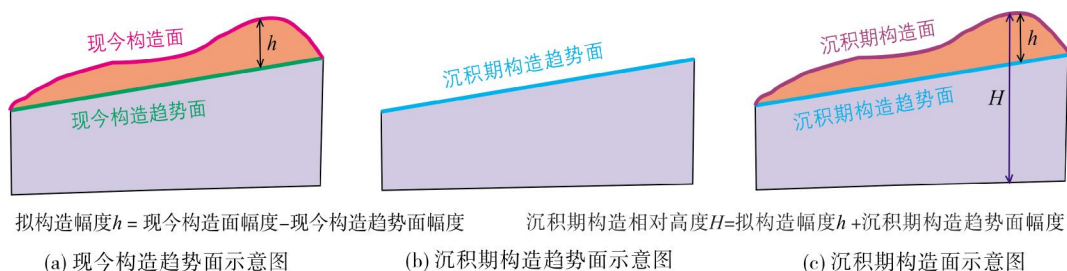


图1 缓坡型微幅度古地貌恢复示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-amplitude paleogeomorphology restoration of gentle slope type

2.2 层序界面地震识别技术

2.2.1 技术现状

层序界面(不整合面,岩溶界面)在碳酸盐岩岩溶储层形成过程中起着关键的控制作用。利用常规测井资料识别不整合面^[18],一是存在多解性,二是灵敏度不够。不整合面(风化壳)是一种地层结构,在地震剖面上具强反射响应特征,根据地震反射同相轴的终止形式可以判别不整合面类型,即依据不整合面上下地层接触关系,可识别出上超/削蚀型、整合/削蚀型、上超/整合型、整合/整合型等4种类型。相对于前面3种大型不整合面,第4种整合/整合型主要为层间岩溶界面(如塔北地区鹰山组三段和四段之间的地层接触界面^[19]),由于发育在深层碳酸盐岩内幕,往往缺乏地质模型,而且受地震反射能量衰减、分辨率低等条件限制,这类界面的地震识别难度较大。

2.2.2 技术进展

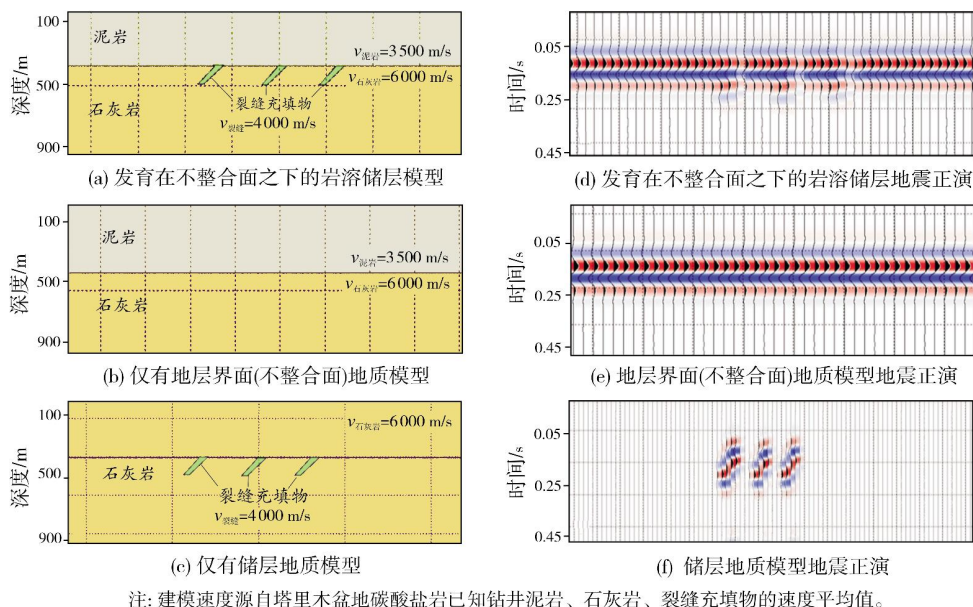
通过碳酸盐岩储层主控因素和发育模式研究,发现普遍存在层序界面控制储层发育的规律,因此,进一步挖掘三维地震数据的地质信息,在层序界面的地震识别以及与层序界面有关的储层预测技术方面,取得以下几个方面的进展:

(1)层序界面识别技术。地震同相轴对于一、二级层序响应具有较好的一致性,而对于三级层序或者更高级层序而言,地震反射同相轴不一定与倾斜

的地质时间界面相一致,而是地震频率成分控制了地震反射同相轴的倾角和结构,如前积碳酸盐岩台地边缘沉积和陆坡沉积中的地震反射^[20]。本文在利用地震信息识别更高级别的层序界面方面建立了“三步法”解决方案:第1步,利用与研究区相对应的露头或连井对比剖面建立地质模型,并采用不同频率子波进行地震正演模拟;第2步,选择能够表征地质模型沉积结构的正演子波频率,并对原始地震体进行分频处理,提取能够表征沉积结构的频率体;第3步,在取得的频率体上识别反射结构特征,进行地震层序划分,完成约束储层单元的地震层序框架解释。

(2)层序界面控制下的储层弱振幅提取技术。该项技术所针对的是受不整合面控制的储层弱振幅信息如何提取的问题。岩溶不整合界面的上下岩性阻抗差值较大,形成较强振幅的地震反射,屏蔽了不整合面附近弱振幅储层的地震响应,制约了该类储层的有效预测。在实际研究过程中,利用主成分分析法去除不整合面的强屏蔽,即提取地震数据中代表背景的信息,去除其屏蔽效应,剩余的有效信息则反映弱振幅储层信息,这个过程就是把强反射背景隐藏下的、不整合面以下能反映储层特征的有效反射信号释放出来,使储层地震响应特征更清晰,从而达到有效预测储层的目的(图2)。

(3)去除薄层地震反射调谐效应的分频融合技术。该项技术针对的地质问题是:在层间岩溶地层中,往往发育薄层碳酸盐岩储层,地震信号通过这类储层的上下2个界面时,容易产生地震波的调谐效应



注:建模速度源自塔里木盆地碳酸盐岩已知钻井泥岩、石灰岩、裂缝充填物的速度平均值。

图2 受不整合面控制的弱地震振幅储层提取正演

Fig. 2 Forward modeling of weak seismic amplitude extraction of reservoir controlled by unconformity

(因地层厚度变化带来振幅变大或变小,与储层本身的性质没有关系),制约了有效储层的预测。技术对策的内涵是利用变频融合,进行调谐反演具有去子波恢复地层厚度的功能,去除调谐效应,用于薄层的储层识别,可以提高薄储层预测准确率。

2.3 岩溶储层地震识别技术

2.3.1 技术现状

岩溶储层具有强地震振幅特征,振幅类和频率类地震属性在缝洞处有异常表现。目前已经形成了一系列岩溶储层地震预测技术^[21-23],如储层井-震精细标定技术、岩溶古地貌分析技术、地震多属性储层预测技术、叠后地震波阻抗反演和叠前地震弹性参数反演技术、地震相波形分类分析技术、基于波动方程的地震正演技术、基于地震各向异性分析的裂缝预测技术、储层空间三维可视化雕刻技术、多信息融合储层综合评价技术等。这些技术主要用于易识别的大型岩溶洞穴的预测。然而,岩溶洞穴型储层非均质性强,横向连通性识别较难,小型洞穴和孔洞的地震响应特征并不十分明显,仅仅依赖地球物理手段无法准确定义识别储层的阈值。

2.3.2 技术进展

针对岩溶储层预测向精细化发展的生产需求,

在以下4个方面取得进展:

(1)岩溶储层分层解释技术^[24-27]。采用“三步骤”进行岩溶储层分层解释评价:首先,依据储层受海平面升降、构造运动控制的成岩机理以及结合现代岩溶水文知识,在古地貌恢复的基础上,按古地貌由高到低的顺序选取代表井,确定岩溶排泄基准面,划分单井洞穴层;然后,选取等时沉积界面,拉平地震数据体,将单井洞穴层标定在地震剖面上;最后,精细解释出洞穴层,提取振幅均方根属性,预测每一层洞穴的平面分布,在单层洞穴分布认识的基础上,分析洞穴的连通性。

(2)杂乱弱振幅反射特征储层预测技术。该技术利用岩溶趋势面分析方法,近似求取地层界面反射波,根据波的叠加原理,有效分解出缝洞型储层的地震响应,从而达到对缝洞型储层有效预测的目的。地震波趋势异常预测技术不但能识别串珠状地震反射所代表的储层,还可有效识别杂乱状弱振幅地震反射所代表的储层。

(3)利用相干加权能量变化属性和多子波分解与重构技术^[28],以类似于“储层编码”的形式表达不同储层类型及发育程度,精细标定不同类型岩溶储层的地震反射特征。

(4)形成基于地震属性组合的岩溶储层预测新方法:①断裂-裂缝系统识别组合方法,包括多窗口

扫描、构造导向滤波、相干类属性、方差类属性、边缘检测、边缘保护平滑滤波、纹理类属性、能量梯度属性、体曲率类属性、基于曲率属性的玫瑰图、振幅差异属性、蚂蚁体、形态指数等;②孔洞储层识别地震属性组合,包括自定义属性体计算、数据比例融合、基于沉积模式的地层切片、单频类(高亮体)属性、时频分析。

2.4 断溶体储层地震识别技术

2.4.1 技术现状

对于断裂控制的岩溶储层预测,断裂的识别是关键步骤。不同尺度的断裂系统往往会采用不同的识别技术。大尺度断裂系统(一般指几百米至千米级的断裂系统)的识别主要应用相干类技术,通过计算纵向和横向局部波形的极性、振幅、相位的相似性而得到的相干值来判断,地层边界、特殊岩性体的不连续性产生低相干值。中等尺度断裂系统(一般指数百米至百米级的断裂系统)的识别主要采用频率域三维断裂检测技术,通过高分辨率频谱分解,生成一系列单频体,得到其相应的振幅体和相位体,再对不同频率的振幅体和相位体进行边缘增强,从而识别波形、振幅和相位等的不连续属性,采用自适应的主成分分析法得到反映不同尺度断裂的检测属性体和数据体。小尺度断裂系统(数米至数十米级的断裂系统)的识别主要利用地震属性敏感信息,重新计算地震属性和排列组合,分析地层倾角,进行构造导向滤波处理,然后提取多频段地震数据,采用相干增强技术精细刻画小断层。

2.4.2 技术进展

针对受不同性质、不同尺度断裂控制的储层预

测,在以下3个方面取得进展:

(1)逆冲走滑断裂形成的断溶体识别。由于断距小,易受地震波调谐效应影响,识别难度较大。技术对策主要有:①提取地震属性敏感信息,并制定敏感地震属性组合,具体过程为首先分析地层倾角,进行构造导向滤波处理,然后提取多频段地震数据,最后采用多尺度体曲率、相干、方差、边缘检测、倾角、蚂蚁体、断层形态指数等计算方法和主成分分析属性融合技术,取得更好的裂缝识别效果(图3);②应用较新的最大似然法断裂系统预测计算方法^[29],通过对地震数据体扫描,计算数据样点之间的相似性,获得断裂发育的最可能位置及概率;③利用OVT域数据三维地震裂缝预测等技术的优势^[30],为解决该类断裂预测的难题提供了新的手段。

(2)断溶体微裂缝系统(特别是溶蚀缝)的识别。这类裂缝系统受构造影响较小,地震响应弱,识别难度大,因此需要依据溶蚀缝受暴露面、沉积相带控制的规律,在各向异性介质方位AVO分析的基础上,利用自适应AVO叠前各向异性检测技术,消除各项同性后进行叠前裂缝检测,从而克服了常规叠加处理的缺陷,使地震资料的分辨率得到大幅度提高,从而使裂缝检测结果更加可靠。

(3)断溶体储层边界识别技术。由于断溶体受断裂及岩性的双重影响,因此确立基底断裂精细描述、有利岩相分析、精细地震属性分析的技术路线,采用各向异性高斯滤波器的梯度结构张量分析(振幅梯度对三维地震数据体图像进行纹理分析)方法,得到较准确的倾角、反映沉积结构的混沌和横向梯度等,再用倾角和相干数据体结合得到高精度的相干和曲率来精细刻画断裂系统及岩相,从而实现断溶体储层边界识别^[31-34]。

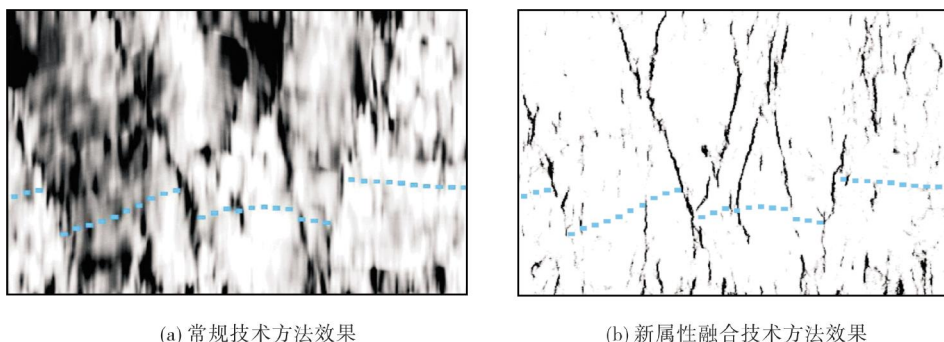


图3 应用常规技术与新属性融合技术识别断裂-裂缝的效果对比

Fig. 3 Effect comparison of conventional technology and new attribute fusion technology in identifying fault-fracture

2.5 礁滩体地震识别技术

2.5.1 技术现状

礁滩储集体预测主要依据地震剖面上直接和间接的识别标志(地震反射特征)^[35]。直接标志包括外部和内部特征:外部特征表现为丘状和透镜状地震反射,礁滩体外部边缘常出现上超及绕射等特有的地震反射现象;内部特征表现为振幅、频率和相位的连续性,及结构与围岩有较大的差别,礁滩内部反射较为杂乱或无反射。间接标志是由于速度差异,在礁滩体部位常出现上拉或下拉及在礁滩体上方有披覆现象,波形聚类是地震相分析的常规手段,也是岩相和沉积相分析的基础,可以表征块状介质厚层的构形特征。

2.5.2 技术进展

依据地震反射特征预测礁滩体存在多解性,随着礁滩储层勘探开发的深入,需要进行更为精细的地震表征技术。在礁滩地质模型解剖认识的基础上,随着地震处理手段和礁滩体成像精度的提高,礁滩储层的地震预测技术取得了重要进展,主要体现在3个方面:

(1)台地边缘礁滩体沉积构型地震描述技术。通过对储层类型、物性、厚度、测试结果及频谱特征、空间位置、几何形态等主要储层特征参数进行统计,明确礁滩复合体外部多为不对称的正向楔状体,内幕主要存在串珠状强振幅、非串珠弱振幅等多种优质储层地震响应特征^[36-38]。

(2)台内泛滩储层地震预测技术。引进“埋藏深度约束的相控”概念,“相”就是一个由单井解释的岩性、物性、含油性定义的岩层类别,不同的岩层类别代表了不同的弹性参数组合(岩石物理参数组合),在深度趋势约束下,用地震弹性参数将其区分,结合贝叶斯分类算法参与地震反演,达到泛滩储层分布预测的目的。

(3)台内相带分异地震多属性分析技术。碳酸盐台内沉积体系存在面状和块状2种沉积特征。因此,需要寻求能表征这2种沉积特征的地震属性,经分析分别确定为地震结构类信息与沉积属性类信息,通过融合这2种属性来表征碳酸盐台内沉积结构^[39]。同时,采用波阻抗反演和基于调谐与分频分析的高分辨率储层预测技术,提高礁滩体的分辨能力与刻

画精度,从而刻画台地内部岩相分异特征。

2.6 白云岩体地震识别技术

2.6.1 技术现状

常规晶粒白云岩地震储层预测技术主要是通过井-震储层标定、波阻抗反演或提取多种与储层有关的地震属性,继而建立不同地震属性与某些地质参数之间的关联性,包括明确地震属性中的振幅、阻抗、频率及能量衰减等4种基本类型参数的特征意义^[40],从而实现晶粒白云岩储层地震预测。然而,白云岩岩相识别存在2个难点:一是岩相非均质性强,单靠测井数据,无法掌握岩相横向变化快的特点;二是地层结构复杂,晶粒白云岩与泥灰岩呈薄互层出现,各反射界面之间的反射波彼此干涉,地质特征解译尚不够清晰,在缺乏井-震数据有效结合的情况下,单靠地震剖面很难识别出白云岩岩相的边界。

2.6.2 技术进展

针对白云岩储层预测的难点,本文研究通过技术攻关在以下3个方面取得进展:

(1)白云岩储层岩石物理敏感参数分析技术。白云石含量高低对储层储集性能有较大影响^[41],这为应用地震属性识别层序格架内白云岩储层分布提供了理论依据。在开展钻井取心段测井岩性识别的基础上,通过岩石物理分析明确杨氏模量与纵横波的速度比能够识别白云石含量,而通过杨氏模量与白云石含量的统计回归可以确定白云石含量与杨氏模量的关系。据此,在叠前弹性参数反演的基础上,利用重构单井白云石含量曲线进行白云石含量反演,确定高白云石含量的储层平面及纵向分布特征。最后综合应用叠后地震反演获得的波阻抗值和叠前地震反演获得的纵横波速度比,实现对白云岩储层的预测^[42-45]。

(2)白云石化滩相控建模技术。采用贝叶斯-蒙特卡洛随机模拟相控建模和大数据分析技术,自动建立地震相与测井“白云石化滩相”之间的对应关系,这样不仅可以模拟波阻抗,而且可以模拟任何对白云石化滩相储层敏感的曲线,模拟结果在纵向上与测井资料的分辨率保持一致,横向上与地震分辨率一致,从而精细预测白云岩储层、流体、物性的空间分布。

(3)内幕白云岩岩溶储层预测技术。首先通过地

震纯波数据的相对波阻抗计算,获得纯波相对波阻抗体;再对地震纯波数据体进行地层Q吸收因子计算,获得地层Q吸收数据体;然后构建相对波阻抗与Q吸收数据体的融合公式,以及统计已钻井储层阻抗及吸收因子信息优化双属性融合参数;最后利用新型融合参数的数据体来预测储层分布。

3 应用实效分析

碳酸盐岩储层地震预测技术进展为储层分布预测提供了技术支撑。由于储层的成因和分布受多种因素控制,所以各个地区的储层预测需要针对相应的地质要素进行地震识别技术的组合应用,达到综合预测储层分布的目的。

3.1 岩溶储层地震预测应用实效

这类储层的地震识别,需要应用不整合面识别和岩溶储层地震识别2项关键技术,综合预测岩溶缝洞的分布。本文以塔里木盆地轮古西奥陶系潜山岩溶储层预测为例^[24,27],展示这两项关键技术的应用实效。

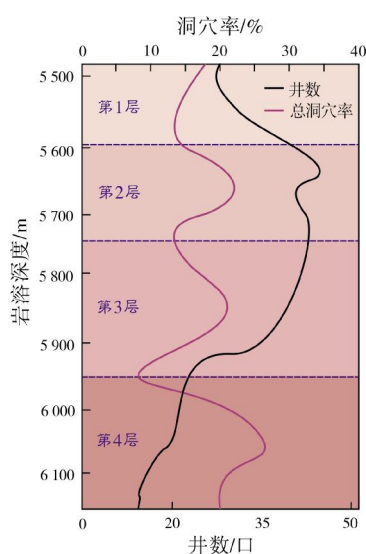


图4 塔北轮古西奥陶系潜山岩溶洞穴纵向发育统计图

Fig. 4 Longitudinal development statistics of karst caves of Ordovician buried hill in west Lungu of Tabei Uplift, Tarim Basin

3.2 断溶体储层地震预测应用实效

这类储层的地震识别,需要应用断裂系统和岩溶缝洞识别2项关键技术。本文以塔北哈拉哈塘油田

轮古西地区位于塔北隆起轮南低凸起,奥陶系鹰山组油藏的埋深超过5600m,储层发育受不整合面和表生岩溶作用控制,储集空间以大型岩溶缝洞为主。首先通过对研究区46口钻井岩溶洞穴的测井识别和统计,发现不整合面之下发育4层岩溶缝洞体(图4):第1层厚度为80~100m,第2层厚度为110~160m,第3层厚度为120~175m,第4层厚度为120~180m,储集空间均为缝洞-孔洞储层。据此,在古地貌恢复的基础上,应用不整合面识别和岩溶缝洞分层地震解释技术,对这4层岩溶缝洞体进行平面分布预测(图5)。

从图5可以看出,岩溶残丘及岩溶沟谷是主要的古地貌形态(图5中黄色代表岩溶台地,蓝色代表岩溶洼地,深蓝色线条为岩溶沟谷),自东向西可划分为岩溶台地、岩溶斜坡和岩溶洼地三级岩溶地貌,在地表相连的岩溶沟谷形成古明河,而在潜山面以下相连的洞穴则形成暗河。奥陶系鹰山组岩溶储层主要为泥晶灰岩、亮晶砂屑灰岩,其中裂缝和溶蚀孔洞相互沟通,形成了以缝洞系统为主要储集空间的碳酸盐岩储集体。

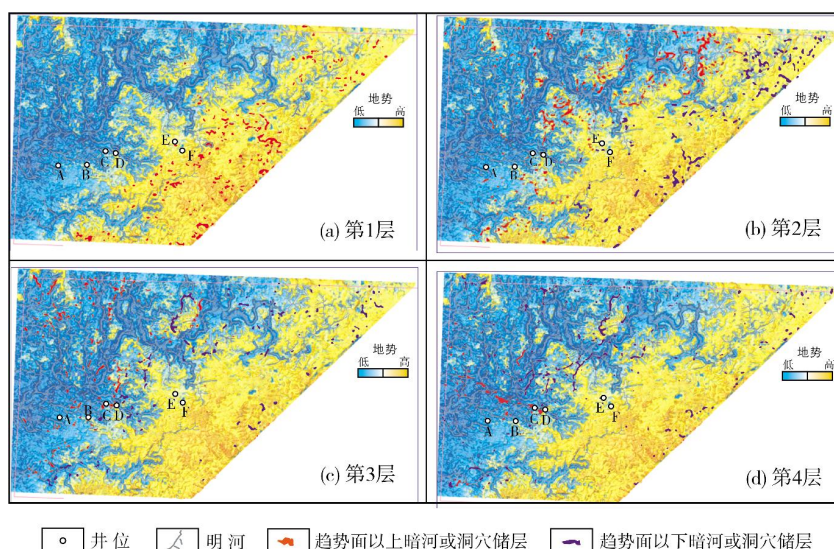


图5 塔北轮古西奥陶系潜山岩溶储层分层预测图

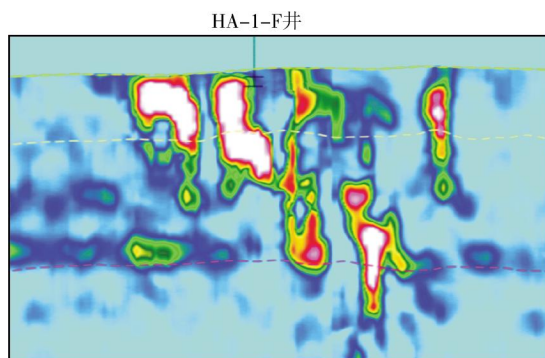
(据参考文献[24])

Fig. 5 Stratigraphic prediction map of karst reservoir of Ordovician buried hill in west Lungu of Tabei Uplift, Tarim Basin (cited from literature [24])

奥陶系潜山区断溶体储层预测为例^[32],展示这2项地震储层预测技术的应用实效。

哈拉哈塘油田位于塔北隆起轮南低凸起的西部斜坡带,被满加尔、草湖等生排烃凹陷环绕,储层受断

裂控制明显,岩溶洞穴沿断裂分布,是典型的断溶体油气藏。目的层奥陶系各组地层平缓,整体表现为向东南方向倾斜的单斜构造,现今构造面貌是多期构造运动叠加改造的结果,断裂展布及发育受控于多期次的构造运动。采用断溶体油藏断裂系统解释技术和岩溶缝洞识别技术(图6),首先进行断层分层系解释,为断裂分段评价提供基础资料,并解释不同断裂带之间、同一断裂不同发育段之间含油气规模的差异;然后,在断裂系统识别的基础上进行断溶体划分和评价(如图7,等值线为储层厚度,红线为断溶体油藏单元边界)。断溶体划分和评价为断溶体油藏勘探和高效开发井部署实现由点状溶洞向溶蚀断裂面的转变发挥了重要的作用,钻井成功率由65%提高到82%。



注:图中不规则亮白色—红黄色团块为优质岩溶储层。

图6 塔北哈拉哈塘油田奥陶系潜山区结构张量地震属性断裂预测剖面图

Fig. 6 Fracture prediction profile of structural tensor seismic attribute of Ordovician buried hill in Halahatang oilfield of Tabei Uplift, Tarim Basin

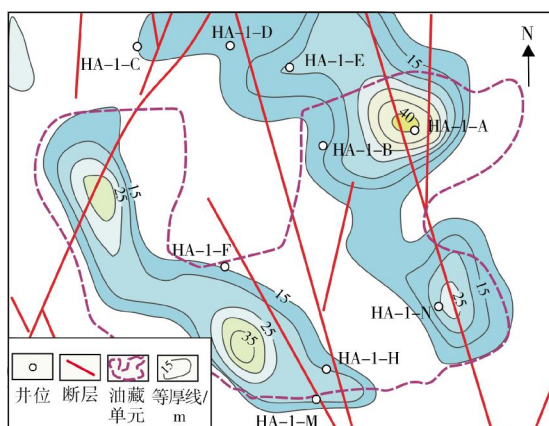


图7 塔北哈拉哈塘油田奥陶系潜山区断溶体油藏边界划分及评价图

Fig. 7 Boundary division and evaluation map of fault-karst reservoir of Ordovician buried hill in Halahatang oilfield of Tabei Uplift, Tarim Basin

3.3 礁滩储层地震预测应用实效

以四川盆地龙女寺地区寒武系龙王庙组为例展示礁滩储层预测技术的应用实效。四川盆地龙王庙组沉积期发育典型的碳酸盐缓坡,在缓坡背景下,随海平面升降发生的高能带侧向迁移,造成台内规模发育的泛滩呈准层状大面积分布,并发生白云石化。龙王庙组颗粒滩白云岩储层无论是侧向上还是垂向上均具有强烈的非均质性,颗粒滩(主要为砂屑白云岩)是孔隙的载体,滩间的泥晶白云岩较为致密,导致侧向上储层与致密层相互交替。颗粒滩主要发育于向上变浅旋回的上部,并受层序界面控制,垂向上多套发育,相互叠置。所以缓坡台地背景下的白云石化滩体识别是龙王庙组储层预测的关键。

在井-震标定的基础上,应用台地类型、礁滩体和白云岩体地震识别这3项技术进行储层预测:首先基于地震层序地层体,在关键层序界面切片上进行岩相划分,引入岩相信息,建立统计岩石物理岩相模型;然后构建基于岩相约束的目标反演函数,利用统计岩石物理岩相模型产生包含岩相信息的弹性参数与储层物性参数训练样本集;最后利用训练样本集,对基于岩相约束的目标反演函数进行求解,获得川中龙王庙组白云岩储层分布预测图(图8)。龙王庙组颗粒滩储层主要发育于龙王庙组上段,受海岸线控制,海岸线的迁移导致颗粒滩大面积分布。通过地震识别技术的应用使礁滩体预测验证吻合率由原来的76%提高到93%。

3.4 晶粒白云岩储层地震预测技术应用实效

这类储层的地震识别,需要应用不整合面、断裂系统、白云岩体地震识别3项关键技术。本文以川东地区栖霞组晶粒白云岩储层预测为例,展示这3项技术的应用实效。

川东地区栖霞组储层的主要岩性是晶粒白云岩(残余颗粒白云岩和中—细晶白云岩),溶蚀孔洞、残余粒间孔、生物体腔孔和裂缝是主要储集空间,颗粒滩亚相、准同生溶蚀作用是储层形成的主控因素,其中颗粒滩是储层发育的物质基础和原生孔隙的载体,准同生溶蚀作用将原生孔隙扩溶成孔洞,是改善储集空间的关键。因此不整合面识别和相控反演是预测该类储层分布的关键技术手段。

利用不整合面识别技术系列中的层序界面分离

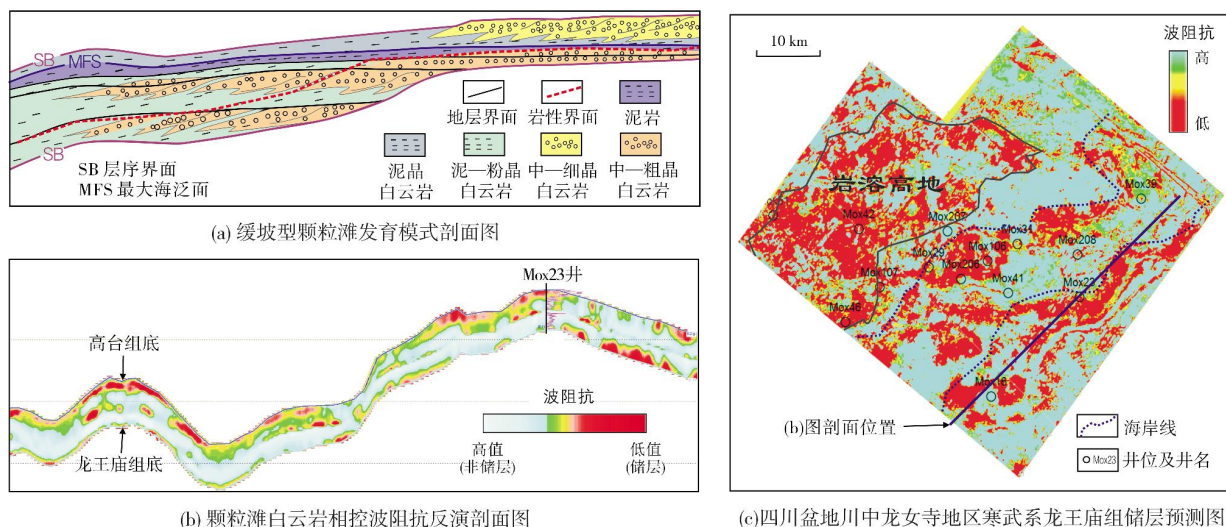


图 8 川中龙王庙组颗粒滩白云岩储层预测

Fig. 8 Prediction of granulated shoal dolomite reservoir of Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin

法去除低频旋回层序界面的地震波形, 剩余地震波形的变化反映了次级旋回沉积环境和岩性组合的空间变化, 同时使地震剖面上的断裂系统更加清晰(图 9), 更能表征储层受层序界面及断裂控制的发育特征。然后针对剩余地震波形数据体, 采用贝叶斯-蒙特卡洛随机模拟相控建模和大数据分析技术, 自动建立地震相与测井“白云石化滩相”之间的对应关系, 结合波阻抗模拟, 较好地达到晶粒白云岩储层地震预测的效果。通过该技术的运用, 刻画了川东地区栖霞组晶粒白云岩储层的分布, 白云岩储层为低阻抗响应特征(见图 10 红色部分)。

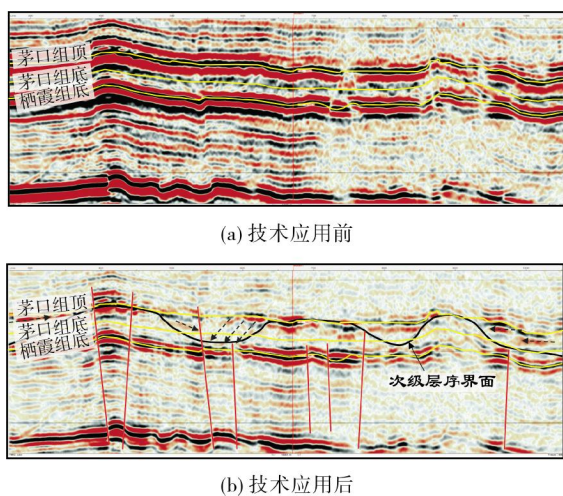


图 9 川东檀木场地区去除不整合面技术应用前后地震剖面

Fig. 9 Seismic profiles before and after application of unconformity surface removal technology in Tanmunchang area in east Sichuan Basin

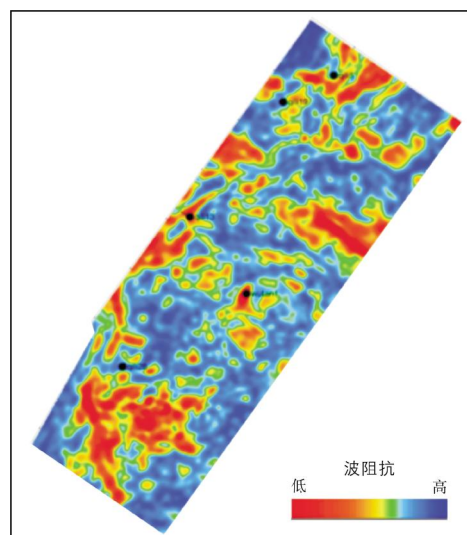


图 10 川东檀木场地区栖霞组晶粒白云岩储层预测分布图 (波阻抗反演)

Fig. 10 Prediction map of crystalline dolomite reservoir of Qixia Formation in Tanmunchang area of east Sichuan Basin (impedance inversion)

3.5 膏质白云岩储层地震预测技术应用实效

这类储层的地震识别, 需要应用不整合面、相控反演地震识别 2 项关键技术。本文以鄂尔多斯盆地马家沟组上组合白云岩储层预测为例, 展示这 2 项技术的应用实效。

鄂尔多斯盆地东南部地区马家沟组上组合(马五₁—马五₄)受海进—海退旋回性变化的影响, 沉积环境为碳酸盐台地背景下的蒸发潮坪, 沉积微

相主要发育泥质白云岩坪、灰质白云岩坪、膏质白云岩坪和含膏白云岩坪,岩石类型主要有含膏细—粉晶白云岩、砂屑白云岩、粉晶白云岩和含灰白云岩,这一时期蒸发和暴露作用较强,主要发育膏质白云岩风化壳储层。依据地质认识,首先识别不整合面,构建能够反映地质特征的低频初始模型,同时通过构建地震岩石物理模型,建立了地球物理参数和储层岩性间的对应关系(图11),这为上组合白云岩储层和含气性预测奠定了理论基础。研究表明:横波波阻抗基本能够区分白云岩,泊松比或拉梅系数能识别有效含气储层(中—粗晶白云岩)(图12)。

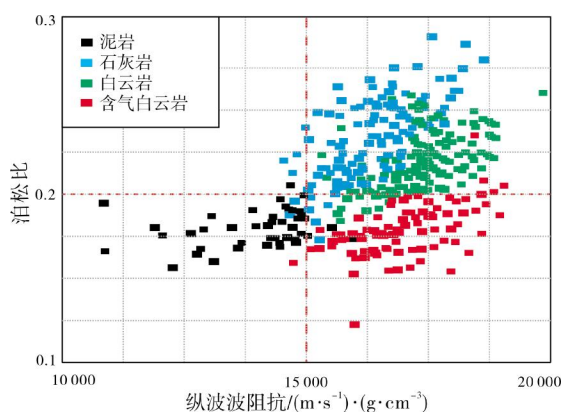


图11 鄂尔多斯盆地东南部地区马家沟组上组合岩石物理分析图版

Fig. 11 Petrophysical analysis chart of upper assemblage of Majiagou Formation in Southeast Ordos Basin

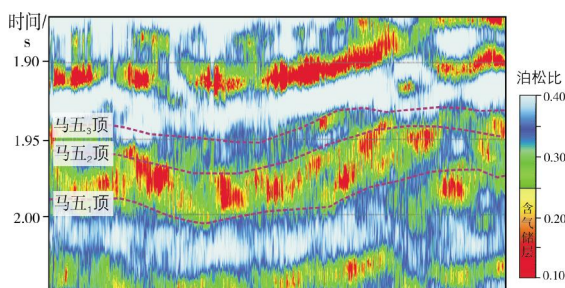


图12 鄂尔多斯盆地东南部地区马家沟组上组合膏质白云岩相控有效储层预测剖面图

Fig. 12 Prediction profile of effective reservoir controlled by gypsum and dolomite of upper assemblage of Majiagou Formation in Southeast Ordos Basin

4 结 论

本文开展了地质-测井-地震一体化的碳酸盐岩储层地震预测技术攻关,形成了基于碳酸盐岩储层成因和分布规律地质认识、储层地质模型约束的地震储层预测技术,并取得良好的应用实效。

因和分布规律地质认识、储层地质模型约束的地震储层预测技术,并取得良好的应用实效。

(1)形成了台地类型及岩相特征地震识别、层序界面(不整合面、岩溶界面)地震识别、岩溶储层地震识别、断溶体储层地震识别、礁滩体地震识别和白云岩体地震识别等6项技术,为岩溶储层、礁滩储层和白云岩储层预测提供了技术手段。

(2)针对不同成因类型碳酸盐岩储层,在明确其分布主控因素的基础上,优选地震储层预测技术组合,在塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地的岩溶储层、礁滩储层和白云岩储层预测中取得了良好的应用实效,储层预测验证吻合率提高了20%以上。

参考文献

- [1] 甘利灯,张昕,王尧钧,等. 从勘探领域变化看地震储层预测技术现状和发展趋势[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 214-225.
- [2] 沈安江,赵文智,胡安平,等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545-554.
- [3] 沈安江,陈娅娜,蒙绍兴,等. 中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 1-14.
- [4] 周进高,郝毅,邓红婴,等. 四川盆地中西部栖霞组—茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 67-78.
- [5] 陈广坡. 碳酸盐岩岩溶型储层地质模型及储层预测:以轮古西风化壳岩溶型储层为例[D]. 成都:成都理工大学, 2009: 36-40.
- [6] 赵艾琳,谢冰,何绪全,等. 川中地区下二叠统白云岩储层测井评价[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(2): 1-6.
- [7] 田瀚,李明. 哈拉哈塘油田热普区块奥陶系储层测井解释[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2014, 36(8): 71-78.
- [8] 赵路子,谢冰,齐宝权,等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起深层海相碳酸盐岩测井评价技术[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 86-92.
- [9] 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): 28-36.
- [10] 王亮,胡恒波,张鹏飞,等. 川西地区栖霞组储层测井识别与流体性质判断[J]. 特种油气藏, 2012, 19(4): 18-20, 103.
- [11] 牛庙宁. 富县地区马家沟组碳酸盐岩测井储层评价研究[D]. 西安:西安石油大学, 2013: 37-38.
- [12] 乔占峰,郑剑锋,张杰,等. 海相碳酸盐岩储层建模和表征技术进展及应用[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 15-26.
- [13] 周进高,刘新社,沈安江,等. 中国海相含油气盆地构造-岩相古地理特征[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 27-37.
- [14] 顾家裕,马锋,季丽丹. 碳酸盐岩台地类型、特征及主控因素[J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 21-27.
- [15] 高志前,樊太亮,杨伟红,等. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩台缘结构特征及其演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 657-665.
- [16] 乔占峰,沈安江,郑剑锋,等. 基于数字露头模型的碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 328-337.
- [17] 常少英,沈安江,李昌,等. 岩石结构组测井识别技术在

- 白云岩地震岩相识别中的应用[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 90-95.
- [18] 李浩, 王骏, 殷进根. 测井资料识别不整合面的方法[J]. 石油物探, 2007, 46(4): 421-424.
- [19] 卫端, 高志前, 杨孝群, 等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统鹰山组碳酸盐岩层系内幕不整合识别特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(3): 457-468.
- [20] 杨培杰, 刘书会, 隋风贵. 地震反射同相轴等时与穿时问题探讨[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 2969-2976.
- [21] 杨涛, 乐友喜, 吴勇. 波形指示反演在储层预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 769-776.
- [22] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2011.
- [23] 胡光辉, 王立歆, 方伍宝, 等. 全波形反演方法及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- [24] 常少英, 邓兴梁, 戴传瑞, 等. 岩溶洞穴型油藏描述中的几种方法: 以塔北轮古西油田为例[J]. 海相油气地质, 2016, 21(3): 65-71.
- [25] 孟伟. 碳酸盐岩岩缝洞型油气藏勘探开发关键技术: 以塔河油田为例[J]. 海相油气地质, 2006, 11(4): 48-53.
- [26] 张君龙. 碳酸盐岩层序沉积演化及海平面的控制作用: 以塔里木盆地古城地区奥陶系为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 46-53.
- [27] 常少英, 邓兴梁, 常中英, 等. 岩溶洞穴型储层发育期次识别技术及应用[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(3): 109-114.
- [28] 徐天吉, 沈忠民, 文雪康. 多子波分解与重构技术应用研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 660-665.
- [29] 马德波, 赵一民, 张银涛, 等. 最大似然属性在断裂识别中的应用: 以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 817-825.
- [30] 印兴耀, 张洪学, 宗兆云. OVT数据域三维地震资料解释技术研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(2): 155-178.
- [31] 刘建新, 孙勤华, 王锦喜, 等. 裂缝型储层预测技术优选: 以塔北地区奥陶系为例[J]. 海相油气地质, 2010, 15(3): 65-69.
- [32] 常少英, 庄锡进, 邓兴梁, 等. 断溶体油藏高效井预测方法与应用效果: 以HLHT油田奥陶系潜山区为例[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(增刊1): 199-206.
- [33] 何君, 韩剑发, 潘文庆. 轮南古隆起奥陶系潜山油气成藏机理[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 44-48.
- [34] 张学丰, 李明, 陈志勇, 等. 塔北哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征及主要岩溶期次[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 815-826.
- [35] 李国会, 袁敬一, 罗浩渝, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩缝洞型储层量化雕刻技术[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 24-29.
- [36] 刘延莉, 樊太亮, 薛艳梅, 等. 塔里木盆地塔中地区中、上奥陶统生物礁滩特征及储集体预测[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 562-565.
- [37] 邱隆伟, 刘镠, 师政, 等. 基于残余岩溶指数的表生岩溶储层综合评价及有利区带预测: 以南堡凹陷下古生界碳酸盐岩潜山为例[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(6): 22-27.
- [38] 陈利新, 潘文庆, 梁彬, 等. 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.
- [39] 王宏斌, 张虎权, 孙东, 等. 风化壳岩溶储层地质-地震综合预测技术与应用: 以塔中北部斜坡带下奥陶统为例[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 131-137.
- [40] 杨占龙, 刘化清, 沙雪梅, 等. 融合地震结构信息与属性信息表征陆相湖盆沉积体系[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1): 138-145.
- [41] 靳玲, 丁艳红, 苏桂芝, 等. 地震参数在泌阳凹陷白云岩预测中的应用[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 153-155.
- [42] 严玉霞, 王兰生, 李子荣, 等. 成岩作用对四川盆地广安构造须家河组储层物性的影响[J]. 天然气勘探与开发, 2009, 32(1): 1-4.
- [43] 刘欣欣, 印兴耀, 张峰. 一种碳酸盐岩储层横波速度估算方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 42-49.
- [44] 李宏兵, 张佳佳, 姚逢昌. 岩石的等效孔隙纵横比反演及其应用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 608-615.
- [45] BERRYMAN J G. Mixture theories for rock properties [M]// AHRENS T J. Mineral physics & crystallography: a handbook of physical constants. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1995: 205-228.

编辑: 黄革萍

Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir

CHANG Shaoying, LI Chang, CHEN Ya'na, XIONG Ran, GU Mingfeng, SHAO Guanming, ZHU Mao, DING Zhenchun, ZHANG Hao, WANG Xiaofang

Abstract: In view of the characteristics of carbonate reservoir with strong heterogeneity and complex plane distribution, based on the recognition that the distribution of carbonate reservoir is mainly controlled by large-scale unconformity surface, interlayer karst surface, fault system, reef-shoal facies belt and gypsum dolomite facies belt and other geological elements, the carbonate reservoir prediction technologies are developed with the integration of geology, logging and seismic on the basis of reservoir geological model and the calibration of reservoir logging identification and evaluation chart, with the identification of platform type/lithofacies, sequence boundary, karst reservoir, fault system, reef-shoal body and dolomite body as the core. These technologies have been applied to the prediction of the karst reservoir of Ordovician buried hill in west Lungu, inner fault-karst reservoir of Ordovician buried hill in Halahatang oilfield of Tarim Basin, the reef-shoal reservoir of Sinian-Cambrian, the crystalline dolomite reservoir of the Middle Permian Qixia Formation in Sichuan Basin, and dolomite weathering crust reservoir of the upper assemblage of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin, and the coincidence rate of reservoir prediction increase by more than 20%.

Key words: carbonate; reservoir geological model; reservoir logging identification; seismic prediction technology
CHANG Shaoying, First author: Senior Engineer, engaged in geological-geophysical reservoir prediction. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China