

doi: 10.11720/wtyht.2021.1340

张豪,辛勇光,田瀚.基于双相介质理论预测川西北地区雷口坡组储层含气性[J].物探与化探,2021,45(6):1386-1393.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1340

Zhang H, Xin Y G, Tian H. Gas-bearing property prediction of Leikoupo Formation in the northwest Sichuan Basin based on the theory of two-phase media [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1386-1393. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1340

基于双相介质理论预测川西北地区 雷口坡组储层含气性

张豪^{1,2}, 辛勇光^{1,2}, 田瀚^{1,2}

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油勘探开发研究院 四川盆地研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 四川盆地西北部雷口坡组勘探潜力大, 随着勘探的深入, 多口钻井在雷口坡组雷三³亚段油气显示活跃, 测井解释储层较为发育, 含气性好。针对雷口坡组含气有利区分布不清的问题, 首先结合川西北地区地震地质情况和钻测井资料, 通过经验模态分解技术高分辨率处理, 在保持低频信号的同时抬升高频能量, 有效拓宽了地震数据的频宽, 为双相介质油气检测技术提供了资料基础。基于单井目的层位置处的频谱分析与标定, 发现目的层含气时频谱表现为低频能量相对增强, 高频能量相对减弱的特征, 优选敏感频率范围, 利用基于双相介质理论的油气检测技术对研究区开展储层含气性检测, 油气检测结果与实钻井和地质规律匹配较好, 证实了该技术在研究区应用的可靠性, 为川西北部雷口坡组扩大勘探领域提供了指导方向。

关键词: 双相介质; 油气检测; 经验模态分解; 四川盆地; 雷口坡组; 油气地质工程

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)06-1386-08

0 引言

多年来, 基于单相介质理论的处理和解释技术在常规油气藏勘探中起到了非常重要的作用。但当地下储层孔隙度和流体密度较大时, 基于单相介质理论预测油气就会出现较大的误差。面对油气勘探目标日益复杂化和精细化的要求, 假设地下介质为纯固体介质的单相介质理论在复杂储层流体检测方面适用性较差, 基于双相介质的地震波传播理论更符合地下实际含油气介质的岩石物理特征, 能更精确地描述地震波在含流体介质中的传播机理^[1]。

Biot 双相介质理论认为, 当地震波穿过双相介质时, 固相和流相之间产生相对位移并发生相互作用, 产生慢纵波, 实际地震记录由慢纵波和快纵波叠加而成, 并推导得到双相介质的地震波方程, 分析其

衰减机理^[2-4]。当地震波穿过双相介质时, 地震波能量会向低频端移动, 表现为低频能量相对增强, 高频能量相对减弱^[5]。基于双相介质理论的油气检测技术直接利用原始地震资料和解释层位成果, 不受测井曲线质量以及子波提取等的影响, 油气检测结果比较客观, 可以有效提高流体识别的成功率, 降低油气勘探的风险。目前许多学者应用该方法在岩性油气藏和复杂油气藏勘探中取得了良好的勘探效果^[6-11]。

本文研究区位于四川盆地西北部双鱼石地区, 目的层为中三叠统雷口坡组。双鱼石地区及邻区雷口坡组储层主要分布在雷三³亚段藻白云岩中, 储层非均质性强, 分布规律不清。前人针对川西雷口坡组油气检测已经做了一些探索研究; 李素华等通过谱分解技术获得分频数据体, 利用低频能量增强属性预测川西新场地区雷口坡组顶不整合面储层的

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2021-06-17

基金项目: 国家“十三五”油气重大专项项目(2017ZX05008-005); 中石油天然气股份有限公司重点科技项目(2018A-0105)

第一作者: 张豪(1991-), 男, 工程师, 2017年毕业于中国石油大学(北京), 硕士研究生, 主要从事构造解释与储层预测工作。Email: zhangh_hz@petrochina.com.cn

含气分布^[12];陈刚等采用基于匹配追踪时频分析的低频能量增强油气检测技术对元坝地区岩溶油气发育区进行预测^[13]。川西北双鱼石地区目前勘探主要是针对下二叠统栖霞组台缘滩相沉积的白云岩储层,而对于雷口坡组雷三段藻屑滩相白云岩储层的预测和油气检测目前还属于空白。由于研究区地震资料分辨率较低,雷三³亚段的地震反射特征较为模糊,使用常规处理后的地震资料直接开展储层流体预测研究难以准确预测流体的展布规律,流体检测效果可靠性较差。研究区叠前道集品质较低,远偏移距资料动校正拉伸严重,且钻井都是过路井,没有试气结果,叠前流体预测无法有效开展。针对以上难点,本文基于经验模态分解拓频处理获取的高分辨率资料,通过单井频谱分析与标定,利用双相油气介质理论开展川西北双鱼石地区储层流体预测的研究,有效地预测出储层流体的有利发育区,与已钻井和储层预测结果相吻合,指导了该地区雷口坡组雷三³亚段岩性气藏的下一步勘探。

1 油气检测原理与流程

基于单相介质的地震传播理论难以反映出地震波在含油气介质中的传播规律,而双相介质理论的提出弥补了单相介质理论的不足。双相介质也就是由固体骨架和孔隙中流体组成的介质,当地震波穿过双相介质时,由于流体与固体的振动相互作用,使得孔隙中的流体在孔隙中产生流动,固相和流相之间发生相对位移并发生相互作用,产生慢纵波,即第二纵波,慢纵波速度比较低且与快纵波极性相反,实际地震记录由慢纵波和快纵波叠加而成。当双相介质的孔隙单元之间相互连通时,考虑固体和流体之间相互作用产生的能量耗散,双相介质中的地震波传播方程如下:

$$\begin{cases} N \nabla^2 u + \text{grad}[(A + N)\theta + Q\varepsilon] = \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}u + \rho_{12}U) + b \frac{\partial^2}{\partial t^2}(u - U) \text{grad}[Q\theta + R\varepsilon] = \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{12}u + \rho_{22}U) - b \frac{\partial^2}{\partial t^2}(u - U) \end{cases}$$

式中: b 为耗散系数, u 为固体位移, U 为液体位移, A 和 N 为拉梅系数, θ 为固体体积应变, ε 为液体体积应变, ρ_{11} 为固体质量系数, ρ_{12} 为流体质量系数, ρ_{22} 为固体和流体之间的质量耦合系数。

当不考虑流体与固体之间的相对运动产生的位移时,振幅衰减可写为:

$$\bar{A} = \frac{\eta\phi^2}{K} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

式中: ϕ 为介质孔隙度; K 为渗透率; η 为流体黏滞系数。

由公式可知,地震波的振幅衰减与衰减系数 $\eta\phi^2/K$ 及流体与固体的相对运动速度 $\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t}$ 成正比。当流体与固体之间的相对运动速度小时,地震波衰减系数小,地震波的衰减也就小,当流体与固体间达到共振时,此时低频能量还会得到明显增强;而随着频率的增大,由于流体与固体间的相对运动速度增大,地震波的振幅衰减也会增大,在特定频率下,地震波的衰减系数最大,地震波的振幅能量衰减也最大,此时振幅最小,这就是地震波穿过含油气介质时表现出“低频共振、高频衰减”的原因,基于该理论可以预测出油气分布的有利区。

如图1为油气检测技术应用的流程,首先需要评价地震资料与测井曲线的品质,分析实际地震数据的信噪比和分辨率等指标是否符合油气检测的要求。如若资料品质较差,可以开展一些针对性的去噪、提高分辨率等处理,同时对测井曲线的井眼垮塌和密度曲线等进行校正;接着通过井震精细标定分析储层发育的地震反射特征,预测出储层的展布规律,在储层预测的基础上,基于含油气井与干井的频谱分析与标定,选取低频段与高频段的敏感时窗,开展研究区目的层段的油气检测,并结合已钻井含油气情况和储层预测的结果评判油气检测结果的合理性,从而预测得到研究区油气分布的有利区。

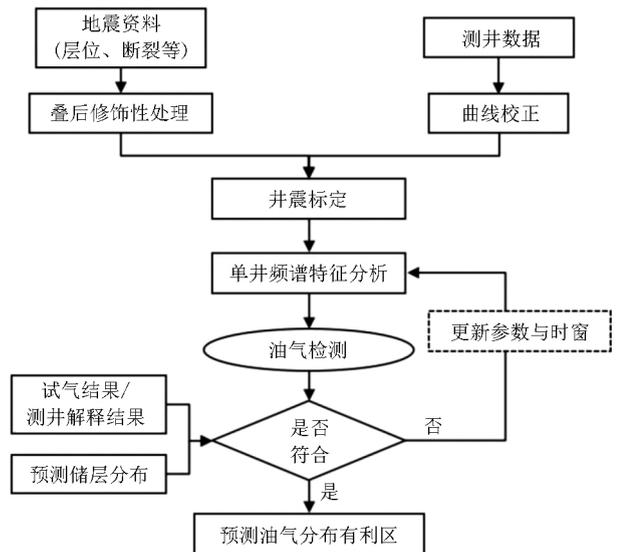


图1 油气检测流程

Fig.1 Flow chart of oil and gas detection

2 应用实例

2.1 研究区地质概况

雷口坡组属于中三叠统,是四川盆地海相碳酸盐岩油气勘探重要的接替领域之一。依据岩性、电性、沉积旋回和储层发育规律可将四川盆地雷口坡组自下而上划分为雷一段、雷二段、雷三段、雷四段 4 个岩性段^[14],储层主要发育在雷一、雷三和雷四段,滩和藻云坪相中,储集岩性主要以颗粒白云岩、藻白云岩为主^[15-16]。雷口坡组勘探历经 50 余年,先后发现中坝雷三段构造气藏、磨溪雷一段构造气藏和龙岗雷四³亚段构造地层气藏^[17-20]。近年来中石化在川西钻探的川科 1 井、彭州 1 井等多口探井在雷口坡组获得了高产工业气流,展示出川西雷口坡组藻云岩储层良好的勘探潜力。总体上来看,川西雷口坡组受地质认识以及地震资料品质的影响,以寻找构造气藏为主,勘探潜力较大,但目前勘探程度还比较低。

研究区为四川盆地西北部双鱼石三维区,位于四川盆地西北部龙门山前冲断褶皱带,处于天井山古隆起斜坡区,总面积 600 km²,地震满覆盖面积 250 km²。双鱼石地区雷口坡组受天井山古隆起抬升剥蚀的影响,雷四²和雷四³两个亚段遭受剥蚀,雷口坡组与顶部须家河组呈不整合接触。在天井山古隆起斜坡区西南部已发现构造型气藏中坝气田,中坝气田面积 10.8 km²,累积产量 81 亿 m³,属于小而肥的气田,如此高效的原因是发育厚层优质藻云岩储层(孔隙度>4%)。近期通过对中坝气田东北部双鱼石地区多口过路井的测井解释和薄片观察发现,双鱼石地区发育类似于中坝气田的厚层藻云岩储层,储层主要发育在雷三³亚段藻屑滩和藻云坪相藻云岩中,孔隙度主体介于 2%~8%,厚度介于 70~130 m,储集空间主要为粒间(内)孔、藻间溶孔。优质储层(孔隙度≥4%)主要发育在高频旋回上部藻屑滩白云岩中,储层非均质性强。双鱼石地区雷口坡川西北双鱼石位于天井山古隆起背景上的现今构造斜坡,沿天井山古隆起斜坡雷三³亚段发育厚层藻云岩储层,生储盖组合好,具备形成构造-岩性气藏条件,是下一步雷口坡扩大勘探领域的重要区域之一。

如图 2 所示,由于缺乏试气资料,本文基于邻区(九龙山、中坝、川西中石化、川西南)雷三³亚段已知试油井资料,建立测井含气性解释图版开展含气性解释。以测井解释为标准,将孔隙度介于 2%~

4%的气层解释为差气层,孔隙度大于 4%为气层,孔隙度小于 2%的为干层。双鱼石地区 7 口过路井中 5 口井测井解释气层厚度较厚,可达 25~90 m,yu1 井和 st10 井气层不发育,为干井。双鱼石地区与中坝构造型气田不同,油气分布受构造的控制作用弱,属于岩性气藏,针对该地区雷三³亚段藻云岩储层的含气性预测目前研究较少,如何寻找下一步的含气有利区是本文需要解决的问题。

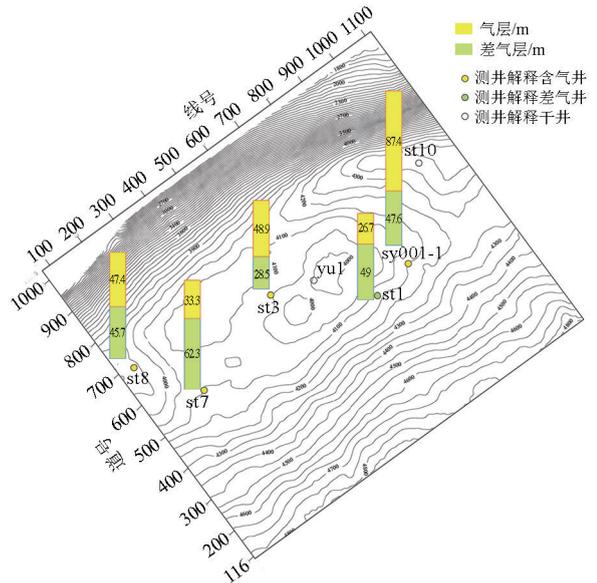


图 2 雷三³亚段测井解释气层厚度叠合构造
Fig.2 Log interpretation of gas layer thickness superimposed structure map of Lei-3 sub-member

2.2 地震数据高分辨率处理

地震资料的品质影响了油气检测的可靠性,高品质的地震资料是油气检测技术应用的基础^[21]。图 3 为研究区连井地震剖面,图 4 为图 3 中蓝色方框区域的频谱。图中绿色层位为须家河组底界,在地震上表现为连续低频强波峰的反射特征,须底下红色层位为雷三³底界。直接利用该地震数据开展油气检测主要有以下 3 个问题:①雷三³亚段底界反射特征不清,难以连续追踪,利用该资料解释的层位确定油气检测时窗难以准确开展储层预测和油气检测的研究;②含气层段地震反射特征较为模糊,像图中 st7 井和 st3 井均为测井解释的含气井,st1 井为测井解释的干井,但是 3 口井的地震反射均为宽波谷空白反射;③地震资料主频在 18 Hz 左右,优势频带分布在 12~42 Hz,主频较低,频带范围较窄,尤其是高频部分能量较低,难以满足油气检测理论中提取高频衰减属性的要求。

针对地震数据分辨率较低,储层响应特征不明显,频带宽度难以满足流体检测的需要等问题,优选

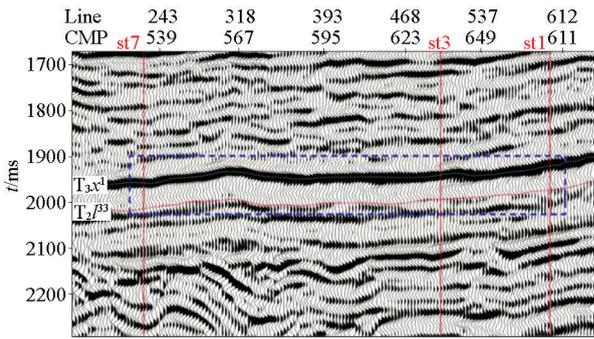


图3 研究区连井地震剖面

Fig.3 Well-tie seismic cross-section in study area

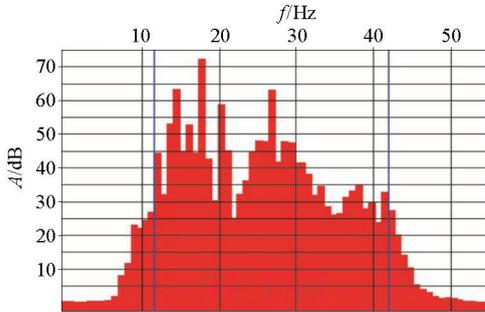


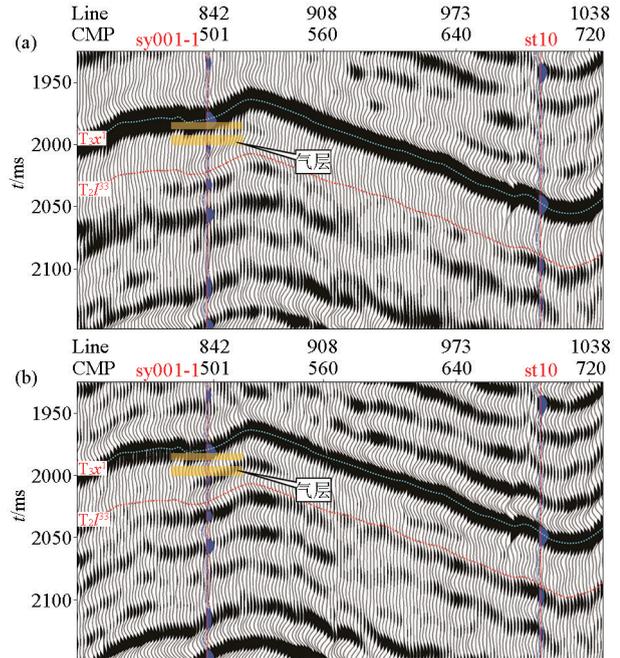
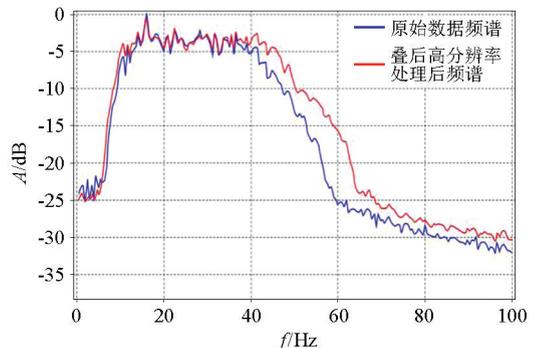
图4 研究区连井地震剖面频谱

Fig.4 Frequency spectrum of well-tie seismic cross-section in study area

出适合研究区地震资料的经验模态分解高分辨率处理技术。经验模态分解方法在时频域的分辨率要优于传统的傅里叶变换、小波变换等方法,对于非平稳信号处理具有特殊的优势,目前已经在地震资料处理领域得到了应用^[22-24]。该技术是利用经验模态分解方法将地震道分解为不同频率的成分,通过分析各频率成分的能量得到各自的能量衰减曲线,再根据该衰减曲线在保持相对振幅关系的前提下,将不同频率成分的能量抬升到一致水平,最后将能量抬升后的每个频率成分进行信号重构,得到拓频处理后的数据。

结合川西北双鱼石地区地震地质情况和钻测井资料,首先通过经验模态滤波,在保持低频信号的同时抬升高频能量,有效拓宽地震数据的频宽,满足油气预测对地震资料的要求。如图5为经验模态分解处理前后的连井地震剖面,受地震分辨率和须家河组底界连续强波峰反射屏蔽的影响,原始地震剖面上须底(简称,须底)到雷三³底界间表现为强波谷反射,该强波谷反射横向能量、波形横向变化不大,难以反映储层和流体的信息。经过经验模态分解处理后的地震资料在保持低频信号的同时抬升高频能量成分,资料的主频得到有效提高,地震优势频带拓宽了7 Hz(图6)。从剖面上看,须底与雷三³底界之

间的反射分辨率和信噪比明显得到提高,原本受地震分辨率制约难以区分的同向轴得以区分开来,地震反射同相轴的连续性增强,目的层地震反射的信息更加丰富。从连井地震剖面中看出,须底下宽相位复波波形内部出现了弱波峰反射特征,与测井合成记录基本一致。st10井目的层位置为干层, sy001-1为气层,高分辨率处理后, st10井仍然表现为强波谷的反射,指示储层不发育; sy001-1表现为中弱波峰反射的储层发育特征。经验模态分解高分辨率处理后储层反射特征与合成记录有很好的对应关系,从而可以改善单井井震匹配关系,建立目标层位与地震反射间的对应关系,突出目的层段储层和流体的反射特征。

图5 经验模态分解技术高分辨率处理前(a)后(b)地震剖面
Fig.5 Seismic profile before (a) and after (b) high resolution processing of empirical mode decomposition图6 经验模态分解技术高分辨率处理前后地震频谱
Fig.6 Seismic spectrum before and after high resolution processing of empirical mode decomposition

2.3 关键参数选取

在储层预测的基础上,为进一步开展有利区的预测,降低勘探风险,对研究区开展基于双相介质理论的油气检测技术应用研究。常用时频分析方法包括短时傅里叶变换、小波变换、S变换及广义S变换等。短时傅里叶变换存在着不能同时提高时域和频域分辨率的“测不准”问题,小波变换为克服傅里叶变换的问题引入了尺度因子,但是实际应用中尺度因子的选取往往比较困难;S变换属于小波变换的改进,广义S变换进一步克服了S变换中基本变换函数形态固定的问题,是目前地震信号处理中非常有效的方法。本文基于广义S变换方法对地震资料时频分解,将时间域的地震资料转换到时间—频率域,在此基础上开展地震油气检测工作。

实际工作中油气检测属性计算时窗的选取直接影响了油气检测结果的可靠性。通过对双鱼石地区已钻井的井震标定分析,雷三³亚段含气层、气水同层和水层纵向上主要分布在地层中部,也有分布在地层顶部,为了将气层、气水同层及水层包括在内,同时包含气层引起的“含气下拉区”,且满足时频分析至少半个相位的要求,分析时窗范围以须家河组底界为顶,以雷三³亚段底界为底。

通过对研究区已钻井目的层位置处进行频谱分析来确定高、低频敏感段范围。如图7所示,实线代表目的层测井解释为含气层的井,虚线代表目的层测井解释为干层或差气层的井。测井解释含气井的频谱在低频段的振幅能量相对于差气井和干井呈现明显的增强,在高频段的能量则明显低于差气井和

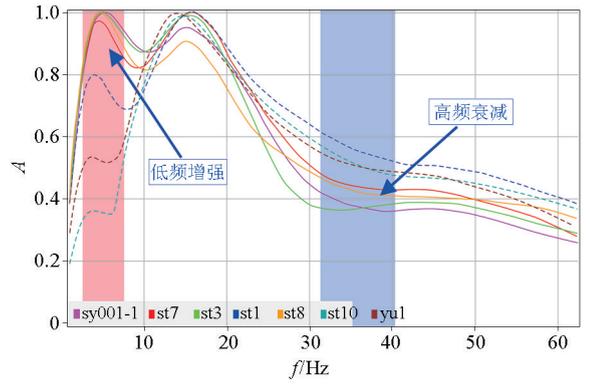


图7 研究区单井地震频谱对比

Fig.7 Seismic spectrum of single well in study area

干井,与钻井的实际情况吻合。差气井 st1 井低频端的振幅要弱于含气井,强于干井。因此,针对频谱分析选取振幅差异最大的低频段(2~7 Hz)和高频段(32~40 Hz),作为油气检测的敏感频率段。

2.4 应用效果

基于所选取的目的层时窗和敏感频率范围,对时窗内振幅能量谱分别进行能量累加计算,得到低频段和高频段内的低频能量和高频能量,再计算低频能量与高频能量之比,将其作为定性表征储层油气富集程度的结果。

图8为过双鱼石三维区已钻井的油气检测结果剖面,剖面上方从上往下依次为低频能量属性、高频能量属性和低高频能量之商表示的油气富集程度,红线所指示的井为测井解释的含气井,蓝线为测井解释的干井和差气井。从图中可以看出,含气井低频能量属性较强,高频能量属性较弱,油气富集程度

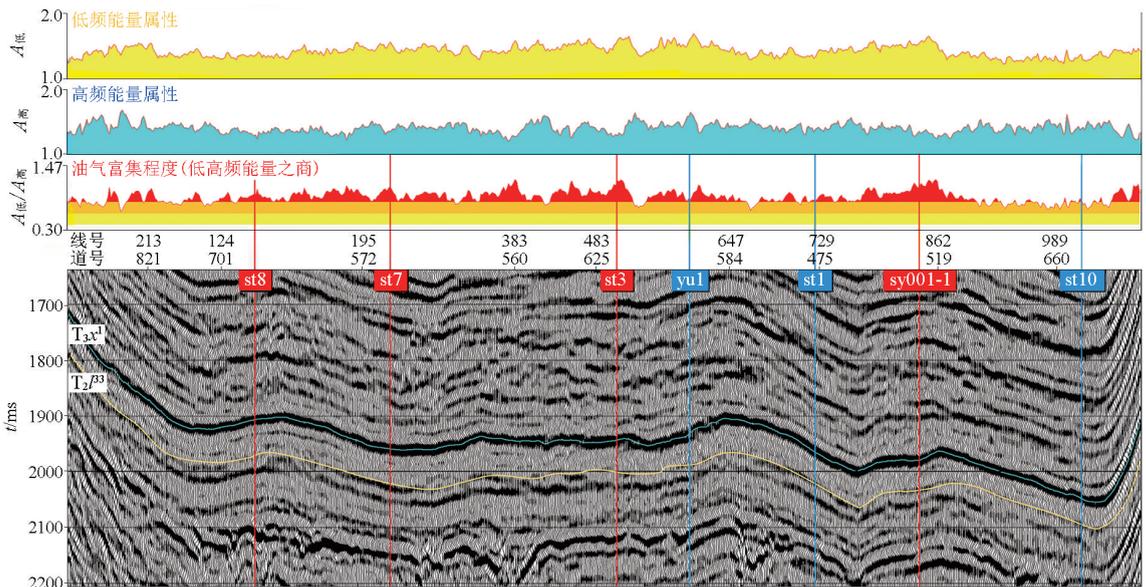


图8 双鱼石三维区已钻井油气检测结果剖面

Fig.8 Oil and gas detection profile in Shuangyushi 3D area

为高值,说明地震波经过含油气地层时,高频信号受到了明显的衰减,在地震振幅谱上表现出“低频共振,高频衰减”的特征。因此基于双相介质理论的油气检测技术在研究区具有可行性。

基于该油气检测技术得到双鱼石三维雷三³亚段烃类检测结果平面图(图9),红色代表预测烃类流体比较发育的区域,含气性最好,黄色次之,蓝色含气性最差。此外,基于川西北雷口坡组内幕白云岩储层发育模式建立了地质模型,定性分析了研究区储层地震响应特征的变化,建立地震响应模式,藻屑滩储层越发育,雷三³内部弱波峰反射越明显,利用波形聚类属性预测出储层的分布规律(图10)。从油气检测结果图上看,优势油气分布区域呈NE向分布的特征。与波形聚类分析预测的藻屑滩储层

分布规律基本一致,也与天井山古隆起斜坡区呈NE向的延伸方向一致。测井解释含气井均位于油气检测属性值高的红色与黄色区域,而差气井 st1 位于预测含气区的边缘,干井位于预测不含气的蓝色区域。对研究区已钻井目的层位置处的油气检测结果值进行了统计(表1),含气井的油气富集程度值都在1.05以上,7口钻井与油气检测结果全部吻合,证实了基于双相介质的油气检测技术在研究区应用的可靠性。基于双相介质油气检测技术识别出优势油气分布区面积 120 km²,是下步该地区雷口坡组雷三³亚段有利勘探方向。通过应用结果可知,双相油气介质油气检测技术可以在不需要井的约束下,有效提高研究区流体识别的成功率,降低油气勘探的风险。

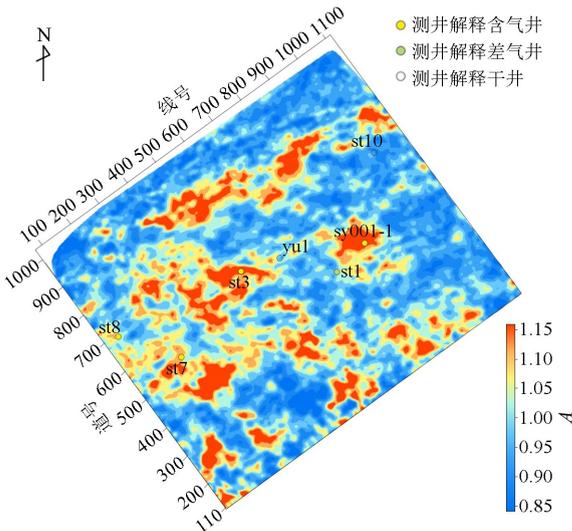


图9 双鱼石三维区雷三³亚段油气检测结果
Fig.9 Oil and gas detection result in Shuangyushi 3D area

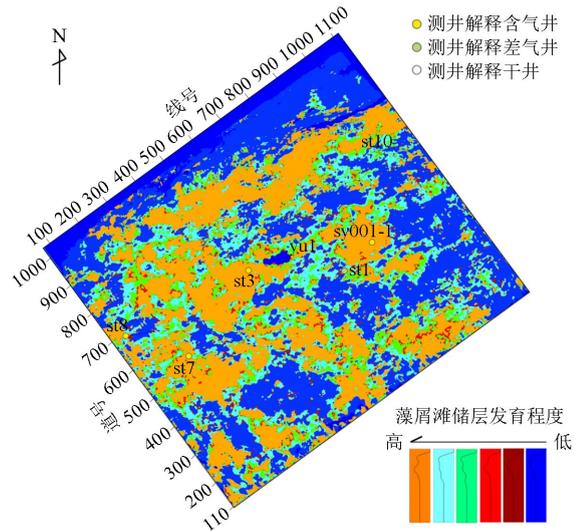


图10 双鱼石三维区雷三³亚段储层预测
Fig.10 Reservoir characterization result in Shuangyushi 3D area

表1 双鱼石三维雷三³亚段油气检测结果
Table 1 Oil and gas detection result in Shuangyushi 3D area

井名	油气检测结果值	测井解释结果	符合情况
sys001-1	1.16	气层	符合
st1	1.04	差气层	符合
st3	1.15	气层	符合
st7	1.13	气层	符合
st8	1.10	气层	符合
st10	0.84	干层	符合
yu1	0.97	干层	符合

3 结论

1) 地震资料的品质直接影响了油气检测的结果质量和可信度,低频信号或者高频信号缺失都难

以满足要求,为做好油气检测需准备频带完整的地震数据,本文通过经验模态滤波处理手段,克服研究区地震资料高频段较窄的缺点,在保持地震低频能量的同时抬升高频部分的能量,有效提高了地震资料的分辨率,为双相介质油气检测技术提供了资料基础。

2) 检测时窗和敏感频率段的确定对油气检测结果至关重要,需要准确的合成记录,标定出气层、水层或气水同层的位置,为确定油气检测的时窗提供依据,紧密结合含气井与非气井的频谱分析与标定,识别出高、低频段变化最大的区域,确定油气检测使用的敏感频率段。

3) 基于双相介质理论的油气检测技术,可以避免井震匹配以及子波提取等带来的人为影响,方法

应用比较简捷,实际应用中应与其他地震预测方法及实际钻井试气结果相结合,利用诸如地震反演及属性等手段来综合评判流体检测结果的可靠性,利用钻井试气结果从点到面来检验本方法的有效性,为下步气藏勘探提供指导方向。

参考文献 (References):

- [1] 张会星,何兵寿,姜效典,等.利用地震波在双相介质中的衰减特性检测油气[J].石油地球物理勘探,2010,45(3):343-349. Zhang H X, He B S, Jiang X D, et al. Utilizing attenuation characteristic of seismic wave in dual-phase medium to detect oil and gas [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 343-349.
- [2] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168.
- [3] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179.
- [4] Biot M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(9A): 1254-1264.
- [5] 周民都,李清河,张元生.双相介质中的地震波运动学特征[J].高原地震,1999,11(4):1-8. Zhou M D, Li Q H, Zhang Y S. The kinematic characteristics of seismic waves in two-phase media [J]. Earthquake Research in Plateau, 1999, 11(4): 1-8.
- [6] 李宏伟,王九拴,邵林海,等.油气检测技术在三湖浅层生物气勘探中的应用[J].石油地球物理勘探,2013,48(5):770-775. Li H W, Wang J S, Shao L H, et al. Hydrocarbon detection in biogas exploration in Sanhu shallow [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 770-775.
- [7] 李永义.双相介质油气检测技术在龙西—杏西地区含油性预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2017,52(s1):72-76. Li Y Y. Hydrocarbon detection based on two-phase medium for oil-bearing prediction in the Longxi-Xingxi area [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(s1): 72-76.
- [8] 杨占龙,沙雪梅,李在光.含油气检测技术及其在岩性圈闭油气藏勘探中的应用[J].天然气地球科学,2010,21(5):822-827,874. Yang Z L, Sha X M, Li Z G. Hydrocarbon detection and application in lithologic reservoir exploration [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 822-827, 874.
- [9] 张艳芳,王权锋.基于双相介质的地震油气检测技术[J].天然气地球科学,2013,24(4):803-807. Zhang Y F, Wang Q F. Oil-gas detecting techniques with seismic in two phase medium [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 803-807.
- [10] 陈希光,陈昌,王波,等.油气双相介质理论在辽西凹陷南部岩性圈闭中的应用[J].地质与资源,2019,28(1):35-42. Chen X G, Chen C, Wang B, et al. Application of hydrocarbon detection method based on two-phase media theory in the lithologic traps in southern liaoxi sag [J]. Geology and Resources, 2019, 28(1): 35-42.
- [11] 郭华军,黄革萍,徐洋.油气检测技术在莫索湾地区的应用[J].物探与化探,2013,37(2):264-268. Guo H J, Huang G P, Xu Y. The application of hydrocarbon detection technology to Mosuo-wan field [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 264-268.
- [12] 李素华,卢齐军,许国明,等.川西 XC 地区雷口坡组顶不整合面储层预测方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(5):793-798. Li S H, Lu Q J, Xu G M, et al. Reservoir prediction in the top Leikoupo unconformity surface in the area XC, Sichuan [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 793-798.
- [13] 陈刚,张玺华,陈勇,等.风化壳古岩溶储层地震预测方法——以川东北元坝地区雷口坡组四段为例[J].煤田地质与勘探,2015,43(4):85-89. Chen G, Zhang X H, Chen Y, et al. Seismic prediction of weathering crust palaeokarst reservoir: a study on the karst reservoir of the 4th Leikoupo Formation of Yuanba area in Northeast Sichuan [J]. Coal Geology and Exploration, 2015, 43(4): 85-89.
- [14] 周进高,辛勇光,谷明峰,等.四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探方向[J].天然气工业,2010,30(12):16-19. Zhou J G, Xin Y G, Gu M F, et al. Direction of gas exploration in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 16-19.
- [15] 辛勇光,周进高,倪超,等.四川盆地中三叠世雷口坡期障壁型碳酸盐岩台地沉积特征及有利储集相带分布[J].海相油气地质,2013,18(2):5-11. Xin Y G, Zhou J G, Ni C, et al. Sedimentary facies features and favorable lithofacies distribution of Middle Triassic Leikoupo Barri-ered Carbonate Platform in Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(2): 5-11.
- [16] 田瀚,唐松,张建勇,等.川西地区中三叠统雷口坡组储层特征及其形成条件[J].天然气地球科学,2018,29(11):1585-1594. Tian H, Tang S, Zhang J Y, et al. Characteristics and formation conditions of carbonate reservoir in Leikoupo Formation of western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1585-1594.
- [17] 孙春燕,胡明毅,胡忠贵,等.四川盆地中三叠统雷口坡组沉积特征及有利储集相带[J].石油与天然气地质,2018,39(3):498-512. Sun C Y, Hu M Y, Hu Z G, et al. Sedimentary characteristics and favorable reservoir facies distribution of the Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 498-512.
- [18] 杨光,石学文,黄东,等.四川盆地龙岗气田雷四3亚段风化壳气藏特征及其主控因素[J].天然气工业,2014,34(9):17-24. Yang G, Shi X W, Huang D, et al. Characteristic sand major controls of weathering crust gas reservoirs in T2134 in the Longgang Gas Field, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(9): 17-24.
- [19] 周世超,王兴志,曾德铭,等.川中龙岗地区中三叠统雷四3亚段气藏地球化学特征与成藏分析[J].新疆石油地质,2015,36

- (4):415-422.
Zhou S C, Wang X Z, Zeng D M, et al. Geochemistry and accumulation analysis of gas reservoir of Leikoupo 43 sub-member of Middle Triassic in Longgang area, Central Sichuan Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(4):415-422.
- [20] 王廷栋, 郑永坚, 李绍基, 等. 从油气地化特征探讨川西北中坝雷三气藏的气源[J]. 天然气工业, 1989, 9(5):20-26.
Wang T D, Zhen Y J, Li S J, et al. From geo-chemical characteristics of oil and gas to discuss the gas source of Lei-3 reservoir, Zhongba Gasfield, in northwest Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 1989, 9(5):20-26.
- [21] 赵延江, 段云卿, 杨文军, 等. 大民屯凹陷高分辨地震资料处理技术研究[J]. 物探与化探, 2007, 34(4):370-373.
Zhao Y J, Duan Y Q, Yang W J, et al. A study of the high-resolution seismic data processing technique for Damingtun Sag [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 34(4):370-373.
- [22] Wang T, Zhang M C, Yu Q H, et al. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 83:29-34.
- [23] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings A, 1998, 454(1971):903-995.
- [24] 张波, 郭平, 高树生, 等. 高分辨率处理技术在辽河雷家地区碳酸盐岩储层中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(s1):43-50.
Zhang B, Guo P, Gao S S, et al. High-resolution processing techniques applied for carbonate reservoirs in Leijia Area, Liaohe [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(s1):43-50.

Gas-bearing property prediction of Leikoupo Formation in the northwest Sichuan Basin based on the theory of two-phase media

ZHANG Hao^{1,2}, XIN Yong-Guang^{1,2}, TIAN Han^{1,2}

(1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China; 2. Research Institute of Sichuan Basin, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Chengdu 610041, China)

Abstract: The Leikoupo Formation in northwest Sichuan Basin has great potential in exploration, quite a few wells demonstrate active oil and gas showings during drilling, and good gas-bearing property and reservoir development are interpreted from well logging. Aiming at tackling the unclear distribution of favorable gas-bearing zones of Leikoupo Formation and based on the combination of seismic geological conditions and well logging data, the authors conducted Empirical Mode Decomposition processing to compensate high-frequency energy while preserving the low-frequency energy, which laid the data basis for subsequent bi-media hydrocarbon detection technique. Then amplitude spectrums at different well locations were compared and analyzed, the low-frequency energy enhancement and high-frequency energy attenuation were found where reservoir contained gas. With the optimized frequency range, hydrocarbon detection based on two-phase media theory was implemented on the seismic data of the study area. The results of hydrocarbon detection are well consistent with the data from drilling wells and the geological law, which confirms the validity of proposed techniques and provides the directions for expanding oil and gas exploration range and area of Leikoupo Formation in northwest Sichuan Basin.

Key words: two-phase media; hydrocarbon detection; empirical mode decomposition; Sichuan Basin; Leikoupo Formation; oil and gas geological engineering

(本文编辑:叶佩)