

文章编号: 0253-9985(2006)06-0871-08

川东北地区山地高精度地震勘探技术

杨贵祥, 郑天发, 敬朋贵, 高 林

(中国石油化工股份有限公司 南方勘探开发分公司, 云南 昆明 650200)

摘要: 针对川东北区复杂山地、深层勘探、碳酸盐岩层系的复杂地质条件, 以面向礁滩储层的地震采集、处理和解释一体化攻关思路, 在复杂山地高精度地震资料采集、高保真地震资料处理与深层碳酸盐岩优质储层预测等方面开展方法技术攻关与实际应用研究, 形成了复杂山地高精度地震采集工艺技术(其中面向储层的采集设计技术、高精度定位、高密度采样和饱和激发为关键)、高分辨率储层成像技术系列与礁滩储层地震综合预测技术系列, 提高了地震资料的信噪比与分辨率, 有效地支撑了区内天然气勘探的发现与高效探明。

关键词: 山地高精度地震; 礁滩储集岩; 有效储层预测; 一体化地震攻关; 普光气田; 川东北

中图分类号: TE112.1 文献标识码: A

High-resolution seismics in the mountainous terrain of northeastern Sichuan

Yang Guixiang, Zhen Tianfa, Jin Penggu, Gao Lin

(Southern E & P Company, SINOPEC, Kunming, Yunnan 650200)

Abstract The geological conditions in northeastern Sichuan are complicated by the coexistence of complex mountainous terrain, deep burial of exploration targets and carbonate reservoirs. Guided by the notion of integrated seismic acquisition, processing and interpretation for prediction of reservoir, a study is carried out on such areas as the high-resolution seismic acquisition, high-fidelity seismic data processing and deep carbonate reservoir prediction in complex mountainous terrain. A series of technologies are developed, including high-resolution seismic acquisition in complex mountainous terrain with reservoir-oriented acquisition design, high-precision positioning, high-density sampling and saturated excitation as its cores, and high-resolution reservoir imaging and integrated seismic prediction suitable for reef flat reservoirs. They enhance the signal-to-noise ratio and resolution of seismic data and support the exploration of natural gas in the area.

Key words high-resolution seismics in mountain areas; reef flat reservoir; effective reservoir prediction; integrated seismics research; Puguang gas field

川东北地区以长兴组—飞仙关组礁、滩孔隙型白云岩储层为主的构造—岩性复合型圈闭为主要勘探对象, 但地表高山褶皱强烈, 地下地质构造复杂, 导致地震波场错综复杂。如何获得高品质的地震资料, 如何识别与预测优质储层, 查明深层碳酸盐岩系储层厚度、分布面积以及孔隙发育程度是制约该区深层碳酸盐岩油气勘探的关键与难点。

经过几年的地震攻关研究, 形成了复杂山地高

精度地震采集工艺技术、高分辨率储层成像技术系列与礁滩储层地震综合预测技术系列, 提高了地震资料的信噪比与分辨率, 有效地支撑了普光大型气田的发现与高效探明, 取得了显著的勘探效果。

1 地震采集

工区地震地质条件复杂, 给实施山地高精度

收稿日期: 2006-10-25

第一作者简介: 杨贵祥(1963—), 男, 高级工程师, 石油地球物理

基金项目: 国家重点基础研究发展“973”规划(2005CB422100)项目; 中国石化科技部“十条龙”攻关项目——川东北地区大型气田勘探目标及关键技术研究(P06008)联合资助成果

地震带来了极大的困难^[1]:

1) 地表类型复杂多样、切割剧烈(相对高差达 1 200 m),难以进行炮、检点精确定位;表层结构复杂多变,激发、接收条件差异大,造成严重的地表非一致性;表层低速带吸收强烈,造成海相碳酸盐岩地层段反射波能量和频率降低;起伏地表不均匀性造成的近地表散射效应使得地震资料干扰严重、信噪比低。

2) 为保障深部目的层信号有足够的能量,不得不采用较大的激发药量,大药量会产生较大的低频效应,使高频成分能量较小,影响地震分辨率的提高;由于介质对地震信号有明显的选频衰减效应,地震信号中的高频成分比低频成分损失更大,也影响了分辨率。地下构造复杂,断裂发育,地层倾角大,地震波场复杂。勘探地质目标埋藏深,受上覆高陡构造、嘉陵江组膏岩柔皱地层和反射界面严重褶皱的影响,造成地震反射能量屏蔽,使得信噪比降低。如何补偿地震信息中损失的高频成分、拓宽优势频带,是深层碳酸盐岩油气地震勘探的关键。

3) 碳酸盐岩储层非均质性强,与围岩的波阻抗差异小,地震反射信号弱,高频信号更弱。

为满足深层碳酸盐岩储层预测的需求,提高激发高频弱信号能量,保护与提高高频成分和信噪比,面向储层的采集设计技术、高精度定位、高密度采样和饱和激发尤为关键。

1.1 面向储层的采集设计技术

在构造、沉积相和储层发育模式指导下,建立储层的地质-地球物理模型。采用大炮检距观测方式、小道距高覆盖观测方式、变观加密方式、增加构造顶部的覆盖次数等。

1.2 山地高精度定位技术

针对山高森林茂密,植被发育的实际,以卫星定位系统(GPS)实时动态差分模式(RTK)与全站仪结合实现山区高精度定位,使定位精度达到 $M_x = 0.29 \text{ m}$, $M_y = 0.28 \text{ m}$, $M_h = 0.26 \text{ m}$ 。

1.3 精细表层结构调查技术

在对各种表层结构调查方法对比试验和研究的基础上,形成了以双井微测井为主、微 VSP 与微

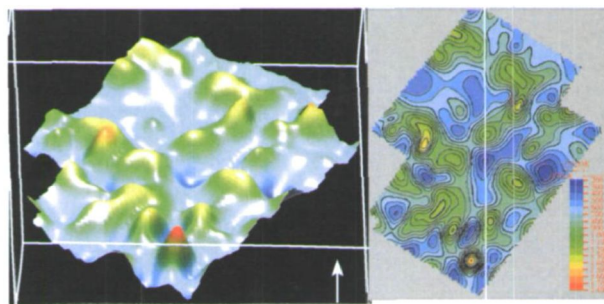


图 1 低速层速度 V_0 立体和平面示意图

Fig. 1 Three dimensional and two dimensional graphs showing the V_0 of low-velocity stratum

电法为辅的表层地质模型精细调查技术,为建立精细的近地表模型和静校正打下良好的基础(图 1)。

1.4 饱和激发与高频能量激发技术

饱和激发理论^[2-3]认为,地震波的振幅表征着介质的应变特征,药量表征着介质的应力特征;饱和激发时能满足线性叠加特性;在饱和激发状态下,可保证激发高频能量,提高高频信号的信噪比。

饱和激发对提高地震采集精度的意义在于:在饱和状态下激发,可以实现信噪比和分辨率的有机统一,同时在理论上回答了多年来高分辨率地震采集的是大药量好,还是小药量激发好的争论;饱和激发理论可以指导激发井深、激发岩性与激发方式的优选与最佳匹配组合。按照饱和激发理论,本区砂岩出露地层选择 19 m 井深、11 kg 高爆速炸药激发,实现 3 者的最佳匹配组合。

1.5 高频信号接收技术

引进有效瞬时动态范围达 408UL24 位浮点数字地震仪,采用高密度采样技术,提高储层描述的时间-空间采样率,时间采样率为 1 ms,三维空间采样率为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。

采用多检波器串联小面积组合方式,压制环境噪音和大线感应干扰,采用高覆盖次数观测系统,提高深层有效地震反射的信噪比。

2 高精度地震成像

复杂山地深层地震处理的主要难点是近地表效应的消除、复杂构造与复杂储层高精度成像。

现行地震处理技术是基于简单地表条件、中浅层油气勘探发展起来的^[4-5]。面对复杂山地、深层碳酸盐岩油气勘探显然存在着严重不足与不适应。基于起伏地表的山地地震处理技术在国内、外尚处于理论研究和试验应用阶段, 仍未成熟。

综合应用野外近地表精细调查、初至波层析成像、迭代剩余静校正解决复杂山地的静校正难题; 以区域地质构造和速度分布规律为基础, 利用叠前偏移共反射点道集的速度分析建立高精度速度模型; 给出地震走时算式系数优化方法, 提高了大炮检距时走时计算精度, 基于波场费涅尔相干理论发展了叠前偏移保幅技术, 形成了拟起伏地表曲射线叠前时间偏移成像技术, 保证了复杂构造和储层的成像精度; 基于调谐频率与分频处理的高分辨率储层成像技术, 进一步提高储层地震识别与地震预测的分辨能力^[6]。

2.1 初至波层析成像静校正技术

借鉴医学层析 (CT) 的原理和算法, 反演求取近地表速度精细结构, 避免了仅使用折射波信息不足的缺陷和识别折射波震相的困难, 突破了现行折射波静校正仅适于地层为常速假设的范畴, 可大幅度提高近地表速度分析的精度。在层析成像静校正基础上进行迭代剩余静校正处理。

从地震同相轴连续性、绕射波特征、信噪比等对比, 综合应用初至波层析静校正与迭代剩余静校正较好地解决了复杂山地的静校正难题。

2.2 拟起伏地表曲射线叠前时间偏移技术

2.2.1 弯曲射线旅行时计算的系数优化方法

双平方根算子 (DSR) 是传统 Kirchhoff 叠前偏移用于计算从震源到成像点, 从成像点到接收点直线旅行时方程, 双平方根算子方程在均匀介质中可以准确地描述地震传播, 但是当地层是层状介质时, 因射线弯曲效应, 描述波场的走时曲线存在着误差 (图 2), 且误差在与广角度入射时, 在陡倾角和大偏移距时更为显著, 进而影响地震资料构造成像的精度与品质。

为此, 采用一个更精确稳定的旅行时方程来计算旅行时, 基于修改后的关于偏移距和时间的泰勒展开

$$T_x = \sqrt{c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^4 + c_4 x^l + \dots} \quad (1)$$

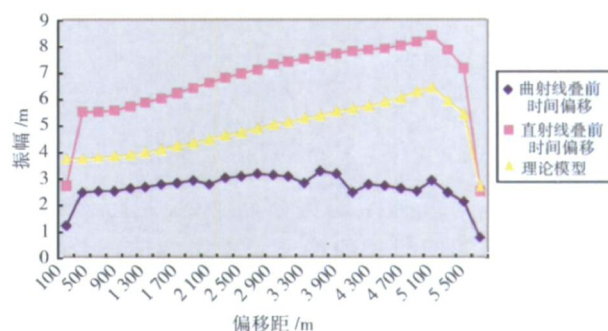


图 2 振幅与偏移距曲线

红. 保幅偏移的振幅; 黄. 真振幅; 蓝. 现行偏移的振幅

Fig. 2 Curves of amplitude and offset distance

式中 T_x 为走时, x 为偏移距, m ; c_1 , c_2 , c_3 和 c_4 为系数, 与地层的厚度和速度有关。通常只使用式 (1) 前 3 项, 为得到更高的精度和稳定性, 使用方程的前 4 项和优化后的系数为

$$T_x = T_{x3} \sqrt{1 + \frac{c_4 x^6 + \dots}{T_{x3}^2}} \approx T_{x3} \left| 1 + \frac{kx^6}{2T_{x3}^2} \right| \quad (2)$$

式中 T_{x3} 由式 (1) 的 3 项式给出; k 为待求的优化系数, 与地层速度分布相关。

走时系数优化方法大幅度提高了大炮检距和陡倾角时的走时计算精度, 为高精度叠前地震构造成像提供了保障。

2.2.2 偏移中保幅处理

考虑到储层预测与描述的需要, 对偏移成像中振幅的保幅处理有更高的要求。将偏移得到的共反射点道集应用到储层与含气检测分析时, 振幅保真尤为重要。偏移中振幅处理的目的是在消除波场在穿越上覆地层时的传播效应。依据地震波场费涅尔相干理论, 导出叠前偏移保幅处理的加权因子为

$$w(\xi R) = \frac{\sqrt{\cos \alpha_s \cos \alpha_g}}{v_s} \left| \frac{T_g}{T_s^2} + \frac{T_s}{T_g^2} + \frac{4L^2 H^2 \sin^2 \alpha}{T_s T_g T_r^2 V_r^4} \right| \quad (3)$$

式中 α_s 和 α_g 是与炮检点有关的入射角和反射角, $^\circ$ (可通过射线追踪计算); T_s 和 T_g 分别表示震源点和接收点的射线走时, s ; v_s 为层速度, m/s ; V_r 为射线速度, m/s ; L 为距离, m ; H 为深度, m ; T_r 与检波点有关的走时, s 。走时对距离的导数可以用于计算出准确的余弦函数值, 公式为

$$\cos\alpha_s = \sqrt{1 - \left| \frac{\partial T_s}{\partial T_g} \right|^2}$$

$$\cos\alpha_g = \sqrt{1 - \left| \frac{\partial T_g}{\partial T_s} \right|^2} \quad (4)$$

从振幅与偏移距的关系(图 2),可以看出保幅偏移的振幅曲线和理论记录中振幅曲线趋势一致,而现行的结果没有反映这种趋势。

2.2.3 拟起伏地表叠前时间偏移

为提高叠前时间偏移的成像精度,研究开发起伏地表的叠前时间偏移方法与技术,其优点在保证构造成像精度的同时,能可靠地求取偏移速度。其原理是直接从起伏地表出发计算炮点、检波点走时,实现地下反射点偏移成像。

叠前偏移成像时间算式如下

$$t = t_R + t_S \quad (5)$$

$$t_R = \sqrt{t_{0R}^2 + c_1 x_R^2 + c_2 x_R^4 + c_3 x_R^6} \quad (6)$$

$$t_S = \sqrt{t_{0S}^2 + c_1 x_S^2 + c_2 x_S^4 + c_3 x_S^6} \quad (7)$$

式中 t 为走时, t_R 和 t_S 为与检点和炮点有关的走时, t_{0R} 和 t_{0S} 为与检波点和炮点有关的反射点的垂直走时, x_R 和 x_S 为检波点和炮点到反射点的水平距离, m 。

叠前时间偏移速度模型建立的准则是共反射点道集(CRP)反射波同相轴拉平,偏移速度通过迭代的方式获得。

根据已知井的钻井分层,在区域构造规律的指导下,结合对应地震剖面的波组特征进行精细解释,利用已知速度分布规律,填充层速度,形成初始速度模型。在区域地质构造和速度分布规律指导下,应用沿层速度分析、垂向速度分析、速度百分比扫描等技术,建立了适于山地高精度成像处理的速度分析方法和流程。

2.3 基于调谐频率与分频处理的高分辨率反演技术^[6]

现行的地震反演技术是将多口井的测井资料

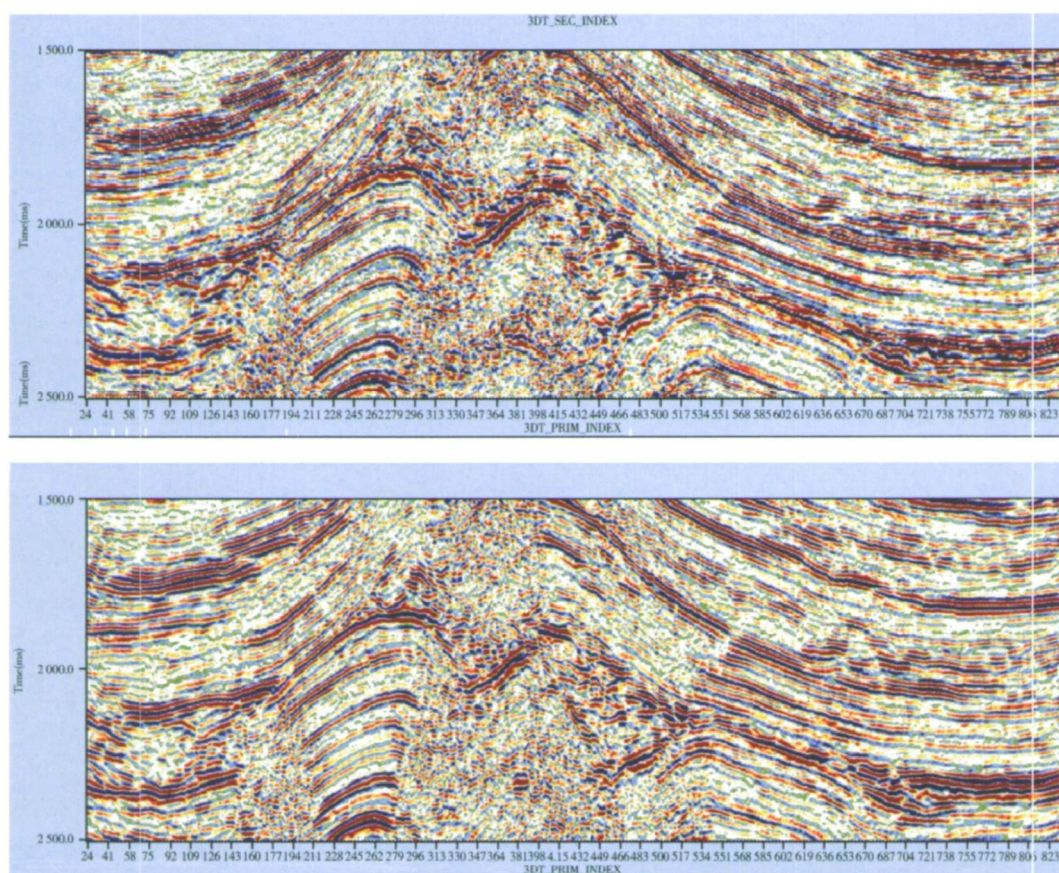


图 3 三维地震资料叠前偏移成像效果对比

上图. 叠后偏移; 下图. 拟起伏地表叠前时间偏移

Fig. 3 Correlation of prestack migration imaging of 3-D seismic data

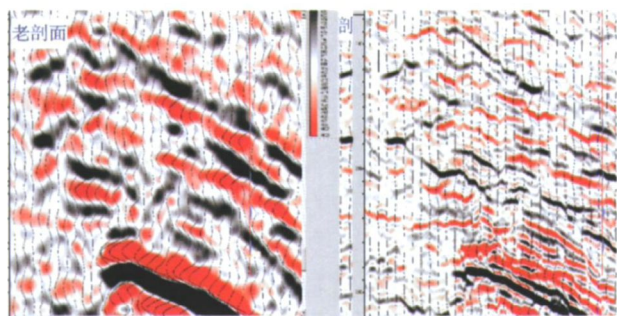


图 4 叠前储层高分辨率成像效果

左. 高分辨率储层成像前; 右. 高分辨率储层成像后

Fig. 4 Prestack high-resolution imaging of reservoirs

线性内插作为其约束条件, 因此仅适于储层横向缓慢变化时的储层预测, 如砂体储层预测。对于强非均质性的碳酸盐岩储层而言, 其储层变化显然无法使用线性内插加以描述, 故现行反演技术用于碳酸盐岩储层预测是存在严重的不适应性。为此, 研究开发了基于调谐频率与分频处理的高分辨率反演技术, 其原理是利用地震资料的调谐频率和分频分析, 半定量地确定储层厚度, 并将其作为地震反演的约束条件。这样就无需对储层的空间变化规律进行假设, 能适应强非均质碳酸盐岩储层。

经高分辨率成像处理后频谱得到提高和拓宽, 储层成像更加精确, 储层反射特征细节显得更加清楚 (图 4), 有助于储层的精细描述。

3 礁滩储层综合预测

碳酸盐岩油气勘探的主要问题是储层预测, 区内海相碳酸盐岩地层地质年代老, 经历多期构造改造, 且叠合在陆相地层之下, 储层埋藏深度大。针对特定的地质条件, 开展了储层地震响应特征、储层识别模式、有效储层预测和含气性判别等方面的方法技术的攻关研究, 形成了礁滩储层综合预测技术。

依据对岩石物性参数实验测定建立储层地球物理响应模式、以地震反射特征建立储层的地震识别模式、以波阻抗反演及频谱分解^[7]为手段研究储层发育与分布、用多种地震属性分析及层拉平技术恢复古沉积地貌研究有利地质沉积相带, 有力地促进了礁滩发育区识别和刻画。

3.1 建立储层地球物理响应模式

据已钻井储层内部与围岩岩石组合关系建立相应地质模型, 通过地震正演建立地震响应模式。

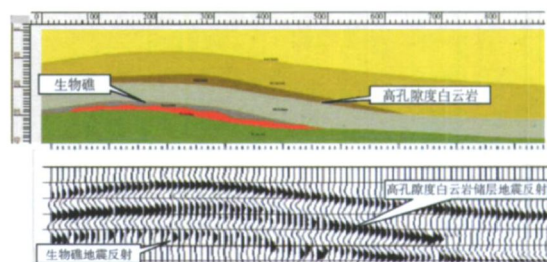


图 5 生物礁模型正演模拟

Fig. 5 Bioherm forward modeling

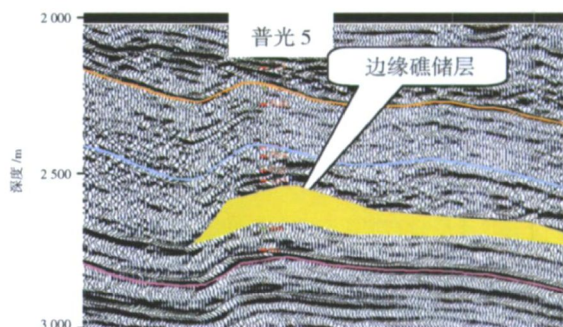


图 6 普光构造边缘礁典型剖面

Fig. 6 Typical profile of marginal reef in Puguans Structure

从图 5 可看出生物礁的反射特征为高孔隙度的白云岩所表现的中-强振幅“亮点”的反射特征, 其下伏生物礁灰岩由于与围岩的阻抗差异较小, 且生物礁底面不平坦, 表现为断续中-弱振幅反射。

3.2 储层地震识别模式

综合储层发育模式、地震响应特征、已知探井储层段的地震反射特征, 归纳建立了普光地区长兴—飞仙关组礁滩储层的几种地震识别模式。如普光型飞仙关组鲕滩的“多轴、低频、中强变振幅、断续、杂乱或透镜状反射结构”; 大湾型飞仙关组鲕滩的“双轴、低频、强振幅、亚平行反射结构”; 长兴组礁滩的“顶底为强反射, 中断, 礁内部低频、弱反射, 杂乱、凸透镜状”。

3.3 有利沉积相研究

在高精度地震成像资料的精细构造解释的基础上, 利用层拉平、平衡剖面 and 三维可视化等技术恢复古地貌 (图 7), 研究原始沉积格局, 结合地震多属性分析确定储集体有利相带分布规律。

3.4 礁滩发育区地震识别

在高分辨率层序地层、沉积相、储层发育模式

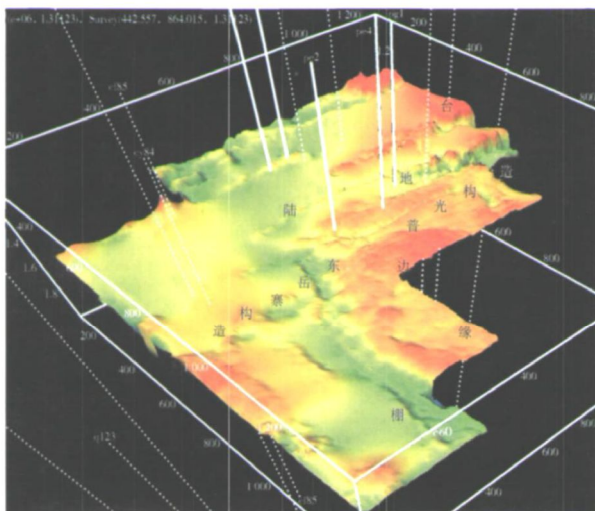


图 7 长兴—飞仙关组沉积时期古地貌

Fig. 7 Palaeogeomorphology during the deposition of Changxing-Feixianguan Formation during the sedimentation

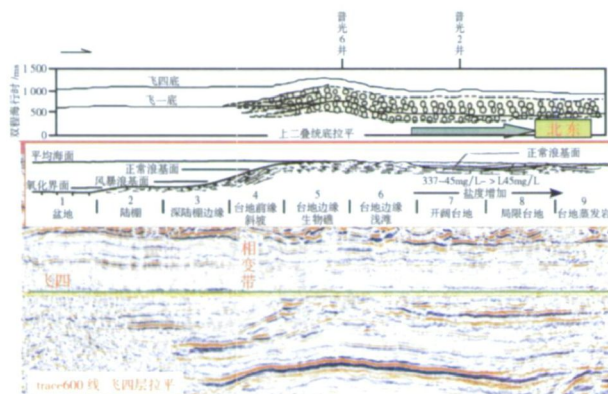


图 8 礁滩相解释剖面

Fig. 8 Interpretation profile of reef flat facies

指导下,利用地震相分析和地震属性分析等技术识别礁滩发育区(图 8),其中地震属性主要包括振幅、频率等信息。

3.5 有效储层量化分析技术

谱分解技术是利用信号处理的时间-频率分析将地震数据由时间域转变为时间-频率域,时间-频率域地震数据可更直观地反映储层的空间展布。其原理在于储层的厚度变化会在频率域引起调谐频率的变化,储层地震信号的频率成分变化常指示着储层物性的变化。借助于时间-空间域单频地震资料的可视化显示可直观地追踪储层的变化分布规律。针对现行技术存在的不足,将

在信号分析领域近年来发展起来的匹配跟踪小波变换方法引入地震资料的时间-频率分析。匹配跟踪小波变换的基本原理是构造一类特定频率性质的小波类,通过该小波类中的小波与地震数据的最佳匹配,将地震数据变换为多个小波的合成,借助于小波频率分析实现地震数据谱分解的时间-频率分析。其优点是利用反演技术实现谱分解,无需选定的时窗,大幅度提高了地震数据的时间-频率分析精度。

图 9 给出地震数据的频谱分解结果,从中可看出,储层在不同频率的单频数据中存在明显的差异性,利用储层在频率域的响应特征,借助可视化技术,实现储层厚度与物性的精细分析。

波阻抗技术是预测储层空间展布的常用技术,因储层发育情况与泥质含量的增多均会导致波阻抗的降低,使得波阻抗的变化并不能直接反映孔隙度的变化。礁、滩储层中的泥质会直接影响白云岩储层预测的精度。为此,开发了用于消除白云岩储层中泥质含量影响的伽马随机反演技术,与波阻抗反演结合,实现了有效储层的空间分布与孔隙度预测。

“声阻抗重构技术”是利用孔隙度曲线重构声阻抗,通过反演得到重构的声阻抗反演结果,再建立重构后的波阻抗与孔隙度的关系式,将反演结果转换为孔隙度,得到孔隙度的反演结果,进而按有效储层孔隙度门槛值求取其厚度。

图 10(a)为过普光 6—普光 2—普光 4—普光 1—普光 3 联井密度反演剖面,图 10(b)为随机伽马反演剖面,普光 6、普光 2、普光 4、普光 1 井飞仙关组发育巨厚溶孔白云岩储层,表现为明显的低伽马和低密度特征。普光 3 井飞一段储层不发育,表现为相对高伽马和高密度特征。普光 6、普

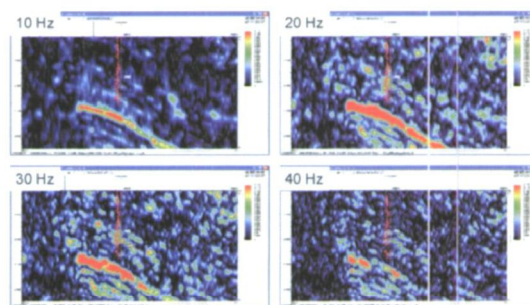


图 9 普光地区地震数据频谱分解

单频剖面分别为 10 20 30 40 Hz

Fig. 9 Spectrum analyze of seismic data in Puguang

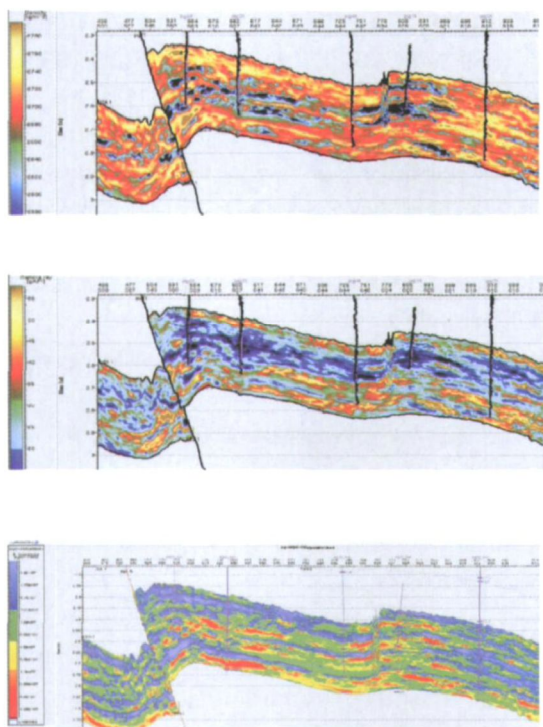


图 10 密度 (a)、随机伽马 (b) 和伽马约束去泥值后波阻抗 (c) 反演联井剖面

Fig. 10 Cross-well inverse profiles of density (a), random gamma (b), and wave impedance after removing the mud interference (c),

光 2 井长兴组发育厚层生物礁盖白云岩储层, 也表现为明显的低伽马和低密度特征, 而普光 4 以北到普光 3 井一带长兴组为开阔台地沉积, 孔隙性储层不发育, 伽马值和密度值明显比南部的普光 6 井高。因此, 利用伽马和密度反演资料可以较好地区分储层与非储层。图 10 (c) 为利用伽马数据和密度数据进行约束, 去除泥值和膏岩后的波阻抗联井剖面, 反映储层的低阻抗异常更为清楚, 储层的横向非均质变化特征较明显。

4 勘探效果

首块大面积复杂山地深层碳酸盐岩高精度地震勘探工程的实施, 表明所得的高精度地震资料与原有老资料相比, 信噪比和分辨率有了很大的提高, 老资料原始单炮记录有效频带 $8 \sim 70 \text{ Hz}$ 视主频 30 Hz 新技术应用后原始单炮记录有效频带范围 $8 \sim 125 \text{ Hz}$ 视主频为 50 Hz 。因此, 原始资料主频提高 20 Hz 为储层精细描述提供了可靠的基础资料。图 11 给出了高精度地震采集技术应用

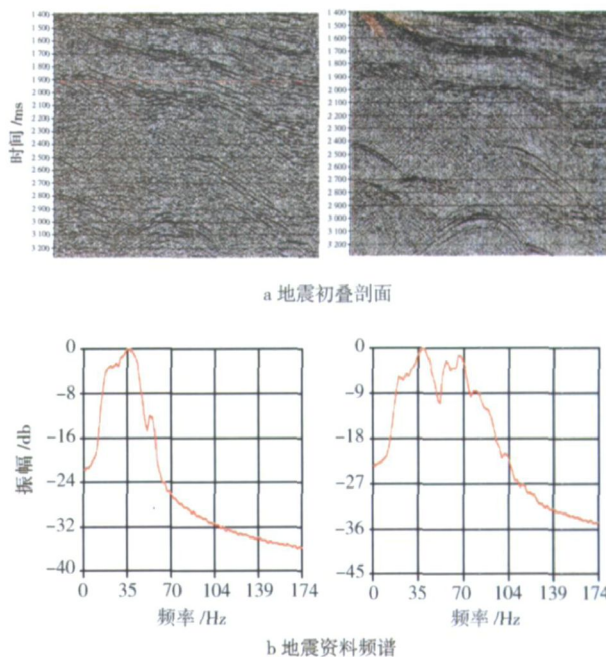


图 11 山地高精度地震勘探效果图 (左图为新技术应用前, 右为新技术应用后)

Fig. 11 Correlation of seismic profiles and frequencies before and after the application of high-precision seismic exploration in mountainous terrain

前后的初叠剖面与相应的频谱。

随着山地高精度地震勘探技术的成功应用, 极大地促进了本地区海相碳酸盐岩油气勘探的重大发现, 经普光地区多井实钻证实, 预测深度误差小于 1.5% , 多储层预测的精度由原有技术的解释分辨能力的 37 m 提高到可分辨 12 m 厚的礁滩储层, 并使预测孔隙度与测井解释孔隙度的误差精度小于 5% , 有效地提高了区内礁滩相气藏的预测精度。

5 结论

1) 高精度地震勘探是一个系统工程^[8 9], 地震采集、处理、解释一体化攻关为面向储层的高精度地震勘探提供了全面解决方案, 高品质的地震资料为储层综合预测奠定了基础。

2) 复杂山地高精度地震采集技术为南方海相碳酸盐岩油气勘探提供了良好的技术支撑, 有力地促进了油气勘探新突破。

3) 叠前偏移技术有利于改善构造和储层成像, 为后续储层预测与研究奠定了基础。

4) 礁滩储层综合预测技术实用、有效, 大大提高了勘探精度和储量探明速度。

5) 多学科综合预测为成功实现快节奏、高效率突破深层碳酸盐岩储层勘探目标提供了可靠的保证。

参 考 文 献

- 戴少武, 贺自爱, 王津义. 中国南方中、古生界油气勘探的思路 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 195~202
Dai Shaowu, He Zilai, Wang Jinyi. Thinking of Mesozoic hydrocarbon exploration in south China [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(3): 195~202
- 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相层系油气成藏组合类型与勘探前景 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 11~16
Wu Yujin, Xiao Kaihua, Zhou Yan, et al. Types of marine plays in southern China and exploration prospects [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 11~16
- 熊翥. 复杂地区油气地球物理勘探技术 (数据采集) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 1~301
Xiong Zhu. Oil & gas geophysical (acquisition) in complex condition [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1998. 1~301
- 杨贵祥. 碳酸盐岩裸露区地震采集方法 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1108~1128
Yang Guixiang. The method of seismic exploration in the bare carbonate rock area [J]. Prospecting in Geophysics, 2005, 20(4): 1108~1128
- 杨贵祥, 贺振华, 朱铤. 中国南方海相地层下组合地震采集方法研究与实践 [J]. 石油物探, 2006, 45(2): 157~168
Yang Guixiang, He Zhenhua, Zhu Xuan. Research on seismic acquisition methods for lower assemblage of marine strata in south China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(2): 157~168
- 马在田. 地震成像技术—有限差分法偏移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989. 1~213
Ma Zaitian. Seismic imaging technique—finite difference migration [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1989. 1~213
- 杨贵祥. 基于调谐频率与分频处理的高分辨率反演技术 [J]. 石油物探, 2006, 45(3): 242~244
Yang Guixiang. High resolution inversion based on tuning frequency and frequency decomposition [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 242~244
- Portniaguine O, Castagna J P. Inverse spectral decomposition, 74th Ann Internat Mtg: Soc of Expl Geophys, 2004, 1786~1789
- Castagna J P, Sun S. Instantaneous spectral analysis: detection of low frequency shadows associated with hydrocarbons [J]. The Leading Edge, 2003, 22(2): 120~127
- 张旭光, 窦慧媛. 三维可视化技术在碳酸盐岩储层预测中的应用 [A]. 塔河油气田勘探与评价文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 331~337
Zhang Xuguang, Dou Huiyuan. The application of 3D visualization in carbonate reservoir forecast [A]. Analects of exploration and exploitation of Tahe oil-gas pool [C]. Beijing Petroleum Industry Press, 2006. 331~337
- 李宗杰, 樊政军, 杨林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层地球物理识别模式 [A]. 塔河油气田勘探与评价文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 308~316
Li Zongjie, Fan Zhenjun, Yang Lin. Geophysical recognition mode of carbonate reservoir in Tahe oil-gas pool [A]. Analects of exploration and exploitation of Tahe oil-gas pool [C]. Beijing Petroleum Industry Press, 2006. 308~316
- 李宗杰, 韩革华. 塔河地区碳酸盐岩储层预测技术方法研究 [A]. 塔里木盆地北部油气田勘探与开发论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 2000. 160~170
Li Zongjie, Han Gehua. Study of technical method of carbonate reservoir forecast in Tahe area [A]. Analects of exploration and exploitation of the pool in the north of Tarim basin [C]. Beijing Geological Publishing House, 2000. 160~170
- 樊怀阳. JASON 反演技术在塔河油田 3 号区块的应用 [A]. 塔里木盆地北部油气田勘探与开发论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 2000. 177~181
Fan Huaiyang. The application of Jason reversal development in the block 3 of Tahe oil-gas pool [A]. Analects of exploration and exploitation of the pool in the north of Tarim basin [C]. Beijing Geological Publishing House, 2000. 177~181
- 翟晓先, 漆立新. 塔河油田勘探实践与面临的挑战 [A]. 塔河油气田勘探与评价文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 1~10
Zhai Xiaoxian, Qi Lixin. Exploration practice and challenge in Tahe oil-gas pool [A]. Analects of exploration and exploitation of Tahe oil-gas pool [C]. Beijing Petroleum Industry Press, 2006. 1~10

(编辑 高 岩)

(编辑 李 军)

(上接第 870 页)