

文章编号: 0253-9985(2006)06-0879-16

川西坳陷中、浅层气藏储层识别技术

唐建明^{1,2}, 杨 军², 张哨楠¹(1 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059, 中国石油化工股份有限公司 西南分公司
勘探开发研究院 德阳分院, 四川 德阳 618000)

摘要: 川西坳陷陆相沉积领域浅、中层 (深度大约在 500~3 000 m) 天然气藏属近常规到致密砂岩远源气藏。这些气藏主要分布在侏罗系—白垩系的地层中, 并形成了如新场气田、洛带气田、新都气田、马井气田等大、中型气田。川西坳陷的中、浅层气藏具有储层发育良好、输导条件较好、储层展布与构造配置关系好及封盖保存条件良好等特点。储层沉积微相以三角洲前缘毯状砂体、三角洲前缘分流河道砂体、河口坝砂体和湖底扇砂体等为主, 储层地球物理特性通常表现为低波阻抗特征, 与围岩具有良好的波阻抗差异。川西坳陷地震地质条件较差, 地表覆盖有几米至 200 多米厚的卵石和沙土, 高频吸收严重, 原始地震记录干扰波 (面波、声波及折射波) 发育, 信噪比较低。因此, 川西坳陷中、浅层气藏储层识别成功的关键技术是卵石覆盖区高精度的三维地震采集、保持含气地震响应特征的三维地震资料处理、正演模拟指导下的储层地震属性提取及分析和储层空间展布刻画及多学科协同的综合评价等。川西中、浅层气藏的勘探开发实践表明, 地震勘探技术在气藏分布范围确定、空间几何形态描述、储层物性参数反演、沉积相和储层非均质性研究以及高产富集带预测、含气性识别等方面发挥了十分关键的作用。

关键词: 致密砂岩; 地震响应; 地震属性; 空间展布刻画; 非均质性; 储层识别; 远源气藏; 川西坳陷

中图分类号: TE112.2 文献标识码: A

Recognition of shallow-middle gas reservoirs in western Sichuan depression

Tang Jianming^{1,2}, Yang Jun², Zhang Shaonan¹

(1 College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059)

(2 Deyang Branch of Research Institute of E&P, Southwest Company, SINOPEC, Deyang, Sichuan 618000)

Abstract The non-marine shallow-middle gas reservoirs (with depth ranging from 500 m to 3 000 m) in western Sichuan depression are near-normal to tight sandstone of distal facies. These reservoirs are mainly distributed in the Jurassic and Cretaceous formations where large-to medium-sized gas fields, such as Xinchang, Luodai, Xindu, Majing and etc. are harbored. The shallow-middle reservoirs in western Sichuan depression feature in well-developed reservoirs, favorable transportation conditions, ideal matching of reservoir distribution and structure configuration, and good sealing. Sedimentary micro-facies reservoirs are mainly composed of delta front silt-like sand, delta front distributary channel sand, estuarine sand bar, and sublacustrine fan sand. The reservoirs typically show low wave impedance and large wave impedance difference with surrounding rocks. The seismo-geological conditions are rather unfavorable in western Sichuan depression, where the surface is covered by unconsolidated pebble and sandy soil beds with thickness ranging from several meters to 200 meters, resulting in severe high frequency attenuation and strong interference waves, such as surface wave, acoustic wave and refraction wave, and low S/N ratio. Therefore, a successful gas reservoir recognition in the study area involves the application of high-

收稿日期: 2006-10-11

第一作者简介: 唐建明 (1965-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 石油天然气地球物理勘探

基金项目: “九五”国家重点科技攻关项目 (99-110-02-05)

precision 3-D seismic data acquisition in areas covered by unconsolidated pebble layers, 3-D seismic processing with gas bearing seismic responses preserved, reservoir seismic attributes extraction and analysis based on forward modeling and reservoir spatial delineation and multidisciplinary integrated evaluation. The exploration and production of the shallow-middle gas reservoirs in the study area show that seismic exploration plays an important role in delineation of reservoir distribution, description of the spatial geometry of the reservoirs, inverse modeling of the reservoir parameters, study of sedimentary facies and heterogeneity, determining prolific gas-bearing zone, and recognition of gas-bearing properties.

Key words tight sand; seismic response; seismic attribute; reservoir spatial delineation; heterogeneity; reservoir recognition; distal gas reservoir; western Sichuan depression

四川盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为一近菱形的盆地, 位于上扬子大型沉积区。同等发育的海、陆两大沉积建造, 总厚度达 6 000~12 000 m。从上震旦统至侏罗系, 都有不同程度的生油能力, 并具有利于油气运移、储集的优越条件。在震旦系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系中均发现了天然气藏, 估计天然气总资源量约为 $6.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中川西坳陷中段天然气资源量为 $1.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$ [1]。

川西坳陷致密碎屑岩气藏的分布范围广, 层位众多, 深度跨度大。气藏在纵向上既有与源岩同一层系的上三叠统近源气藏, 也有与主力烃源岩相距较远的侏罗系远源气藏, 浅层、中层及深层相互联系成为不可分割的整体。尽管有着明显的非均质性和突出的低孔渗性, 但致密化前后储层都有利于油气运移和聚集的良好条件 [2~8]。目前在川西坳陷浅、中层已发现多个气藏, 其中最为著名的是新场气田的蓬莱镇组气藏和上沙溪庙组气藏。由于这些气藏埋深浅、储层品质好、产量高、勘探开发技术成熟, 再加上建产成本低、周期短、效益好, 因此自然成为了川西坳陷浅、中层的主力气藏。

从 1990 年 5 月开始, 川西坳陷新场地区相继发现了侏罗系蓬莱镇组、上沙溪庙组及千佛崖组 3 个主力气藏, 到 2005 年底, 在川西坳陷中段获探明储量近 $1.400 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产天然气 $21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。川西坳陷浅、中层气藏勘探开发实现重大突破主要依托了两项关键技术的突破, 即以地震勘探技术为主的储层识别技术和以水力压裂技术为主的储层改造技术。

1 川西坳陷浅、中层储层基本特征

川西坳陷这一上升背景下的相对坳陷, 控制着陆相沉积物的厚度、性质和结构。天然气储层

具有分布广、多层系、薄互层、非均质、超低孔渗、高含水饱和度、孔隙结构复杂、致密或超致密、高速、高压等特点。

1.1 基本地质特征

蓬莱镇组气藏发现于 1990 年。止 2005 年底, 蓬莱镇组气藏开发井达 154 口, 获得天然气测试产量 $245.659 3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 成为川西坳陷的主力气藏之一。气藏从下至上分为 3 个主力开发层系, 即蓬莱镇组三段 (J^3), 蓬莱镇组二段 (J^2) 和蓬莱镇组一段 (J^1)。其中, J^1 气藏埋深 500~900 m, 由 7 个气层纵向上叠置而成, 平均孔隙度为 15.07%, 平均渗透率为 $4.899 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 砂体厚度一般在 5 m 以上; J^2 气藏埋深 800~1 200 m, 由 5 个气层纵向叠置而成, 属河流相沉积, 呈带状分布, 平均孔隙度为 11.83%, 平均渗透率为 $1.383 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 砂体厚 5~15 m, 为近致密储层。蓬莱镇组气藏压力系数为 1.30~1.60 [3], 气藏基本地质特征见表 1。

表 1 川西坳陷蓬莱镇组储层基本地质特征

Table 1 Basic geological characteristics of gas reservoirs in the Penlaizhen Formation in western Sichuan depression

地层	有利储层 微相	储层 岩性	孔隙度* , %	渗透率* / ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	埋藏深 度 /m	地压 系数
蓬 莱 镇 组	J^1 三角洲前 缘带状砂		13.34~ 19.97 (15.07)	2.050~ 6.920 (4.899)	500~ 900	1.23~ 1.44
			9.51~ 13.48 (11.83)	0.366~ 2.238 (1.383)	800~ 1 200	1.45~ 1.50
			7.30~ 13.20 (9.88)	0.080~ 3.383 (0.381)	1 050~ 1 500	1.59~ 1.73

* 括号内为平均值。

表 2 川西坳陷上沙溪庙组气藏基本地质特征

Table 2 Basic geological characteristics of gas reservoirs in the Shaximiao Formation in western Sichuan depression

地层	有利储层微相	储层岩性	孔隙度* , %	渗透率* / (10 ⁻³ μm ²)	埋藏深度 /m	地压系数
J _s ¹⁽¹⁾						
沙溪庙组	J _s ²⁽¹⁾ 三角洲	中-细	0.77~ 17.07 (9.03)	0.011~ 0.844 (0.160)	2 140~ 2 540	1.90~ 2.04
	J _s ²⁽²⁾ 平原河	粒岩屑				
	J _s ²⁽³⁾ 道叠置	长石砂				
	J _s ²⁽⁴⁾ 砂体	岩				
	J _s ³⁽¹⁾					

* 括号内为平均值。

上沙溪庙组气藏, 储层为滨浅湖与三角洲交替沉积, 含气砂体主要属分支河道叠加微相, 分为 $J_3^{1(1)}$, $J_3^{2(1)}$, $J_3^{2(2)}$, $J_3^{2(3)}$, $J_3^{2(4)}$, $J_3^{3(1)}$ 等 6 套含气层系, 埋深 2 100~2 450 m, 孔隙度为 4.40%~16.62%, 渗透率介于 $0.080 \times 10^{-3} \sim 0.700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 砂层厚度为 10~25 m, 属致密砂岩孔隙-裂缝型储层, 压力系数为 1.90~2.04。上沙溪庙组气藏基本地质特征见表 2。

1.2 岩石物理特征

蓬莱镇组气藏含气砂岩速度为 3 000~3 500 m/s, 密度为 2.38~2.50 g/cm³; 围岩速度 3 850~4 500 m/s, 密度为 2.40~2.60 g/cm³。含气砂岩与围岩之间存在较大的波阻抗差异。

沙溪庙组气藏致密砂岩储层中的非产层段速度一般为 4 800~5 600 m/s, 密度大于 2.65 g/cm³; 产层段速度为 4 000 m/s 左右, 密度约为 2.50 g/cm³。而致密砂岩储层中的相对高孔渗砂岩速度则明显变低, 一般仅 3 300 m/s, 密度也只有 2.20~2.35 g/cm³ (可能包含井筒附近裂缝的影响); 泥岩速度一般小于 4 000 m/s, 密度为 2.35~2.60 g/cm³。

2 储层识别的地质-地球物理基础

储层识别技术在一个地区是否有效主要取决于地质和地球物理基础条件的满足程度。储层在地质成因上处于较有利的沉积环境中, 与围岩之间有明显的波阻抗差异。而且储层最好是孔隙性储层, 具有一定的厚度和低于围岩的波阻抗 (高于围岩波阻抗的储层一般为致密至超致密储层, 储

层识别的可靠性将大大降低)。同时, 地震资料品质、分辨率和振幅保持水平, 波场偏移归位情况, 吸收、衰减和频散等信息的保护程度, 或者说含气地震响应特征的保护程度等是储层识别取得成功的地球物理资料基础。

2.1 川西坳陷浅、中层气藏储层的可识别性

储层的可识别性与两个重要因素有关。一个是地震资料的分辨率, 包括垂直分辨率和水平分辨率。通常情况下, 地震资料分辨率越大, 分辨能力越强。当然, 较高的信噪比是必须的。因为信噪比是分辨率的基础, 分辨率是由信噪比所定义的。高信噪比能够保证应有的地震分辨率的实现^[9]。另一个是储层的基本岩石物理特征及容易识别的沉积微相特征。也就是说, 储层与围岩要有明显的波阻抗差异。差异越大, 地震资料分辨率越高。

储层识别与地震分辨率有密不可分的关联。不同的学者给出的垂直分辨率的极限准则也不一样。Knapp 提出, 若地震脉冲延续时间为一个周期, 则垂直分辨率的极限为 1/2 波长; 他给出了最为严格的分辨率准则^[10]。Rayleigh 根据光学成像原理给出了光学分辨率极限定义, 认为两个物体的视觉波程差大于 1/2 波长时就是可分辨的。对于薄层而言, 来自薄层顶、底界面反射的 1/2 波长的波程差, 相当于 1/4 波长的薄层厚度, 也被定义为垂直分辨率的极限^[11]。Ricker 提出, 当两个子波的到达时间差大于或等于子波主极值两侧的两个最大陡度点的时间间距时, 这两个子波是可分辨的, 相当于 1/4.6 波长的薄层厚度^[12]。Widess 在他的经典论文“多薄才是薄层?”中指出, 小于 1/8 波长的薄层, 地震特征、波峰/波谷时间和频率随厚度没有明显的变化, 然而振幅随厚度的变化几乎是线性的, 但此时已无法通过厚度的变化来区分反射系数的变化。因此, 在没有噪声 (或信噪比很高) 的情况下, 可以将 1/8 波长作为理论分辨率的极限^[13]。Lawrence 在研究薄层和煤线的调谐作用和干涉反射时指出, 1/20 波长的薄层能够产生反射, 能够被视觉识别^[14]。Sheriff 证明, 薄层检测的最小厚度极限为 1/30 波长^[15]。Guangning 提出, 在信噪比较高的情况下, 应用小波变换可以检测到 1/32 波长的薄层的地震信号^[16]。因此在地震垂直分辨率方面可以认为, 薄层的理论分辨率极限

为 $1/8$ 波长;地震可检测薄层的能力,视不同的技术方法和资料情况,可达到 $1/20$ 至 $1/30$ 波长。这一结论是川西坳陷浅、中层储层识别的理论基础。

关于地震水平分辨率极限,也有大量的学者进行了研究和讨论^[9, 16~18]。地震水平叠加剖面的水平分辨率通常用第一 Fresnel 带来衡量。考虑到“有效”Fresnel 带的概念,水平分辨率约为 Fresnel 带半径的 $1/\sqrt{2}$ 。未偏移剖面的水平分辨率一般受制于两个因素,即地层倾角和有效 Fresnel 带大小。对于偏移剖面而言, Fresnel 带已经有效收缩,水平分辨率有了较大的提高。此时, Fresnel 带大小不再是衡量水平分辨率的准则。川西坳陷浅、中层气藏有意义的含气砂岩的横向分布在几十米至几百米之间,而地震观测的面元网格尺寸主要为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。利用三维偏移数据体进行储层识别,水平分辨率满足地质要求。

川西坳陷中段浅、中层多口典型井含气砂岩与围岩声波测井和密度测井资料统计表明,含气砂岩与围岩间存在明显的波阻抗差异。通过楔形模型的波动方程正演模拟,分别得到了川西坳陷浅、中层蓬莱镇组和沙溪庙组典型储层的正演记录、调谐曲线及时间厚度曲线(图 1, 图 2)。

川西坳陷蓬莱镇组气藏典型储层的楔形模型分析(图 1)表明,蓬莱镇组储层振幅调谐($1/4$ 波长)时(图中红线)的厚度为 25 m ,在调谐厚度附近地震振幅明显增强,而且波谷/波峰的过零点有下拉现象出现;当储层减薄到 12.5 m ($1/8$ 波长)时(图中蓝线),反射振幅接近大于 1 个波长的厚储层的振幅水平,储层完全可以被识别;当储层的厚度薄到 5 m ($1/20$ 波长)时(图中绿线),正演记录仍有可识别的反射,此时的振幅约相当于厚储层振幅的 $1/3$ 在信噪比较高的情况下,储层仍然可被识别。大于 37.5 m ($3/8$ 波长)的储层厚度可以通过储层顶/底反射的时间差准确求取。蓬莱镇组有开发意义的储层厚度范围为 $5\sim 20\text{ m}$,处在 $1/20\sim 1/4$ 波长之间,具备储层识别的地球物理基础。

川西坳陷蓬莱镇组气藏典型储层的楔形模型分析(图 2)表明,沙溪庙组储层调谐厚度为 30 m ;当储层减薄到 15 m 时完全可以被识别;当储层的厚度薄到 6 m 时,正演记录仍有可识别的反射;大于 45 m 的储层厚度可以用反射波的时间差准确求取。沙溪庙组有开发意义的储层厚度一般在

$13\sim 33\text{ m}$ 之间,主要处于 $1/8\sim 1/4$ 波长之间,储层是能够可靠识别的。

2.2 确保储层识别可靠的地震勘探关键技术

川西地区地震地质条件特殊,表层地震地质条件十分复杂,低、降速带(第四系)分布极不均匀。第四系现代河床分布复杂,普遍在几十厘米到 2 m 左右即遇第一个卵石层,地震记录有很强的声波、面波、折射波及环境噪声等干扰,且高频吸收及能量衰减严重。要确保储层识别的精度及可靠性,必须突破川西坳陷地震勘探中的卵石覆盖区三维地震采集方法,采用低信噪比条件下的保持储层含气地震响应特征的三维地震资料处理技术,以确保储层识别有高品质的资料基础。

川西坳陷浅、中层气藏勘探主要采用窄束状观测系统以避免复杂表层和自然条件对三维地震资料成像的影响,不需要采用宽方位观测系统研究储层的裂缝等各向异性特征。采用较多的三维地震资料采集排列片为 4 线 6 炮: 4×120 道接收, 2×15 次覆盖, $2400-40-40-40-2400$ 中间对称放炮观测系统。

川西坳陷地震资料含有大量的规则干扰(折射波、面波及声波等)、随机干扰(高频干扰)和人文干扰(机械振动、交通干扰等),就浅层而言属中等偏低的信噪比资料。地震资料处理中必须贯彻保护和突出浅、中层储层含气地震响应特征的三维地震资料精细处理思路。

3 储层识别方法

3.1 储层识别

储层识别是一项联合地质、测井、地震、测试等信息进行综合研究的过程。其基本思路是:在充分了解储层的基本地质特征、地质分层、电性特征及地震响应特征的基础上,通过储层的精细标定和正演模拟,研究不同厚度、不同物性条件、不同含气级别、不同流体性质的储层的地震响应特征,辅之以已知井的统计分析和试采结果,分析表征储层的敏感地震属性,最终确定不同品质储层的地震识别标志,并展开面上的识别和圈定。对圈定的可疑“储层”进行沉积相和沉积微相的符合性分析,剔除平面展布特征与储层最有利的沉积相或沉积微相不相符的部分,得到可靠的储层分布。

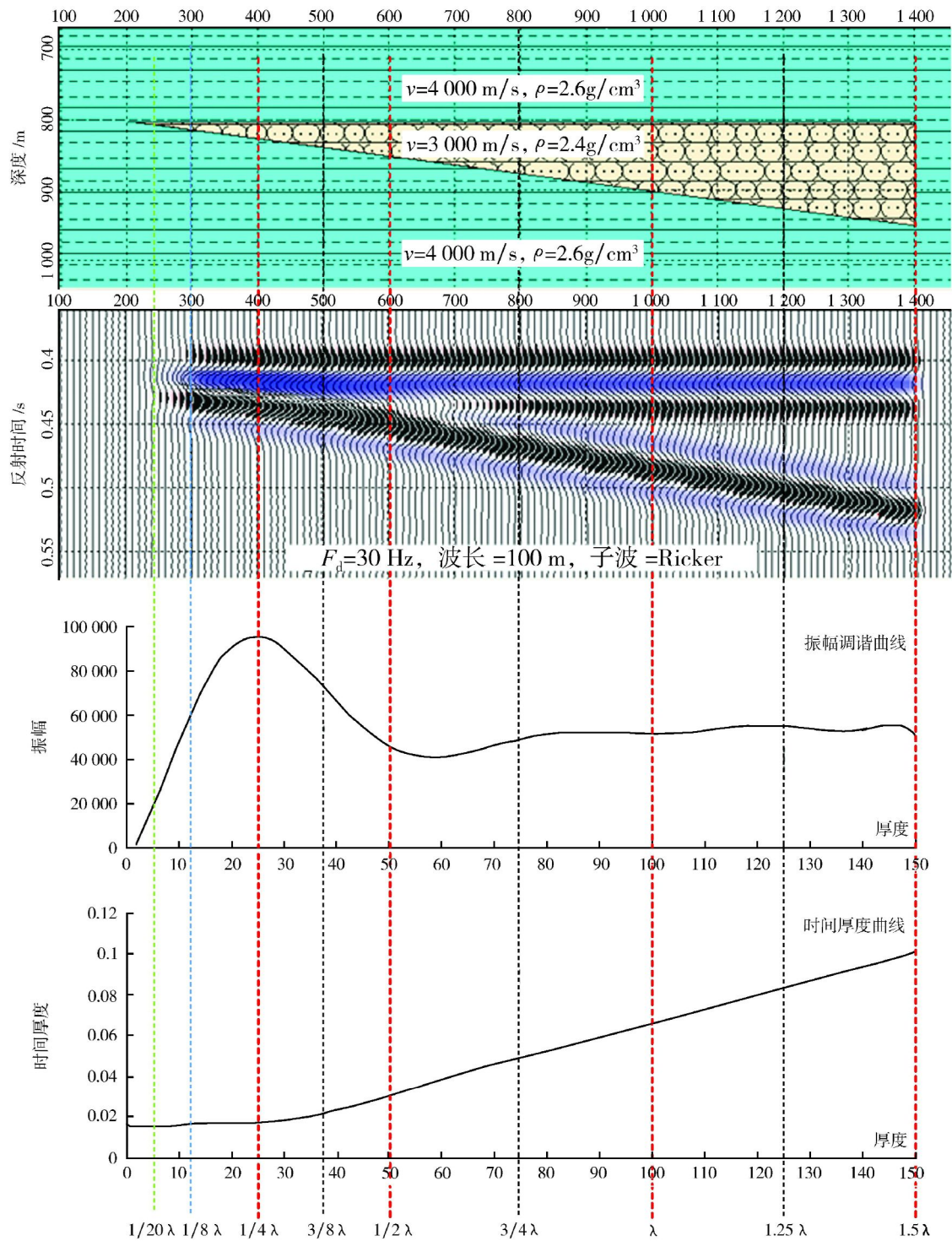


图 1 蓬莱镇组典型气藏楔形模型分析

Fig. 1 Wedge modeling analysis of the typical gas reservoirs in the Penlaizhen Formation

3.1.1 储层识别标志建立

从研究典型井的响应特征(振幅、频率、波阻抗等)入手,在统计分析的基础上,总结归纳出储层的主要识别标志。以下是川西坳陷新场气田蓬莱镇组气藏的 3 种地震识别标志(图 3)。

1) “强波谷、强波峰、低频”:以 X77(自然产

能 $11.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), X65 等井为代表,这类井一般含气砂岩较厚,含气级别高,测井曲线类型以箱形为主,自然产能高(图 3a)。

2) “弱波谷、强波峰、低频”:以 L12(自然产能 $1.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), XP2、XP7 等井为代表,测井曲线以钟形为主,自然产能不很高,但压裂后产能仍然可以有很好的表现(图 3b)。

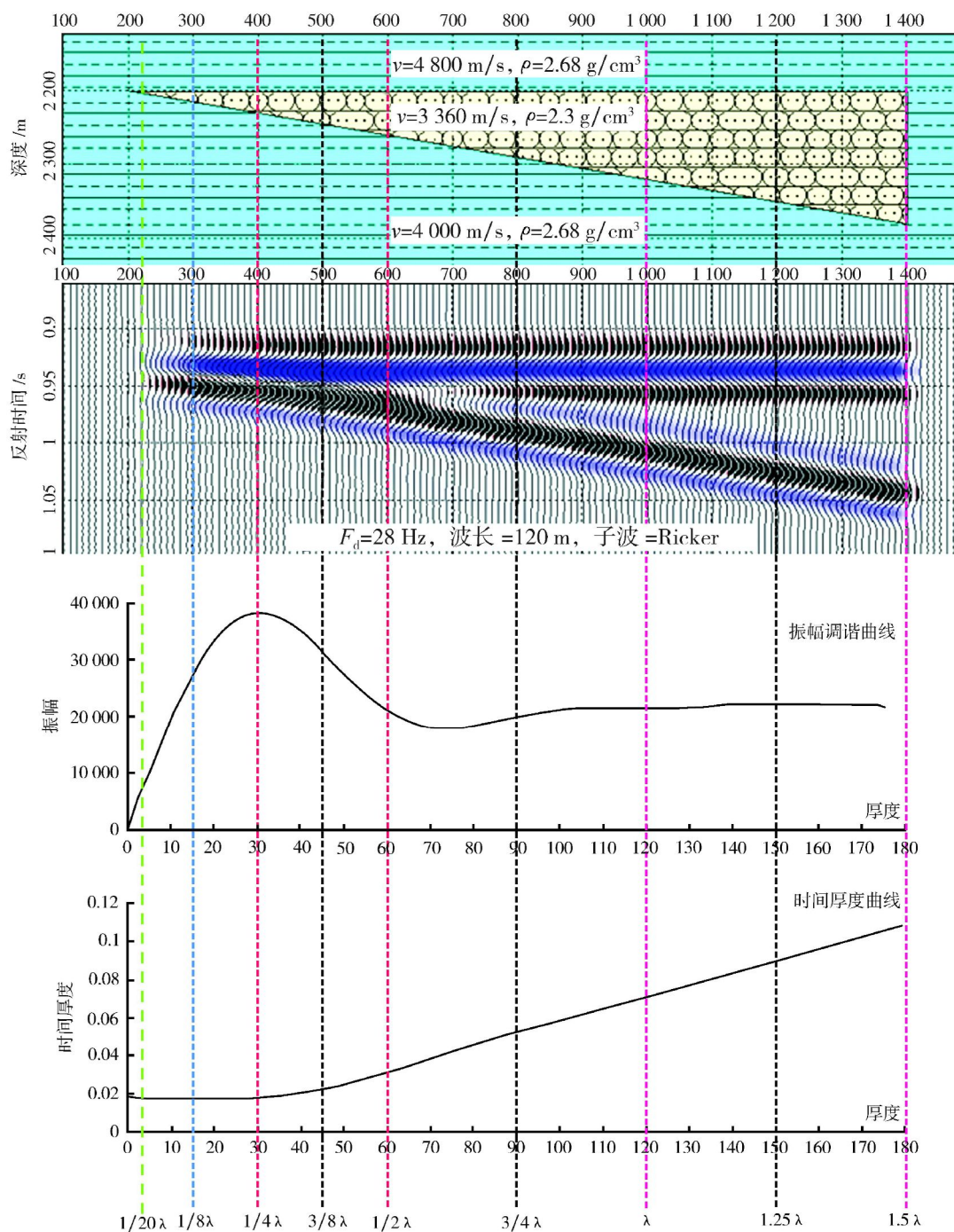


图 2 沙溪庙组典型气藏楔形模型分析

Fig. 2 Wedge modeling analysis of the typical gas reservoirs in the Shaximiao Formation

3) “弱波谷、较强波峰、低频”: 以 CX135-2、CX162-2 (自然产能 $0.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、压裂产能 $1.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 等井为代表, 测井响应特征以锯齿状为主, 含气级别偏低 (图 3c)。

3.1.2 正演模拟验证

根据已知井的岩性组合特征和声波、密度测井资料, 可制作楔状砂体模型和多层叠置砂体模型。通过正演获得相应的地震响应, 以验证河道

砂体的地震识别标志及地震资料对含气砂体的分辨能力^[19]。

叠置砂体模型波动方程正演模拟是验证储层识别模式可靠性的有效手段。图 4 是新场气田 $J_3^{(2)}$ 储层叠置砂体连井正演模型。从连井的地质剖面上看, 共有 3 个含气砂体尖灭点。从连井叠置砂体正演结果看, 单砂体尖灭点的位置出现相位反转; 而砂体叠置部分边界的 AB1 和 AB2 砂体尖灭位置出现相位突变。相同的连井地震

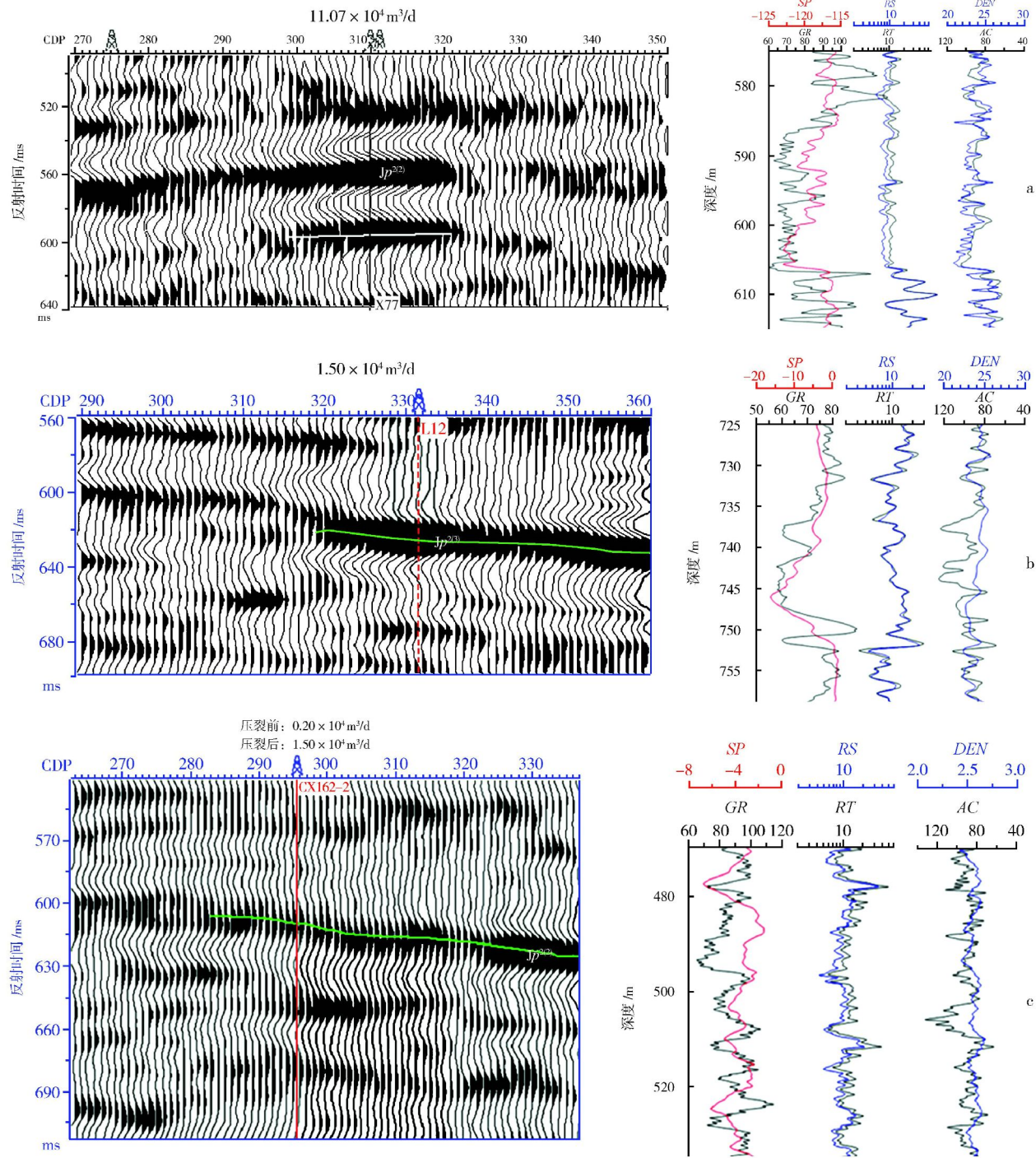


图 3 新场地区 J_3p 气藏地震(左)及测井响应(右)模式

Fig. 3 Seismic(left) and log(right) response patterns of J_3p gas reservoir in Xinchang area

a. 过 X77 井的地震剖面及产层段测井曲线; b. 过 L12 井的地震剖面及产层段测井曲线;
c. 过 CX162- 2 井的地震剖面及产层段测井曲线

剖面的相同位置也出现了相同的相位突变地震响应。

3.1.3 储层展布预测

储层展布预测是在已经确定的储层识别标志

基础上, 通过多井的对比分析或借鉴类似气藏的经验, 确定各种属性参数的取值范围或确定储层的地震属性阈值。利用三维沿层属性提取、地震相分析、分频处理等手段, 可实现储层展布预测。

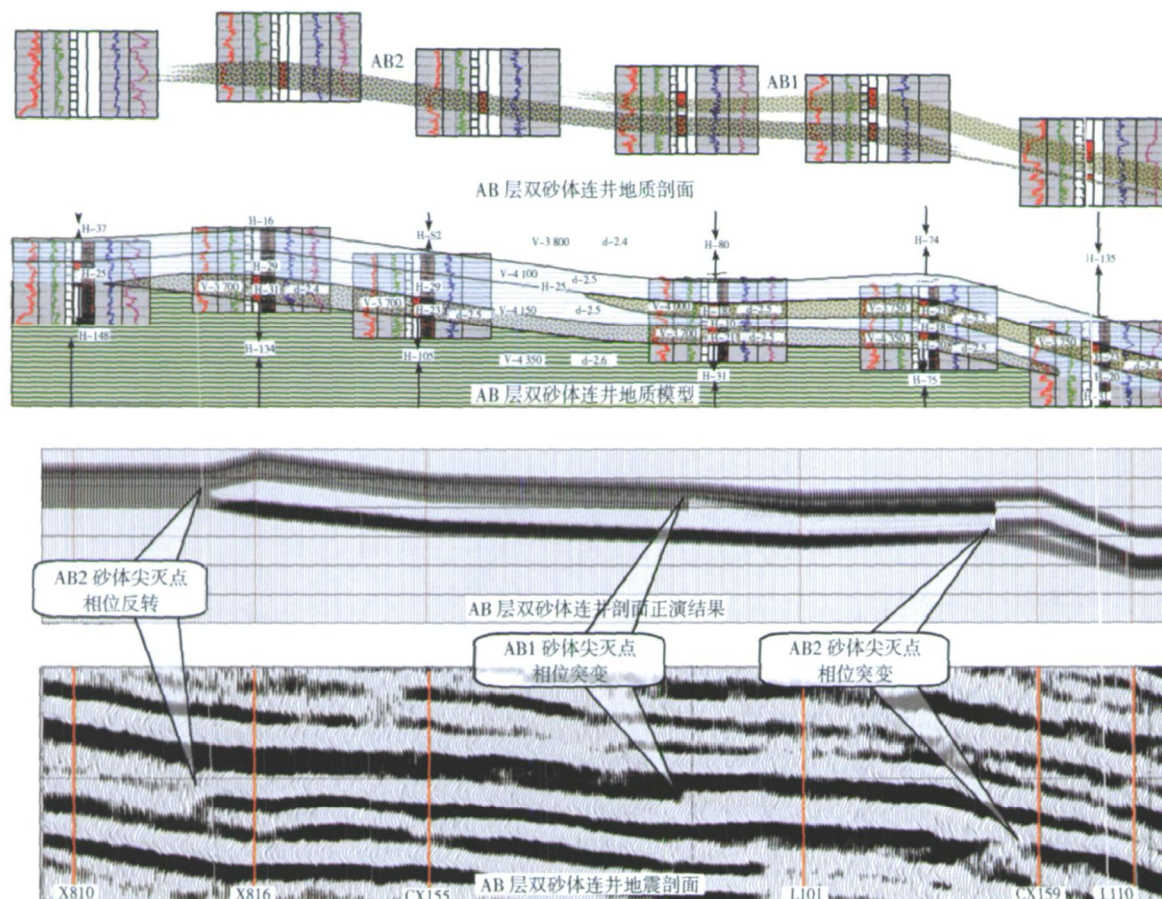
图 4 新场气田 $J_s^{2(2)}$ 储层叠置含气砂体正演模拟

Fig. 4 Forward modeling of superposed gas-bearing sandstones of $J_s^{2(2)}$ reservoir in Xinchang gas field
(上为叠置砂体地质模型, 中为正演记录, 下为实际的连井地震剖面)

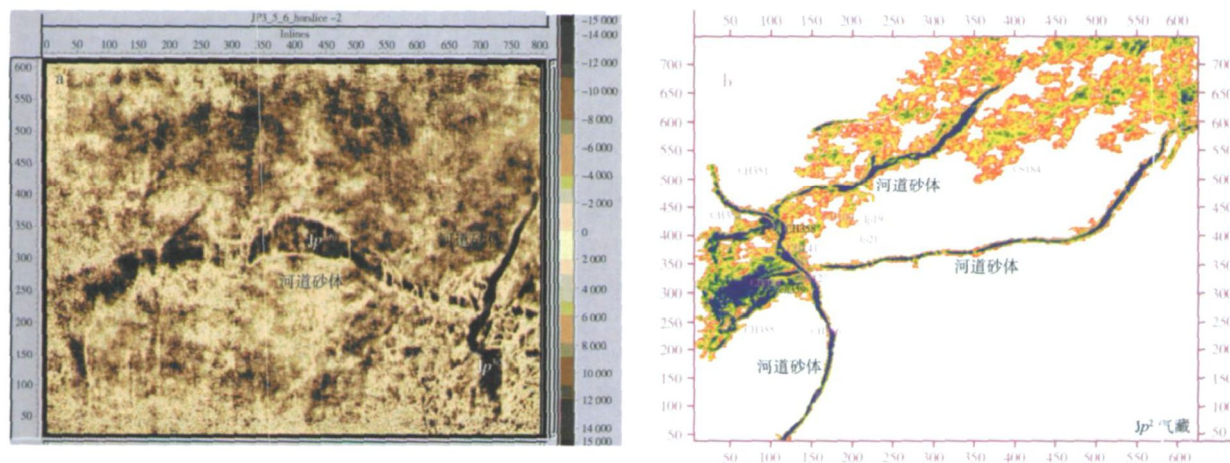


图 5 含气砂体空间展布预测

Fig. 5 Spatial distribution prediction of gas-bearing sandstone

a. 新场气田蓬莱镇组气藏 $J_p^{3(5+6)}$ 砂体振幅平面图; b. 合兴场气田蓬莱镇组 J_p^2 气藏砂体振幅平面图

1) 三维沿层属性提取: 在储层精细标定的基础上, 进行储层对比追踪, 提取的参数包括与振幅、频率、相位和反射结构有关的若干种属性。图

5a为新场气田蓬莱镇组气藏 $J_p^{3(5+6)}$ 砂体的预测结果, 反映了 EW 向的 $J_p^{3(6)}$ 砂体和 NS 向的 $J_p^{3(5)}$ 砂体及二者的叠置关系; 图 5b为合兴场气田蓬莱

镇组 $p^{2(4+5)}$ 气藏含气砂体的展布情况, 反映了 NE 向的两套河道砂体和近 NS 向的河道砂体的展布, 在西面 3 套砂体出现了相互叠置。

2) 三维地震相分析: 利用自组织神经网络技术 (SOM) 对地震道波形进行自动分类得到的地震相图 (seismic facies map) 可以分辨出河道、沙坝等几何形状复杂的含气砂体。图 6a 为新场气田蓬莱镇组气藏 $p^{2(4+5)}$ 含气砂体地震相图, 反映了河道砂体的空间展布和内部的非均质性; 图 6b 为新场气田 $J_3^{(2)}$ 地震相图, 反映了 $J_3^{(2)}$ 两个砂体 (红

色为 AB1, 绿色为 AB2) 的叠置情况和主要沉积相带的展布。

3) 频谱分解 (spectral decomposition): 频率分解技术利用短时窗离散傅立叶变换、小波变换、WVD 变换或多子波分解技术对地震记录进行时频分析, 并分解出不同频率的地震能量子体, 用于预测不同厚度储层的展布和地层的不连续性 [20-22]。对新场气田 $p^{3(6)}$ 气藏用 0~100Hz 频率的能量子体来描述储层的横向展布规律。图 7a 是 $p^{3(6)}$ 气藏 20、25、30、35Hz 频率对应的调谐振

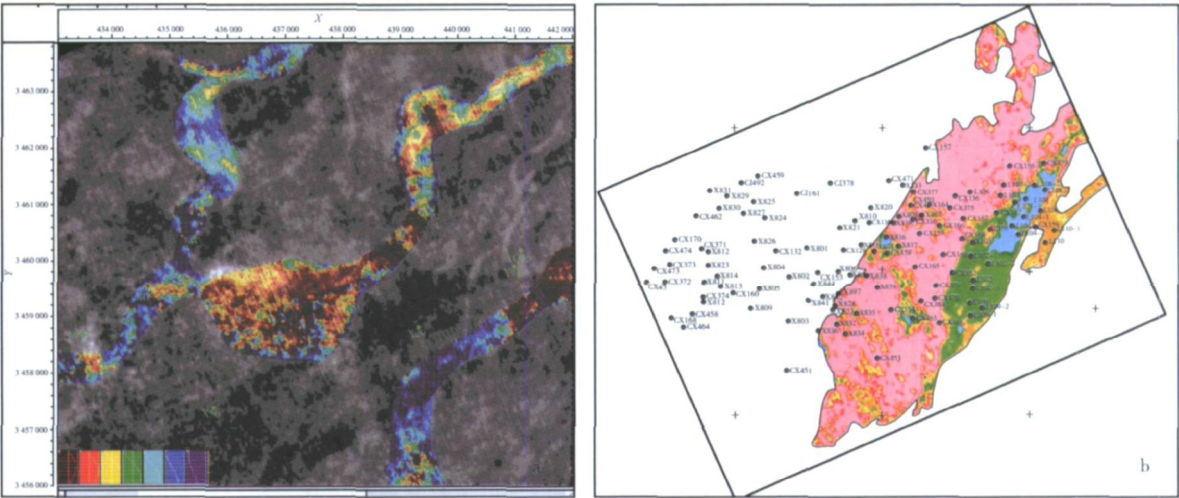


图 6 储层三维地震相图

Fig. 6 3D seismic facies map of the reservoirs in Xinchang gas field

a. 新场气田 $p^{2(4+5)}$ 气藏; b. 新场气田 $J_3^{(2)}$ 气藏

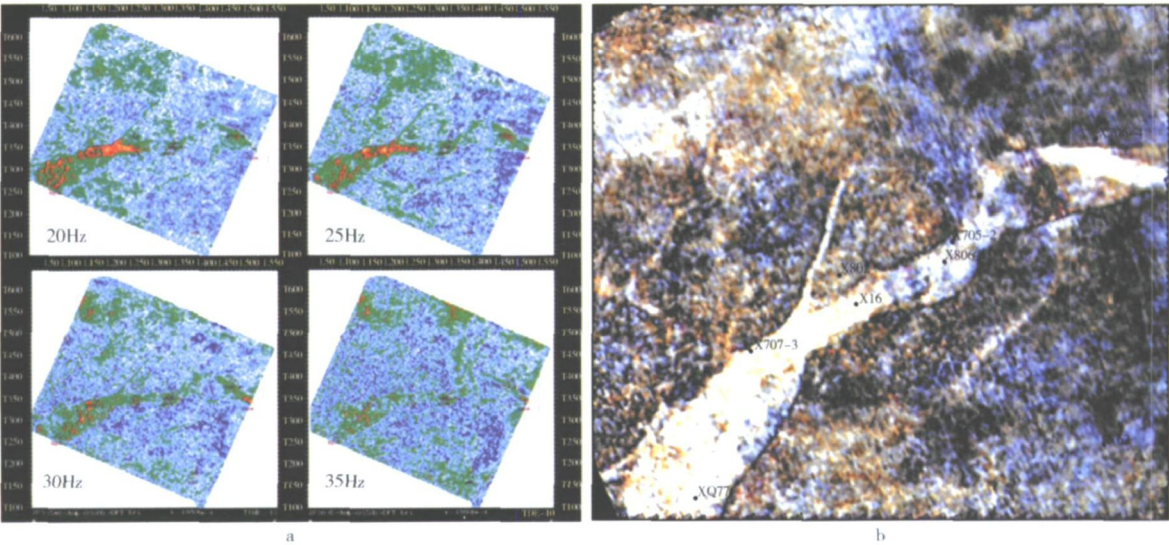


图 7 新场气田 $p^{3(6)}$ 频谱分解储层预测

Fig. 7 Spectral decomposition prediction of $p^{3(6)}$ reservoir in Xinchang gas field

幅。从中可以看出, 20 和 25 Hz 的振幅变化主要反映了河道沉积的砂体展布特征; 在 30 和 35 Hz 的振幅图上, 河道沉积特征依然存在, 但反映的主要是沉积厚度较薄的储层的特征。图 7b 是采用不同频率调谐振幅叠合的方式显示的河道, $p^{3(6)}$ 砂体的边界及储层内部的变化均清楚地得以表现。

3.2 储层空间展布刻划

储层三维空间展布刻划是利用先进的三维解释及三维可视化技术预测储层展布范围、检测储层分布边界、表现其空间展布规律的系列技术。

1) 储层边缘检测: 通常采用三维相干体^[21]和沿层方位角提取技术。三维相干体高、低相干值的空间展布特征, 使我们能够快速识别出岩性、岩

相变化及地层尖灭特征, 确定含气砂体的边界; 三维沿层方位角参数, 可以更加直观地表征含气砂体的沉积特征及其分布边界。图 8 为新场气田蓬莱镇组气藏 $p^{3(5+6)}$ 砂体相干体沿层切片和沿层方位角平面图。从图中可见, $p^{3(5+6)}$ 两条河道砂体的边界十分明显, 并且 EW 向和 SN 向的两期河道的切割关系也非常清楚。

2) 储层空间展布刻划: 以经过验证和修正的含气砂体地震识别标志为准, 采用三维可视化解释手段, 分层组在小层追踪对比线的控制下进行储层的三维空间识别和追踪, 并对满足条件的样点进行识别 (也称为储层雕刻), 实现储层三维空间展布的刻划。同时, 结合沉积微相研究成果对追踪出的储层的几何外形进行分析, 评价追踪出的储层空间展布的合理性。图 9a 中可见新场气

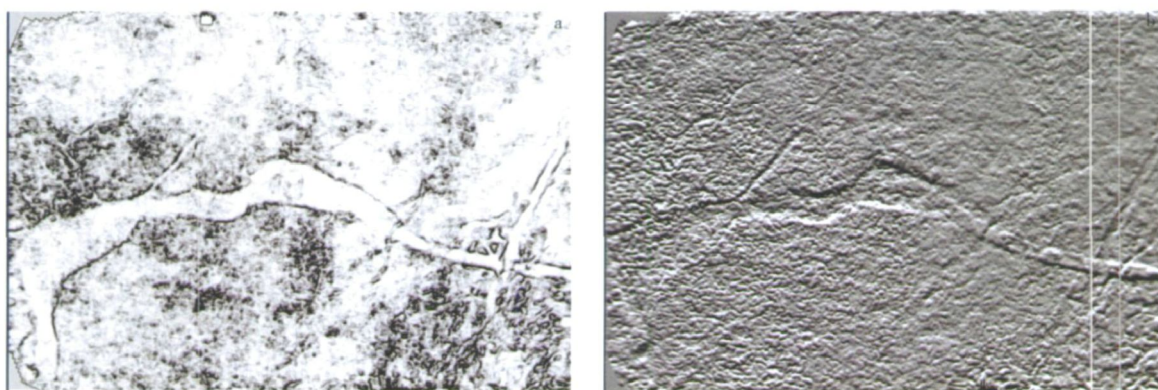


图 8 三维相干体和方位角的砂体边界检测

Fig. 8 Reservoir boundary detection by using 3-D coherence and azimuth in Xinchang gas field

a. 新场气田 $p^{3(5+6)}$ 气藏相干体沿层切片; b. 新场气田 $p^{3(5+6)}$ 气藏沿层方位角平面图

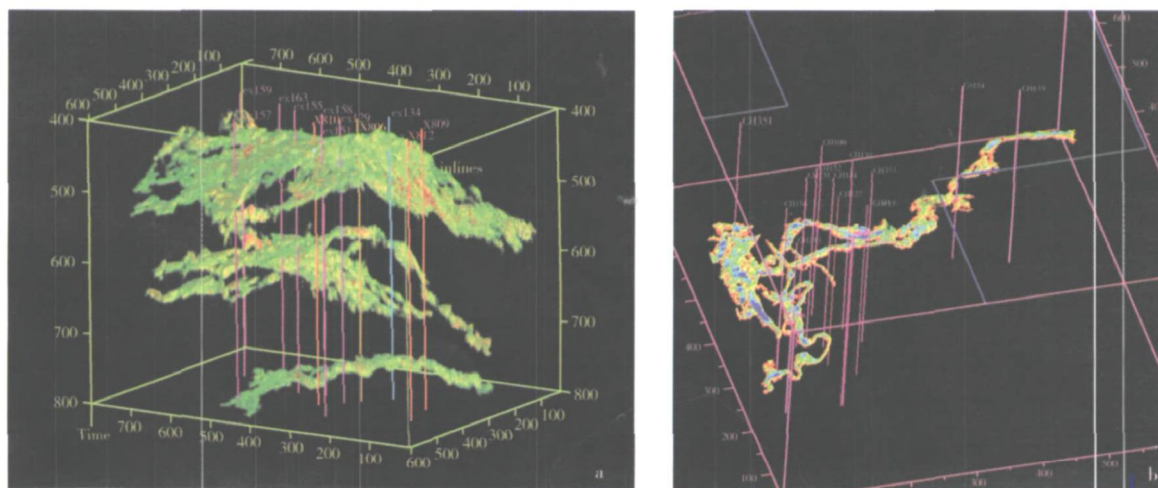


图 9 含气砂体空间展布刻划

Fig. 9 Spatial delineation of gas-bearing sandstone in Hexingchang gas field

a. 新场气田 $p^{1(6)}$, $p^{2(2+3)}$, $p^{3(5+6)}$ 含气砂体; b. 合兴场气田 p^3 含气砂体

田蓬莱镇组 $J^{1(6)}$, $J^{2(2+3)}$, $J^{3(5+6)}$ 气藏含气砂体呈叠置的线状、网状和片状分布 (由下而上)。图 9b 中合兴场气田 J^3 气藏河道相含气砂体的分叉合并及复杂的河流弯道表现十分精细。

3.3 储层含气性分析

地震属性与含气性关系分析是储层综合评价的基础。川西坳陷浅、中层气藏的识别和评价一般包含以下内容。

1) 振幅与含气性的关系: 由模型正演知道, 储层的厚度与振幅大小有正相关关系; 且储层孔渗性越好, 则波阻抗就越低, 和围岩的反射系数就会越大, 振幅就越强。因此, 砂体厚、孔渗性好的储层就表现为强振幅 (低阻抗储层)。统计表明, 新场气田大于 10 m 的钻井基本都能获得高产。

2) 波阻抗与含气性的关系: 阻抗值的大小和

储层的反射系数成正比, 并且消除了储层厚度的影响, 因此阻抗值更为直接地反映了储层的物性特征。从图 10 可以看出, 新场气田蓬莱镇组 $J^{2(2+3)}$ 和 $J^{2(4+5)}$ 气藏产层的波阻抗值 $\leq 10\ 500$ 高产储层波阻抗值 $\leq 9\ 000$ 。

3) AVO 属性与含气性的关系: AVO 属性的 $\lambda\rho$ (拉梅常数与密度的乘积) 和 $\mu\rho$ (剪切模量与密度的乘积) 两个参数实际上是 P 波阻抗、S 波阻抗经数学转换求得的。通常情况下, “低 $\lambda\rho$ 、高 $\mu\rho$ ” 表示含气砂岩的存在。从图 11 中可以发现, 新场气田 $J^{2(4+5)}$ 气藏产层的 $\lambda\rho \leq 425$, $\mu\rho \geq 340$; 中、高产井的 $\lambda\rho \leq 400$, $\mu\rho \geq 355$ 。

4 气藏描述中的地震方法

气藏描述以多学科理论为指导, 综合运用地

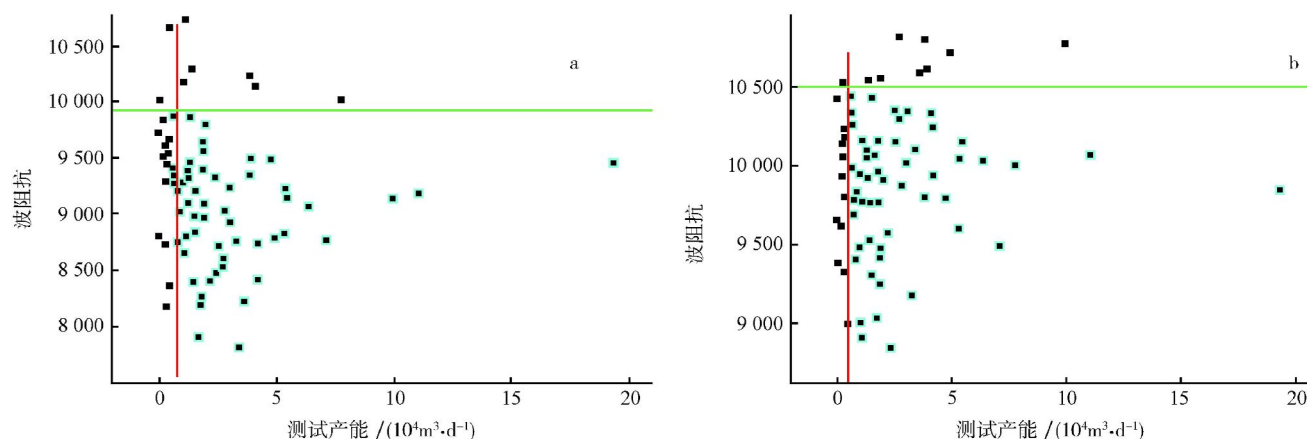


图 10 新场气田 $J^{2(2+3)}$ a) 和 $J^{2(4+5)}$ b) 气藏波阻抗与产能的关系

Fig. 10 Relationship between impedance and productivity of $J^{2(2+3)}$ reservoir and $J^{2(4+5)}$ reservoir in Xinchang gas field

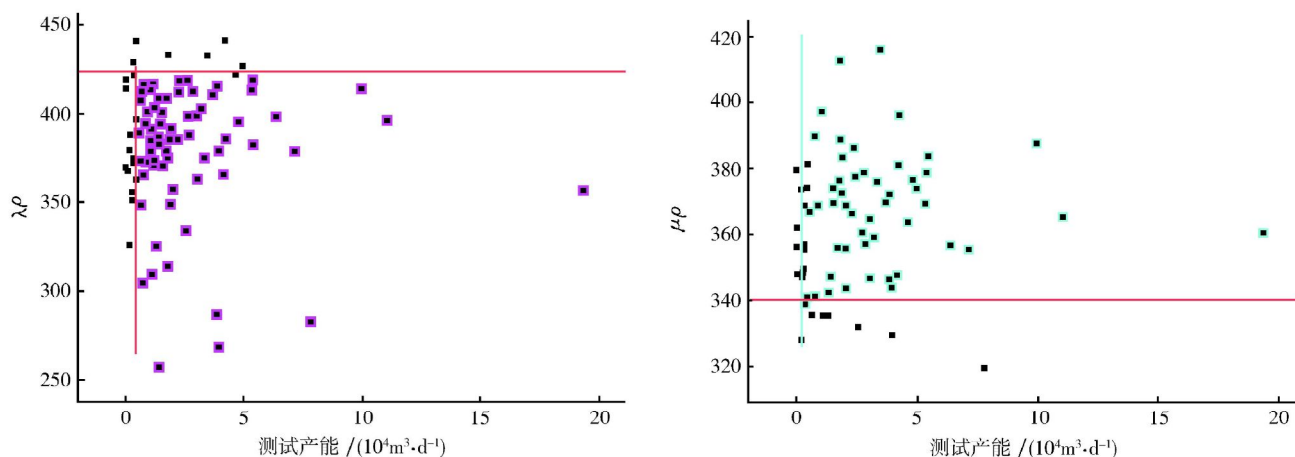


图 11 新场气田 $J^{2(4+5)}$ 气藏 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 与产能交会图

Fig. 11 Crossplot of $\lambda\rho$ and $\mu\rho$ in $J^{2(4+5)}$ reservoir in Xinchang gas field

质、地震、测井和试油、试采等信息,最大限度地利用先进的技术手段,对气藏进行定性、定量描述和评价^[23]。基于三维地震资料开展的气藏描述工作中,地震方法能够在结合多学科信息的基础上开展大量的工作,提供有关储层的丰富信息,如储层构造形态及断层展布特征、沉积相及沉积微相特征、地层分层及对比、储层分布范围及空间展布特征、定量或定性的储层物性参数分布特征、定量的储层储集参数分布特征等,最终获得较为精细的静态三维地质模型^[24]。

4.1 储层几何形态描述

多井约束地震地层反演技术是一项基于模型的有先验信息约束的多道地震反演技术^[25]。该方法将测井资料特有的垂向高分辨率与地震资料良好的横向连续性有机结合起来,明显提高了对薄互层砂岩储层的识别能力。在多井约束地震地层反演成果的基础上,制定储层顶面对比追踪标准,进行储层顶界的对比、追踪,制作储层顶界等 t_0 图,利用经钻井校正的速度场数据体进行时深转换,制作储层顶界构造图。

储层厚度的计算可以采用多种方法实现。当储层厚度大于 $3/8$ 波长(图 1、图 2)时,可以直接追踪储层的顶、底反射,利用二者的时差和测井标定的层速度计算得到。当储层厚度小于 $3/8$ 波长时,可采用以下方法:

1) 由于理论上波阻抗反演消除了地震子波

的影响,因此可利用多井约束的波阻抗反演或稀疏脉冲反演结果,直接在波阻抗数据体上追踪储层的顶、底面,利用二者的时差计算储层厚度;

2) 由于振幅谱中各频率分量的值能够反映与薄层有关的周期性陷波点,理论研究证明,陷波点之间的频率差 P_f 与薄层的时间厚度 (P_t) 之间互为倒数关系 ($P_t = 1/P_f$),因此储层厚度可以通过 $H = V_n P_t / 2$ 求得^[20];

3) 对于小于 $1/4$ 波长的薄层,可认为振幅与厚度有正相关的线性关系,可利用沿层振幅来计算或预测储层的厚度;

4) 如资料信噪比较高,还可通过反射系数反演的方法预测储层的厚度。

通过储层顶面构造图的编制、储层厚度的计算、反演、预测,加上断裂系统的解释和分析,最终完成了储层几何形态的描述。图 12 为新场气田沙溪庙组气藏 4 套储层的空间几何形态图。

4.2 沉积相及沉积微相研究

依托高精度三维地震资料,结合岩心、录井、测井单井相分析及多井对比解释,以储层空间展布刻划成果为基础,开展高分辨率层序地层研究,建立地震相向沉积相转换的关系,进一步落实有利储层所处的沉积相或沉积微相,可建立储层更为准确的沉积模型。表 3 为新场气田蓬莱镇组气藏地震相与沉积相转换的对应关系表。总体而言,这一地区的高能相沉积(有利储层发育的相

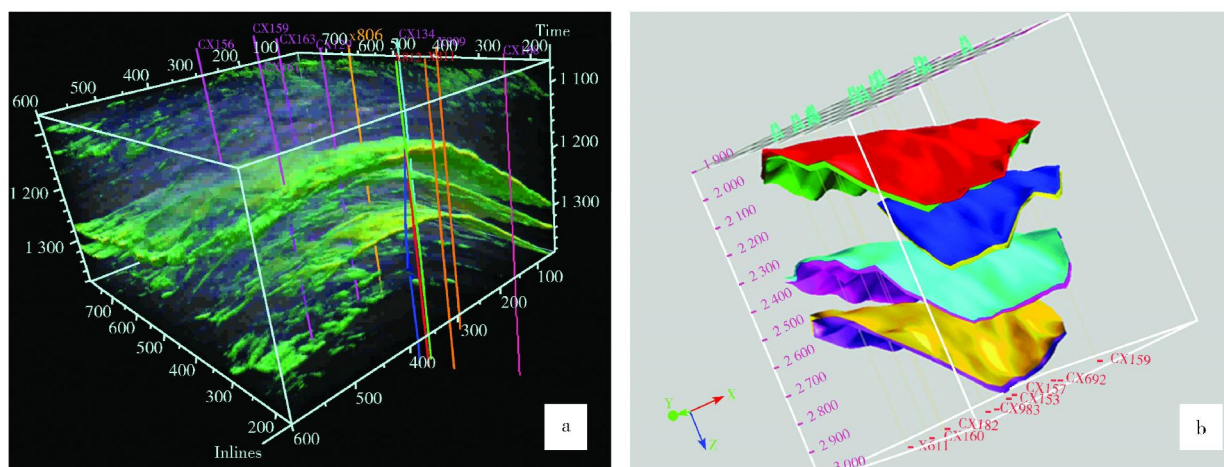


图 12 新场气田 J_2s 气藏几何形态

Fig. 12 Geometry of J_2s reservoir in Xinchang gas field

a. 波阻抗三维可视化形态; b. A、AB、B、C 层气藏几何形态

表 3 地震相与沉积相的对应关系

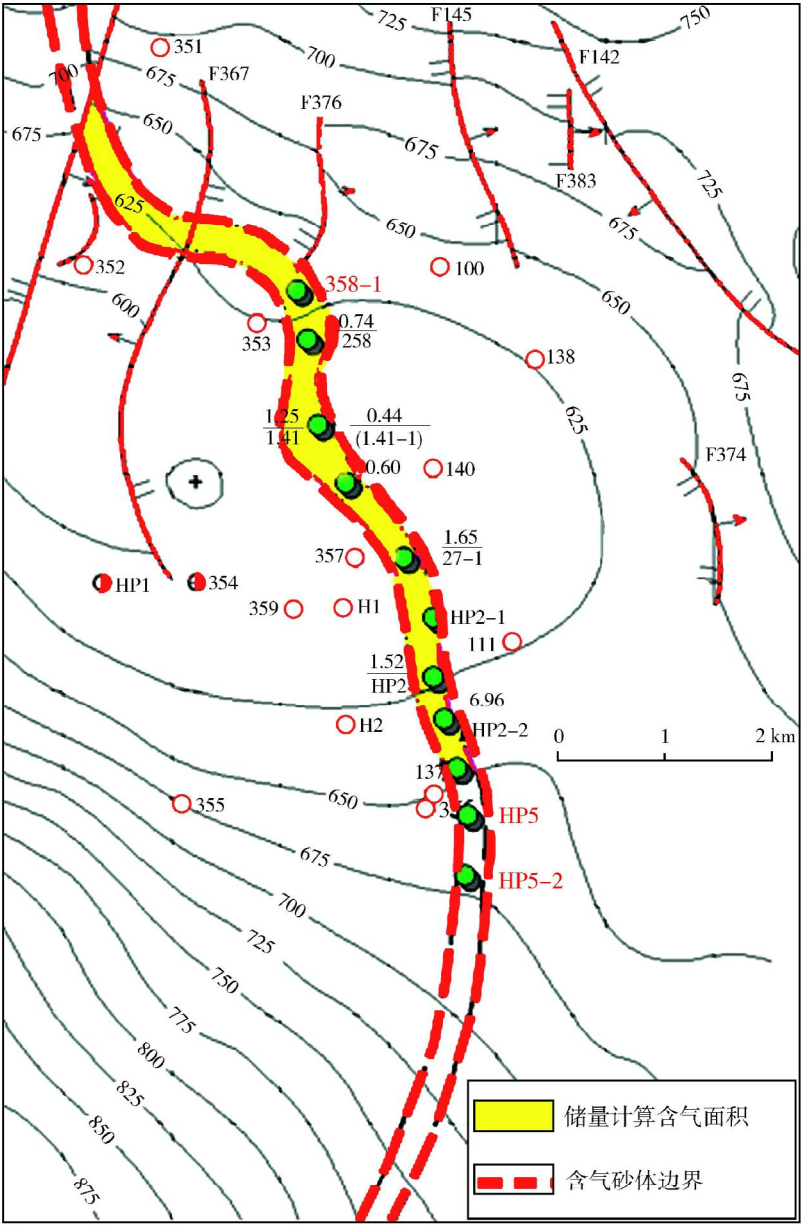
Table 3 Relationship between seismic facies and sedimentary facies

沉积相		地震相
高能相沉积	河道	连续反射、强波谷、低频、边界清晰
	河口坝	连续反射、强-较强波谷、低频、延伸范围较大
	决口扇、天然堤、远沙坝	连续性较差、弱反射
低能相沉积	河漫湖、滨湖	杂乱、空白反射

带)在地震剖面上表现为易于识别的“低频、强波谷”的地震相特征。

4.3 储层分布范围及含气面积确定

在储层识别及空间展布刻划的基础上, 结合储层含气性分析成果, 综合沉积相和沉积微相的研究成果及试气、试采情况, 在综合评价的基础上, 圈定储层的分布范围, 确定储层含气面积。图 13 为合兴场气田蓬莱镇组 $p^{2(13)}$ 气藏含气面积图。图中岩性气藏特征明显, 含气面积 (黄色部分) 主要受沉积微相控制, 与构造圈闭没有直接的关系, 天然气的富集仅需要一个大的正向构造背景。川西坳陷浅、中层的绝大部分气藏与此特征相同或相似。



4.4 储集参数反演及转换

获得储层储集参数并分析其在面上的分布特征是气藏描述和储量计算不可缺少的过程。有两个途径获得储集参数的空间分布。一种方法是通过研究波阻抗与孔隙度的关系,建立波阻抗/孔隙度转换关系(拟合公式),在井资料的约束下将波阻抗转换为孔隙度。该方法在波阻抗与孔隙度的拟合有较高相关系数时,转换结果较为可靠。另一方法是在已知井较多且分布均匀的情况下,利用随机反演方法,在地震波阻抗及其他地震属性的约束下,反演出如孔隙度、渗透率、含气饱和度等储集参数。这些参数可以在储量计算中参考使用,或作为储层综合评价的基础参数,同时也可用于储层地质建模。

图 14 反映了新场气田沙溪庙组 $J_3^{(1)}$ 气藏的孔隙度转换过程,得到的孔隙度平面分布合理,高孔隙度的部位主要集中在河流相砂体的中心部位,与沉积相研究的结论吻合较好。

5 结论

近年来,川西坳陷浅、中层致密非均质气藏的勘探开发依靠科技进步,重视地震勘探新技术、新方法的研究和推广应用,坚持采集、处理、解释一体化思路,大力倡导多学科协同的联合研究,以高质量的研究成果指导勘探开发,降低了风险,提高了效益。截止 2005 年底,在川西坳陷浅、中层获

天然气探明储量近 $1\,400 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产量达到 $21 \times 10^8 \text{ m}^3$,区域甩开井成功率达 65%,评价井和开发井成功率达 75% 和 93%,其中新场气田沙溪庙组气藏开发井成功率达 100%。勘探开发实践证明,川西坳陷浅、中层储层识别技术是实用、有效的,值得类似地区借鉴和参考。

随着勘探开发的不断深入,利用地震属性进行储层识别也开始面临越来越大的挑战。在利用地震资料进行储层识别时应注意以下问题。

1) 储层识别和边界检测得到的储层发育边界与砂体分布的实际边界有一定的误差。通常情况下,通过地震属性识别的储层分布范围比实际的砂体分布范围要小。因为砂体厚度小于 $1/20$ 波长后,地震方法难以检测。因此,在地震识别的储层分布范围以外,钻遇几米的薄砂体是有可能的。

2) 在利用常规地震属性的条件下,要有效地识别储层的含气性或含气丰度有较大的困难。在成藏条件不太有利的地区,往往出现优质储层含水饱和度偏高的情况。如川西坳陷新都地区的沙溪庙组气藏,储层孔渗性很好,但普遍含水。尽管常规地震属性能够很好地识别储层的分布范围,但难以判断其天然气的充满度。只有通过 AVO 反演或纵横波联合反演,才能作出更好的流体性质识别。

3) 在高阻抗砂岩含气的情况下,储层的识别将变得复杂。一方面,高阻抗砂岩有可能是致密或超致密储层而不具备产出天然气的能力;另一

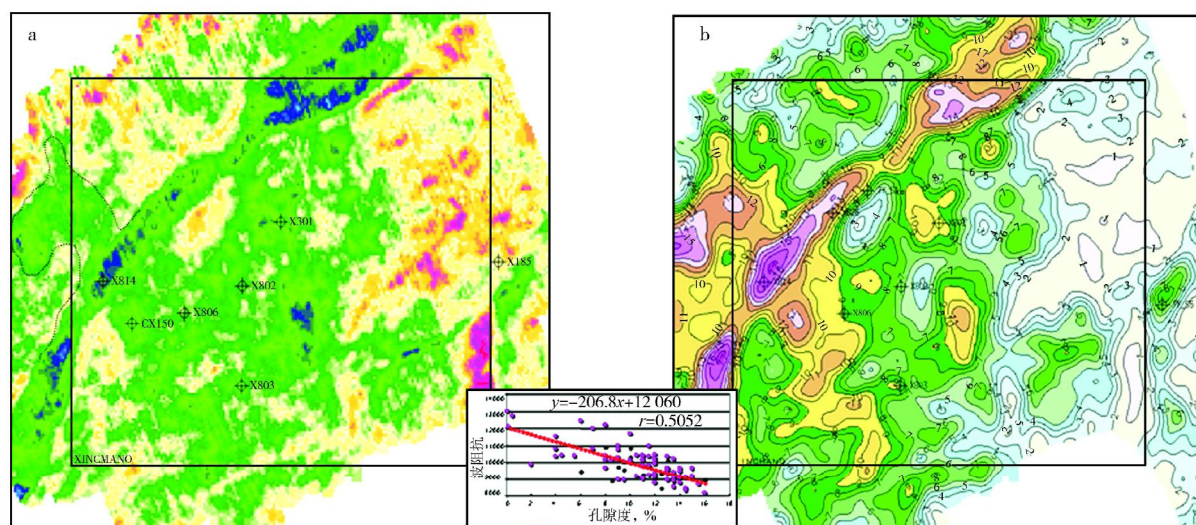


图 14 新场气田沙溪庙组 $J_3^{(1)}$ 气藏波阻抗 a) 和孔隙度 b) 平面图

Fig. 14 Impedance(left) and porosity(right) map of $J_3^{(1)}$ reservoir in Xinchang gas field

方面, 高阻抗背景下的低阻抗异常又有可能与裂缝或泥质含量过高有关。因此, 常规地震属性在储层识别中将具有多解性。建议采用 AVO 反演的方法, 以剔除泥岩的响应。

4) 地震资料的信噪比和含气地震响应特征的保持在浅、中层天然气的勘探中极为重要。然而, 由于浅层资料覆盖次数低、干扰重、信噪比低, 往往难以满足储层识别对资料的要求。因此, 要勘探浅、中层气藏最好采用针对浅、中层的观测系统。

5) 提高分辨率有利于薄层的识别, 但目前的资料处理技术在提高分辨率的同时会严重削弱“低频、强波谷”的浅、中层气藏地震响应特征。因此, 要提倡分辨率适度资料处理策略。

6) 在储层识别中, 由于薄层的调谐作用, 薄层的反射振幅及其他属性的异常比较明显, 而厚层的地震响应反而显得不太突出。因此, 在储层识别中要警惕厚层的漏判问题。

7) 由于浅、中层气藏的气藏类型、储层物性特征、储层与围岩的相互关系、成藏主控因素等与川西坳陷陆相深层气藏及四川盆地的海相气藏有明显差异。切忌将浅、中层储层识别的成功经验和直接用于深层和海相天然气的勘探中。应根据深层和海相储层的特点, 在认真分析研究的基础上, 研究针对性的储层识别方法, 并建立相应的配套技术。

参 考 文 献

- 1 王国立, 周文英, 唐立章, 等. 川西坳陷中段天然气资源评价 [A]. 见: 杨克明, 徐进, 编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术 [C]. 北京: 地质出版社, 2004 91~ 97
Wang Guoliang, Zhou Wenying, Tang Lizhang et al. Resource evaluation of middle member in West Sichuan depression [A]. In: Yang Keming, Xu Jin, eds. Reservoir formation theory and exploration and production technology on natural gas [C]. Beijing: Geology Publishing House, 2004 91~ 97
- 2 冉隆辉, 谢姚祥, 王兰生. 从四川盆地解读中国南方海相碳酸盐岩油气勘探 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(3): 289~ 294
Ran Longhui, Xie Yaoliang, Wang Lansheng. Understanding exploration of marine carbonate reservoirs in South China through Sichuan basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006 27(3): 289~ 294
- 3 郭正吾. 四川盆地西部致密碎屑岩含气领域勘探理论与实践 [A]. 见: 杨克明, 徐进, 编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术 [C]. 北京: 地质出版社, 2004 17~ 21
Guo Zhengwu. Exploratory theory and practice of gas-bearing field tight elastic in West Sichuan basin [A]. In: Yang Keming, Xu Jin, eds. Reservoir formation theory and exploration and production technology on natural gas [C]. Beijing: Geology Publishing House, 2004 17~ 21
- 4 曹烈, 安凤山, 王信. 川西坳陷须家河组气藏与古构造关系 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(2): 224~ 229
Cao Lie, An Fengshan, Wang Xin. Relationship between palaeo-structure and gas reservoirs in Xujiahe formation in Western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2005 26(2): 224~ 229
- 5 李书兵. 川西坳陷远源气藏成藏主控因素分析 [A]. 见: 杨克明, 徐进, 编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术 [C]. 北京: 地质出版社, 2004 42~ 52
Li Shubing. Analysis on the main factors controlling the far-source gas reservoir formation in West Sichuan depression [A]. In: Yang Keming, Xu Jin, eds. Reservoir formation theory and exploration and production technology on natural gas [C]. Beijing: Geology Publishing House, 2004 42~ 52
- 6 叶军. 川西坳陷天然气富集规律 [A]. 见: 杨克明, 徐进, 编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术 [C]. 北京: 地质出版社, 2004 85~ 90
Ye Jun. Accumulation rule of natural gas in West Sichuan depression [A]. In: Yang Keming, Xu Jin, eds. Reservoir formation theory and exploration and production technology on natural gas [C]. Beijing: Geology Publishing House, 2004 85~ 90
- 7 朱彤, 叶军. 川西坳陷致密碎屑岩气藏类型划分及特征 [J]. 石油实验地质, 2004 26(6): 537~ 541, 546
Zhu Tong, Ye Jun. Types and characteristics of tight clastic rock gas pools in the West Sichuan depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004 26(6): 537~ 541, 546
- 8 叶军, 陈昭国. 川西新场大型气田地质特征与预测关键技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(3): 384~ 391
Ye Jun, Chen Zhaoquo. Geological characteristics of large Xin-chang gas field in Western Sichuan depression and key prediction technologies [J]. Oil & Gas Geology, 2006 27(3): 384~ 391
- 9 李庆忠. 走向精确勘探的道路 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993 12~ 30
Li Qingzhong. The way to obtain a better resolution in seismic prospecting [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993 12~ 30
- 10 Knapp R W. Vertical resolution of thick beds, thin beds, and bed cyclothes [J]. Geophysics, 1990 55(9): 1 183~ 1 190
- 11 Kallweit R S, Wood L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets [J]. Geophysics, 1982 47(7): 1 035~ 1 046
- 12 Ricker N. Wavelet contraction, wavelet expression, and the control of seismic resolution [J]. Geophysics, 1953 18(6): 769~ 792
- 13 Widess M B. How thin is a thin bed [J]. Geophysics, 1973 38(6): 1 176~ 1 180
- 14 Gochioco L M. Tuning effect and interference reflections from thin

- beds and coal seams[J]. Geophysics 1991, 56(8): 1 288 – 1 295
- 15 Sheriff R E. Limitations on resolution of seismic reflection and geologic detail derivable from them[J]. AAPG Memoir 26, 1977: 3– 14
- 16 Guangning Z, Qingchun L. Using the wavelet transform to detect singularities of the thin bed seismic signals[J]. SEG Expanded Abstracts 2000: 50– 54
- 17 云美厚. 地震分辨率[J]. 勘探地球物理进展. 2005, 28(1): 12~ 18
Yun Meihou. On seismic resolution[J]. Progress in Exploration Geophysics 2005, 28(1): 12– 18
- 18 云美厚, 丁伟, 王新红. 地震水平分辨率研究与应用[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(2): 102~ 107
Yun Meihou, Ding Wei, Wang Xinhong. Study and application of seismic horizontal resolution[J]. Progress in Exploration Geophysics 2005, 28(2): 102– 107
- 19 李显贵, 绍吉华, 张涛. 波阻抗模型正演技术在砂岩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(6): 584~ 586
Li Xiangui, Shao Jihua, Zhang Tao. Using forward impedance modeling to trace the sandstone reservoir[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(6): 584– 586
- 20 Greg P, James G, John L. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge 1999, 18(3): 353– 360
- 21 Lynn P, Rich B, Greg P. Interpretation of incised valleys using new 3-D seismic techniques: a case history using spectral decomposition and coherency[J]. The Leading Edge 1998, 17(9): 1 294– 1 298
- 22 蔡刚, 吕锡敏, 苏明军, 等. 频谱分解技术在准噶尔盆地油气勘探中的作用[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 35~ 37
Cai Gang, Lü Ximing, Su Mingjun, et al. Application of spectrum decomposition technique in exploration in Junggar basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4): 35– 37
- 23 刘雯林. 油藏描述原理与方法技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 7~ 147
Liu Wenlin. Theory and technology on reservoir characterization[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 7– 147
- 24 冉建斌, 李建雄, 刘亚村. 基于三维地震资料的油藏描述技术和方法[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(1): 102~ 112
Ran Jianbin, Li Jianxiong, Liu Yacun. 3-D seismic-data-based reservoir description technology and methods[J]. Oil Geophysical Prospecting 2004, 39(1): 102– 112
- 25 谢用量, 唐建明, 杨振武. 地震地层反演在川西致密砂岩气藏描述中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 35(2): 228~ 235
Xie Yongliang, Tang Jianming, Yang Zhenwu. Application of seismic strata inversion in tight sandstone reservoir characterization in Western Sichuan depression[J]. Oil Geophysical Prospecting 2004, 35(2): 228– 235

(编辑 李 军)

2005年国际勘探领域^①重大油气发现^②

国家	作业者	发现处	估计可采储量 ^③ (10 ⁴ t油当量)
缅甸	Daewoo	Shwe Phyu 2	8 900
安哥拉	BP	Block 31	8 900
俄罗斯	Lukoil	Y. – Rakushechnaya	8 220
挪威	Shell	Onyx SW	6 850
澳大利亚	Woodside	Pluto	6 850
印度	ONGC	Vashista	6 400
印度	Gujarat SPC	KG – 8	N/a
澳大利亚	ConocoPhillips	Caldita	4 790
美国	Unocal	Knotty Head	3 420

注: ① 不包括美国陆上和加拿大;

② 储量规模在 (3 420 × 10⁴ t) 2. 5 × 10⁸ bbl油当量以上;

③ 储量数据来自 HS的估算结果。

(摘自《世界石油工业》)