

文章编号: 1001-1749(2023)03-0281-07

中江气田沙溪庙组“暗点”型薄砂岩储层 隐蔽机理分析及识别对策

陈思远¹, 丁蔚楠², 曹俊兴¹, 谭峰¹

(1. 成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059;

2. 中国石化 西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041)

摘要: 砂岩油气储层在地震剖面上一般表现为“亮点”, 但钻探发现四川盆地中江气田的一些砂岩储层在地震剖面上表现为“暗点”, 不易识别。这里依据钻测井资料, 采用地震正演模拟方法分析了这些储层地震响应表现为“暗点”的机制, 认为是 II b 类 AVO (Amplitude variation with offset) 响应砂岩在特定厚度的薄层调谐作用下, 在叠前道集中发生了极性反转, 从而使得原本在叠后剖面上应为较“亮点”的反射变成了“暗点”。针对这种储层隐蔽机制, 采用高分辨处理与 AVO 分析相结合的方法, 成功识别出了消隐的河道砂储层, 为“暗点”型薄砂岩储层的识别提供了可参考的成功范例。

关键词: 储层预测; 暗点; 薄储层; 隐蔽砂体; 沙溪庙组

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.01

0 引言

中江气田位于四川盆地川西坳陷中段东部斜坡, 已建产能超过 $1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$, 是川西中浅层天然气增储上产的主要阵地, 勘探开发的潜力巨大^[1-2]。前人研究发现, 该地层以浅水三角洲平原—前缘沉积体系为主, 发育多期水下分流河道, 河道内的储层厚度为 5 m~20 m, 孔隙度为 9%~12%, 属于中等孔隙度的致密砂岩储层^[3-4]。沙溪庙组发育多套单层厚度较大的叠置河道砂组, 其速度和密度都低于围岩, 当油气充填到砂岩内部之后, 纵波速度会降低, 与泥岩的波阻抗差异进一步变大, 结果是该河道砂岩气顶表现为两波峰夹一波谷的“亮点”反射。柴绪兵^[5]等利用“亮点”技术对松辽盆地太平川南地区

葡萄花油层的检测取得了较好的效果; 干大勇等^[6]利用振幅能量属性定性预测低阻抗“亮点”河道砂体的展布规律并有效区分优质砂体的分布位置; 赵迪等^[7]综合采用精细的岩石物理分析和叠后地质统计学反演实现了中江气田沙溪庙组河道砂岩储层精细定量预测。

随着开发的推进, 在部分区域发现“暗点”型隐蔽砂岩。D 井就是研究区内“暗点”薄储层的一口典型井, 钻前预测位于“亮点”河道砂体上的 layer4 层为高产气层, 弱振幅的 layer3 层为非储层 (图 1)。最后试气结果表明, “亮点”layer4 层日产气为 873 m^3 , “暗点”layer3 层反而获得高产工业气流, 日产气为 $47\ 138 \text{ m}^3$ 。该井的钻探结果揭示, 研究区存在“暗点”型隐蔽储层, 并且此类储层同样具备良好的产量, 因此“暗点”储层的识别对中江气田增产上储

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42030812, 41974160); 中国石化科技部项目(P20055-6)

第一作者: 陈思远(1996-), 男, 硕士, 主要研究油气地球物理, E-mail: 1429772965@qq.com。

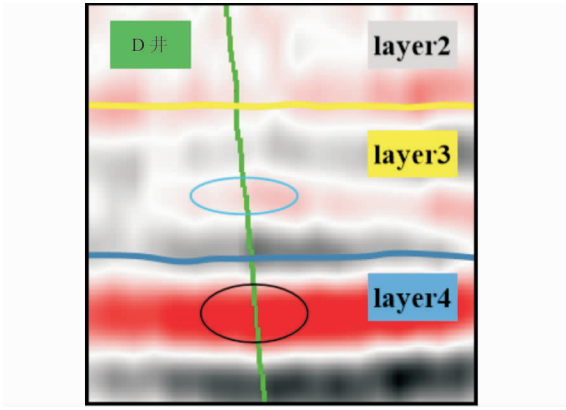


图1 过D井地震剖面

Fig. 1 Seismic section through well D

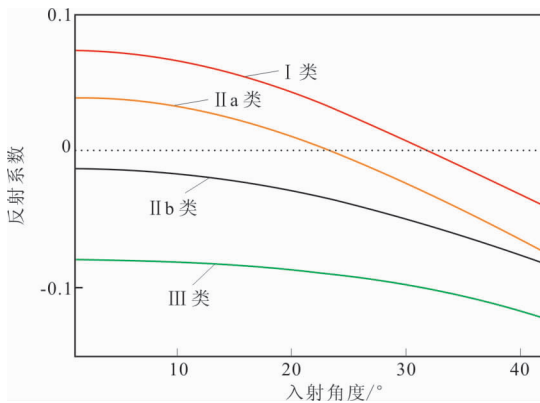


图2 I类、II类和III类 AVO 曲线

Fig. 2 Curves of class I, II and III AVO

具备重要意义。林小兵等^[8]利用地震多属性并结合神经网络和属性降维处理等技术手段在叠后预测出“暗点”型气藏的含气性；Ross 等^[9]阐述了 II 类 AVO 异常的非“亮点”储层应用 $P \times G$ 属性分析的局限性，并提出用远道与近道振幅差的 FN 属性来描述其 AVO 特征；潘光超等^[10]将 FN 属性应用于莺歌海盆地深层“暗点”型隐蔽圈闭，识别出了常规叠加剖面上具有 II 类 AVO 异常的地震弱反射特殊异常体。与常见的 II 类“暗点”型储层不同，钻遇的高产储层厚度薄，薄层调谐使得 AVO 特征改变，同相轴连续性变差，这给储层识别造成了更大的困难，为了找到更多的“暗点”隐蔽储层，笔者首先希望在不考虑厚度的情况下，从叠前道集出发模拟“暗点”砂岩储层隐蔽的成因，接着再利用楔形模型研究不同厚度薄层调谐对隐蔽河道的影响，最后采用高分辨处理方法提高薄层分辨率，结合 AVO 技术识别“暗点”型隐蔽储层，从而提高“暗点”型储层勘探的准确性。

表1 I类、II类和III类 AVO 正演模拟参数

Tab. 1 Forward model parameters of class I, II and III AVO

三参数	$V_p/m \cdot s^{-1}$	$V_s/m \cdot s^{-1}$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$
泥岩	4200	2050	2.5
I类砂岩	4800	2800	2.6
IIa类砂岩	4500	2600	2.55
IIb类砂岩	4180	2400	2.45
III类砂岩	3700	2100	2.42

1 “暗点”型薄储层特征及成因分析

“亮点”指的是在叠后地震剖面上振幅较强的区域，因为在大多数情况下砂岩较泥岩速度更低，当孔隙中充填流体后速度变的更低，上下介质波阻抗差异进一步加大，从而使得含气砂岩的振幅显得更明亮^[11]。然而并不是所有的含气砂岩均表现为“亮点”特征，部分中等阻抗的砂岩在充填流体后，通常会表现出“暗点”特征。因为地震剖面通常指的是叠后剖面，是由叠前地震数据体按偏移距叠加而成，储层是“暗点”还是“亮点”与其 AVO 类型有关。Rutherford 等^[12]基于砂岩与上覆介质的波阻抗差和上覆介质的特征，对含气砂岩划分出了三类 AVO 响应。之后 Castagna 等^[13]将其推广到低阻抗气层，引入第 IV 类砂岩，该类砂岩的反射系数随入射角的变化趋势与前三类砂岩相反。图 2 中列出了三类 AVO 曲线，第 I 类代表高阻抗砂岩、第 II a 和第 II b 类代表砂岩波阻抗与泥岩近似，第 III 类则是低阻抗砂岩，三类 AVO 正演模拟参数如表 1 所示。

对第 I、第 II a、第 II b 和第 III 类砂岩进行正演模拟，得到其叠前道集和叠后地震剖面(图 3)，结果表明，对第 I 类、第 II a 类这两种砂体接触类型而言，随着入射角的增大，其反射系数呈下降趋势，且存在着极性反转的现象，叠前道集则表现为波峰到波谷的变化。特别是第 II a 类储层，表现为弱振幅“暗点”特征，这是河道砂体隐蔽的原因之一。而第 II b 和第 III 类 AVO 的反射系数在法线入射时为负，此时随着入射角的增大，反射系数的绝对值逐渐增大，经过叠加后形成中强的波谷型“亮点”反射。

同时，薄层的调谐效应会在一定程度上改变 AVO 特征进而影响地震振幅^[14]。前人对薄层的研

究由来已久, Sengbush 等^[15] 早期发现当地震波双程旅行时等于 $1/2$ 的子波周期时反射振幅达到最大值, 并将这一现象称为“调谐”; Widess^[16] 基于零相位子波并变换薄层厚度得出结论, 当地层厚度小于地震波长的一半时, 层顶和层底的反射相互干涉使得地震波的形状和振幅都发生变化, 当楔形体变薄到波长的四分之一时, 调谐小波的振幅通过边瓣和主瓣的相长干涉达到最大值。当薄层存在时, 调谐效应会对 AVO 曲线造成影响, 因而, 我们通常碰到

的 AVO 现象大多都不是单个界面的反射, 而是经过薄层调谐干涉后的结果。

利用第 II a 类“暗点”和第 II b 类“亮点”的楔形模型模拟薄层对地震振幅的影响, 模型参数在表 2 中列出, 第 II b 类“亮点”模型参数取测井目的层的纵波、横波速度和密度平均值, 设置第 II a 类“暗点”模型进行对比研究。采用 Zoeppritz 方程完全式求解反射系数, 正演模拟网格 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、主频为 35 Hz 雷克子波。

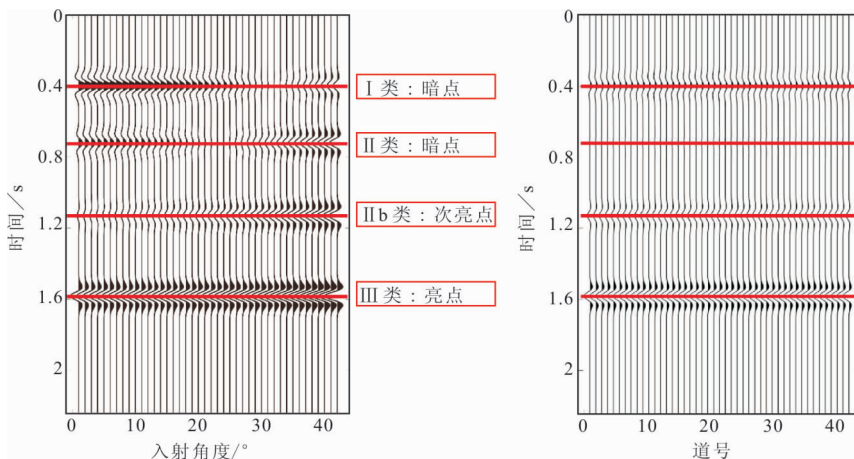


图 3 I 类、II 类和 III 类 AVO 叠前道集、叠后剖面

Fig. 3 Pre-stack gathers and post-stack profiles of class I, II and III AVO

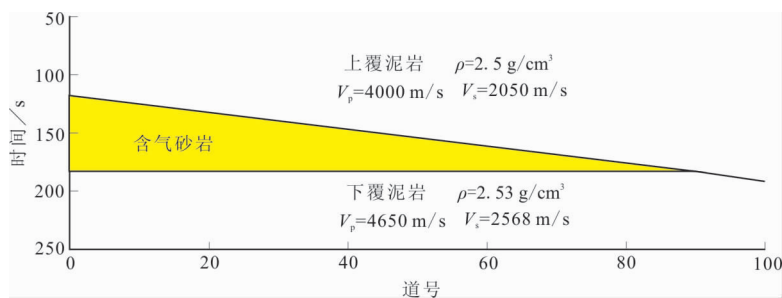


图 4 楔形模型

Fig. 4 Wedge model

表 2 两种楔形模型参数

Tab. 2 Parameters of two wedge models

AVO 类型	II a 类“暗点”			II b 类“亮点”		
	$V_p / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_s / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$V_p / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_s / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
上覆泥岩	4000	2050	2.5	4000	2050	2.5
储层	4180	2400	2.40	3980	2350	2.45
下覆泥岩	4650	2568	2.53	4650	2568	2.53

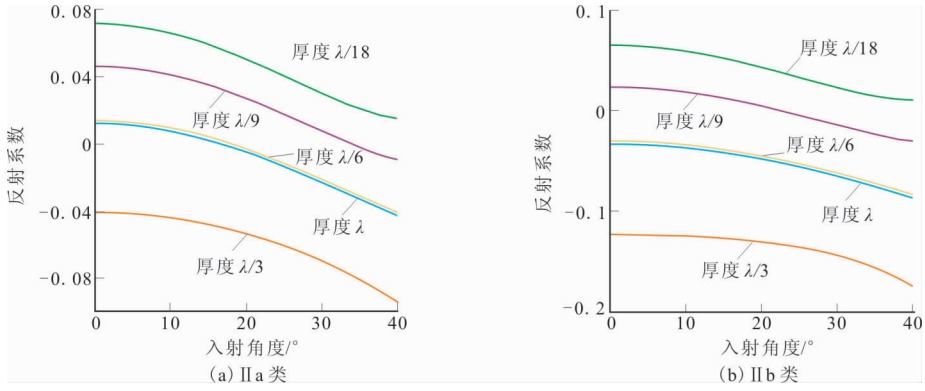


图 5 不同厚度下的 AVO 曲线

Fig. 5 AVO curves under different thicknesses

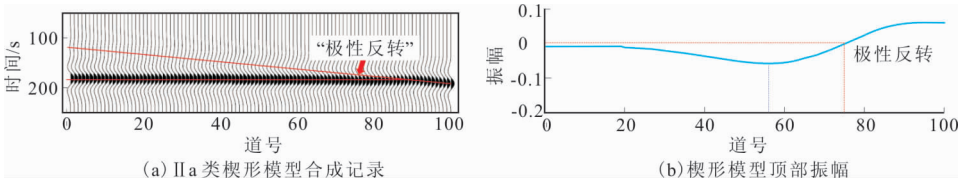


图 6 II a 类楔形模型正演模拟

Fig. 6 Forward modeling of type II a wedge model

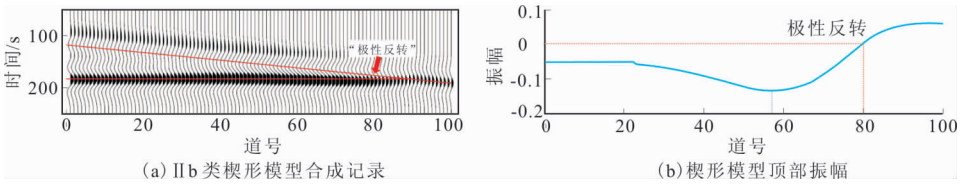


图 7 II b 类楔形模型正演模拟

Fig. 7 Forward modeling of type II b wedge model

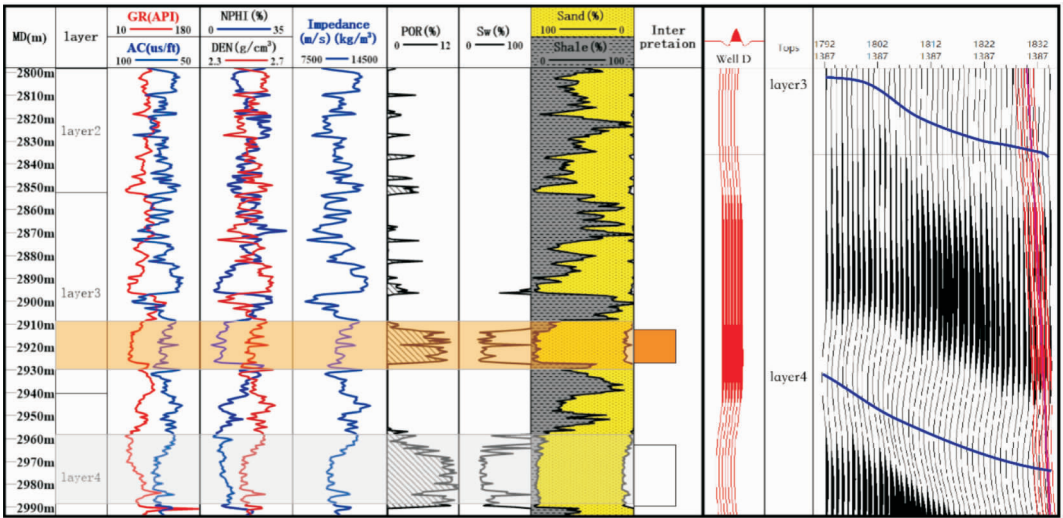


图 8 D 井地震标定

Fig. 8 Well D seismic calibration

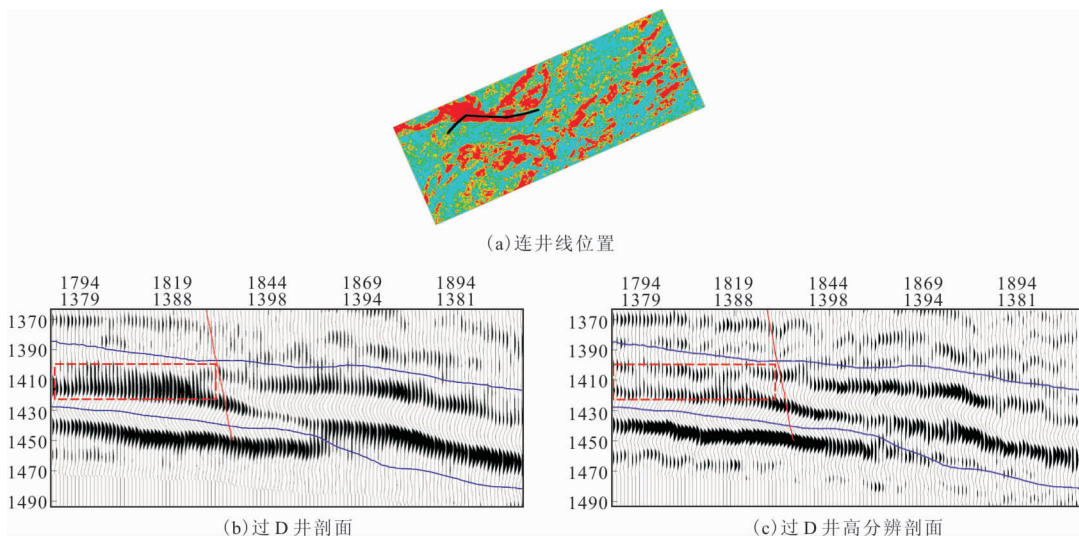


图 9 layer3 段高分辨处理前后对比

Fig. 9 Comparison before and after the layer3 segment high-resolution processing

为了研究薄层调谐对 AVO 的影响,提取不同厚度下楔形顶部反射界面振幅,得到振幅随入射角的变化曲线(图 5)。大多数情况下,AVO 曲线的趋势不会发生变化,都是随入射角的增大呈下降趋势。但是受到调谐的影响,不同厚度下的 AVO 曲线会上下移动,即当楔形厚度变薄时,AVO 曲线先向下移动,当向下移动到临界时调谐达到最大,之后曲线再向上移动。当厚度减小足够薄时,AVO 曲线会移动到厚度为 λ (此时无调谐)的 AVO 曲线上方,这会对 AVO 曲线的类型判断产生影响,具体来说,对于第 II a 类 AVO 曲线容易判断成第 I 类 AVO 响应;第 II b 类 AVO 曲线则会越过零点,也会发生极性反转,从而容易被误判为第 II a 类曲线。

图 6 和图 7 分别是第 II a“暗点”和第 II b“亮点”楔形模型正演结果。从模型中可知,第 II a 类 AVO 响应在第 76 道所对应的厚度($\lambda/6$)发生极性反转。第 II b 类也会发生与第 II a 类曲线类似的极性反转现象,只不过第 II b 类极性反转的厚度更薄,大约在 $\lambda/9$ 发生极性反转。

利用 D 井伽马、速度、密度等测井曲线进行合成记录标定(图 8),目的层(layer3 层)在地震剖面为中弱波峰响应,从 D 井相对波阻抗关系可以判断该井 layer3 层为第 II b 类 AVO 响应,我们知道第 II b 类 AVO 在叠后剖面通常是中等波谷型“亮点”,但是在井震标定的叠后地震剖面却对应着波峰反射。这说明该段储层的“暗点”是不仅由波阻抗关系决定,还受储层厚度地影响。测井资料显示,井中沙溪庙组 layer3 段高产砂体厚度约为主波长 $\lambda/10$,

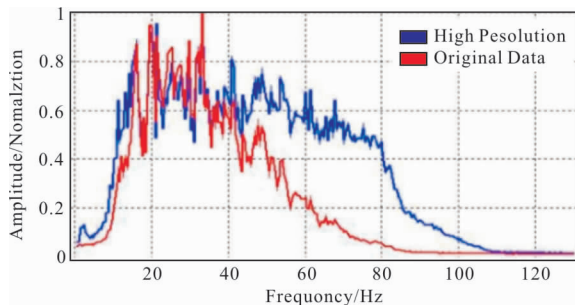


图 10 高分辨处理前后频谱对比

Fig. 10 Spectrum comparison before and after high-resolution processing

比图 6 中第 II b 类“亮点”极性反转的临界厚度($\lambda/9$)小,因此受调谐的影响下,D 井 layer3 层原本是第 II b 类接触关系的高产薄砂体在叠前道集上发生极性反转,呈现出类似于第 II a 类 AVO 的响应特征,从而使得原本在叠后剖面上较亮的地震反射变成“暗点”。

2 “暗点”型薄储层识别方法与应用效果

“暗点”型储层具有弱振幅、弱连续性的地震反射特征,通过叠后“亮点”技术无法准确刻画此类砂岩,并且此类砂岩与围岩波阻抗差异不大,常规叠后预测技术无法准确地识别储层。对此类储层的识别通常是从叠前道集入手,利用远道与近道振幅差的 FN 属性进行刻画,然而工区薄层调谐会改变 AVO 的类型,因而识别“暗点”型薄储层的首要任务,是消除薄层的调谐来提升薄层分辨率。这里将时变分频反褶积反演的反射系数与宽频地震子波褶积获得高

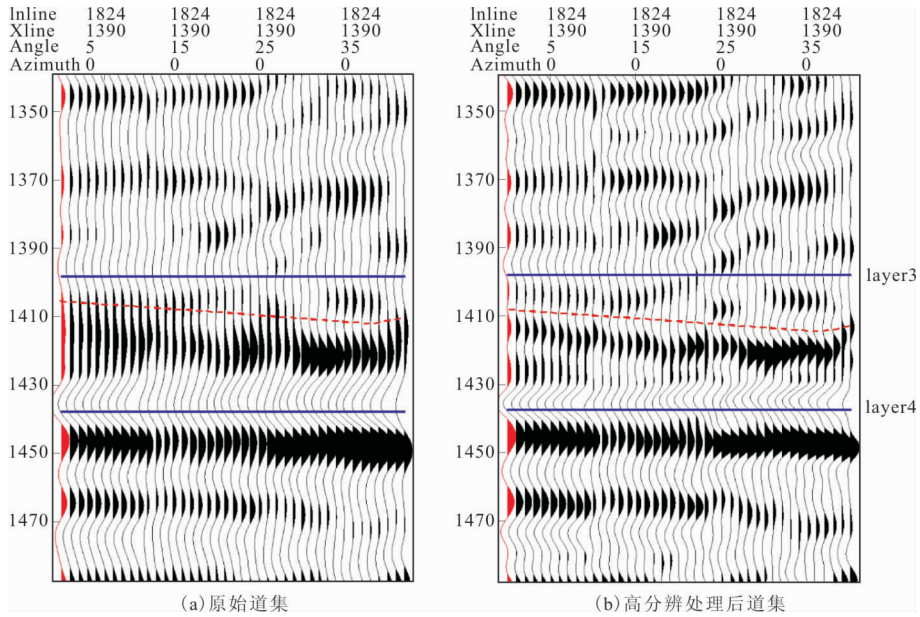


图 11 高分辨处理前后叠前道集对比

Fig. 11 Comparison of gathers before and after high-resolution processing

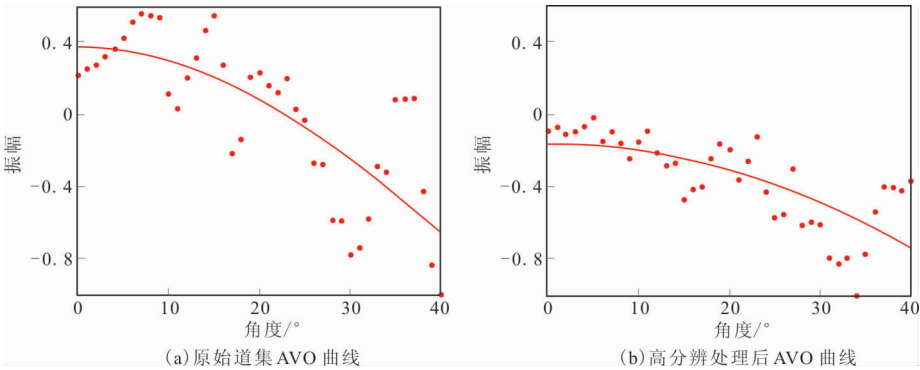


图 12 高分辨处理前后 AVO 曲线对比

Fig. 12 Comparison of AVO curves before and after high-resolution processing

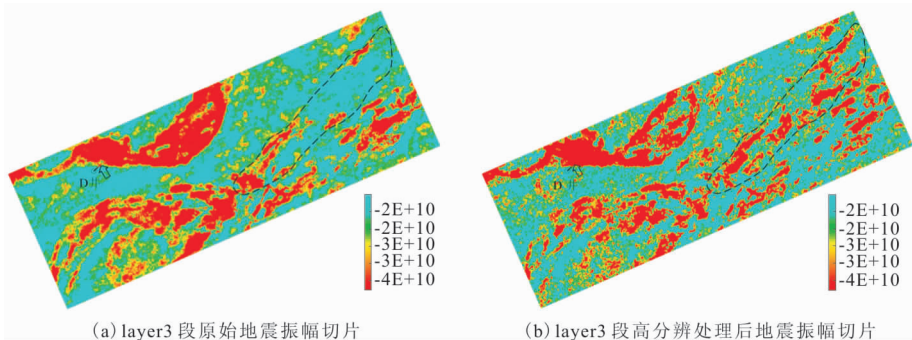


图 13 layer3 段平面对比图

Fig. 13 Plane comparison of layer3 section

分辨地震数据,之后再通过 AVO 技术检测第 II b 类“暗点”薄储层;反射系数反演的关键是子波的选择,具体参数如下:子波提取的间隔为 200 ms,子波

长度为 160 ms(地震采样率 1 ms)噪声系数为 0.1。通过对图 9 中沙溪庙组高分辨处理前后剖面的对比发现,D 井左侧波峰得到分离,出现两个波峰夹一波

谷,与右侧的波谷相互连通,说明薄层的调谐效应被有效消除。图 10 是高分辨处理前后频谱对比图,在经过高分辨处理后低频得到很好地保留,同时高频也被拓宽,地震主频提升到了 50 Hz。

在原始叠前道集上(图 11(a))反射比较杂乱,整体趋势来看,AVO 为第 II a 类 AVO 特征(图 12(a)),叠加后为弱波峰型的“暗点”反射,在经过高分辨处理后目的层叠前道集波谷得到分离(图 11(b)),AVO 曲线相对于原始道极向下移动,呈第 II b 类特征(图 12(b)),这说明高分辨处理消除了薄层对 AVO 的影响,使得“暗点”薄储层在叠后由弱波峰型“暗点”恢复到了中等波谷型“亮点”。

图 13 是研究区 layer3 段勘探有利区平面对比图,红色调属于河道砂体,是良好的储层。其中,原始采集的地震数据切片河道轮廓比较模糊,连续性差,细节缺失不丰富。这是因为原始地震资料分辨率较低,无法有效识别薄砂体;而经过高分辨方法处理之后的切片,河道细节更加丰富,隐蔽河道砂体的轮廓得以显现。同时,D 井井底(图 13 箭头处)也被恢复到“亮点”河道内部,这与测井预测结果吻合。

3 结论

中江气田沙溪庙组薄储层“暗点”砂岩较为发育,笔者主要从正演模拟上说明了原本不存在极性反转的第 II b 类 AVO 响应的砂岩,在薄层调谐的影响下也会发生极性反转,呈现第 II a 类砂岩 AVO 响应特征,使得近道、远道振幅相互“消隐”,从而造成河道的隐蔽。最后,通过高分辨处理将“暗点”型薄储层的弱波峰型“暗点”反射恢复到了中等波谷型“亮点”,证实原本认为不在河道上的高产气井 D 实际是位于河道边缘,并且使河道细节也得到了更精细地刻画。

参考文献:

[1] 段永明,曾焱. 窄河道致密砂岩气藏高效开发技术—以川西地区中江气田中侏罗统沙溪庙组气藏为例[J]. 天然气工业,2020,40(05): 58—65.
DUAN Y M,ZEN Y. Technologies for the efficient development of tight sandstone gas reservoirs innarrow channels: a case study of middle jurassic Shaximiao formation gas reservoir in the Zhongjiang gas field of western Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2020,40(05): 58—65. (In Chinese)

[2] 曾焱,黎华继. 川西坳陷东坡中江气田沙溪庙组复杂

“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J]. 天然气勘探与开发,2017,40(04): 1—8.

ZEN Y,LI H J. High—yield enrichment laws of Shaximiao formation tight sandstone gas reservoir of complex "narrow" channel in Zhongjiang gas field,in the eastern slope of West Sichuan Depression[J]. Natural Gas Exploration and Development,2017,40 (04): 1—8. (In Chinese)

- [3] 衡勇,王勇飞,刘成川,等. 中江气田沙溪庙组河道砂岩气藏低阻气层成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(05): 582—589.
HEN Y,WANG Y F,LIU C C,et al. Genes— is of low — impedanre gas reservoirs in Shaximiao formation channel sandstone gas reservoirs of Zhongjiang gas field,Sichuan basin,China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & technology edition),2020,47 (05): 582—589. (In Chinese)
- [4] 刘成川,陈俊. 中江气田沙溪庙组气藏致密砂岩储层测井评价[J]. 石油物探,2020,59(01):131—140.
LIU C C,CHEN J. Logging evaluation of the tight sandstone reservoir in the gas reservoir of the Shaximiao formation within Zhongjiang gas field,China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2020,59 (01): 131—140. (In Chinese)
- [5] 柴绪兵. “亮点”、“暗点”技术在太平川南地区葡萄花油层油气检测中的应用效果分析[J]. 科学技术与工程,2012,12(09):2132—2136.
CHAI X B. The Effectiveness analysis of using "bright spots","dim spots" technique to test oil and gas in Putaohua reservoir of Taipingchuan region[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12 (09): 2132 — 2136. (In Chinese)
- [6] 干大勇,黄天俊. 地震振幅能量表征河道砂体及其储层物性—以川中地区中侏罗统沙溪庙组为例[J]. 天然气工业,2020,40(10): 38—43.
GAN D Y,HUANG T J. Characterization of channel sand body and its reservoir physical properties based on seismic amplitude energy: a case study of the middle jurassic Shaximiao formation in the central Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (10): 38 — 43. (In Chinese)
- [7] 赵迪. 中江气田沙溪庙组河道砂岩储层定量预测[J]. 物探化探计算技术,2017,39(5):657—662.
ZHAO D. Quantitative prediction of channel sandstone reservoirs in Shaximiao formation of zhongjiang gas field[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2017,39 (5):657—662. (In Chinese)

- [8] 林小兵,刘莉萍. 利用地震多属性分析技术预测“暗点”型含气储层[J]. 新疆地质,2007(02):183—186.
LIN X B, LIU L P. Application of seismic multiple attributes analysis technology in the exploration of dim-spot gas-bearing reservoirs [J]. Xinjiang Geology, 2007(02):183—186. (In Chinese)
- [9] ROSS, C. P., D. L. KINMAN, Nonbrightspot AVO: Two examples[J]. Geophysics, 1995(60):1398—1408.
- [10] 潘光超,邓勇. 莺歌海盆地深层“暗点”型隐蔽圈闭识别方法[J]. 石油地球物理勘探,2018,53(05): 883, 1014—1021,1030.
PAN G C, DENG Y. Dim spot subtle trap identification in Yinggehai basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53 (05): 883, 1014—1021, 1030. (In Chinese)
- [11] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 大庆: 中国石油大学出版社,2006.
LU J M. Principles of seismic exploration [M]. Daqing: China University of Petroleum Press, 2006. (In Chinese)
- [12] 赵伟. 薄互层调谐效应对 AVO 的影响[J]. 石油物探, 2006,45(6):570—574.
ZHAO W. Effect of thin interbed tuning on AVO[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45 (6): 570—574. (In Chinese)
- [13] RUTHERFORD S R, WILLIAMS R H. Amplitude-versus offset variations in gas sands[J]. Geophysics, 1989,54(6): 680—688.
- [14] 刘立彬. 基于正演模型的砂泥岩薄互层 AVO 特征分析[J]. 石油地球物理勘探,2019,54(6):1246—1254.
LIU L B. Thin interbed AVO characteristics analysis based on forward model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54 (6): 1246—1254. (In Chinese)
- [15] SENBUSH R L, LAWRENCE P L. Interpretation of synthetic seismograms[J]. Geophysics, 1961, 26(2): 138—157.
- [16] WIDESS M B. How thin is a thin bed? [J]. Geophysics, 1973, 38(6):1176—1180.

Concealed mechanism analysis and identification countermeasures of dim—spot thin sandstone reservoir in Shaximiao formation of Zhongjiang gas field

CHEN Siyuan¹, DING Weinan², CAO Junxing¹, TAN Feng¹

(1. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Exploration and Development Research Institute, Sinopec Southwest Oil and Gas Branch Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Gas Sandstone reservoirs generally appear as bright spots on seismic profiles. However, drilling has discovered that some sandstones of the Shaximiao Formation in the Zhongjiang Gas Field in the Sichuan Basin are dim spots that are difficult to identify. Based on logging data, the paper uses the seismic forward model to analyze the mechanism of the seismic response of these dim spot reservoirs. It is believed that polarity reversal occurs in the pre-stack gathers for the Type II b sandstone under the influence of thin-bed tuning of a certain thickness, making the bright amplitude on the post-stack profile dark. Aiming at this kind of reservoir, combining high-resolution processing and AVO analysis was used to successfully identify hidden channel sand reservoirs. This provided a successful example for identifying thin dim spot reservoirs.

Keywords: reservoir prediction; dim spot; thin-bed tuning effect; hidden sandstone reservoir; Shaximiao formation