于正军,张军华,周昊,等. 准噶尔盆地东南缘页岩油储层脆性预测与评价. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1711-1723. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230140.

Yu Zhengjun, Zhang Junhua, Zhou Hao, et al. Brittleness Prediction and Evaluation of Shale Oil Reservoir in Southeastern Margin of Junggar Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54 (5):1711-1723.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230140.

准噶尔盆地东南缘页岩油储层脆性预测与评价

于正军[1],张军华[2],周 昊[2],任瑞军[1],陈永芮[2],杨玉龙[1]

1.中石化胜利油田分公司物探研究院,山东 东营 257022

2.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580

摘要:准噶尔盆地东南缘二叠系中下部发育页岩油致密储层,脆性预测与评价对其勘探和开发有重要意义。本文利用岩石物理实验、测井资料和叠前地震资料计算了准噶尔盆地东南缘二叠系页岩油致密储层脆性指数,对Rickman经典公式法、杨氏模量与泊松比比值法、拉梅系数法和剪切模量法进行了比较、分析与评价。研究认为:1)杨氏模量相对泊松比对岩性有更好的区分度,由拉梅系数表征的泥岩分布率较高;2)根据文献所得测井多参数计算脆性指数的方法应用效果不佳,在Castagna经验公式换算横波速度基础上计算的脆性指数具有较好的应用效果;3)由YPD(Young's modulus - Poisson's ratio - density)式和LMR(拉梅系数-密度)式反演的弹性参数变化率也能较好地指示有利储层,尤以密度变化率为最佳,该属性在扇三角洲前缘及分流河道特征上得到很好的展示;4)岩石物理实验和实际资料应用均表明,$\rho E/\sigma$ 为研究区脆性的最佳表征公式,效果好于Rickman经典公式与其他方法。

关键词:准噶尔盆地;致密储层;页岩油;岩石物理实验;横波速度;杨氏模量;泊松比;脆性指数

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230140 **中图分类号**:P631.4 **文献标志码**:A

Brittleness Prediction and Evaluation of Shale Oil Reservoir in Southeastern Margin of Junggar Basin

Yu Zhengjun[1], Zhang Junhua[2], Zhou Hao[2], Ren Ruijun[1], Chen Yongrui[2], Yang Yulong[1]

1. *Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying* 257022, *Shandong, China*

2. *School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *Shandong, China*

Abstract: Shale oil tight reservoirs are developed in the middle and lower part of Permian in southeastern margin of Junggar basin. Brittleness prediction and evaluation are of great significance to its exploration and development. In this paper, the brittleness index of Permian tight reservoir in southeastern margin of Junggar basin is calculated by using petrophysical experiments, well logging data and prestack seismic data, and the Rickman classical formula method, the method of ratio of Young's

收稿日期:2023-05-30

作者简介:于正军(1968—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事油气藏勘探综合研究,E-mail:yuzj_789@163.com

通信作者:张军华(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事石油物探的教学与研究工作,E-mail:zjh@upc.edu.cn

基金项目:中石化先导项目(P21007);国家自然科学基金项目(42072169)

Supported by the Sinopec Pilot Project (P21007) and the National Natural Science Foundation of China (42072169)

modulus and Poisson's ratio, the Lamé coefficient method and the shear modulus method are compared, analyzed and evaluated. The results show that: 1) Compared with Poisson's ratio, Young's modulus has a better discrimination of lithology, and the mudstone distribution resolution represented by Lamé coefficient is higher; 2) The method of calculating brittleness index based on logging multi-parameters obtained in the literature has a poor application effect, but the brittleness index calculated on the basis of converting shear wave velocity by Castagna's formula has a good application effect; 3) The change rates of elastic parameters inverted by YPD (Young's modulus - Poisson's ratio - density) formula and LMR (Lamé coefficient - density) formula can also indicate favorable reservoir, especially the density change rate is the best, and the characteristics of upper fan delta front and distributary channel can be well demonstrated by this attribute; 4) Petrophysical experiments and actual data applications show that $\rho E/\sigma$ is the best characterization formula of brittleness in the study area, and the effect is better than Rickman's classic formula and other methods.

Key words: Junggar basin; tight reservoir; shale oil; petrophysical experiment; shear wave velocity; Young's modulus; Poisson's ratio; brittleness index

0 引言

脆性是非常规油气藏勘探开发的重要参数,反映物体受力变形时发生破裂的性质,与延性、弹性、塑性等都属于岩石的力学特性。脆性大小一般通过脆性指数来衡量,其计算方法主要包括矿物含量占比法、岩石物理实验测量法、测井资料换算法和地震叠前反演法等。Rickman 等[1]对杨氏模量和泊松比进行归一化并取二者的平均值作为脆性指数。Goodway 等[2]用拉梅常数进行组合来表示脆性指数。Guo 等[3]利用杨氏模量和泊松比的比值描述脆性。张丰麒等[4]将 Zoeppritz 方程推广为 EI-Zoeppritz 方程,直接反演脆性指数。Zhang 等[5]基于 AVO(amplitude variation with offset)理论和多孔介质理论推导出脆性反演方程。张瑞等[6]使用幂指数经验公式代替 Aki 近似方程中的密度项,建立了一套直接反演岩石脆性参数的方法。刘庆等[7]将灰色关联方法与层次分析相结合,为脆性指数的预测提供了新思路。

在前人研究的基础上,本文从准噶尔盆地(简称准)东南缘取心井的岩石物理实验出发,分别用 Rickman 经典公式法、杨氏模量与泊松比比值法、拉梅系数法等方法计算脆性指数,分析脆性指数的分布特点;采用测井多参数法,以声波时差转换得到的纵波速度和多种方法获得的横波信息计算井的脆性指数,并与录井进行对比验证;优选角度域的叠前数据体,利用小、中、大三个角度的叠前资料直接反演弹性参数变化率数据体,并由此估算脆性,开展测井约束弹性参数叠前反演;最后对变化率(反射系数)预测的脆性指数和弹性参数反演的脆性指数进行分辨率与信噪比评价,为研究区二叠系致密油的勘探开发以及类似勘探新区开展脆性预测提供参考。

1 研究区概况

准噶尔盆地东南缘发育多个残留凹陷,包括石钱滩凹陷、梧桐窝子凹陷、木垒凹陷、古城凹陷、吉南凹陷、吉木萨尔凹陷、石树沟凹陷等(图 1)。其中:吉木萨尔凹陷已探明丰富的二叠系页岩油地质储量,实现了规模化勘探开发[8];石钱滩凹陷石钱 1 井发现了自生自储的石炭系碎屑岩构造-岩性油气藏;

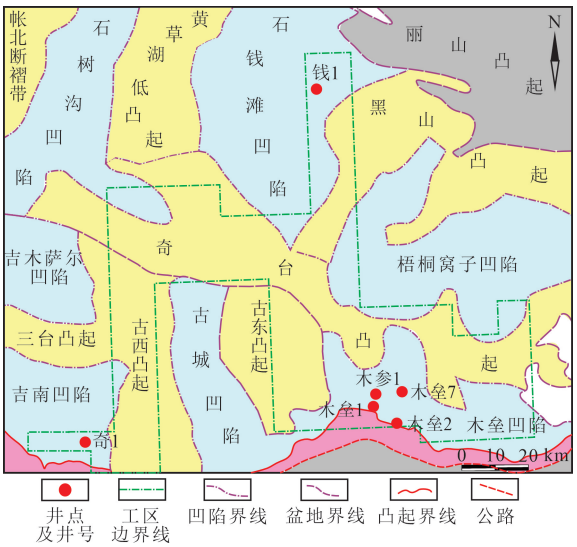


图 1 准东南区域位置及部分井位分布

Fig.1 Location of southeast Junggar basin and distribution of some wells

吉南凹陷萨探 1 井在二叠系钻遇了 371 m 厚的烃源岩[9]。石钱滩凹陷钱 1 井，木垒凹陷木参 1 井、木垒 1 井和木垒 2 井近来又有了新的油气发现，这也展示了准东南缘良好的油气勘探前景。

准东南二叠系以沙奇凸起为界，北部一般以平地泉组(P_2p)命名，南部以芦草沟组(P_2l)命名[10]。不同区块岩性有所不同，吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组主要发育湖相云质混积岩，石树沟凹陷平地泉组白云石、方沸石体积分数较高，发育灰岩、砂岩及砂砾岩[8-13]。准东南二叠系储层具有邻源供烃、自生为主、原位聚集的典型陆相页岩油特点[14]。

对于致密油勘探开发来说，储层描述除了物性、含油性以外，脆性也是重要的衡量指标。准东南区块地域辽阔，勘探面积达 8 674 km^2，但已钻探井较少。充分利用有限的取心、录井、测井与地震资料开展脆性指数计算与评价，具有客观必要性。

2　基于岩石物理实验的脆性计算与评价

利用岩石物理实验测试岩石样品的杨氏模量、泊松比，再根据 Rickman 经典公式(表 1)即可计算岩石的脆性指数[1]。还可以根据弹性参数的物理含义，计算表征脆性特性的属性(它们的量值不在[0，1]之间，本文称之为类脆性指数)，如表 1 中的杨氏模量与泊松比比值法[3]、拉梅系数法[2]与剪切模量法[2]。

对研究区 29 块岩样进行岩石物理实验，测得弹性参数与岩样的岩性分布如图 2 所示。从图 2 可以看出，泥岩杨氏模量小、泊松比大、拉梅系数小，根据表 1 公式分析可知，脆性指数小；反之，砂岩、灰岩等，杨氏模量大、泊松比小、拉梅系数大，脆性强。对图 2a 进一步观察还能发现，杨氏模量相对泊松比对岩性有更好的区分度；从图 2b 可以看出，由拉梅系数表征的泥岩分布更集中，分辨率高于杨氏模量-泊松比分布。

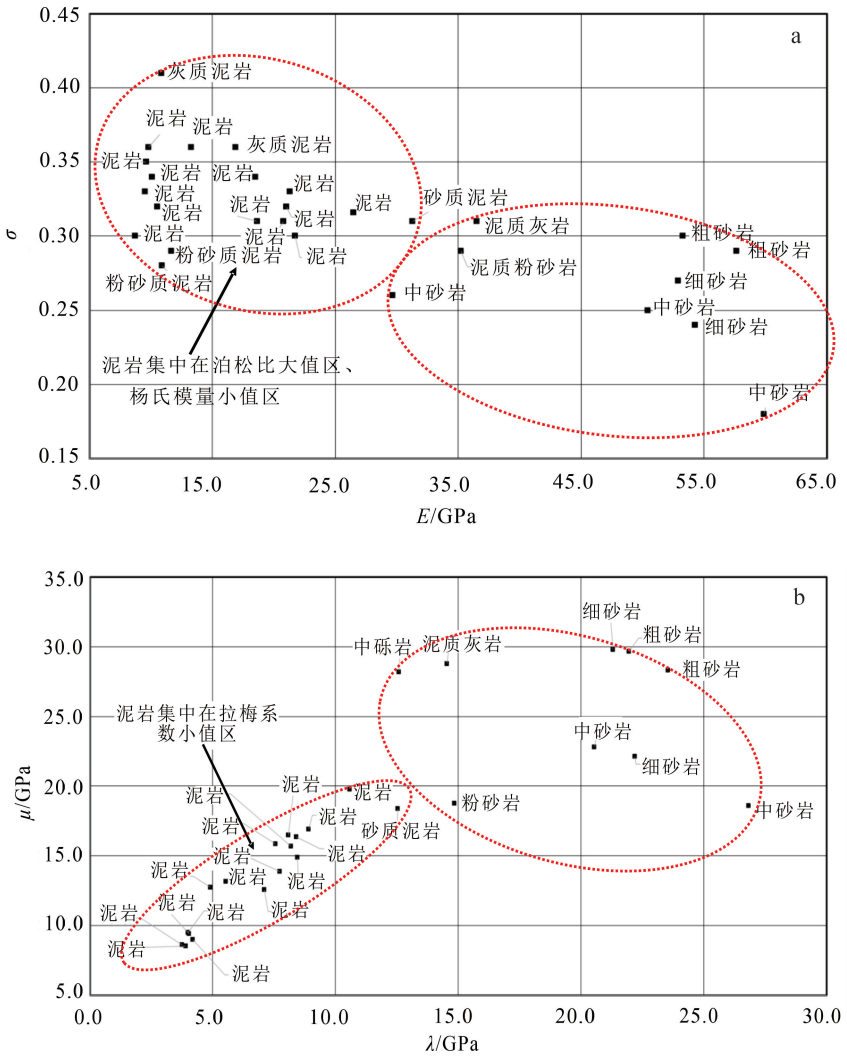
用表 1 所示公式计算每块样品的脆性或类脆性指数，按同一顺序排列，结果如图 3 所示。由图 3a 可以看到：1)泥岩与非泥岩(灰岩、砂岩等)的脆性指数有较好的区分度；2)泥岩的平均脆性指数为 0.251，非泥岩的平均脆性指数为 0.696，二者比值为 2.77，一定程度上可反映区分岩性的能力。图 3b 基本结论同图 3a，非泥岩与泥岩的类脆性指数均值比为 4.19，高于第一种方法。由图 3c 可以看到，21 号灰岩、23 号砾岩的类脆性指数低于泥岩，这是反常规的错误结果，而且非泥岩与泥岩的类脆性指数均值比为 1.32，是 4 种方法中最低的。图 3d 中 20 号泥岩样本与后续砾岩样本也很难区分，不过非泥岩与泥岩的类脆性指数均值比为 3.03，处于 4 种方法的第 2 位。综合以上认识，4 种脆性指数评价方法中，杨氏模量与泊松比比值法云质岩、灰岩、砂岩等岩性的杨氏模量大、泊松比小，具有放大甜点的效应，区分泥岩与非泥岩的能量最强，为最佳表征方法，其次为剪切模量法，再次为 Rickman 经典公式法，拉梅系数法最差。

表 1　不同弹性参数脆性表征公式

Table 1　Brittleness characterization formulas of different elastic parameters

方法	表征公式	物理含义	年份	作者
Rickman 经典公式法	$I_{b1}=\frac{1}{2}\left(\frac{E-E_{min}}{E_{max}-E_{min}}+\frac{\sigma-\sigma_{max}}{\sigma_{min}-\sigma_{max}}\right)$	较大的杨氏模量、较小的泊松比表示脆性强，计算时考虑归一化	2008	Rickman 等[1]
杨氏模量与泊松比比值法	$I_{b2}=\rho\frac{E}{\sigma}$	用杨氏模量与泊松比的比值来表征脆性，杨氏模量大，泊松比小，脆性大	2012	Guo 等[3]
拉梅系数法	$I_{b3}=\frac{\lambda+2\mu}{\lambda}=\frac{1-\sigma}{\sigma}$	用拉梅系数间接表征脆性，μ 值大，λ 值小，泊松比小，脆性大	2010	Goodway 等[2]
剪切模量法	$I_{b4}=\mu=\frac{E}{2(1+\sigma)}$	剪切模量可间接反映脆性，杨氏模量大，泊松比小，间接表示脆性强	2010	Goodway 等[2]

注：E. 杨氏模量；σ. 泊松比；ρ. 密度；λ、μ. 拉梅系数，λ(拉梅常数)表示压缩性，μ(剪切模量)表示刚性；I_{b1}、I_{b2}、I_{b3}、I_{b4}.(类)脆性指数。



a. 杨氏模量、泊松比与岩性分布图;b. 拉梅系数与岩性分布图。

图2 准东南岩石物理实验弹性参数与岩性分布图

Fig.2 Elastic parameters and lithology distribution map of petrophysical experiment in southeast Junggar basin

3 测井多参数脆性计算与比较

3.1 测井多参数经验公式直接计算脆性指数

一口井的取心段有限,而且也不是每口井都取心,因此,用岩石物理实验计算脆性是很有限的。测井是评价储层的很好手段,井的脆性指数可通过测井参数计算得到。

袁思乔等[15]在研究松辽盆地大情字井油田白垩系青山口组一段致密砂岩储层时,得出了声波时差 AC(A_C)、密度 DEN(ρ)、电阻率(R_t)、自然伽马 GR(G_R)、补偿中子 GNL(C_{nl})等5种测井参数与脆性指数的关系,其中 ρ、R_t 与脆性正相关,其他三种测井曲线与脆性负相关,测井曲线计算前都做归一化处理,计算公式为

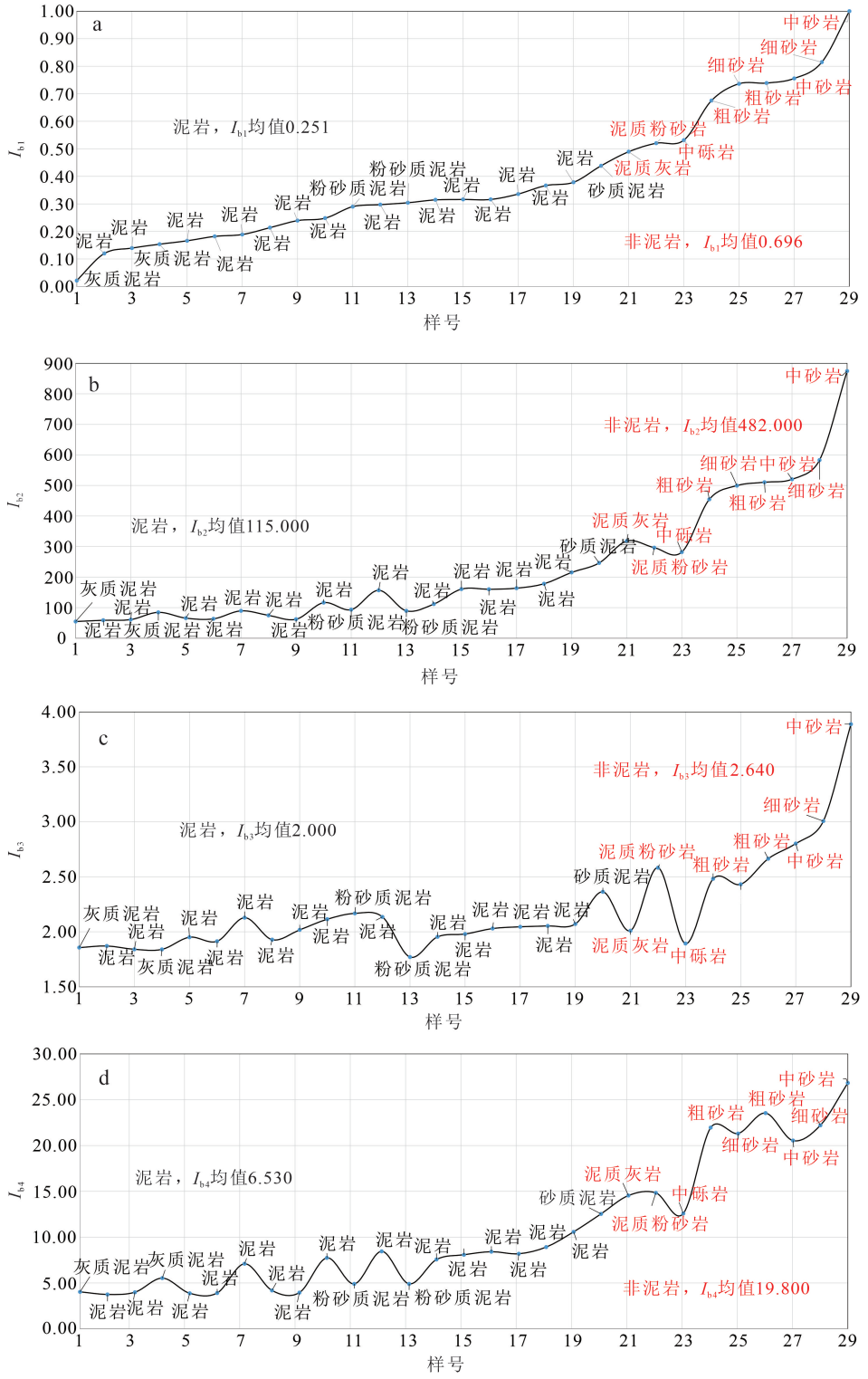
$$I_{bw1}=\frac{1}{5}\left(0.32\rho+0.13R_t+\frac{0.41}{A_C}+\frac{0.08}{C_{nl}}+\frac{0.06}{G_R}\right)\times 100\%。\quad(1)$$

付娟娟等[16]研究了山西沁水盆地石炭系—二叠系页岩储层脆性指数与测井响应间的关系,得出以下关系式:

$$I_{bw2}=33.6\rho-0.05R_t-8.6G_R-0.01A_C。\quad(2)$$

3.2 利用横波速度换算脆性指数

利用声波时差可以换算纵波速度,如果有横波时差,可用弹性参数之间的关系获取杨氏模量与泊松比,进而计算井段的脆性指数。



a. Rickman 经典公式法；b. 杨氏模量与泊松比比值法；c. 拉梅系数法；d. 剪切模量法。

图 3　岩石物理实验 4 种脆性指数表征结果

Fig.3　Results of four kinds of brittleness index in petrophysical experiment

$$E=\rho\frac{3v_P^2-4v_S^2}{(v_P/v_S)^2-1};\tag{3}$$

$$\sigma=\frac{0.5(v_P/v_S)^2-1}{(v_P/v_S)^2-1}。\tag{4}$$

式中：v_S 为横波速度；v_P 为纵波速度。

3.2.1 利用横波速度与其他测井曲线的统计关系获取

杨秀春等[17]在研究鄂东气田韩城矿区煤岩地层时，得出了横波时差与纵波时差、密度的如下关系：

$$\Delta t_S=\frac{\rho\Delta t_P^2}{0.4105\Delta t_P+322.36\rho-478.41}。\tag{5}$$

式中：Δt_S 为横波时差；Δt_P 为纵波时差。

孙玉凯等[18]在研究吐哈油田胜北地区的岩性油气藏时，得到了横波时差与补偿中子、电阻率、密度之间的关系：

$$\Delta t_S=215.69\frac{C_{nl}\rho}{R_t}+111.34。\tag{6}$$

赵炎[19]给出了横波时差的以下计算公式：

$$\Delta t_S=\frac{\Delta t_P}{\{1-1.15[(1/\rho+1/\rho^3)/(e^{\frac{1}{\rho}})]\}^{1.5}}。\tag{7}$$

3.2.2 利用岩石物理实验横波与纵波速度关系获取

Castagna 等根据不同岩性，给出了不同换算公式[20]：

1)白云岩地层：

$$v_S=0.583v_P-0.078。\tag{8}$$

2)饱含水净砂岩：

$$v_S=0.804v_P-0.856。\tag{9}$$

本文通过准东南 4 口井 29 块岩样的岩石物理实验，统计出了横波速度与纵波速度的关系(图 4)：

$$v_S=579.18e^{0.0003v_P}。\tag{10}$$

从图 4 可以看出，横波速度与文献[17－20]给出的规律类似，基本呈线性关系，拟合度较高。

3.3 研究区井脆性指数计算与比较

以钱 1 井二叠系平地泉组云质岩甜点段和木垒 1 井芦草沟组二段 2 砂组滩坝砂储层、一段 2 砂组扇三角洲砂体为研究对象，用多种方法计算脆性指数，并进行比较和评价。

3.3.1 钱 1 井

对于钱 1 井，首先直接由测井多参数计算脆性指数 I_{bw1}(式(1))、I_{bw2}(式(2))(图 5)。分析可知：1)I_{bw1} 集中在几个峰值，DEN 与 R_t 曲线的贡献率很高，部分异常漏检(如 DEN 曲线所在 325 m 处的白云质灰岩)；2)I_{bw2} 存在负值，甜点段曲线缺乏差异性，不适合钱 1 井区，原因是计算公式的系数对研究工区不合适。

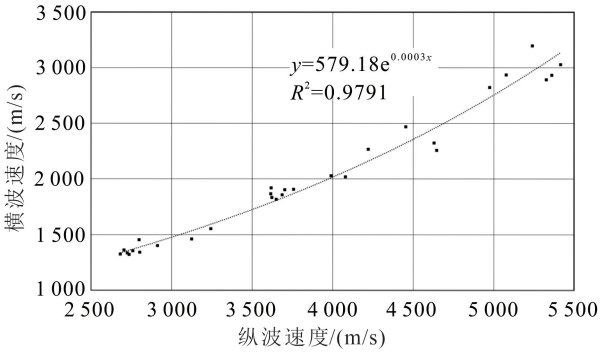


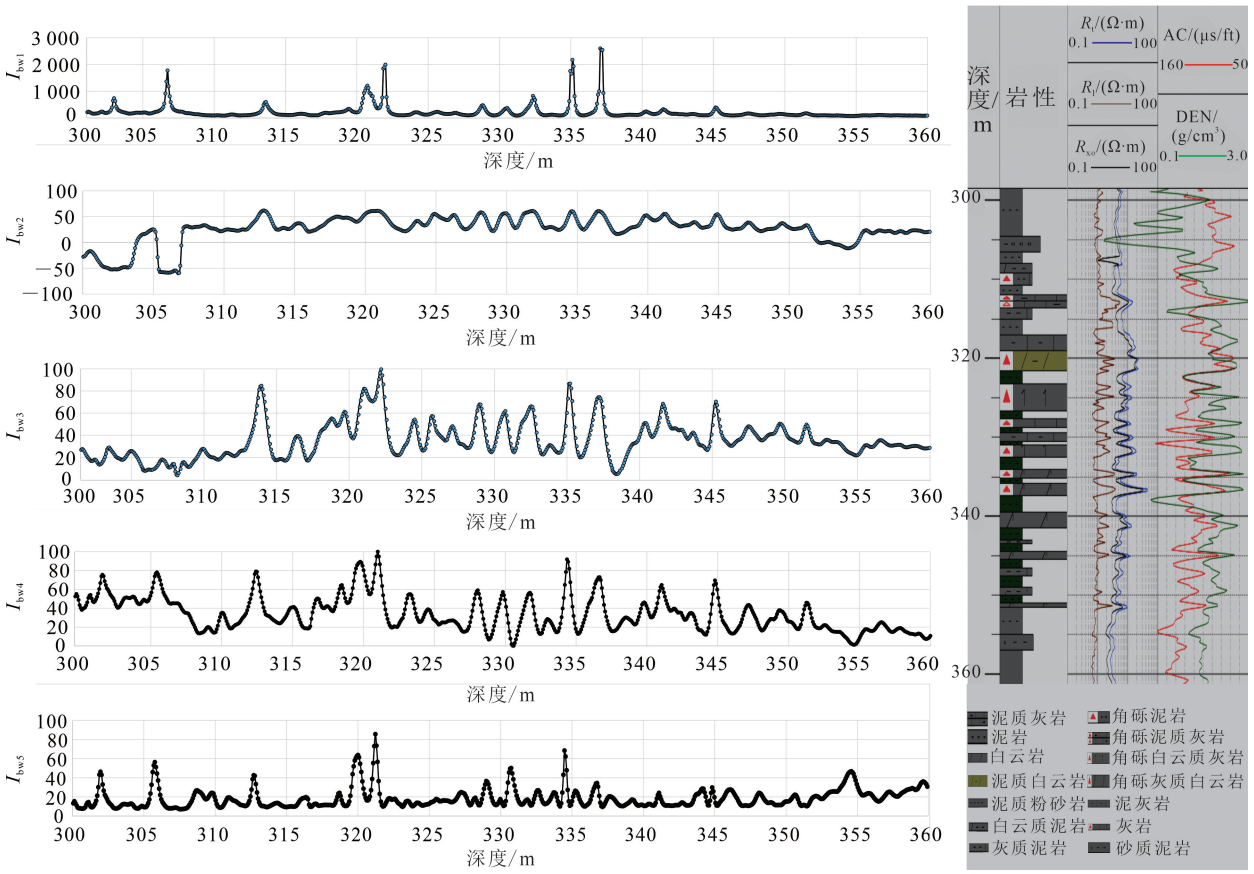
图 4 准东南横波速度与纵波速度关系

Fig. 4 Relationship between S-wave velocity and P-wave velocity in southeast Junggar basin

然后分别利用赵炎经验公式、Castagna 经验公式和岩石物理实验方法计算脆性指数，即 I_{bw3} 由式(7)换算，I_{bw4} 由式(8)换算，I_{bw5} 由式(10)换算(图 5)。纵波速度从测井数据中获取，根据式(3)(4)分别计算杨氏模量和泊松比，再利用 Rickman 经典公式计算脆性(为了便于数值比较，不采用表 1 中其他方法)。可以看出：1)I_{bw3}、I_{bw4} 曲线特征基本类似，I_{bw4} 在 306 m R_{xo} 曲线处的泥质粉砂岩得到有效识别，效果好于 I_{bw3}；2)岩石物理实验得到的 I_{bw5} 总体与录井吻合较好，但 355 m 处 R_t 曲线处的泥岩脆性偏高。概括来说，对于钱 1 井区，因为目的层段云质岩发育，取心又少，由 Castagna 经验公式统计分析白云岩纵横波速度关系为佳。

3.3.2 木垒 1 井

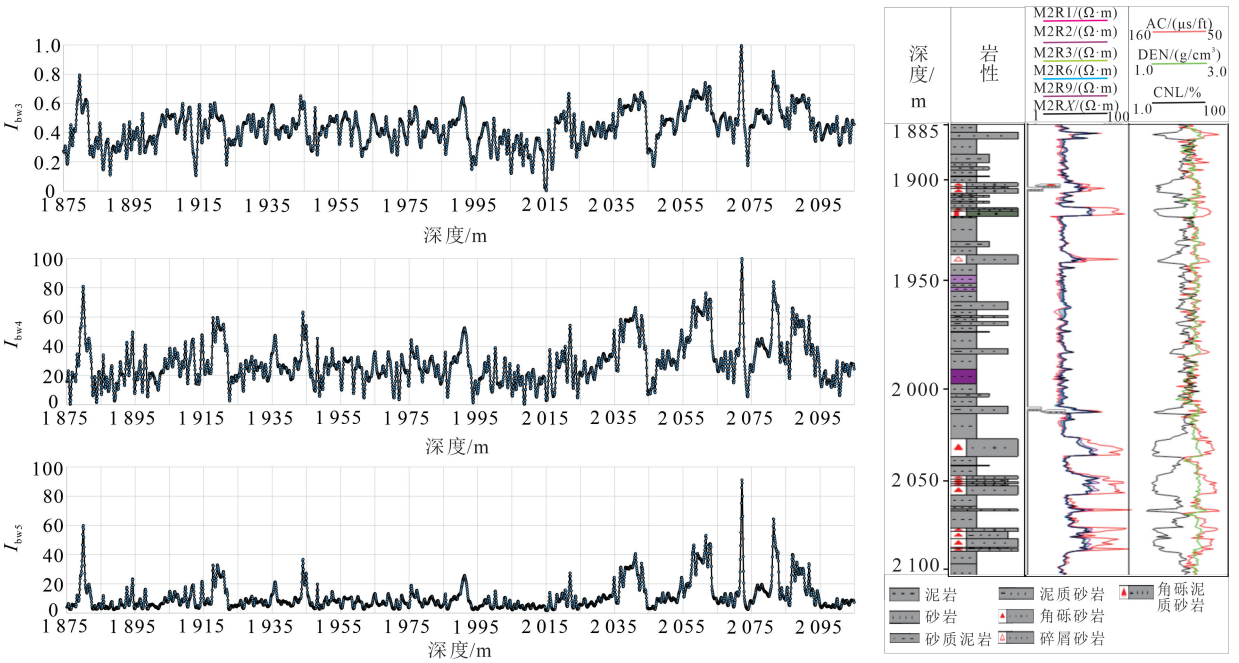
对于木垒 1 井，分别利用赵炎经验公式、Castagna 经验公式和岩石物理实验方法计算脆性指数，即 I_{bw3} 由式(7)换算，I_{bw4} 由式(9)换算，I_{bw5} 由式(10)换算。纵波速度从测井数据中获取，根据式(3)(4)计算杨氏模量和泊松比，再利用 Rickman 经典公式计算脆性。将计算结果与录井进行比较，如图 6 所示。可以看到，木垒 1 井的砂岩脆性强，3 种方法大部分砂岩储层都能得到较好的指示。但 R_{xo} 曲线的几处薄砂岩，岩石物理实验指示的脆性



R_l. 感应电阻率；R_{xo}. 冲洗带地层电阻率。ft(英尺)为非法定计量单位，1 ft=0.3048 m，下同。

图 5　钱 1 井不同脆性指数计算结果与录井比较

Fig.5　Comparison between calculation results of different brittleness index and logging in Well Qian 1



M2RX. 高分辨率阵列感应测井电阻率，其中的 X 代表高分辨率感应测井的不同探测深度。

图 6　木垒 1 井不同脆性指数计算结果与录井比较

Fig.6　Comparison between calculation results of different brittleness index and logging in Well Mulei 1

(I_{bw5})不大,效果不如其他方法;而在 R_t 曲线表示的含油储层段内,岩石物理实验(I_{bw5})的区分度好于其他2种方法。相对而言,岩石物理实验计算的脆性是3种方法中最好的。

总的来说,对于本文这样少井的新区,如果没有横波测井,用赵炎经验公式(式(7))、Castagna经验公式(式(8)、式(9))或岩石物理实验结果换算的横波也基本上可以得到与录井比较一致的脆性指数,并以岩石物理实验相对为好。

4 基于叠前反演的脆性表征方法

用矿物组分、岩石物理实验和测井资料换算只能得到目标点或目标层段的脆性,要得到脆性的区域分布,须用叠前资料反演弹性参数,再用一定的表征公式计算脆性指数。

叠前反演经典公式是 Aki & Richards 近似式[21],它是关于纵横波速度、密度与反射系数的关系式:

$$R(\theta)=\frac{\sec^2\theta}{2}\frac{\Delta v_P}{v_P}-4\frac{v_S^2}{v_P^2}\frac{\Delta v_S}{v_S}+\left(\frac{1}{2}-2\frac{v_S^2}{v_P^2}\sin^2\theta\right)\frac{\Delta\rho}{\rho}。\tag{11}$$

式中:$R(\theta)$ 为反射系数;θ 为入射角和透射角的均值;Δv_P、Δv_S、$\Delta\rho$ 分别为反射界面上下的纵波速度差、横波速度差和密度差。

由于式(11)表示的速度变化率与脆性的关联度还不是很强,为此利用弹性参数之间的关系,得到其他多种反演公式,如杨氏模量-泊松比-密度(Young's modulus - Poisson's ratio - density, YPD)反演式[22]:

$$R(\theta)=\left(\frac{1}{4}\sec^2\theta-2k\sin^2\theta\right)\frac{\Delta E}{E}+\left(\frac{1}{4}\sec^2\theta\frac{(2k-3)(2k-1)^2}{k(4k-3)}+2k\sin^2\theta\frac{1-2k}{3-4k}\right)\frac{\Delta\sigma}{\sigma}+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{4}\sec^2\theta\right)\frac{\Delta\rho}{\rho}。\tag{12}$$

式中:k 为横波速度与纵波速度的比值;ΔE、$\Delta\sigma$ 分别为反射界面上下的杨氏模量差、泊松比差。式(12)要求解杨氏模量、泊松比、密度的变化率(或称反射系数)三个变量,给定与 θ 有关的3个角度域道集,近似为 $R(\theta)$,即可联立求解方程。

还有拉梅系数-密度(LMR)反演式[2]:

$$R(\theta)=\left(\frac{1}{4}-\frac{1}{2}k^2\right)\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\sec^2\theta+\left(\frac{1}{2}\sec^2\theta-2\sin^2\theta\right)k^2\frac{\Delta\mu}{\mu}-\frac{1}{4}(1-\tan^2\theta)\frac{\Delta\rho}{\rho}。\tag{13}$$

式中,$\Delta\lambda$、$\Delta\mu$ 为反射界面上下的拉梅系数差。

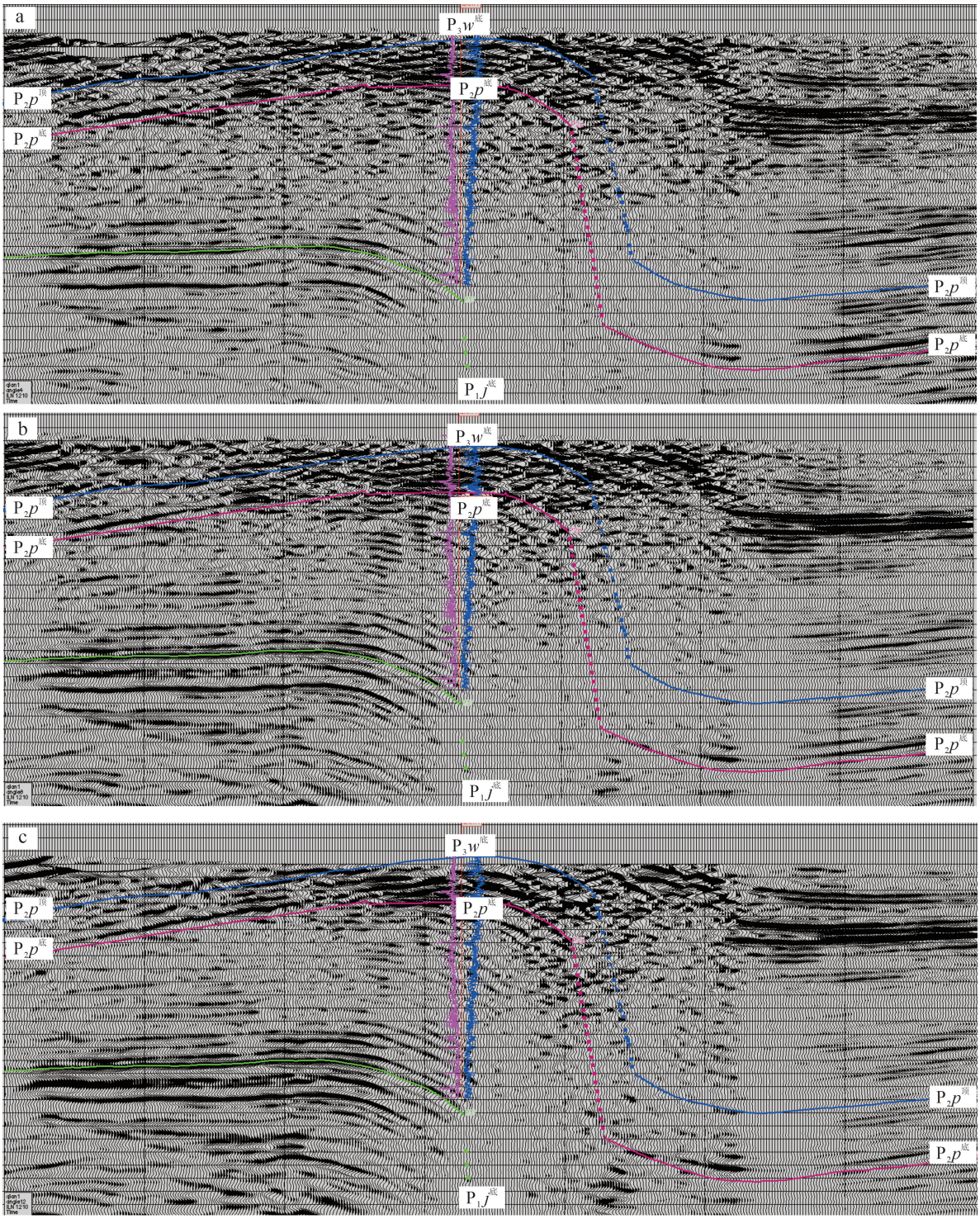
除了以上方法外,还有学者直接反演流体体积模量、孔隙度[5],以及用4个角度数据反演出4个弹性参数:流体项、杨氏模量、泊松比、密度[23]。

上述方法和计算公式反演的是弹性参数变化率或反射系数,在井和地层结构约束下可以得到真实的弹性阻抗和各种弹性参数,再进一步换算、表征脆性指数。

将以上方法应用到准东南钱1井工区,利用如图7所示小、中、大3个角度的数据体进行弹性参数变化率反演。图8展示了平地泉组下部甜点的沿层反演切片。我们惊喜地发现,YPD式反演的密度变化率有很好的反演效果。如图8g,研究区西北部扇三角洲前缘及分流河道特征得到很好体现,与地质认识相符,指示了本区云质岩有利发育区。

通过岩石物理实验计算横波时差曲线,在井和地层结构的约束下,笔者反演了弹性阻抗和多种弹性参数,图9展示了杨氏模量和泊松比过井反演剖面。从图9可以发现,杨氏模量相对泊松比剖面信噪比更高,对云质岩有更好的识别度,反演结果与图2a岩石物理实验结果一致。

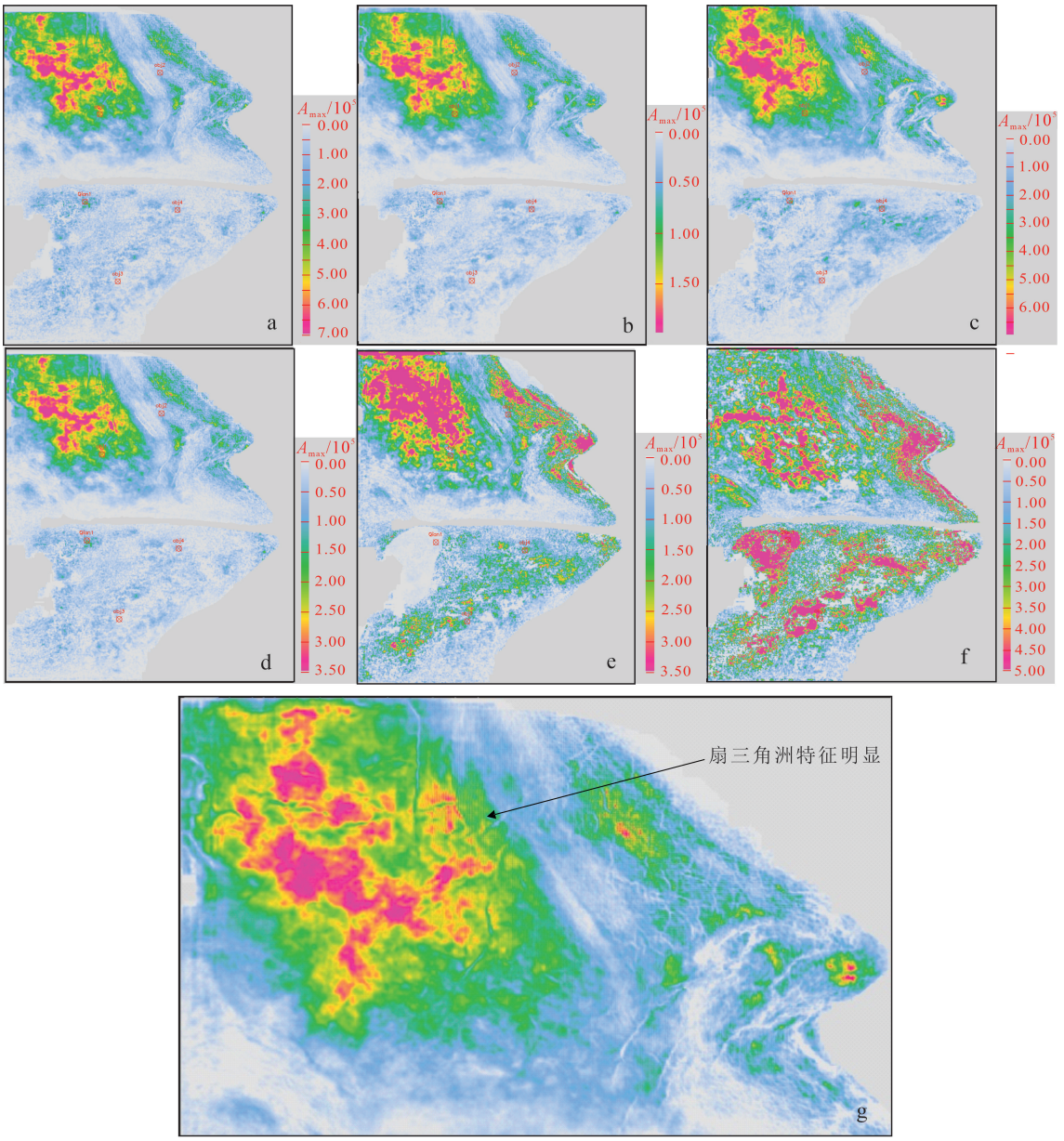
根据多种弹性参数反演结果,用表1所示的脆性指数表征公式计算了钱1井区的云质岩发育段沿层脆性指数,结果如图10所示。与密度变化率等弹性参数进行比较,井约束反演指示的脆性有利带也在研究区的西北部,预测部位大体一致;但脆性指数有条带状甜点特征。其中:Rickman经典公式法(图10a)和拉梅系数法(图10c)两种方法目标区信噪比较高,但它们在研究区的南部存在野值;而杨氏模量与泊松比比值法(图10b)和剪切模量法(图10d)两种方法没有野值。总体来看,反演所得脆性指数认识与图3所示岩石物理实验表征结果完全一致,杨氏模量与泊松比比值法用到了弹性参数杨氏模量与泊松比的比值,大的杨氏模量除以小的泊松比具有更明显的脆性特征,具有类似甜点属性的优势,值得推广使用。



a. 4°角数据；b. 8°角数据；c. 12°角数据。P_3w. 上二叠统梧桐沟组；P_1j. 下二叠统佳木河组。

图 7　钱 1 井区角度域数据体过井剖面

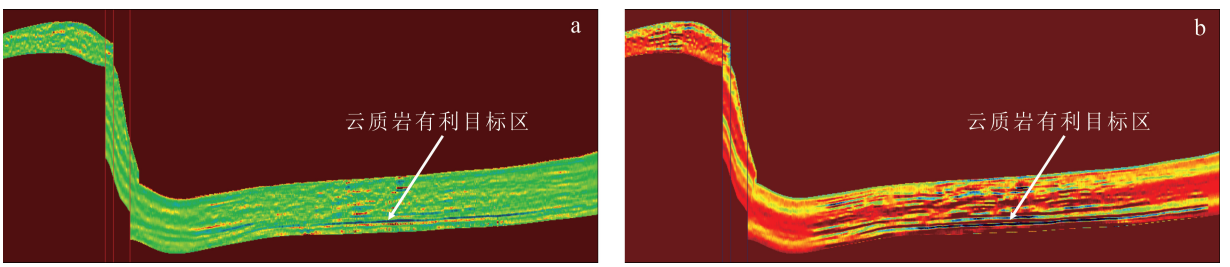
Fig.7　Cross-well profile of angle domain data body in Well Qian 1 area



a. ΔE ;b. $\Delta\sigma$;c. $\Delta\rho$;d. $\Delta\lambda$;e. $\Delta\mu$;f. $\Delta\rho$;g. c的局部放大图。A_{max}. 幅值最大值。

图8 YPD式(a、b、c)和LMR式(d、e、f)弹性参数变化率反演结果对比

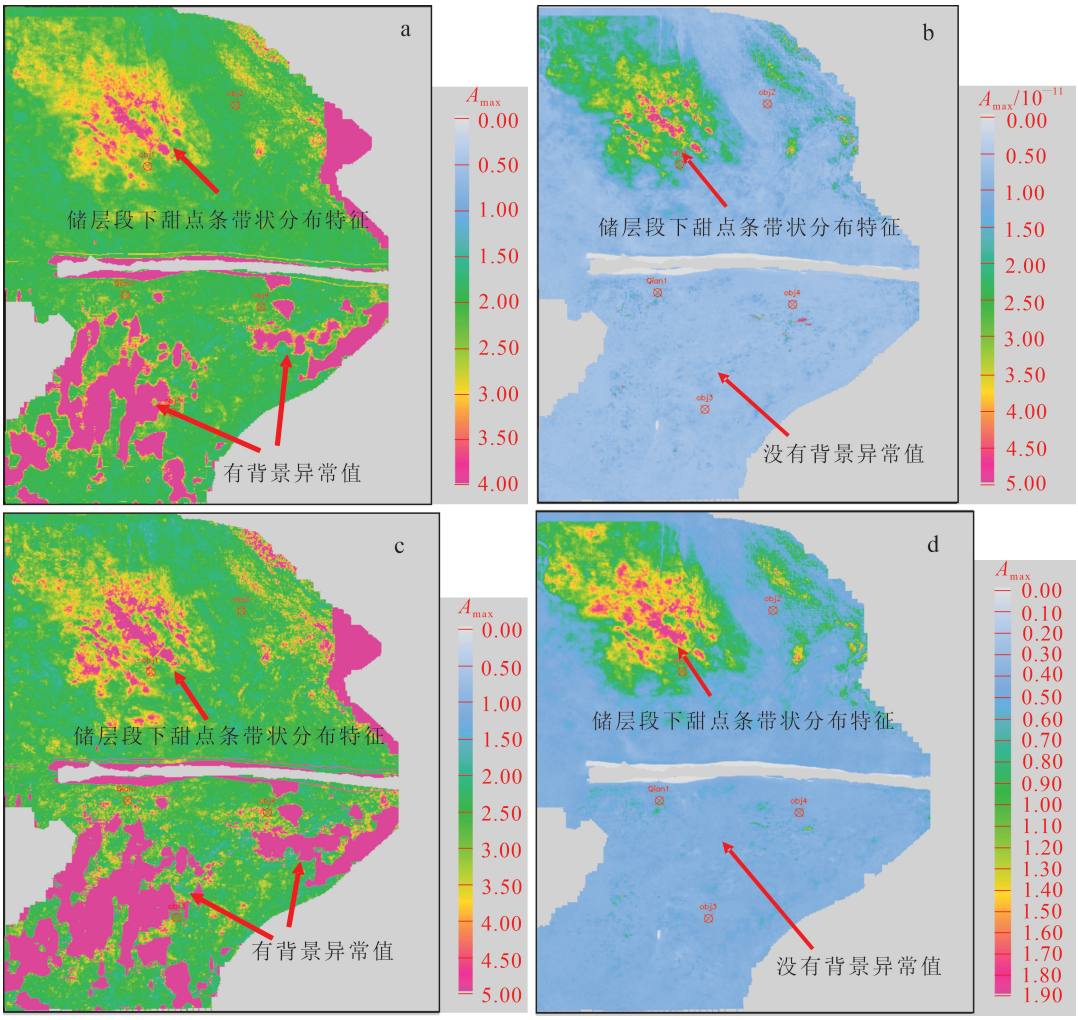
Fig.8 Comparison of inversion results of elastic parameter change rates between YPD formula (a, b, c) and LMR formula (d, e, f)



a. 杨氏模量;b. 泊松比。

图9 杨氏模量与泊松比过井反演剖面

Fig.9 Cross-well inversion profile of Young's modulus and Poisson's ratio



a. Rickman 经典公式法；b. 杨氏模量与泊松比比值法；c. 拉梅系数法；d. 剪切模量法。

图 10　不同脆性指数表征方法计算结果比较

Fig.10　Comparison of calculation results of different brittleness index characterization methods

5　结论

准东南二叠系芦草沟组/平地泉组发育页岩油致密层，脆性是储层评价的重要指标。利用获取的 29 块取心样品、多口井的测井资料以及叠前三维地震数据体，用多种方法对脆性指数进行了计算、比较与评价。

1）岩石物理实验结果表明，杨氏模量是比泊松比更好的弹性参数。

2）井脆性指数分析表明，Castagna 经验公式具有很好的适用性。

3）密度变化率直接反演具有分辨率高的特点，可以较好地表征储层的沉积特征。

4）相较于 Rickman 经典公式，用杨氏模量与泊松比的比值来表征脆性物理意义明确，应用效果更好，值得进一步推广使用。

参考文献（References）：

[1] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are not Clones of the Barnett Shale [C/OL]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition[2024 - 03 - 01]. doi: 10.2118/SPE - 115258 - MS.

[2] Goodway B, Perez M, Varsek J, et al. Seismic Petrophysics and Isotropic-Anisotropic AVO Methods for Unconventional Gas Exploration[J]. The Leading Edge, 2010, 29(12): 1500 - 1508.

[3] Guo Z Q, Chapman M, Li X Y. A Shale Rock Physics

Model and Its Application in the Prediction of Brittleness Index, Mineralogy, and Porosity of the Barnett Shale[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2012: 1-5.

[4] 张丰麒,魏福吉,王彦春,等. 基于精确 Zoeppritz 方程三变量柯西分布先验约束的广义线性 AVO 反演[J]. 地球物理学报,2013,56(6): 2098-2115.
Zhang Fengqi, Wei Fuji, Wang Yanchun, et al. Generalized Linear AVO Inversion with the Priori Constraint of Trivariate Cauchy Distribution Based on Zoeppritz Equation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 2098-2115.

[5] Zhang S, Huang H D, Dong Y P, et al. Direct Estimation of the Fluid Properties and Brittleness via Elastic Impedance Inversion for Predicting Sweet Spots and the Fracturing Area in the Unconventional Reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 45: 415-427.

[6] 张瑞,文晓涛,杨吉鑫,等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及地震叠前反演[J]. 石油地球物理勘探,2019,54(1): 145-153.
Zhang Rui, Wen Xiaotao, Yang Jixin, et al. Two-Term Reflection Coefficient Equation with Young's Modulus and Poisson Ratio and Its Prestack Seismic Inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(1): 145-153.

[7] 刘庆,张镇,杨帅,等.基于灰色关联与层次分析的脆性指数预测方法:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密储层为例[J].物探与化探,2023,47(4):944-953.
Liu Qing, Zhang Zhen, Yang Shuai, et al. Method for Brittleness Index Prediction Based on Grey Correlation and Analytic Hierarchy Process: A Case Study of the Tight Reservoirs in the Lucaogou Formation of the Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 944-953.

[8] 宋永,周路,郭旭光,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组湖相云质致密油储层特征与分布规律[J]. 岩石学报,2017,33(4):1159-1170.
Song Yong, Zhou Lu, Guo Xuguang, et al. Characteristics and Occurrence of Lacustrine Dolomitic Tight-Oil Reservoir in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag, Southeastern Junggar Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1159-1170.

[9] 梁世君,罗劝生,康积伦,等.准噶尔盆地吉南凹陷萨探1井风险勘探突破及意义[J]. 中国石油勘探,2021,26(4):72-83.
Liang Shijun, Luo Quansheng, Kang Jilun, et al. Breakthrough and Significance of Risk Exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 72-83.

[10] 张志杰,成大伟,周川闽,等. 准噶尔盆地石树沟凹陷平地泉组细粒岩特征及其对准东北地区页岩油勘探的指示意义[J].天然气地球科学,2021,32(4):562-576.
Zhang Zhijie, Cheng Dawei, Zhou Chuanmin, et al. Characteristics of Fine-Grained Rocks in the Pingdiquan Formation in Well Shishu 1 and Their Significance for Shale Oil Exploration in Northeastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(4): 562-576.

[11] 匡立春,唐勇,雷德文,等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2012,39(6):657-667.
Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation Conditions and Exploration Potential of Tight Oil in the Permian Saline Lacustrine Dolomitic Rock, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657-667.

[12] 王越,于洪州,熊伟,等. 石钱滩凹陷二叠系平地泉组层序沉积特征及石油地质意义[J]. 油气地质与采收率,2021,28(4):35-45.
Wang Yue, Yu Hongzhou, Xiong Wei, et al. Sequence Sedimentary Characteristics and Petroleum Geological Significance of Permian Pingdiquan Formation in Shiqiantan Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 35-45.

[13] 刘英辉. 准噶尔盆地乌—夏地区风城组云质岩类沉积环境及成因探讨[J].吉林大学学报(地球科学版),2022, 52(1): 80-93.
Liu Yinghui. Origin of Dolomitic Tuff in Permian Fengcheng Formation in Wu-Xia Area of Junggar Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 80-93.

[14] 支东明,宋永,何文军,等. 准噶尔盆地中—下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. 新疆石油地质,2019,40(4):389-401.
Zhi Dongming, Song Yong, He Wenjun, et al. Geological Characteristics, Resource Potential and Exploration Direction of Shale Oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(4): 389-401.

[15] 袁思乔,刘之的,王鼎涵,等.利用多测井参数预测致密砂岩脆性指数方法研究[J]. 地球物理学进展,2022,37(1):312-319.
Yuan Siqiao, Liu Zhidi, Wang Dinghan, et al. Research on Prediction Method of Tight Sandstone Brittleness Index Using Multiple Logging Parameters [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 312-319.

[16] 付娟娟,郭少斌. 沁水盆地海陆交互相页岩脆性指数预测与测井响应分析[J]. 石油实验地质,2019,41(1):108-112.
Fu Juanjuan, Guo Shaobin. Prediction of Brittle Index and Its Relationship with Log Data in Marine-Terrigenous Shale of Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 108-112.

[17] 杨秀春,张继坤,周科. 鄂东气田韩城矿区煤层横波时差测井曲线的构建方法[J]. 测井技术,2014,38(3):304-308.
Yang Xiuchun, Zhang Jikun, Zhou Ke. Study on Establishing Method of Shear Wave Logging Curves for Coalbed in Eastern Block of Ordos Basin[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(3): 304-308.

[18] 孙玉凯,郑雷清. 基于常规测井资料的横波时差估算方法及应用[J]. 新疆石油地质,2009,30(4):521-522.
Sun Yukai, Zheng Leiqing. Method for S-Wave Moveout Calculation and Application Based on Conventional Well Logging Information[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(4): 521-522.

[19] 赵炎. 用横波时差估算裂缝孔隙度方法研究[J]. 新疆石油地质,1984,5(4):71-76.
Zhao Yan. Study on Estimation of Fracture Porosity by Shear Wave Time Difference [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1984, 5(4): 71-76.

[20] 邵才瑞. 基于岩石物理的多元信息融合方法研究与应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
Shao Cairui. Multi Data Fusion Method Study and Its Application Based on Rock Physics[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.

[21] Aki K I, Richards P G. Quantitative Seismology-Theory and Method [M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1980.

[22] 宗兆云,印兴耀,张峰,等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前反演[J]. 地球物理学报,2012,55(11):3786-3794 .
Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Zhang Feng, et al. Reflection Coefficient Equation and Pre-Stack Seismic Inversion with Young's Modulus and Poisson Ratio [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3786-3794.

[23] 桂金咏,高建虎,雍学善,等. 致密储层敏感弹性参数叠前同步反演方法[J]. 石油物探,2015,54(5):541-550.
Gui Jinyong, Gao Jianhu, Yong Xueshan, et al. A Prestack Simultaneous Inversion Method for Sensitive Elastic Parameters of Tight Reservoir [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(5): 541-550.