

文章编号:0253-9985(2008)05-0654-14

## 塔河油田南部缝孔型碳酸盐岩储层叠前地震预测

管路平

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 南京石油物探研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:**塔河油田南部中、下奥陶统碳酸盐岩储层以裂缝型储层为主,经溶蚀形成缝孔型有效储集体。裂缝的展布受断裂控制,油层厚度小,水体活跃。储层具有大小规模不同、空间分布形态不规则、充填性质各异的缝孔组合特征。针对这类缝孔型储层,提出了叠前地震各向异性分析和叠前弹性参数反演预测方法。实际地震资料的应用表明,前者能有效预测裂缝发育强度及方位,结合井资料后者能有效预测缝孔带发育级别及含流体指示,两项预测结果与已知的缝洞储层及钻探结果基本吻合。两项叠前地震预测技术均揭示了塔河南部视层状区域呈块体状及条带状展布的几个有利缝孔储集发育带,从而提高了预测小尺度缝孔型碳酸盐岩储层空间展布规律的能力。

**关键词:**方位各向异性;叠前弹性参数反演;物理模拟;缝孔型储层;储层预测;塔河油田

**中图分类号:**P631.4

**文献标识码:**A

## Pre-stack seismic prediction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in the south of Tahe oilfield

Guan Luping

(Nanjing Institute of Geophysical and Prospecting, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

**Abstract:** The carbonate reservoirs of the Middle and Lower Ordovician in southern Tahe oilfield are mainly of fractured-vuggy type featured in effective fractures and vugs formed by dissolution. The distribution of fractures in these reservoirs is controlled by faults, the oil layers are thin, and water bodies are active. The fracture-vug combinations are of different scales, irregular spatial distributions, and various filling properties. In view of the characteristics of the fractured-vuggy carbonate reservoirs in the study area, two techniques are presented, namely the pre-stack anisotropy analysis technology for detecting the intensity and azimuth of fractures and the pre-stack elastic parameter inversion method for predicting, in combination with log data, the growth of the fractured-vuggy zones and fluid-bearing indicators. The application of the techniques in southern Tahe oilfield reveals that the prediction results are basically consistent with data gathered from the known fractured-vuggy reservoirs and drilling data. The application of these two techniques has improved the prediction of spatial distribution of small-scale fractured-vuggy reservoirs and also shows that there are several favorable fractured-vuggy zones distributed in the southern Tahe oilfield.

**Key words:** azimuthal anisotropy; pre-stack elastic parameter inversion; physical modeling; fractured-vuggy carbonate reservoir; reservoir prediction; Tahe oilfield

塔河油田的主力储层为奥陶系碳酸盐岩储层<sup>[1]</sup>,类型主要有裂缝型、裂缝-孔洞型和裂缝-溶洞型<sup>[1~6]</sup>,储集空间以溶洞与裂缝为主。溶洞

的规模一般都不大且不规则;裂缝与微裂缝的发育及展布受构造与应力控制,经岩溶叠加改造后形成缝洞网络系统<sup>[3]</sup>。自1996年塔河油田奥陶

收稿日期:2008-08-11。

作者简介:管路平(1964—),男,高级工程师、博士生,油气地球物理方法技术研究。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB202402)。

系碳酸盐岩勘探取得重大突破以来<sup>[7]</sup>, 针对该地区碳酸盐岩储层的地球物理响应特征<sup>[4,8,9]</sup>和储层预测方法技术研究<sup>[1,5,9~11]</sup>不断取得新的成果, 总结出了3种储层地震识别模式, 即不规则地震反射结构、串珠状强振幅地震反射结构和弱振幅低频地震反射结构<sup>[1]</sup>, 形成了适合于该地区碳酸盐岩储层预测的技术系列<sup>[5~11]</sup>。

塔河油田南部地区的钻探及综合研究认为<sup>[7,12~15]</sup>, 该区岩溶相对欠发育, 中、下奥陶统储层以裂缝型为主, 其发育与展布受断裂控制。有效储集层集中分布在一间房组顶面0~120 m范围内, 有效的油气层厚度较小, 不同储集体以及流体分布存在一定的差异性, 水体异常活跃, 油水关系复杂。构造缝和溶蚀缝是塔河南部奥陶系最主要的储集空间类型。从岩心裂缝统计来看, 有效裂缝主要为立缝和高角度缝, 有效裂缝宽度以中、小缝为主, 表现为早期的大缝多被方解石充填, 中、小缝多为未-半充填。一般取心段裂缝平均密度10~15条/m, 储层段达40条/m, 整体上小裂缝并不孤立发育。由成像测井可见垂直裂缝延伸10余米, 一些岩心上可见张开5~10 mm宽的天然大缝, 表明南部发育有多种不同尺度及相当规模的裂缝及裂缝群。准确预测及定位这些裂缝发育带及含流体性质, 成为塔河南部扩大发现、降低钻探

风险、提高钻井命中率的当务之急。而裂缝的发育程度、发育规模、发育级别及流体指示的预测正是叠前地震预测技术所面临的重要研究内容。

## 1 缝孔叠前地震检测方法

### 1.1 叠前地震P波振幅随方位变化(AVA)的分析方法

图1为定向垂直排列裂缝物理模型定偏旋转观测地震记录及裂缝顶、底反射波响应曲线。由图1可见, 振幅、时间及速度均出现随观测方位而呈周期性的视极化现象, 说明方位P波的视极化现象确实与地下发育有一定规模的裂缝相关, 表明P波通过裂缝体时表现出很强的方位各向异性特征。裂缝对P波的响应取决于裂缝方位与测线之间的夹角及地下裂缝系统的发育程度, 振幅和速度曲线都近似呈周期为180°正余弦变化。在一个固定偏移距上, P波反射振幅 $V$ 与炮检方向和裂缝走向之间的夹角 $\varphi$ 有如下数值模拟关系:

$$V = A + B \cos 2\varphi \quad (1)$$

式中: $A$ 为与炮检距有关的基本常量; $B$ 为与炮检距和裂缝特征相关的模量。依照简谐振荡特征, $A$ 可以看成均匀介质下的反射强度, 而 $B$ 则为固定

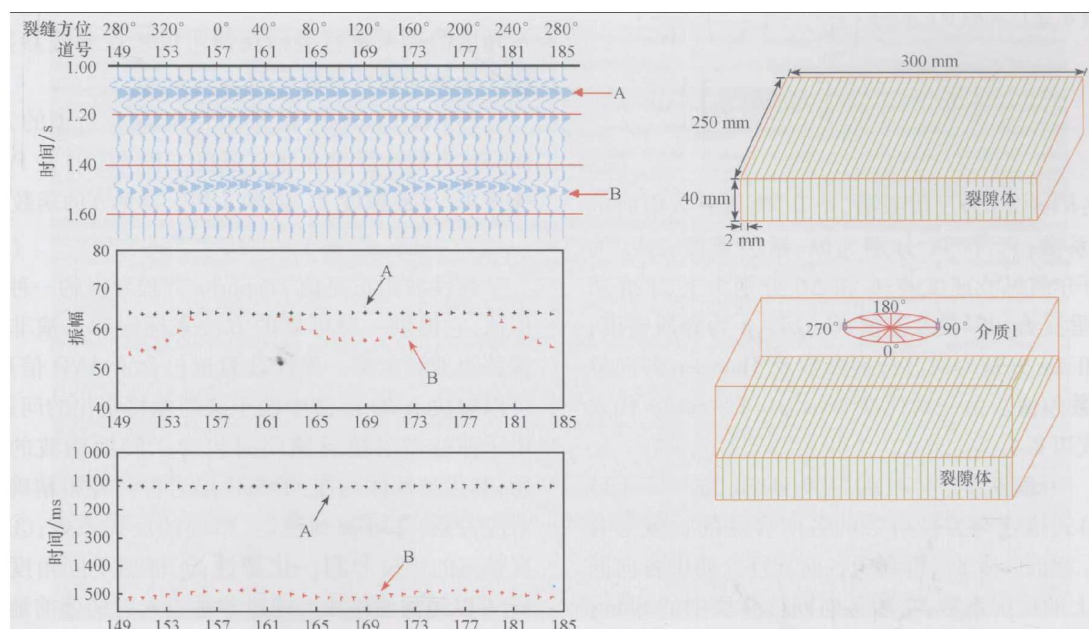


图1 垂直排列裂缝物理模型定偏方位观测地震记录及裂隙反射振幅、时间曲线  
Fig. 1 Physical model of vertically aligned fractures as well as seismic record, reflection amplitudes, and times from fixed offset variable azimuthal observations

偏移距下随方位变化的振幅调谐因子。当炮检方向平行于裂缝走向( $\varphi=0^\circ$ )时,振幅( $V=A+B$ )最大;当炮检方向垂于裂缝走向( $\varphi=90^\circ$ )时,振幅( $V=A-B$ )最小。理论上,该方程只要知道3个方位上的振幅变化就可求解裂隙方位角 $\varphi$ 和与裂隙发育强度相关的综合因子 $B$ 。因此,在均匀分布的方位道集上寻找相对强振幅(能量)就成为裂缝检测的直观工具。

## 1.2 叠前地震P波AVO随方位变化(AVOA)的数值模拟

AVO技术是利用含油气砂岩与围岩之间存在明显的泊松比差导致反射系数随入射角变化,即地震观测道集上振幅随偏移距的变化预测储层含油气性的技术。首先,我们概念性地考虑前述裂缝垂直定向排列的模型。在不考虑纵波入射角( $\theta$ )的情况下,若测线平行于裂缝方向,由于P波质点沿平行于裂缝方向的基质点上运动,裂缝对反射特性的影响最小;然而,若测线垂直或趋于垂直于裂缝并以大角度入射,则裂缝将会强烈地影响P波的传播及速度。

水平对称轴横向各向同性条件下的反射系数方程为:

$$R(\theta, \varphi) = R(0) + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta V_p}{V_p} - \left( \frac{2V_s}{V_p} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} \right. \\ \left. \left[ \Delta \gamma + 2 \left( \frac{2V_s}{V_p} \right)^2 \Delta \omega \cos^2 \varphi \right] \right\} \sin^2 \theta \quad (2)$$

式中: $R(\theta, \varphi)$ 为反射系数, $R(0)$ 为垂直入射时的反射系数; $V_p$ 和 $V_s$ 分别为纵、横波速度, $\Delta V_p$ 为上、下介质纵波速度差; $G$ 和 $\Delta G$ 分别为上、下介质平均垂直剪切模量及差值, $G=\rho V_s^2$ , $\rho$ 为介质密度; $\Delta \omega$ 和 $\Delta \gamma$ 分别为横波分裂参数及Thomsen各向异性系数差值。由三角代换 $2\cos^2 \varphi = 1 + \cos 2\varphi$ 代入(2)式可得:

$$R(\theta, \varphi) = A(\theta) + B(\theta) \cos 2\varphi \quad (3)$$

用(3)式描述与方位有关的各向异性的贡献是有效的。当 $\varphi=0^\circ$ 时,得到弱各向异性介质中各向同性面上的反射系数,它和各向同性介质中的Shuey近似式相同,AVO及其派生的一系列属性参数反映的是各向同性面上基质介质的入射及反射关系。随着观测方位偏离各向同性面,与各向异性

有关的影响将引起入射及反射的变化。在垂直裂缝介质中,这种变化将呈 $180^\circ$ 周期的改变,AVO及其属性参数的这种方位变化显然与各向异性有关。通过随方位变化的AVO属性参数模拟,方位P波AVO就成为检测裂缝性油气藏中裂缝及裂缝发育方向的一种地球物理手段<sup>[16]</sup>。

## 1.3 叠前弹性参数反演技术

叠前弹性反演是通过利用不同角道集的地震数据以及纵波、横波、密度等测井资料,联合反演出与岩性、含油气性相关的多种弹性参数,实现储层物性及含油气性的预测。塔河南部碳酸盐岩岩性致密且单一,储层的发育(裂缝、溶蚀孔洞、溶蚀裂缝等)往往导致相关体积弹性参数的大幅变化,基于纵、横波联合反演及弹性参数反演预测非均匀缝孔发育带具有良好的应用前提。

反射系数与弹性参数间的近似公式为:

$$R_{pp} = (1 + \tan^2 \theta) \frac{V_{p2} - V_{p1}}{V_{p2} + V_{p1}} - 8K \sin^2 \theta \frac{V_{s2} - V_{s1}}{V_{s2} + V_{s1}} \\ + (1 - 4K \sin^2 \theta) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

式中: $R_{pp}$ 为反射系数; $K = \frac{\bar{V}_s^2}{V_p^2}$ 。

因而,通过反射系数与纵、横波速度、密度以及角度的关系进行叠前反演可以求取弹性参数,称之为叠前弹性参数反演。

Patrick Connolly根据Aki-Richards近似的Zoeppritz方程推导出弹性波阻抗方程 $EI(\theta)$ 是P波速度 $V_p$ 、S波速度 $V_s$ 、密度 $\rho$ 和入射角 $\theta$ 的函数:

$$EI(\theta) = V_p^{1+\sin^2 \theta} V_s^{-8K \sin^2 \theta} \rho^{1-4K \sin^2 \theta} \quad (5)$$

弹性波阻抗是由Zoeppritz方程导出的一种近似值,它提供一种可靠的方法来标定和反演非零偏移距地震数据。弹性波阻抗包含了AVO信息,可以解决AVO反演中的子波随偏移变化的问题。由于弹性波阻抗反演同时包含了转换横波的信息,其优越性体现在:①与地层岩性具有很精确的对应关系;②可得到稳定、精确的反射系数;③具有特定的单位和归一化特性;④根据不同角度的 $EI$ 可以预测泊松比。通过非垂直入射的叠前地震数据道集来反演不同入射角情况下波阻抗的技术称为弹性波阻抗反演,该技术与常规声波阻抗反演技术的主要区别在于它以Zoeppritz方程为基

础,利用不同角度叠加数据  $S(\theta)$  来反演不同入射角  $\theta$  情况下的波阻抗,从而为储层描述、流体预测提供了有效的手段。

## 2 缝孔储层叠前地震预测技术流程

### 2.1 多方位叠前各向异性分析处理

#### 2.1.1 资料的预处理及宏面元多方位叠前道集的形成

##### 1) 资料的预处理

选择塔河南部一次面积  $671.8 \text{ km}^2$ , 48 次覆盖,  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$  面元三维资料。前期常规地震保幅处理主要包括道编辑、带通滤波、真振幅恢复、静校正、速度分析、剩余静校正、地表一致性补偿、叠前反褶积及动校正等。

##### 2) 宏面元抽取及不同方位均匀道集的形成

为了提高每道信噪比及保证一致的叠加次数,扩大原 CMP 面元,建立 CMP 宏面元。最终选定 CMP 宏面元尺寸为  $80 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ , 宏面元之间有滑动,并被划分为 6 个方位且每个方位都有近 48 次叠加,数据在小于  $2\ 850 \text{ m}$  偏移距段有全方位数据。

##### 3) 形成方位道集

为使随方位角变化的数据更稳定并增加方位

角上数据道的密度,对方位边界实施部分重叠处理,一般控制在  $2.5^\circ \sim 5^\circ$  的范围。本期我们形成了两种方位道集的抽取:一是以  $10^\circ$  的间隔将数据分选成从中心角度  $N5^\circ$  到  $N175^\circ$  的 18 个方位道集,直接用于方位振幅及方位 AVO 参数的模拟计算;二是考虑叠加次数达到原叠加次数 48 次的要求,并进行叠后偏移处理,分为 7 个角度(图 2)。

##### 4) 生成方位角度道集

把记录转换成角道集记录。该记录除进行方位各向异性分析外,还可用于叠前振幅随入射角 AVAO 纵、横波联合反演。

##### 5) 叠前方位角度道集归一化

不同方位道集上的有效反射波的反射振幅随入射角趋向于零应向同一个振幅值收敛,即趋于垂直入射反射振幅。

##### 6) 生成方位叠加道及偏移数据体

选取信噪比较高、入射角较大(小于临界角)、各方位道集相对均匀的区段进行叠加,使叠加道振幅更加可靠(图 2)。

#### 2.1.2 振幅随方位变化模拟方法研究

采用 Wright(1986)方位各向异性介质具有水平对称面(HTI)条件下的反射系数方程,通过在固

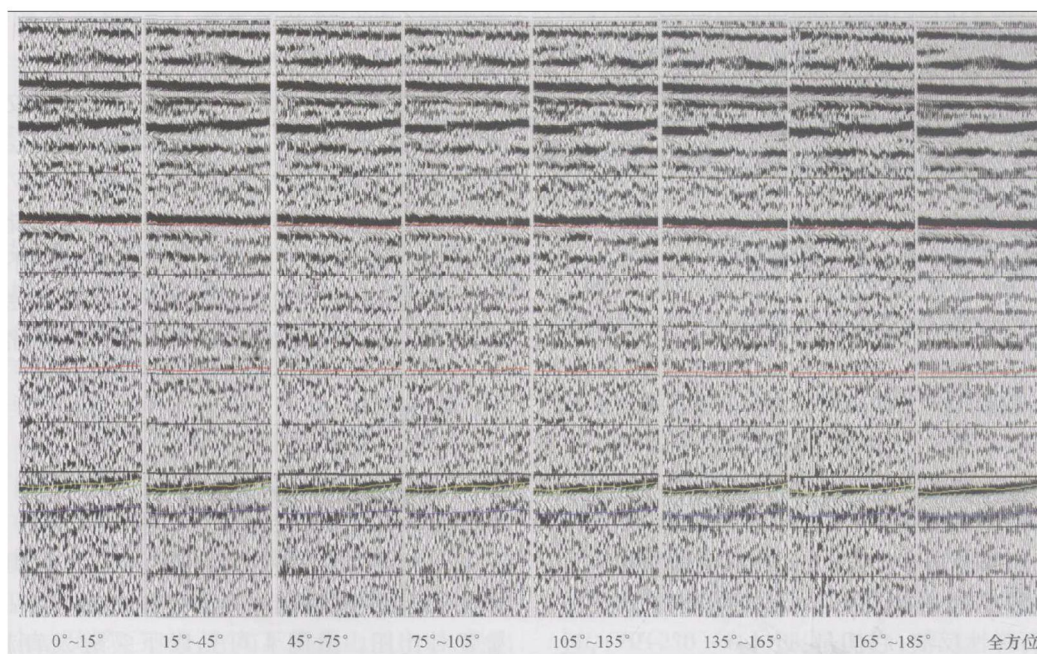


图 2 任意抽取的 7 个不同方位数据体及全方位数据体部分段剖面的对比

Fig. 2 Correlation of portions of full-azimuth section and randomly-selected 7 azimuthal sections

定入射角下地震参量随方位的变化,或沿特定方位下获得的 Shuey 近似式,利用三角近似式模拟与方位调谐相关的参量预测裂缝发育密度及走向,模拟量初步选为振幅能量、AVO 梯度因子等。实现时利用足够多的方位道集构成超定方程,求得最大满足有误差拟合样本的最小二乘解,从某种程度上代表裂缝的整体发育趋势。

## 2.2 叠前弹性反演主要流程

### 2.2.1 叠前弹性反演方法

该工作包括两个部分,即 AVA 角道集的 AVO 纵、横波联合反演及弹性阻抗反演,结果都是获得纵、横波波阻抗以及拉梅常数等。部分叠加反演借助于分开近、远偏移距的地震数据分别进行波阻抗反演,消除偏移距变化的影响。同时,联合反演的目标是在弹性波阻抗之外求解出纵横波阻抗、纵横波速度及拉梅常数等岩石弹性参数。

部分叠加反演及同时联合反演包括以下几个重要步骤:①根据 AVO 响应特点划分入射角范围、生成不同角度叠加数据体并进行数据体排齐;②由包含纵、横波速度及密度测井数据的井资料分别计算不同入射角下的纵、横波波阻抗及弹性阻抗  $EI$ ;③以计算的弹性参数交会分析来判别对储层特征的识别能力;④对不同的角度叠加数据分别提取子波;⑤分别对不同角度道集叠加数据体进行约束稀疏脉冲反演(CSSI)或同时 AVA 约束反演;⑥沿井轨迹提取反演结果并做交会以验证识别能力的有效性;⑦提取储层段属性并进行综合预测。

### 2.2.2 叠前弹性反演具体实现

1) 角道集叠加数据体划分对弹性反演的影响

叠加数据体个数的选择要基于反演弹性参数的稳定性与子波、资料解释的稳定性两方面综合考虑。通过选择不同叠加数据体组合(3,4,5 和 7 个数据体)的方法做 AVA-CSSI 反演试验、反演质量控制、反演分辨率对比,合理选择叠加数据体个数及角度范围。本期选择 5 个角度体来替代叠前资料进行弹性反演,它们是:近  $4.5^\circ(0^\circ \sim 9^\circ)$ ,近中  $10.5^\circ(5^\circ \sim 16^\circ)$ ,中  $17.5^\circ(12^\circ \sim 23^\circ)$ ,中远  $24.5^\circ(19^\circ \sim 30^\circ)$ ,远  $30.5^\circ(26^\circ \sim 35^\circ)$ 。

### 2) 弹性参数识别缝孔型储层有效性分析

经分析选用 Aki-Richards 积分法的结果与 BP 弹性波阻抗计算的稳定低频部分相合并来生成不同角度下的  $EI$ 。声波阻抗  $AI$  与  $EI$  的交会,能较好地识别出目标层碳酸盐岩的岩性及裂缝,表明了弹性波阻抗在裂缝型碳酸盐岩储层预测中的有效性。

### 3) 子波提取及合成记录制作

首先由常规的全叠加,估算零偏移距的子波制作合成记录,保证时-深关系的正确性;再对每个角道集体分别估算各自的子波。子波的估算分为两步:①估算子波的振幅谱;②用振幅谱子波作为初始子波,估算子波的时移与相移。

### 4) 弹性波阻抗反演和弹性参数反演

运用部分叠加反演方法得到  $EI$ ,运用同时联合反演方法得到各种弹性参数数据体。该项工作在精细层位解释、井控低频背景和参数最优选择基础上进行工作。

### 2.2.3 井中弹性波阻抗和弹性参数交会分析

综合 13 口井的纵波、横波、密度测井数据,结合岩心、成像测井资料,就计算的  $EI$  和弹性参数进行了各种交会分析(图 3)。该分析包括:①纵波阻抗  $I_p$ -横波阻抗  $I_s$ ;②纵波速度  $V_p$ -纵横波速度比  $V_p/V_s$ ;③弹性参数  $\lambda\rho$ -弹性参数  $\lambda/\mu$ ;④声波阻抗  $AI$ -不同角度  $EI$ 。

$I_p$ - $I_s$  交会图上储层与非储层有不同的交会区域,但有近 20% 的叠合率;低角度  $EI$  上储层及非储层段有几近 100% 的重叠;而在  $V_p - V_p/V_s$ ,  $\lambda\rho - \lambda/\mu$  及  $AI - EI(19^\circ \sim 36^\circ)$  交会图上非储层与裂缝、溶孔储层有不同的交会区域。利用不同的交会区域可以顺利地将有效储层从不同致密岩体中区分出来,并可作为缝洞储层发育识别的指示。

## 3 实际应用

### 3.1 叠前各向异性裂缝检测

图 4 为塔河南部一间房组( $T_7^4 - T_7^5$ )由各向异性分析检测的裂缝发育强度和主方向与钻探并叠置对比图。由图 4 可见以下裂缝发育趋势。①裂缝总体主发育方向为南北向( $0^\circ \sim 20^\circ$ ),以南北、南北偏东、南北偏西方向为主;另一组近北北

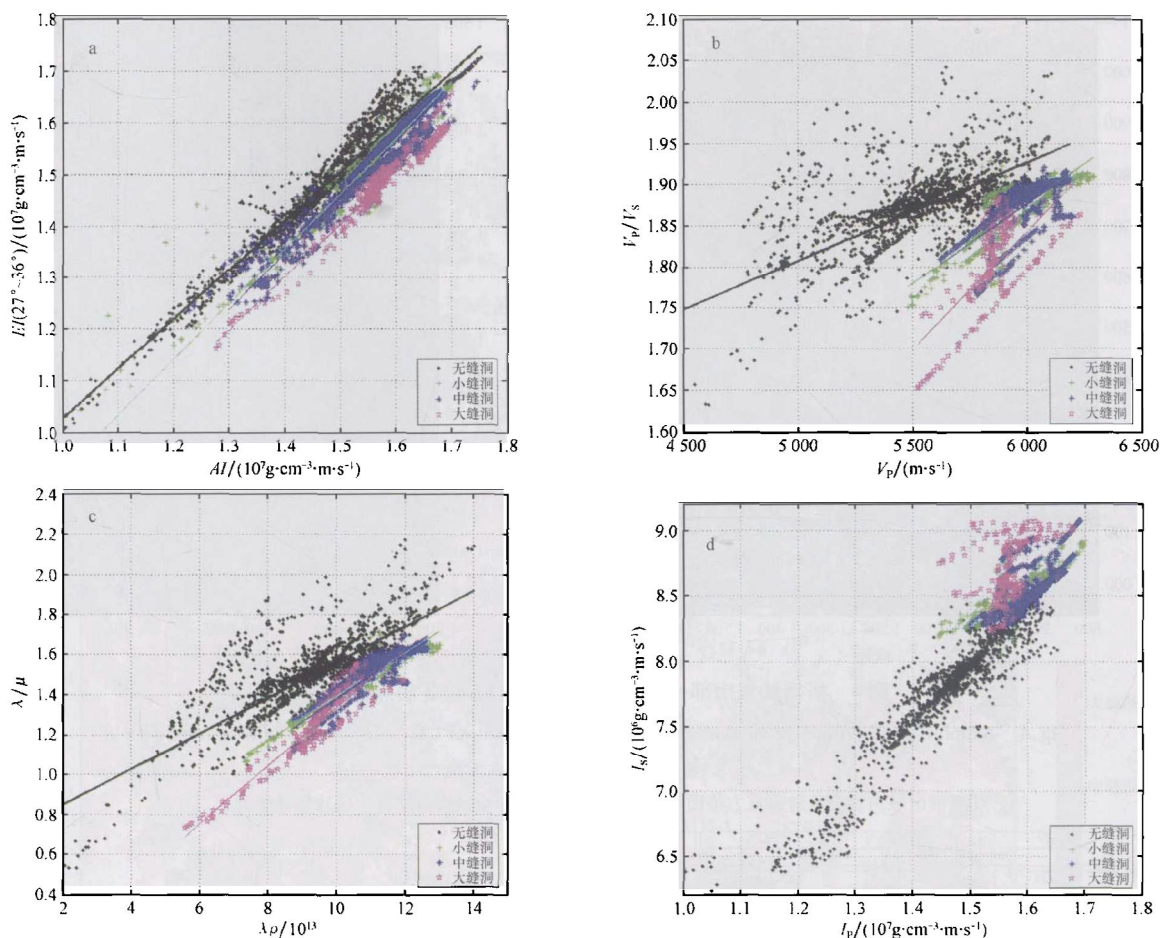


图3 塔河南部13口井中不同取心段上测井弹性参数交会区分不同尺度缝孔储层

Fig. 3 Discrimination fractured-vuggy reservoirs of different scales by using the crossplot of elastic parameters from coring intervals in 13 wells in the southern Tahe oilfield

a. 声阻抗  $AI$  - 不同角度  $EI$ ; b. 纵波速度  $V_p$  - 纵横波速度比  $V_p/V_s$ ; c. 弹性参数  $\lambda\rho$  - 弹性参数  $\lambda/\mu$ ; d. 纵波阻抗  $I_p$  - 横波阻抗  $I_s$

(小缝洞: 裂缝宽度  $< 0.1$  mm, 洞直径  $< 1$  mm; 中缝洞: 裂缝宽度  $= 0.1 \sim 2$  mm, 洞直径  $= 1 \sim 2$  mm;  
大缝洞: 裂缝宽度  $> 2$  mm, 洞直径  $> 2$  mm。)

西-南东东向,但整体相对较弱。预测的裂缝走向与区域构造由北向南倾没走向基本一致,沿轴部发育有由北向南延伸的多条大断裂,并呈南北、南北偏东、南北偏西走向。②裂缝发育程度以中心线为界,分南、北两大区域。北区一间房组储层厚度在  $100 \sim 200$  m,受加里东期及海西早期影响广泛发育缝洞及裂缝,图示多数井取心都不同程度发育裂缝,有产能井一般都多组裂缝与溶蚀缝洞连续叠置发育;南部区块一间房组相对减薄,仅有  $10 \sim 20$  m,有效的储层段均发育在区域大断裂延伸末端及邻近地带,并与下伏鹰山组串通,易出现水涌、水淹现象。③北部区异常整体上呈片状分布,发育密度相对较强,叠置有部分南北向、北

西-南东向更强的异常条带,分布于北区的大部分钻井均揭示裂缝有普遍发育的迹象,在主要一些异常块体上常常连续发育裂缝,并伴有大量的孔洞发育;南区则以由北向南延展的长条状异常为主,零散分布在异常上的井取心可见裂缝发育,并有比较好的油气钻探成功率。

### 3.2 叠前弹性反演检测缝洞发育带及流体指示

通过测井多种参数交会分析(图3),优选出了对缝洞大小判断比较明显的弹性参数,包括  $AI - EI(27^\circ \sim 36^\circ)$ ,  $V_p - V_p/V_s$  和  $\lambda\rho - \lambda/\mu$ 。对比3种交会图可以看出,阻抗交会图中相同级别大小缝洞的样点具有较好的收敛特征,即样点的分散

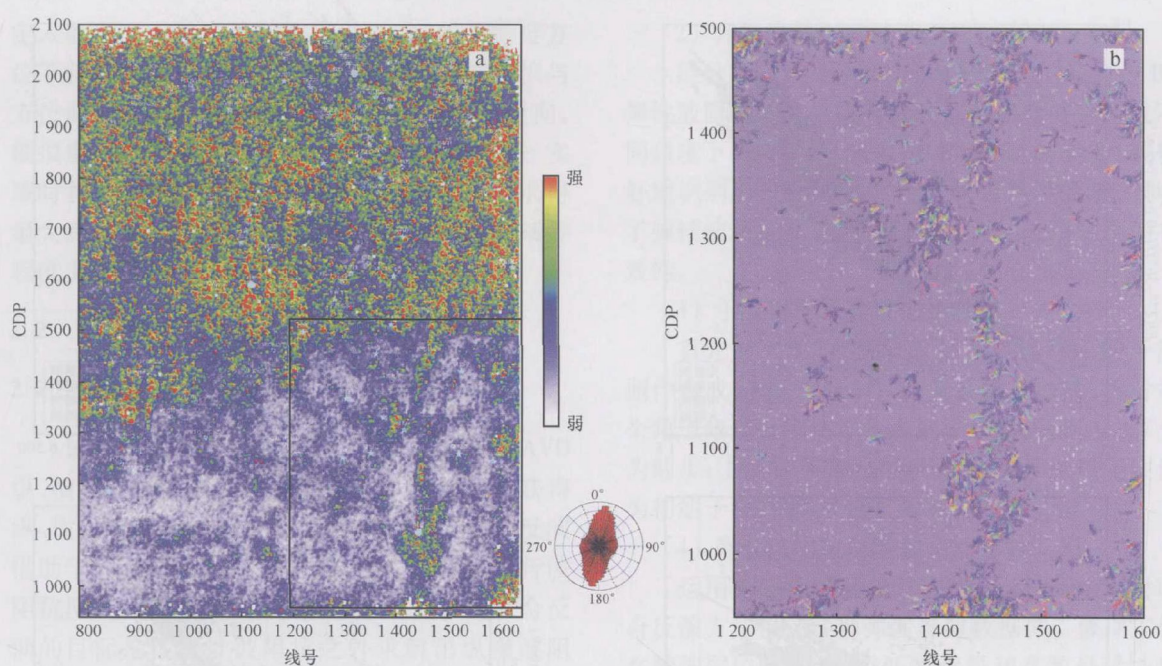


图4 塔河油田南部一间房组( $T_7^4 - T_7^5$ )方位各向异性预测图

Fig. 4 Azimuthal anisotropic prediction of the Yijianfang Formation ( $T_7^4 - T_7^5$ ) in southern Tahe oilfield

a. 裂缝发育强度; b. 部分主方位

(黑框区域为右图裂缝发育方位图示区域。图4b 左下为全区裂缝发育方位玫瑰花统计图。)

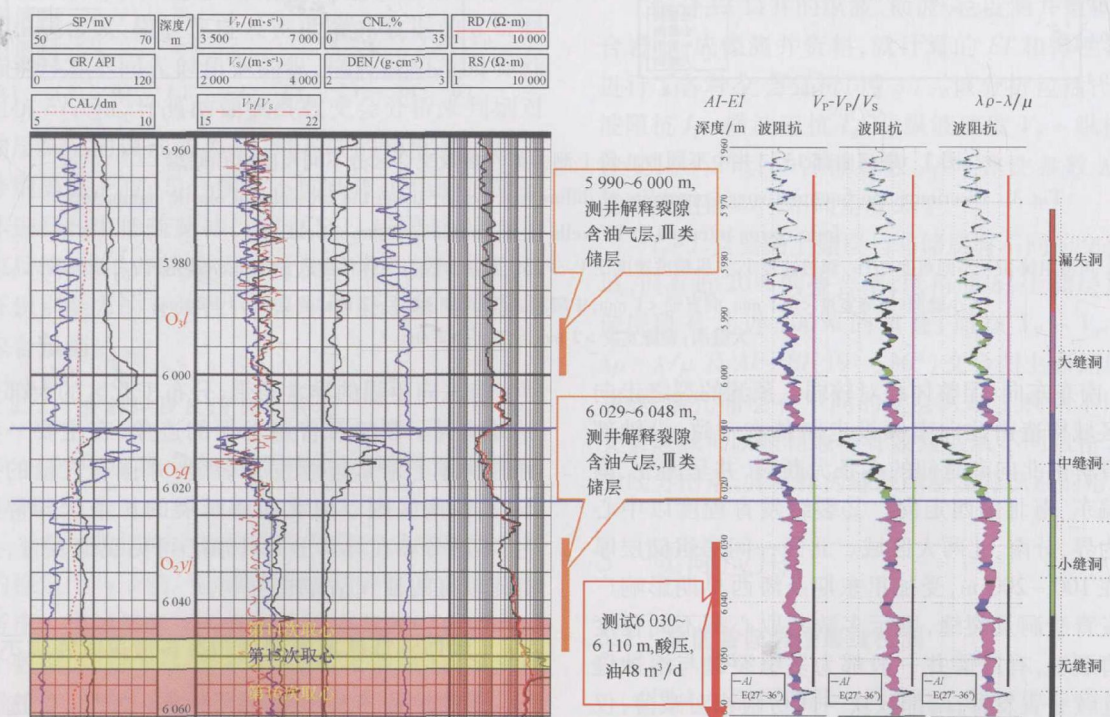
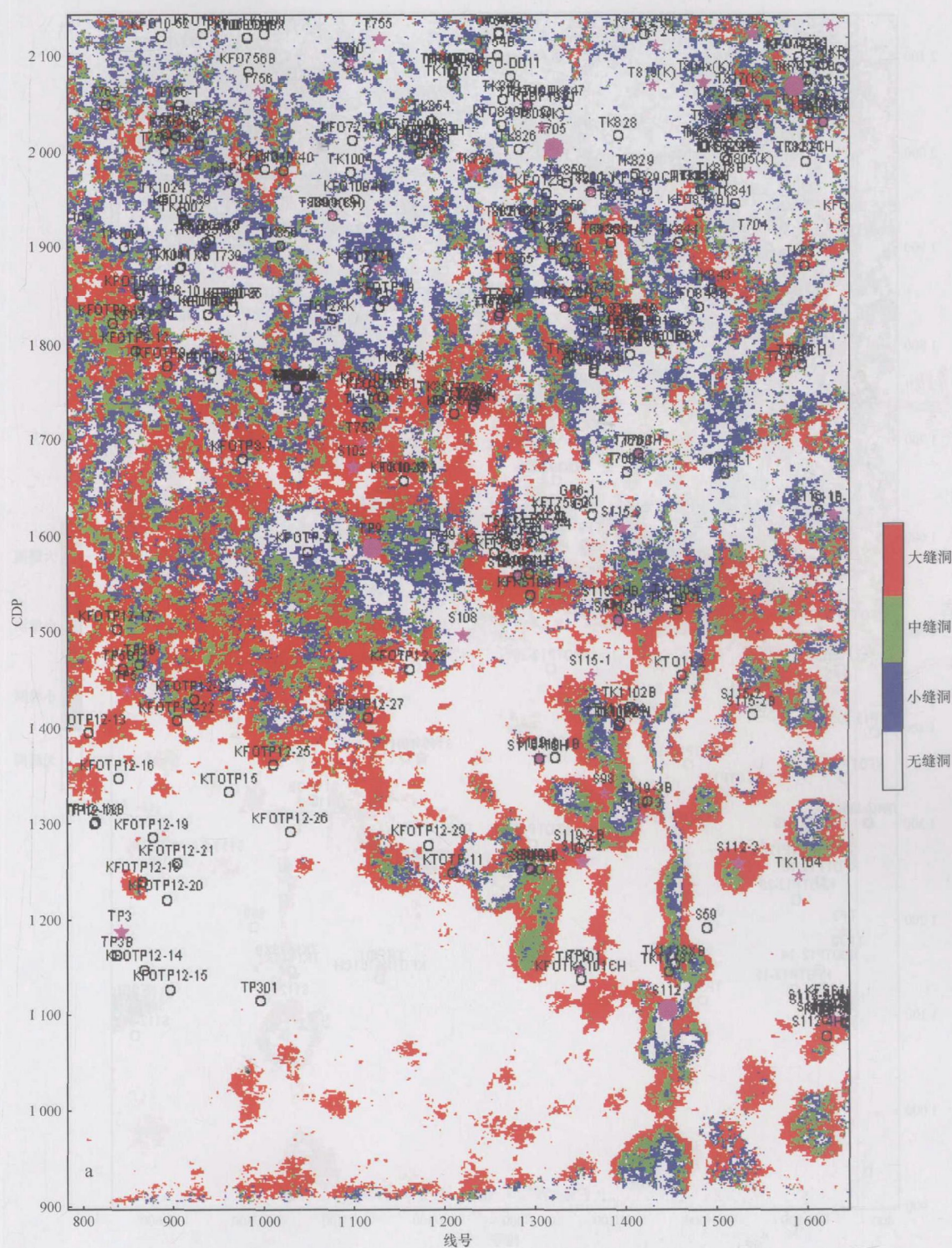
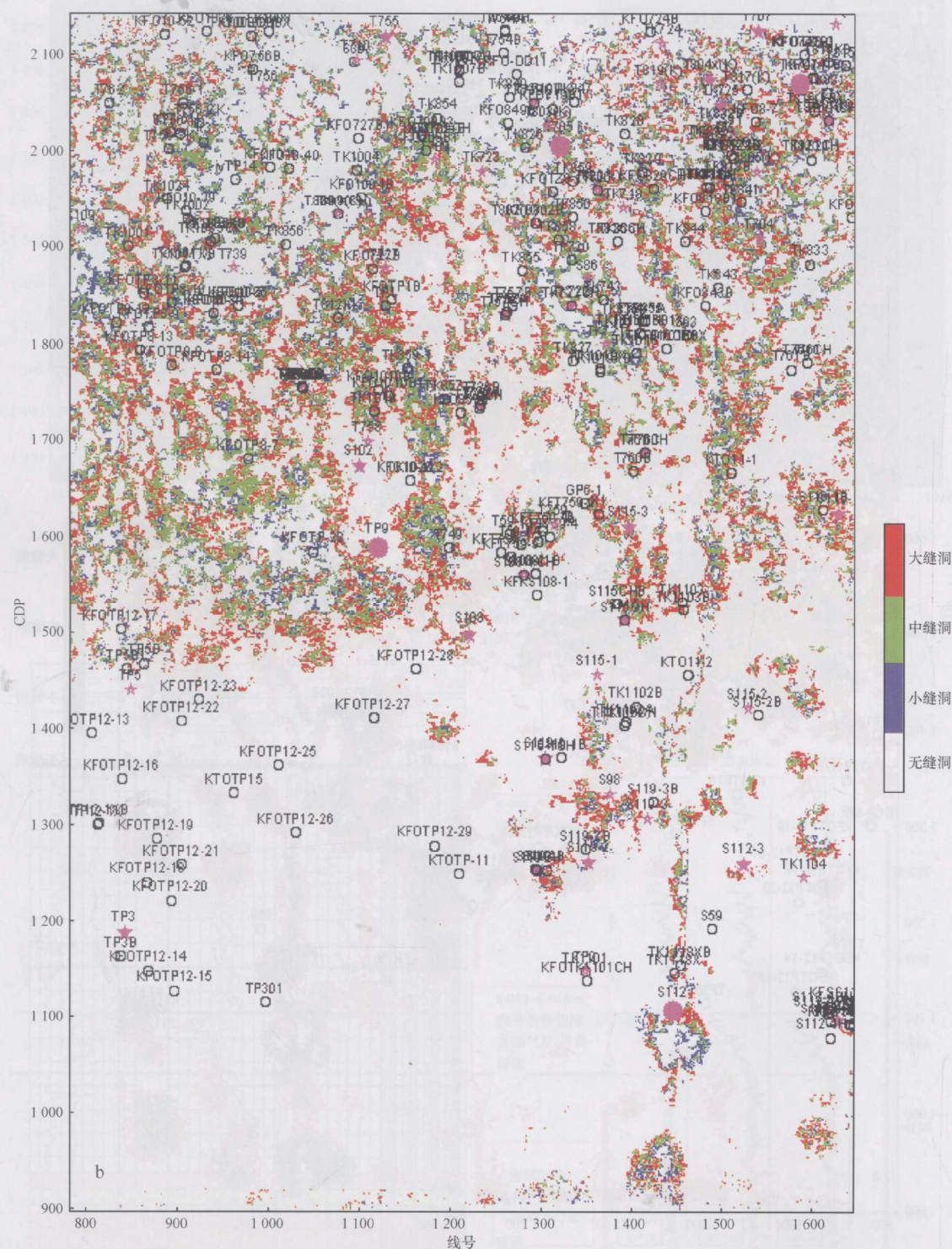


图5 S102井测井曲线、取心层段(a)及不同交会方法缝洞量化预测结果(b)

Fig. 5 Logs and coring intervals in Well S102 (a) and quantitative predictions of fracture-vug size with different crossplotting methods

(图5b 中左为  $AI - EI$  交会结果; 中为  $V_p - V_p/V_s$  交会结果; 右为  $\lambda \rho - \lambda/\mu$  交会结果。)

图6 塔河南部一间房组( $T_7^4$ )反射层缝洞大小预测结果Fig. 6 Prediction of fracture-vug sizes in the Yijianfang Formation ( $T_7^4$ ) in the southern Tahe oilfielda.  $AI - EI$  交会结果; b.  $V_p - V_p/V_s$  交会结果; c.  $\lambda\rho - \lambda/\mu$  交会结果



续图6 塔河南部一间房组( $T_7^4$ )反射层缝洞大小预测结果

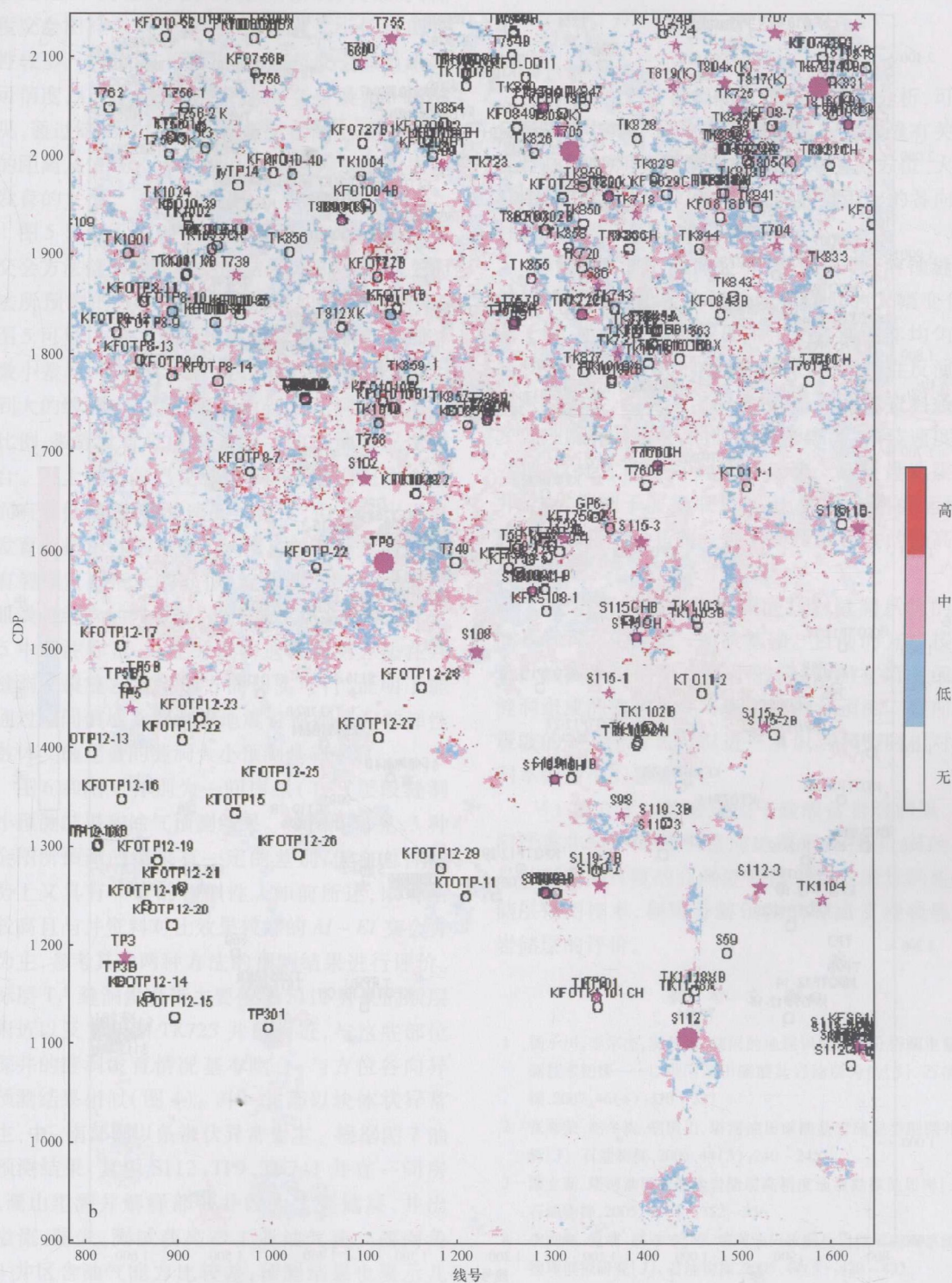
Fig. 6 Prediction of fracture-vug sizes in the Yijianfang Formation ( $T_7^4$ ) in the southern Tahe oilfield

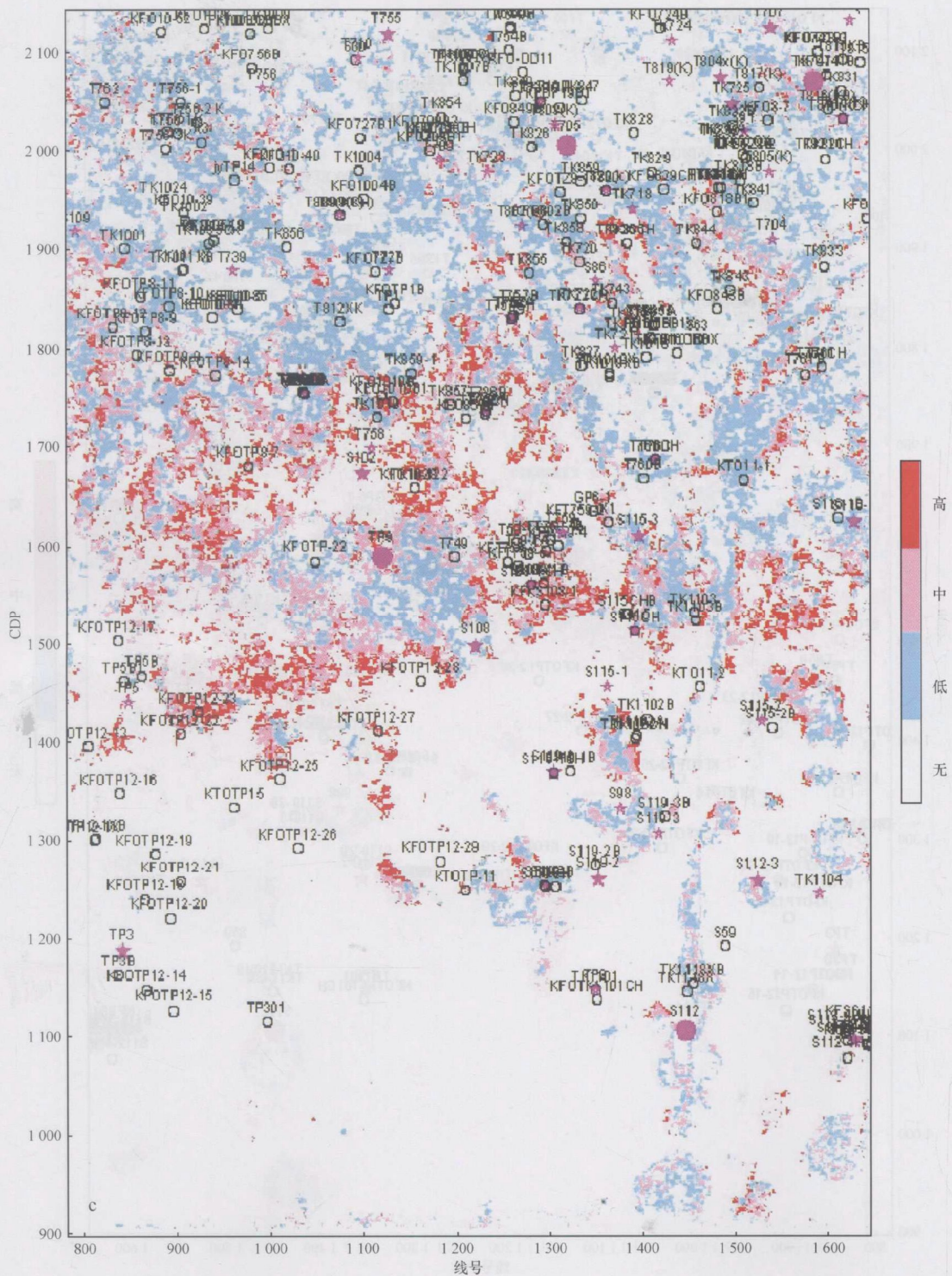
a.  $AI - EI$  交会结果; b.  $V_p - V_p/V_s$  交会结果; c.  $\lambda\rho - \lambda/\mu$  交会结果

Fig. 6 Prediction of fracture-vug sizes in the Yijianfang Formation ( $T_7^4$ ) in the southern Tahe oilfield

a.  $AI-EI$  交会结果; b.  $V_P-V_P/V_S$  交会结果; c.  $\lambda\rho-\lambda/\mu$  交会结果



续图7 塔河南部一间房组( $T_7^4$ )油气预测结果Fig. 7 Prediction results of oil/gas in the Yijifang Formation ( $T_7^4$ ) in the southern Tahe oilfielda.  $AI - EI$  交会结果; b.  $V_p - V_p/V_s$  交会结果; c.  $\lambda\rho - \lambda/\mu$  交会结果

续图7 塔河南部一间房组( $T_7^4$ )油气预测结果Fig. 7 Prediction results of oil/gas in the Yijifang Formation ( $T_7^4$ ) in the southern Tahe oilfielda.  $AI - EI$  交会结果; b.  $V_p - V_p/V_s$  交会结果; c.  $\lambda\rho - \lambda/\mu$  交会结果

度较低,且不同级别大小的缝洞之间分离最好;而速度交会图样点最为分散,且缝洞大小样点的重叠性较多。因而,在可信度上,阻抗交会具有最高的可信度, $\lambda\rho$ 与 $\lambda/\mu$ 次之,速度交会最差。由此可见,通过储集体弹性参数在交会图上偏离基岩线的距离及值域区间可以识别缝洞并量化描述其发育的大小。

图5显示了S102井测井曲线、取心层段及不同交会方法缝洞量化预测的结果,3种不同的交会方法所预测的S102井缝洞结果如图5右所示。由图5可见,3种方法所预测的缝洞大小存在局部的微小差异,但总体上一致。取心段预测结论为中到大的缝洞,与实际取心中到大孔洞占相当大的比例、裂缝发育且以中缝为主的实钻情况比较吻合。而上覆奇尔巴克组( $O_2q$ )虽然因泥质含量高而有较低的纵、横波速度及密度,但并未出现缝洞发育的指示;同时在 $O_2q$ 层上方和下方缝洞预测有裂缝发育指示的部位,综合测井解释也证实为Ⅲ类裂缝含油气层段,酸压测试见工业油流(见图5中部注释)。这充分说明这种预测方法在判别缝洞及裂缝发育级别方面切实可行,证明了能够通过空间值域关系式对地震资料所反演的弹性参数体实施定量的缝洞大小预测基础牢靠。

图6和图7分别为一间房组( $T_7^4$ )层段缝洞大小预测结果和油气预测结果。由图6可见,3种交会图所预测的结果有一定的差别,但在总体的趋势上又具有一定的相似性。如前所述,以可信度较高且与井资料对比效果较好的 $AI-EI$ 交会方法为主,参考其他两种方法的预测结果进行评价。目标层 $T_7^4$ 缝洞发育带主要位于S112井人的断层带附近以及TP9和TK725井区附近,与这些部位钻探井的缝洞发育情况基本吻合,与方位各向异性预测结果相似(图4)。中-北部以块体状异常为主,中-南部则以条带状异常为主。根据图7油气预测结果,其中S112,TP9,TK741井在一间房组、鹰山组测井解释部分井段为Ⅰ类储层,并出现溢流、漏失,测试获高产工业油气流。西南角TP3井区含油气能力比较差,预测结果也展示几近无异常。总体来看,通过弹性反演参数交会及偏离基岩压实线的程度可以揭示塔河油田南部不同级别的储层大小,并对其含流体指标进行地震预测。

## 4 结论

1) 通过P波振幅随方位角的变化分析,可以定量揭示与地下高角度定向排列垂直裂缝有关的发育强度(密度)及发育方位,原则上宽方位、大偏移距(入射角 $12^\circ \sim 30^\circ$ )数据对裂缝引起的各向异性较为敏感。

2) 塔河油田南部裂缝、溶蚀孔洞、溶蚀缝等储层的发育往往导致相关体积模量的大幅变化,基于纵、横波联合反演及弹性反演预测非均匀缝孔发育带具有良好的应用前提。利用弹性反演结果进行岩性、裂缝或含油气预测,要注意资料条件及处理解释的结合,同时必须考虑纵、横波速度的差别,这样才能更好地进行反演。高质量地震测井资料、精细子波提取及标定、横波资料的运用、弹性参数综合分析每一环节对反演精度的提高都至关重要。

3) 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞系统的预测具有有利的地震-地质基础。目前的方法技术难以检测和识别单个较小的缝洞,但有诸多细小缝洞组成的缝洞系统可有效检测和预测。叠前地震波的动力学参数可以进一步识别和检测相对溶洞系统更小的裂缝带。

4) 建立了一整套适应于碳酸盐岩缝洞纵、横向严重非均质储层的叠前地震预测技术,其特点是针对不同尺度的孔洞缝规模采用针对性的地震储层预测技术,利用分解预测的思路实现碳酸盐岩储层的评价。

## 参 考 文 献

- 1 杨子川,李宗杰,窦慧媛. 储层的地震识别模式分析及定量预测技术初探——以塔河油田碳酸盐岩储层为例[J]. 石油物探,2007,46(4):370~377
- 2 张秀荣,赵冬梅,胡国山. 塔河油田碳酸盐岩储层类型测井分析[J]. 石油物探,2005,44(3):240~245
- 3 漆立新. 塔河油田碳酸盐岩储层高精度地震勘探的思考[J]. 石油物探,2005,44(4):352~356
- 4 李剑峰,赵群,郝守玲,等. 塔河油田碳酸盐岩储层缝洞系统的物理模拟研究[J]. 石油物探,2005,44(5):428~432
- 5 王士敏,鲁新便. 塔河油田碳酸盐岩储层预测技术[J]. 石油物探,2004,43(2):153~158
- 6 鲁新便,王士敏. 应用变尺度分形技术研究缝洞型碳酸盐岩储层的非均质性[J]. 石油物探,2003,42(3):309~312

(下转第675页)

取得了良好的天然气地质成果。

## 4 结论

1) 地质、测井、地震多信息一体化和逐级控制下的研究思路是该区进行储层预测的有效思路。

2) 岩石物理及模型正演是预测的基础,它对储层岩性、物性、含气性的地震响应模式建立及储层预测方法技术的遴选和技术参数的确定具有重要的指导意义。

3) 地震波形分析、地震属性分析和多属性优化、分频解释、吸收衰减储是该区砂体定性预测的有效技术,是选区评价的主要依据之一。

4) 相控随机模拟多参数反演、储层建模技术可达到储层岩性、物性、含气性定量预测的目的,是井位部署的主要依据之一。

5) 研究形成了以突出低孔、低渗、致密储层为目标的完整的预测技术系列,该技术系列从岩相、岩性、物性、含气性等四个层面对储层进行了综合描述,有效的提高了预测的精度,是该区勘探开发的核心技术。

## 参 考 文 献

- 郝蜀民,惠宽洋,李良.鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):762~768
- 丁晓琪,张峭楠,周文,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J].石油与天然气地质,2007,28(4):491~496
- 李仲东,郝蜀民,李良,等.鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律[J].石油与天然气地质,2007,28(4):466~472
- 袁际华,柳广弟.鄂尔多斯盆地上古生界异常低压分布特征及形成过程[J].石油与天然气地质,2005,26(6):762~799
- 马新华.鄂尔多斯盆地上古生界深盆气特点与成藏机理探讨[J].石油与天然气地质,2005,26(2):231~236
- 李良,袁志祥,惠宽洋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J].石油与天然气地质,2000,21(3):268~282
- 翟爱军,邓宏文,邓祖佑.鄂尔多斯盆地上古生界层序地层与储层预测[J].石油与天然气地质,1999,20(4):336~340
- 李剑,罗霞,单秀琴,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征[J].石油勘探与开发,2005,32(4):54~59
- 马新华.鄂尔多斯盆地天然气勘探开发形势分析[J].石油勘探与开发,2005,32(4):50~53
- Tanner M T. Seismic attributes[Z]. CSEG Recorder, 2001. 48~56
- Barnes A E. Seismic attributes in your faces[Z]. CSEG Recorder, 2001. 41~47
- Zang H, Backus M M, Barrow K T, et al. Facies mapping from three dimensional seismic data: potential and guidelines from a tertiary sandstone-shale sequence model, Powderhorn Field, Calhoun County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(1): 16~46
- Ecoublet P, Semeys W W. Porosity prediction from seismic attributes and inversion[Z]. TRIP Internal Report, Rice University, 1997
- 刘文岭,牛彦良,李刚,等.多信息储层预测地震属性提取与有效性分析方法[J].石油物探,2002,41(1):70~76
- 焦方正.塔河油气田开发研究文集[M].北京:石油工业出版社,2006
- 袁国芬.塔河油田碳酸盐岩储层地球物理响应特征[J].石油物探,2003,42(3):318~321
- 王世星,曹辉兰,靳文芳,等.碳酸盐岩缝洞系统地震响应特征分析和卡1区缝洞储层预测[J].石油物探,2005,44(5):421~427
- 李明,李守林,赵一民.塔里木盆地某地区碳酸盐岩裂缝储层预测研究[J].石油物探,2000,39(2):24~35
- 张永升.波形分析方法在碳酸盐岩储层预测中的应用[J].石油物探,2004,43(2):135~138
- 闫相宾.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3):262~265
- 王金琪.塔里木奥陶系岩溶储集的油气前景[J].石油与天然气地质,1999,20(4):305~310
- 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层测井识别与评价[J].石油与天然气地质,2008,29(1):61~65
- Guan Luping, Wang Shixing. Prediction of fracture-cavity system in carbonate reservoir: a case study from Tahe oilfield, China[J]. The Leading Edge, 2006, 25(11): 1396~1400
- Perez M A, Gibson R L, Toksoz N. Detection of fracture orientation using azimuthal variation of P-wave AVO responses[J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1253~1265

(编辑 董立)

(编辑 李军)

(上接第667页)