

引用格式:雷诚,崔炳凯,翟光华,等.一种基于 $\tau$ 模型算法的岩相建模方法及应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):206-214.

LEI Cheng, CUI Bingkai, ZHAI Guanghua, et al. A lithofacies modeling method based on a new integrated algorithm and its application [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 206-214.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.009

## 一种基于 $\tau$ 模型算法的岩相建模方法及应用

雷诚<sup>1</sup>,崔炳凯<sup>1</sup>,翟光华<sup>2</sup>,叶禹<sup>1,3</sup>,徐庆岩<sup>1</sup>,张瑾琳<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油尼日尔公司,尼日尔 尼亚美 999056;  
3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司,北京 102206)

**摘要:**基于地震反演约束的三维储层建模技术将地震数据和测井数据有效结合,既体现了测井数据的垂向分辨率,又考虑了反演数据体反映的储层横向变化特征,是目前油藏分析的主流方法。但在传统的地震数据与测井数据结合算法中,两者对最终岩相的约束权重难于控制,且将两者假设为相互完全独立或条件独立,会在最终结果中出现各种不一致性,例如预测砂岩概率值大于1。该文引入 $\tau$ 模型算法,并将其进行改进,使其在数据相互依赖的复杂情况下,也可确保结果的一致性。同时将该算法应用于尼日尔D油田的岩相建模中,并利用迭代优化算法确定相关系数,使得砂体概率预测平均误差减少30%,有效提高了砂体预测精度。

**关键词:**地震反演;储层建模;数据整合;条件概率;条件独立

中图分类号:TE19

文献标识码:A

### A lithofacies modeling method based on a new integrated algorithm and its application

LEI Cheng<sup>1</sup>, CUI Bingkai<sup>1</sup>, ZHAI Guanghua<sup>2</sup>, YE Yu<sup>1,3</sup>, XU Qingyan<sup>1</sup>, ZHANG Jinlin<sup>1</sup>

(1. CNPC Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. CNPC Niger Petroleum S.A., Niamey 999056, Niger; 3. CNPC Engineering Technology R&D Company Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** The 3D reservoir modeling technology based on seismic inversion constraints effectively combines seismic data and logging data, which not only reflects the high vertical resolution of logging data, but also considers the lateral variation characteristics of reservoirs reflected by inversion data. It is currently the mainstream method of reservoir analysis. However, in the traditional combination of seismic data and logging data, the weight of the constraints on the final lithofacies is difficult to control. And the traditional full independence or conditional independence hypotheses lead to seismic data and logging data combination algorithms are rough, they may result in inconsistencies such as probability values greater than 1 if the each conditional probabilities are valued independently one from another. An alternative combination algorithm, model  $\tau$ , is proposed which is not only simple, but also can ensure consistency of results in the presence of complex data interdependencies. At the same time, the algorithm is applied to the lithofacies modeling of D oilfield in Niger, and the average error of sand body probability is reduced by 30%, which effectively improves the prediction accuracy of the sand body.

**Keywords:** seismic inversion; reservoir modeling; data integration; conditional probability; conditional independence

测井数据具有较高的垂向分辨率,通常被称为硬数据,可对储层垂向小尺度的结构变化进行精细刻画,但该类数据横向分辨率低。地震数据垂向分辨率

低,通常被称为软数据,但该数据具有平面上采样密度大,横向分辨率高的优势。前人在井震联合储层建模方面做了很多研究,BEHRENS等<sup>[1]</sup>、DUBRUKLE

收稿日期:2021-10-14。

第一作者简介:雷诚(1989—),男,博士,工程师,主要从事开发地质方面的研究。地址:北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院非洲研究所,邮政编码:100083。E-mail:leichengnx@petrochina.com.cn

等<sup>[2]</sup>分别在1998年将地震属性图用于三维地质建模;印兴耀等<sup>[3]</sup>、刘文岭<sup>[4]</sup>、胡勇等<sup>[5]</sup>、杨锴等<sup>[6]</sup>、王家华等<sup>[7]</sup>详细描述了地质统计学方法在地震约束储层地质建模中的应用;于兴河等<sup>[8]</sup>、尹艳树等<sup>[9]</sup>、崇仁杰等<sup>[10]</sup>、周丽清等<sup>[11]</sup>将高分辨率地震资料应用于沉积微相模型的建立;孙月成等<sup>[12]</sup>、谭学群等<sup>[13]</sup>、张磊夫等<sup>[14]</sup>、叶小明等<sup>[15]</sup>将地震、测井、岩心及生产动态资料整合进行油藏地质建模,取得了很好的效果。但前人使用的主要数据整合方法在实际应用过程中也存在一定局限性:如在利用条件概率方法对测井数据和地震数据结合预测砂体时,两者对最终结果的约束权重难于控制,且通常会假设两者是相互完全独立或条件独立,这种假设使得结合算法更易实现,但结果往往会出现不一致性,例如预测某点的最终砂体概率值大于1<sup>[16-17]</sup>,为了更好地解决这一问题,提出了一种新的结合算法,该算法不仅简便,并且在复杂的数据相互依赖存在的情况下,也可确保最终结果的一致性,同时可提高模型精度。

## 1 测井数据与地震数据整合方法

在岩相随机建模过程中,假设 $B$ 表示测井数据(硬数据), $C$ 表示地震数据(软数据), $A$ 表示以地震数据和测井数据为约束条件的一个未知参数,此处假定为砂岩数据。则条件概率 $P(A|B,C)$ 表示在测井数据 $B$ (硬数据)及地震数据 $C$ (软数据)约束下,进行模拟所估计的砂岩的概率; $P(A|B)$ 表示根据测井数据通过随机模拟建模方法获取的空间某一点为砂岩的概率; $P(A|C)$ 表示根据地震数据通过反演方法获取的在空间某一点为砂岩的概率; $P(A)$ 表示先验概率,即预先确定的砂岩概率。

根据条件概率公式有:

$$P(A|B,C) = \frac{P(A,B,C)}{P(B,C)} \quad (1)$$

若 $B,C$ 互相独立时,可以有:

$$P[B,C|\cdot] = P[B|\cdot]P[C|\cdot], \forall \text{任意事件}(\cdot) \quad (2)$$

且:

$$P(B,C) = P(B)P(C) \quad (3)$$

由式(2)可得:

$$P(B,C|A) = P(B|A)P(C|A)$$

又因为:

$$P(B,C|A) = \frac{P(B,C,A)}{P(A)} \quad (4)$$

由式(3)一式(4)可得:

$$P(B,C,A) = P(A)P(B|A)P(C|A) \quad (5)$$

由式(1)、式(2)、式(5)可得:

$$P(A|B,C) = \frac{P(A)P(B|A)P(C|A)}{P(B)P(C)} \quad (6)$$

因为:

$$P(B|A) = \frac{P(B)P(A|B)}{P(A)} \quad (7)$$

$$P(C|A) = \frac{P(C)P(A|C)}{P(A)} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6),可得:

$$P(A|B,C) = \frac{P(A|B)P(A|C)}{P(A)} \quad (9)$$

在实际情况下,测井数据 $B$ 与地震数据 $C$ 往往不独立,此时若用 $B,C$ 相互独立的假设(实际操作中往往这样假设),利用式(9)去计算条件概率 $P(A|B,C)$ ,其结果会出现错误。例如,若 $P(A|B)=0.8$ , $P(A|C)=0.6$ , $P(A)=0.4$ ;则根据式(9)得到 $P(A|B,C)=1.2$ ,这明显是不符合情况的。

为解决上述问题,对于 $B,C$ 互不独立时,JOURNAL<sup>[6]</sup>提出“永久比”(permanence of ratios)的概念,其基于变量的比例通常比变量本身更稳定的假设。在复杂的数据相互依赖的情况下,这个概念保证了结果满足所有概率条件。

令:

$$a = \frac{1 - P(A)}{P(A)} = \frac{P(\bar{A})}{P(A)} \in [0, +\infty] \quad (10)$$

相似的,令:

$$b = \frac{1 - P(A|B)}{P(A|B)} = \frac{P(\bar{A}|B)}{P(A|B)}, \quad c = \frac{P(\bar{A}|C)}{P(A|C)} \quad (11)$$

$$x = \frac{1 - P(A|B,C)}{P(A|B,C)} = \frac{P(\bar{A}|B,C)}{P(A|B,C)} \geq 0 \quad (12)$$

则:

$$P(A|B,C) = \frac{1}{1+x} \in [0,1] \quad (13)$$

进一步,对于 $n$ 个数据事件 $D_i, i=1, \dots, n$ ,则条件概率 $A$ 的永久比表达式为:

$$P(A|D_i, i=1, \dots, n) = \frac{1}{1+x} \in [0,1] \quad (14)$$

其中:  $x = \frac{\prod_{i=1}^n d_i}{a^{n-1}} \geq 0$ ;  $a = \frac{1 - P(A)}{P(A)}$ ;  $d_i =$

$$\frac{1 - P(A|D_i)}{P(A|D_i)}, i=1, \dots, n$$

式(14)可进一步引入权重系数 $\tau_i$ 进行表达:

$$\frac{x}{a} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{a}\right)^{\tau_i}, \tau_i \geq 0, i=1, \dots, n \quad (15)$$

此时:

$$P(A|D, i=1, \dots, n) = \frac{\prod_{i=1}^n a^{\tau_i}}{\prod_{i=1}^n a^{\tau_i} + a \prod_{i=1}^n d^{\tau_i}} \quad (16)$$

则对于研究区的数据 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 而言,上式可写为:

$$\frac{x}{a} = \left(\frac{b}{a}\right)^{\tau_1} \left(\frac{c}{a}\right)^{\tau_2}, \tau_1 \geq 0, \tau_2 \geq 0 \quad (17)$$

其中 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 分别表示数据 $B$ 、 $C$ 对数据 $A$ 的影响权重,令:

$$\tau_1 + \tau_2 = 1$$

此时:

$$P(A|B, C) = \frac{1}{1+x} = \frac{a^{\tau_1 + \tau_2 - 1}}{a^{\tau_1 + \tau_2 - 1} + b^{\tau_1} c^{\tau_2}} = \frac{1}{1 + b^{\tau_1} c^{\tau_2}} \in [0, 1] \quad (18)$$

式(18)即为基于权重系数 $\tau$ 的岩相模型新算法,该方法适用于 $B$ 、 $C$ 不独立的条件,进一步提高了结果的稳定性和准确度。

## 2 基于新整合算法的岩相模型建立流程

在地震资料精细解释的基础上,结合地质分层建立研究区构造模型。选择适合研究区的反演技术得到波阻抗反演体,将反演体转换为深度域,并重采样,成为软数据体 $C$ 。将测井数据进行环境校正并标准化,完成泥质含量解释,成为硬数据 $B$ 。以 $B$ 为输入,利用高斯随机模拟建立泥质含量模型,并将其转化为砂岩概率模型I,即 $P(A|B)$ 。拟合软数据体 $C$ 与硬数据 $B$ 的相关函数,根据相关函数将 $C$ 转换为砂岩概率模型II,及 $P(A|C)$ 。根据油田实际情况,确定先验砂岩概率 $P(A)$ 的估计值,并优化 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ ,利用式(18)计算最终砂岩概率模型,并将其转换为岩相模型(图1)。

## 3 应用实例

### 3.1 地质概况

尼日尔D油田位于尼日尔Termit盆地Araga斜坡带,油藏构造为长条形反向断块(图2)。油田目前有6口井(D-4为新井,该文作为验证井),主要的含

油层系位于古近系的Sokor1组,油藏类型为层状边水砂岩油藏。储层以三角洲前缘沉积为主,孔隙度介于12%~30%,渗透率介于 $(200\sim 900) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于中高孔、中高渗储层。

### 3.2 地质统计学反演

与稀疏脉冲波阻抗或拟声波等传统反演方法相比,随机反演方法将地质统计学原理应用于地震反演,其不仅考虑了波阻抗及储层参数在空间分布上的随机性和非均质性,同时引入高分辨率测井数据,使得反演结果更符合地下实际,更好地满足薄储层的预测<sup>[18-23]</sup>。

尼日尔D油田地层主要发育砂泥岩薄互层,砂体厚度大多小于10 m。因此,采用地质统计学反演方法,能够有效识别厚度5 m的薄互层(图3)。从图3可以看出,D油田目的层段储层可分为两部分,上部砂体厚度小,发育程度低,下部砂体厚度大,波阻抗数据反应明显。

### 3.3 测井岩相模型建立

根据尼日尔D油田测井及岩心数据,结合研究区沉积环境,根据式(19)计算泥质含量,解释结果见图4。

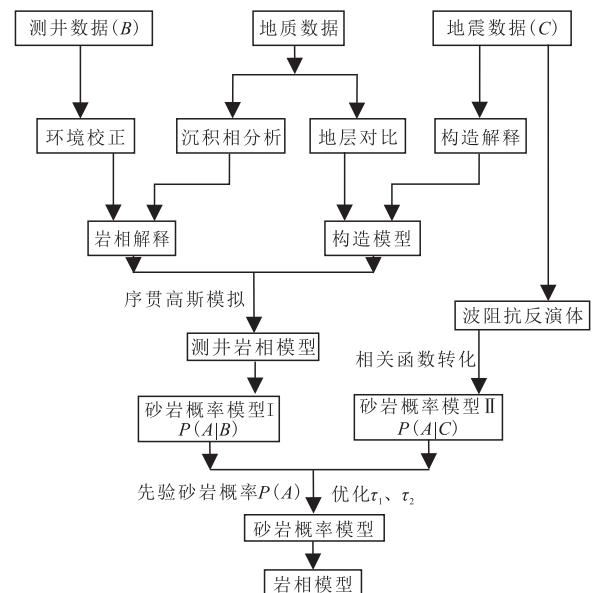


图1 基于新整合算法的岩相建模流程  
Fig. 1 Flow of lithofacies modeling based on new integrated algorithm

$$V_{sh} = \frac{2^{GCUR I_{GR}} - 1}{2^{GCUR} - 1}, I_{GR} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (19)$$

式中:  $V_{sh}$  为泥质含量;  $GCUR$  为希尔奇指数, 与地层地质时代有关, 该工区取值为 2;  $I_{GR}$  为泥质含量指数;  $GR$ 、 $GR_{min}$ 、 $GR_{max}$  分别为目的层段、纯砂岩层段及纯泥岩层段的自然伽马曲线数值。

将井点泥质含量数据作为输入, 利用序贯高斯模拟算法得到工区随机泥岩概率模型, 从而得到砂岩概率模型 1, 即  $P(A|B)$  (图 5、图 6)。在井点数据稀少的情况下, 序贯高斯模拟中使用的变差函数可由工区地震资料获取。研究中根据地震数据, 主变程为 2 000 m, 次变程为 1 500 m, 垂向变程为 2 m。

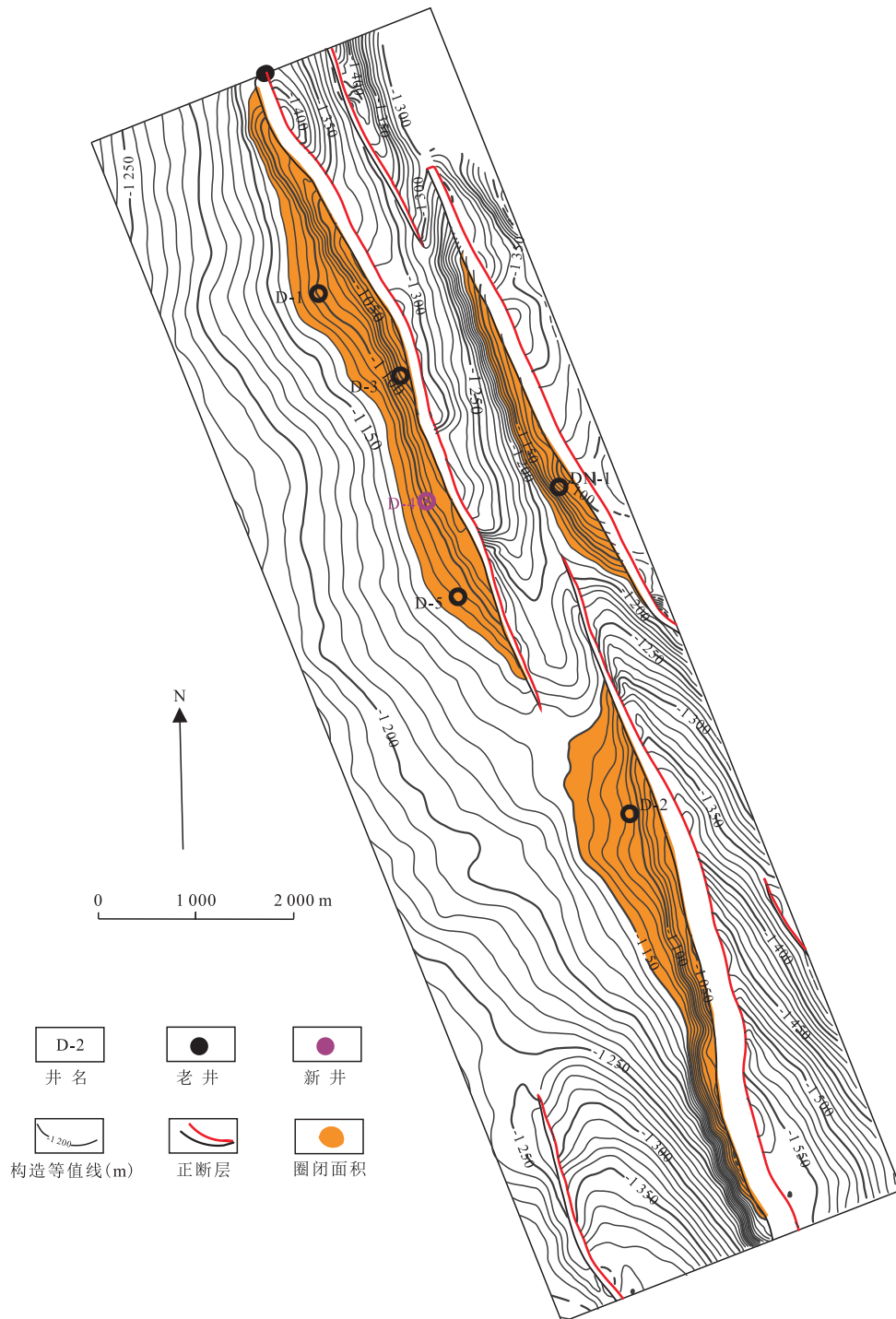
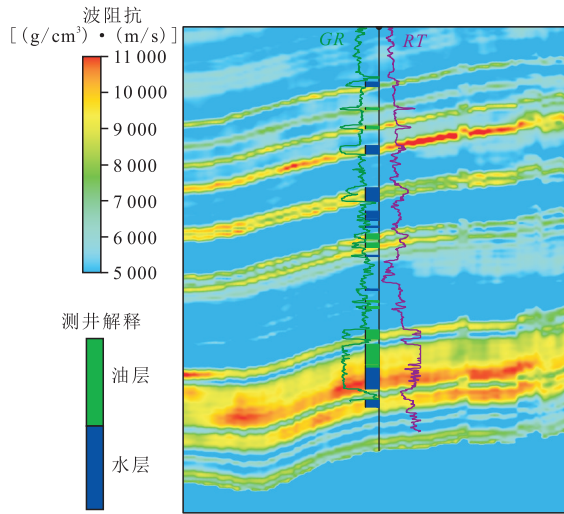


图2 尼日尔D油田 Sokor1组顶面构造  
Fig. 2 Structure of Sokor1 zone top in D oilfield, Niger



注:GR为自然伽马曲线;RT为电阻率曲线。

图3 尼日尔D油田过D-2井反演波阻抗剖面  
Fig. 3 Wave impedance profile across Well-D-2 in  
D oilfield, Niger

### 3.4 基于新整合算法的岩相模型建立

将波阻抗反演体重采样到井点,并与测井解释的泥岩概率曲线做交会图,拟合相关曲线(图7),可以看出,D油田目的层段波阻抗值与泥质含量之间具有很好的相关性,根据多项式拟合结果,其相关系数达到0.946 2。

用相关曲线将波阻抗反演体转换为泥质概率体,从而得到砂岩概率模型Ⅱ,及 $P(AIC)$ (图8、图9)。由图6可知:基于井资料约束的砂岩概率模型其垂向分辨率明显高,但其井间的砂体概率展布只是按照地层走势进行插值;由图9可知:基于波阻抗反演的砂体概率分布垂向分辨率差一些,但井间砂体概率分布忠实于油藏构造特征,断层两盘砂体对置关系清晰。

取目的层段所有井点砂岩概率平均值作为先验砂岩概率 $P(A)$ ;根据油田实际地震资料品质、井数据及井距大小,优化 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 的取值。利用式(18)得到最终砂岩概率模型(图10),该次研究中 $P(A)=0.38$ 。

图10为基于不同 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 取值的3个模拟结果。图10a表示在最终模拟过程中,测井资料的约束权重与地震资料的约束权重相同;图10b表示测井资料约束权重为地震资料约束权重的3倍;图10c表示地震资料约束权重为测井资料约束权重的3倍。每一种模拟结果都将测井资料的垂向高分辨率与地震资料的侧向高分辨率有效结合,提高了薄砂体的模拟精

度,降低了随机模拟的不确定性。同时从对比结果可以看出, $\tau_2$ 值越大,结果越忠实于地震资料, $\tau_1$ 值越大,结果越忠实于测井资料。由于D油田目前处于评价期,油田井数少,井距大,但三维地震资料丰富,因此, $\tau_2$ 的取值大于 $\tau_1$ ,即 $\tau_1$ 的取值介于0~0.5。

给定初始 $\tau_1=0$ ,利用3.2~3.4的流程建立整合的砂岩概率模型。将砂岩概率模型按照D-4井(未参与建模)轨迹生成砂岩概率曲线,并计算其在目的层段与D-4井实际砂岩含量曲线(由泥质含量曲线换算)的误差如下:

$$\text{误差} = \frac{\sum_{i=1}^N |P'_i - P_i|}{N} \quad (20)$$

式中: $P'_i$ 为模型中沿D-4井轨迹目的层段第*i*个采样点的砂岩概率; $P_i$ 为沿D-4井轨迹目的层段第*i*个采样点的实际重采样砂岩概率,砂岩含量由式(19)转化得到; $N$ 为沿D-4井轨迹目的层段的总采样点数。

考虑模拟结果精度及模型运算效率,此次以0.02为步长,0.5为最大值,依次赋给 $\tau_1$ 不同的值,保持模型其他参数不变,重复上述过程得到不同的误差。由图11可以看出, $\tau_1=0.1$ 时,误差取得最小值为0.24,对应的砂岩概率模型为最优模型。因此,最优模型中 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 取值分别为0.1,0.9。

该次研究中参与D油田砂岩概率建模的井数据为5口,其中D-4为新井,作为参数优化及验证井使用。根据验证结果:利用传统协同克里金算法,模型误差为0.39;利用新算法得到砂岩概率模型的最小误差为0.24,最大为0.28,平均为0.26(图11)。相比传统算法,新算法得到的模型平均误差减少30%,砂体预测精度得到大幅提高。同时,由于研究区主要以三角洲前缘沉积环境为主,砂体横向变化快,且5口井的井距均大于1 km,地震资料分辨率有限,这是导致模型最终误差大于0.24的主要原因,随着井资料的丰富,基于新改进算法的模型精度会进一步提高。

以概率0.5为阈值,将最优砂岩概率模型转换为尼日尔D油田岩相模型(图12),从图中可以看出岩性模型能够实现D油田薄砂体的精细表征,砂体垂向分辨率可达2 m。图13为基于常用方法(协同克里金)得到的地震约束岩相模型,与图12对比,井点处及井间主力砂体的展布形态两者基本一致,但在砂体空间展布清晰度及连续性上,基于新整合算法的岩相模型明显优于传统的整合算法。

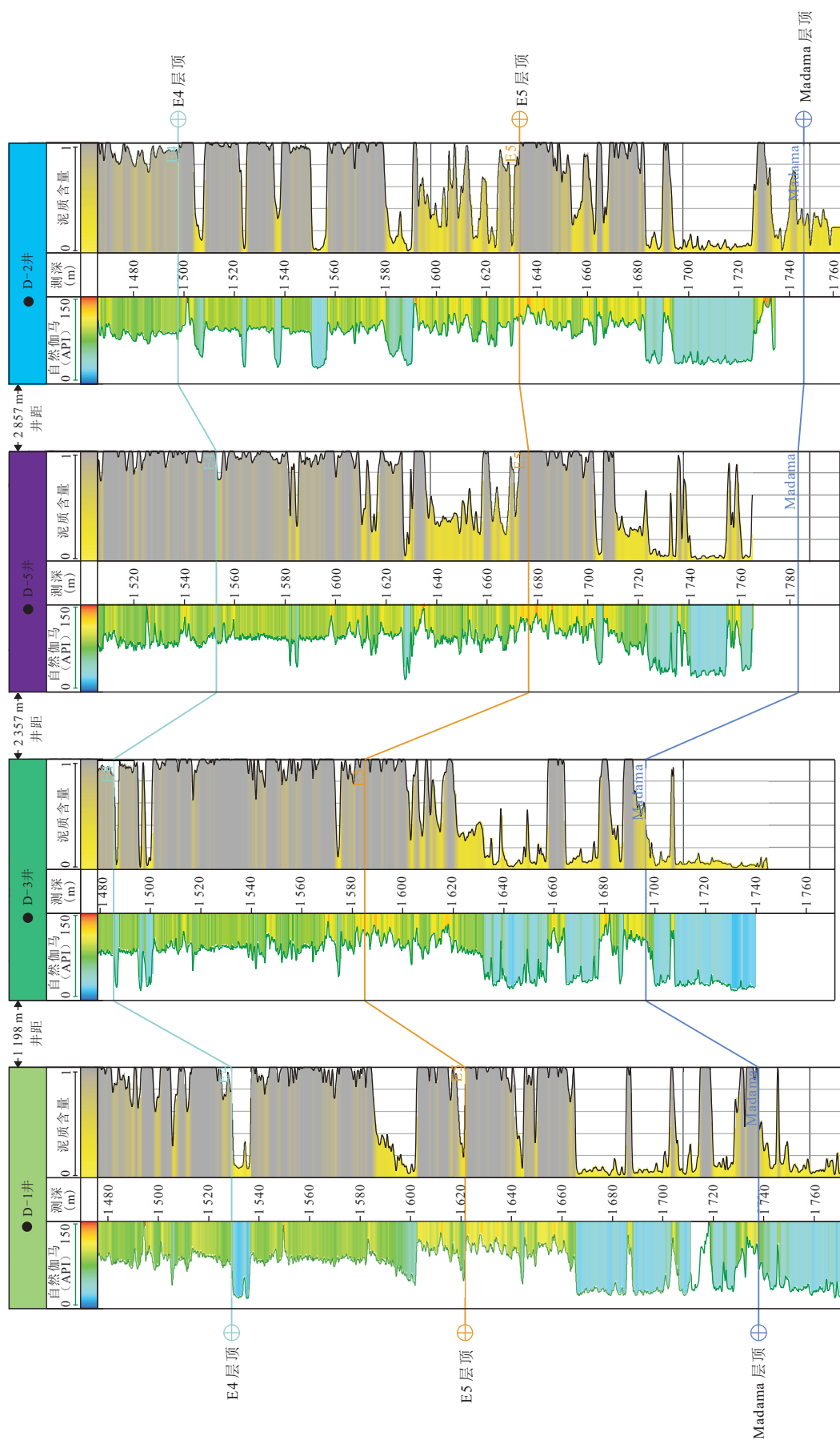


图4 尼日尔D油田主干井泥质含量测井解释结果剖面  
Fig. 4 Shale content interpretation profile cross main wells in D oilfield, Niger

### 4 讨论

提出的基于 $\tau$ 模型算法的岩相建模方法,在数据并非完全独立的情况下,可确保最终结果的一致性,稳定性好。该方法的准确性基于地震数据(属性体或反演体),井资料的质量以及 $\tau$ 值的确定。尤其是 $\tau$

值,不同区块取值不同,与地震资料和井资料的品质相关,目前还未有统一的公式去计算,但优化的方向可考虑以下3点:①若研究区处于勘探期,井数少,井距大,此时 $\tau_2$ 取值应大于 $\tau_1$ 。若研究区处于开发中后期,井资料丰富,此时 $\tau_1$ 取值应大于 $\tau_2$ ;②当地震属性与钻井数据具有较高的相关性时,可根据相关系数给 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 赋值;③编写相应软件,将 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 值逐步逼近的优化方法自动化和流程化,提高运算效率。

### 5 结论

1) 岩相建模过程中,传统的地震数据与测井数据结合算法将两者假设为相互完全独立或条件独立,这样会在最终结果中出现不一致性,例如概率值大于1。基于此引入一种新的结合算法( $\tau$ 模型),该算法不仅有效解决了上述问题,且简单易实现。

2) 将新算法应用于尼日尔D油田岩相建模中,通过优化算法确定 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 的取值,模拟结果将测井资料和地震资料的优势有效结合,提高了薄砂体的模拟精度,砂体垂向分辨率可达2 m。

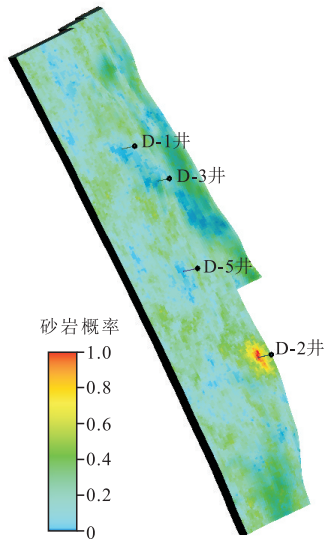


图5 尼日尔D油田砂岩概率模型 I

Fig. 5 Model I of sandstone probability of D oilfield, Niger

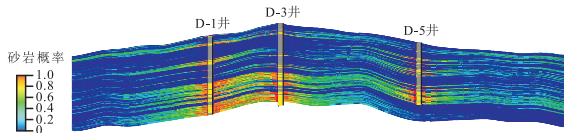


图6 尼日尔D油田砂岩概率模型 I 过井剖面

Fig. 6 Section of sandstone probabilistic model I of D oilfield, Niger

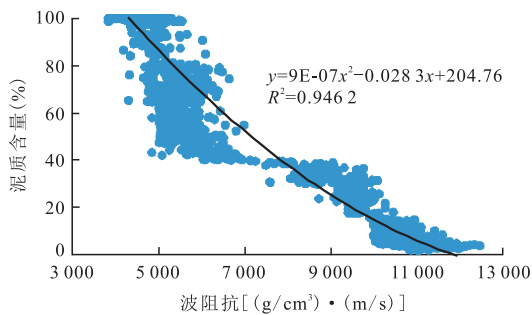


图7 尼日尔D油田主干井目的层段波阻抗与泥质含量交会图

Fig. 7 Cross plot of wave impedance and shale content in target zone of D oilfield, Niger

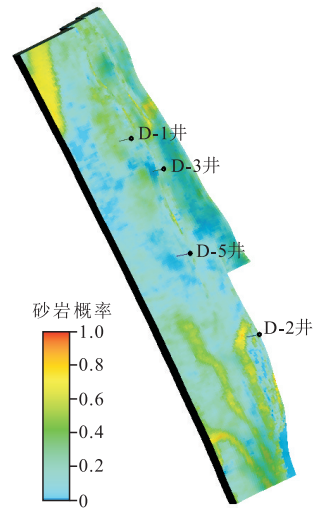


图8 尼日尔D油田砂岩概率模型 II

Fig. 8 Model II of sandstone probability of D oilfield, Niger

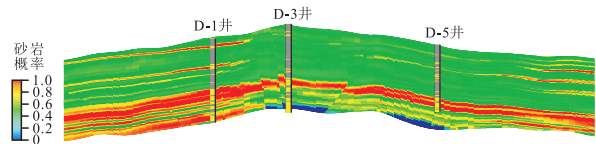


图9 尼日尔D油田砂岩概率模型 II 过井剖面

Fig. 9 Section of sandstone probabilistic model II of D oilfield, Niger

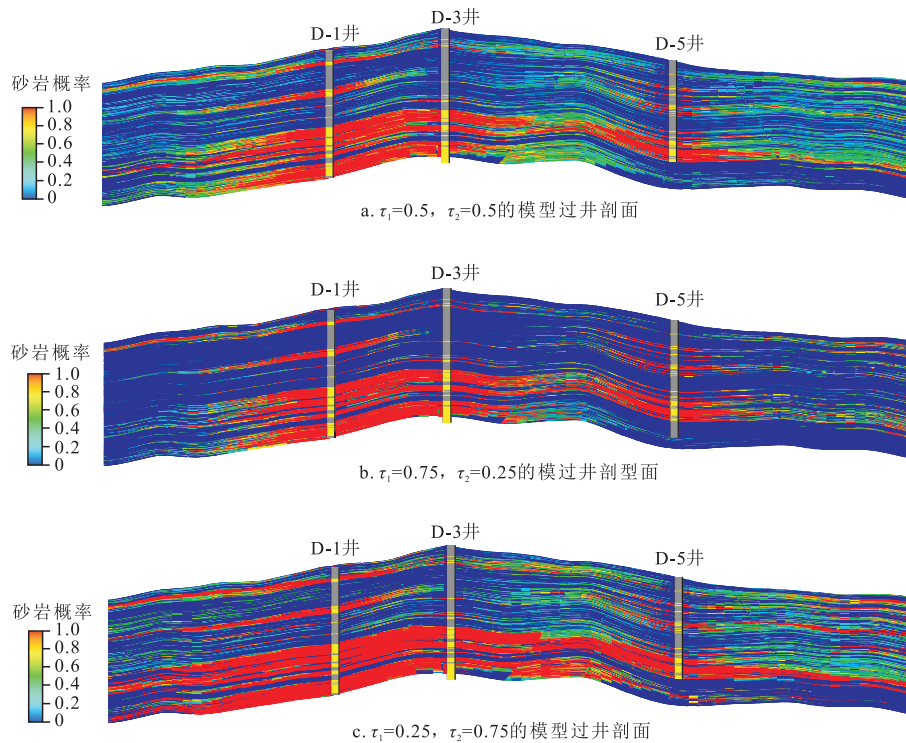


图 10 尼日尔D油田最终砂岩概率模型过井剖面

Fig. 10 Section of integrated sandstone probabilistic model of D oilfield, Niger

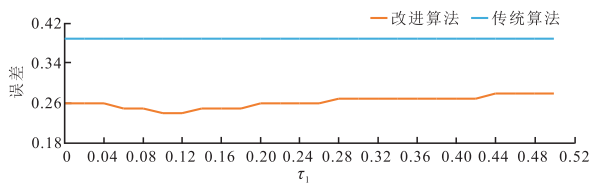


图 11 不同 $\tau_1$ 值与对应的模型误差关系

Fig. 11 Relation curve between various  $\tau_1$  and corresponding sandstone probabilistic model error

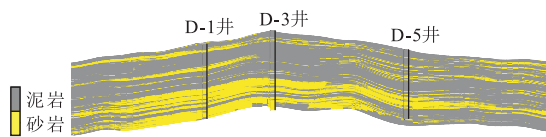


图 12 尼日尔D油田基于新整合算法岩相模型过井剖面

Fig. 12 Section of lithofacies model of D oilfield in Niger based on new integrated algorithm

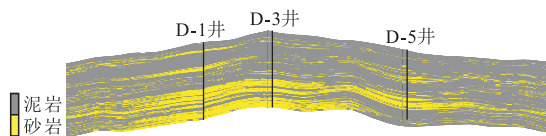


图 13 尼日尔D油田基于常用整合算法岩相模型过井剖面

Fig. 13 Section of lithofacies model of D oilfield in Niger based on traditional integrated algorithm

#### 参考文献

- [1] BEHRENS R A, MACLEOD M K, TRAN T T, et al. Incorporating seismic attribute maps in 3D reservoir modeled [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 1(2): 122-126.
- [2] DUBRULE O, THIBAUT M, LAMY P, et al. Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data[J]. Petroleum Geoscience, 1998, 4(2): 121-128.
- [3] 印兴耀, 刘永社. 储层建模中地质统计学整合地震数据的方法及研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(4): 423-430. YIN Xingyao, LIU Yongshe. Methods and development of integrating seismic data in reservoir model-building[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(4): 423-430.
- [4] 刘文岭. 地震约束储层地质建模技术[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 64-68. LIU Wenling. Geological modeling technique for reservoir constrained by seismic data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 64-68.
- [5] 胡勇, 于兴河, 李胜利, 等. 应用地震正反演技术提高地质建模精度[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 190-197. HU Yong, YU Xinghe, LI Shengli, et al. Improving the accuracy of geological model by using seismic forward and inversion techniques[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 190-197.
- [6] 杨锴, 艾迪飞, 耿建华. 测井、井间地震与地面地震数据联合约束下的地质统计学随机建模方法研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2695-2704.

- YANG Kai, AI Difei, GEN Jianhua. A new geostatistical inversion and reservoir modeling technique constrained by well-log, crosshole and surface seismic data[J]. *China Journal of Geophysics*, 2012, 55(8): 2695-2704.
- [7] 王家华, 赵巍. 基于地震约束的地质统计学建模方法研究[J]. *海洋石油*, 2010, 30(4): 46-49.  
WANG Jiahua, ZHAO Wei. Research on geostatistical modeling method constrained by seismic data[J]. *Offshore Oil*, 2010, 30(4): 46-49.
- [8] 于兴河, 李胜利, 赵舒, 等. 河流相油气储层的井震结合相控随机建模约束方法[J]. *地质前缘*, 2008, 15(4): 33-41.  
YU Xinghe, LI Shengli, ZHAO Shu, et al. The constraining method on stochastic modeling for fluvial petroleum reservoir controlled by depositional facies integrating wells with seismic data[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 33-41.
- [9] 尹艳树, 翟瑞, 吴胜和. 综合多学科信息建模——以港东开发区二区六区块储层微相三维分布模型为例[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(3): 408-411.  
YIN Yanshu, ZHAI Rui, WU Shenghe. Integrating data from multiple disciplines in reservoir modeling: A case from the reservoir microfacies of No. 6 district of No. 2 region, Gangdong oilfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 408-411.
- [10] 崇仁杰, 刘静. 以地震反演资料为基础的相控储层建模方法在BZ251油田[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(5): 307-311.  
CHONG Renjie, LIU Jing. Application of a facies-controlled reservoir modeling method based on seismic inversion data in BZ25-1 oilfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2003, 17(5): 307-311.
- [11] 周丽清, 赵丽敏, 赵国梁, 等. 高分辨率地震约束相建模[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(3): 56-58.  
ZHOU Liqing, ZHAO Limin, ZHAO Guoliang, et al. Stochastic facies modeling constrained by high-resolution seismic data[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(3): 56-58.
- [12] 孙月成, 张楠, 李成立, 等. 三维数据体时深转换速度模型的精细构建方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(3): 145-152.  
SUN Yuecheng, ZHANG Nan, LI Chengli, et al. Fine velocity modeling method of the time-depth conversion for 3D data volume[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(3): 145-152.
- [13] 谭学群, 刘云燕, 周晓舟, 等. 复杂断块油藏三维地质模型多参数定量评价[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 185-194.  
TAN Xuequn, LIU Yunyan, ZHOU Xiaozhou, et al. Multi-parameter quantitative assessment of 3D geological models for complex fault-block oil reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 185-194.
- [14] 张磊夫, 董大忠, 孙莎莎, 等. 三维地质建模在页岩气甜点定量表征中的应用——以扬子地区昭通页岩气示范区为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(9): 1332-1340.  
ZHANG Leifu, DONG Dazhong, SUN Shasha, et al. Application of 3D geological modeling in quantitative characterization of shale gas sweet spots: Case study of Zhaotong national demonstration area of Yangtze region[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(9): 1332-1340.
- [15] 叶小明, 霍春亮, 王鹏飞, 等. 井震静动四位一体储层建模方法[J]. *油气藏评价与开发*, 2017, 7(4): 1-5.  
YE Xiaoming, HUO Chunliang, WANG Pengfei, et al. A reservoir modeling method by comprehensive utilization of various data[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2017, 7(4): 1-5.
- [16] JOURNEL A G. Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses[J]. *Mathematical Geology*, 2002, 34(5): 573-596.
- [17] 王家华, 夏吉庄. 三维地震约束多点建模降低井间砂体预测的不确定性[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 878-888.  
WANG Jiahua, XIA Jizhuang. Multi-point statistical modeling constrained by 3D data reducing of uncertainty of sand body prediction[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 878-888.
- [18] 陈泓竹, 王彦春, 高阳. C51井区葡萄花储层薄砂体展布地震精细刻画[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(3): 600-607.  
CHEN Hongzhu, WANG Yanchun, GAO Yang. Seismic fine depiction of the thin sand distribution of the Putaohua Reservoir in the Well C51 Area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(3): 600-607.
- [19] 常少英, 刘玲利, 崔钰瑶, 等. 浅水三角洲薄砂层地震沉积表征技术——以准噶尔盆地芳草湖地区清水河组为例[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(1): 139-147.  
CHANG Shaoying, LIU Lingli, CUI Yuyao, et al. Seismic sedimentary characterization of thin sand layers of shallow water deltas: A case study of Qingshuihe Formation in Fangcaohu area, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(1): 139-147.
- [20] 周超宇. 地质统计学地震反演技术在溱潼南华地区薄砂层的预测应用[J]. *非常规油气*, 2018, 5(4): 23-26.  
ZHOU Chaoyu. Application of the geostatistical seismic inversion in thin sand in Nanhua Area, Qintong Sag[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2018, 5(4): 23-26.
- [21] 潘翼, 宫伟, 赵匡, 等. 基于地震反演约束的储层建模方法及应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(5): 529-534.  
PAN Yi, GONG Wei, ZHAO Kuang, et al. Application research of reservoir modeling based on seismic inversion constraint[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2017, 44(5): 529-534.
- [22] 原福堂, 董红, 朱再文, 等. 地质统计学随机反演与稀疏脉冲反演在储层预测中的应用对比[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(7): 55-59.  
YUAN Futang, DONG Hong, ZHU Zaiwen, et al. Application comparison between sparse spike inversion and geostatistical inversion in reservoir prediction[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(7): 55-59.
- [23] 戴婉薇, 范乐元, 胡圣利, 等. 基于地质统计学反演和储层分类的相控储层建模方法研究及应用[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(1): 236-241.  
DAI Wanwei, FAN Leyuan, HU Shengli, et al. Facies-controlled reservoir modeling method based on geostatistical inversion and reservoir classification[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2017, 36(1): 236-241.

(编辑 李青)