

文章编号:0253-9985(2010)02-0212-07

基于地震波阻抗反演的小层砂体预测技术 ——在大庆油田州57水平井区块的应用

单敬福¹,王峰²,孙海雷³,孙继刚⁴,韩喜⁵

(1. 中国石油大学 资源与信息学院,北京 102249; 2. 上海理工大学 机械学院,上海 200093;

3. 中国石油天然气股份有限公司 大庆油田公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712;

4. 中国石油天然气股份有限公司 大庆油田公司 采油四厂地质大队,黑龙江 大庆 163511;

5. 中国石油天然气股份有限公司 大庆油田公司 采油八厂地质大队,黑龙江 大庆 163000)

摘要:在油气勘探与开发的整个历程中,无论是勘探阶段还是进入开发后的任何时期,尤其在对水平井区目的层的砂体预测时,始终离不开对储层沉积特征的分析,州57井研究区主力油层为葡萄花油层,其沉积时期处在松辽盆地北部大型三角洲沉积体系中的前缘相带到湖相的过度带之上,沉积地层较薄,沉积单砂体一般不超过2 m。因为砂体的三维展布特征受控于地质历史时期沉积体系的时空变迁及演化,每一次的湖进湖退严格控制砂体的分布与走向,因此,在精细刻画小层砂体过程中,首先要精细的地质研究,然后利用储层地震波阻抗反演对油田小层砂体进行预测,为后期调整注采关系、提高采收率提供重要参考依据。

关键词:水平井;地震波阻抗反演;小层砂体;采收率;大庆油田;松辽盆地

中图分类号:T122.2

文献标识码:A

Prediction of sublayer sandstones based on wave impedance inversion in the wellblock of the horizontal well Zhou-57

Shan Jinfu¹, Wang Feng², Sui Hailei³, Sun Jigang⁴, and Han Xi⁵

(1. Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai For Science And Technology, Shanghai, 200093;

3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Daqing Oil Field, Daqing, Heilongjiang 163511;

4. Geology Unit of the No. 4 Oil Production Company, PetroChina Daqing Oil Field, Daqing, Heilongjiang 163511;

5. Geology Unit of the No. 8 Oil Production Company, PetroChina Daqing Oil Field, Daqing, Heilongjiang 163511)

Abstract: During the whole process of petroleum exploration and development, the prediction of sandbodies in any target area, especially those in wellblocks of horizontal wells, is always dependent upon an analysis of reservoir deposition systems. The well Zhou-57 produces from the Putaohua Formation, which was deposited within the transition zone from a large-scale delta front to lake in northern Songliao Basin. The formation features in thin single sand bodies with a thickness of less than 2 m. The spatial distribution of these sandbodies is controlled by the variation and evolution of deposition systems during different geological times. The distribution and strike of sandboies are strictly controlled by lake transgression and regression. Therefore, a fine description of these sandbodies requires firstly a detailed geological study and then a prediction of sandstone sublayers through seismic wave impedance inversion. The prediction results can be used as important reference factors to adjust the injection-production pattern and improve the recovery ratio during the later phase of development.

Key words: horizontal well, wave impedance inversion, sublayer sandstone, recovery, Daqing oilfield, Songliao Basin

收稿日期:2009-10-15。

第一作者简介:单敬福(1977—),男,博士后,油储地球物理。

地震储层描述方法是运用最为广泛的储层描述方法^[1~11],它具有在宏观和三维空间上定量表征储层具有很大优势,但也具有微观精细表达储层的缺点。其缺点分为三个方面:其一地震分辨率对储层分辨能力具有决定性的作用。尽管通过一些地震属性分析方法和技术能够提高对储层的刻画精度,但仍然是以地震本身的分辨率为基础,不可能跨越地震分辨率的限制。其二是本区波阻抗特征或速度特征与储层物性之间缺乏统计上的有效相关性。其三是本区地震储层解释只是葡萄花油层顶界面的解释,是粗略的、累计的储层变化,而非单个储层单元或砂体的纵横向变化,难于达到储层描述的精度。在常规的井约束下的地震宽频带反演方法能够略微地提高地震分辨率,但由于储层的波阻抗缺乏统计上的独立性,在储层解释上仍然存

在着巨大的障碍^[1,2]。根据这些特征,笔者充分利用测井约束的地震波阻抗反演方法来预测油田砂体三维展布规律,其优点是既发挥了地震资料宏观和空间分布的优势,也充分利用了测井纵向上分辨率高的特点,两者有机结合,取长补短,为准确预测油田小层砂体三维空间上的展布提供了有力的保障。

1 地质背景

州 57 井研究区块位于大庆长垣以东的三肇凹陷内,研究面积约为 60 km²(图 1),区内原州 57 等 4 口探井,区内主要目的层为葡萄花油层。2006 年到 2007 年期间,大庆油田采油八厂在该区加大挖潜力度,先后在该区针对葡萄花油层部署评价井 11 口。钻井实施效果证明,该区的外扩挖

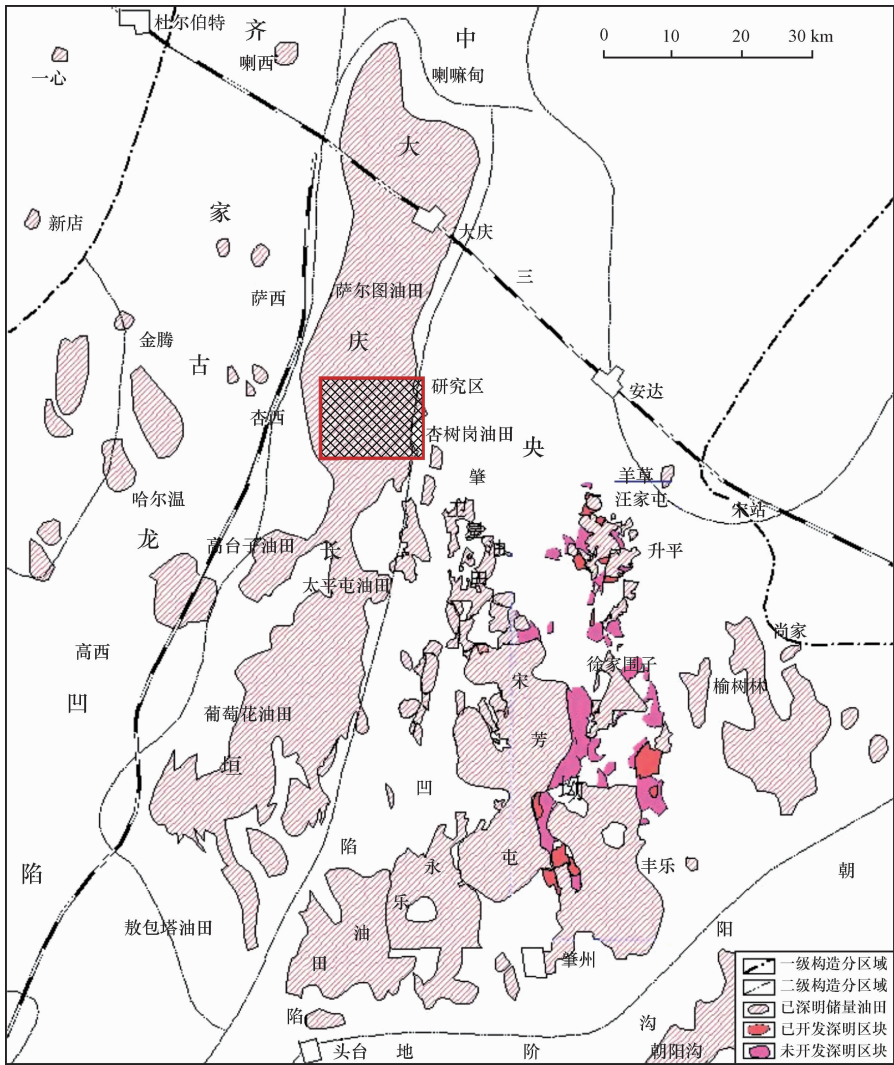


图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 The location of the study area

潜工作取得了重要的石油发现,综合评价研究区葡萄花油层可提交石油探明储量 600×10^4 t,并且为 2007 年油田公司上交古龙北 1.0×10^8 t 石油探明储量作出了巨大贡献。2007 年在区内设计并实施肇字号葡萄花油层水平井共 33 口。为了提高水平井的开发效果,需要研究出一套生产中使用的技术方法,以解决开发过程中对储层展布的精细要求。

2 基于地震资料的储层三维精细描述

2.1 地震子波求取及合成记录标定

在地震反演过程中,求取地震子波的目的是

为了求取合适的反褶积算子。在实际工作中,在已知测井声波速度和岩石密度的前提下,通过估算合适的地震子波,正演得到井孔合成记录。这个过程是不断递进的,当井孔合成记录与井旁地震道达到最大相关时,认为此时地震子波为正确的子波。

Jason 软件在计算单井孔合成记录时,首先给一个某一频率的理论子波,在得到合成记录后,与井旁地震道进行仔细标定,在标定没有误差后,通过计算实际子波得到最终的合成记录(图 2)。

2.2 小层格架构建方法

根据研究区已钻 121 口直井的 7 个小层的小

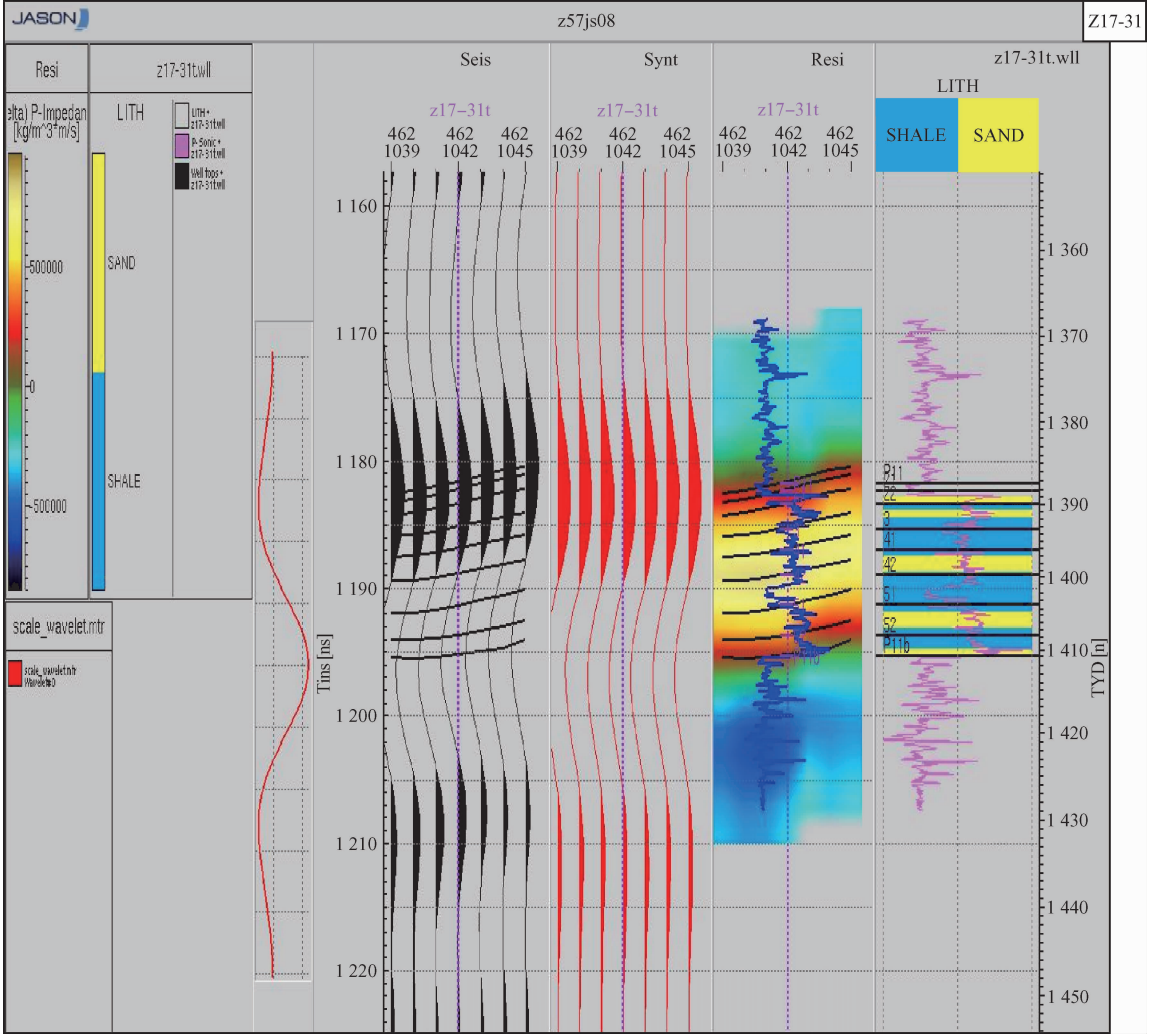


图 2 合成地震记录的标定(以肇 17-31 井为例)
Fig. 2 Calibration of synthetic seismogram—taking the well Zhao 17-31 as an example

表1 葡萄花油层组各小层平均时间厚度与平均地层厚度对比

Table 1 Correlation of the average time thickness and the average layer thickness of sublayers in the Putaohua Formation

小层号	PI11	PI21	PI22	PI3	PI41	PI42	PI51	PI52	合计
平均厚度/m	1	2	2	2	2	2	2	2	15
时间厚度/ms	1	1	1	1	1	1	1	1	8

层深度界线解释结果,可以把小层界线标定在合成记录上,每个小层界线都代表各小层组内 1-3 个旋回的开始和结束。研究区葡萄花油层平均厚度约为 15 m,地层层速度约为 3 260 m/s,地震旅行双程时间厚度约为 8 ms。由各小层厚度的解释结果,可以求出每个小层的平均厚度。根据合成记录的时深对应关系,可以得到各小层的时间厚度平均值。

研究区内包括探井、评价井共 15 口, 根据平均时间厚度关系, 可以在葡萄花顶底面之间内差出其它小层时间界线面, 插值公式为:

$$\text{小层界线时间面} = \text{顶面时间} + \text{小层时间累计厚度} \times (\text{底面时间} - \text{顶面时间}) / 15 \quad (1)$$

该公式不仅考虑到了顶底面之间厚度变化的影响因素,又考虑到了各小层厚度不一致的情况。由此得到的小层面与测井小层分层在井点处仍然存在误差,为了消除这种误差,可以先用所得到的各小层时间面减去井点处标定的时间面,再用所得到的误差点值插值成误差值平面,最后用各小层时间面减去误差值平面,最终得到校正好的各小层时间面,其可以精确地与各井点小层相对应,见图3。

2.3 敏感测井曲线分析

在多种测井曲线中,我们希望找出对岩石最敏感的曲线来有效地表征地下岩层的特性和分布规律,然后再实现测井曲线特征值反演,完成三维空间数据的计算。在研究中,利用本区各井各小层的砂岩和有效厚度解释成果,制作每口井的岩性曲线和有效含油(厚度)曲线,然后利用其它曲线与之交汇,通过交汇结果来确定敏感曲线。

本次我们做了波阻抗与岩性、伽玛与岩性、(深侧向)电阻率与岩性、自然电位与岩性的多种交汇,交汇分析结果表明,本区葡萄花目的层段的波阻抗、伽玛、自然电位等曲线在分辨砂岩与泥岩时,砂泥岩岩性重叠段大,都不能有效的区分砂泥岩,而在电阻率与岩性的交汇图上可见,电阻率是能够有效区分砂泥岩岩性的地球物理属性,经研究确定,电阻率值小于 $8 \Omega \cdot m$ 时为泥岩,大于 $8 \Omega \cdot m$ 时为砂岩。

在砂岩确定之后,还可以进一步开展研究工作,就是在砂岩储层中识别有效含油的砂岩,通过针对砂岩再增加其它约束条件来实现这个过程。本次增加的条件有两个,一是当声波速度大于4 000 m/s,认为是致密岩性而不含油;二是当测井微电位-微梯度的幅度差大于1.5时,砂岩含油。

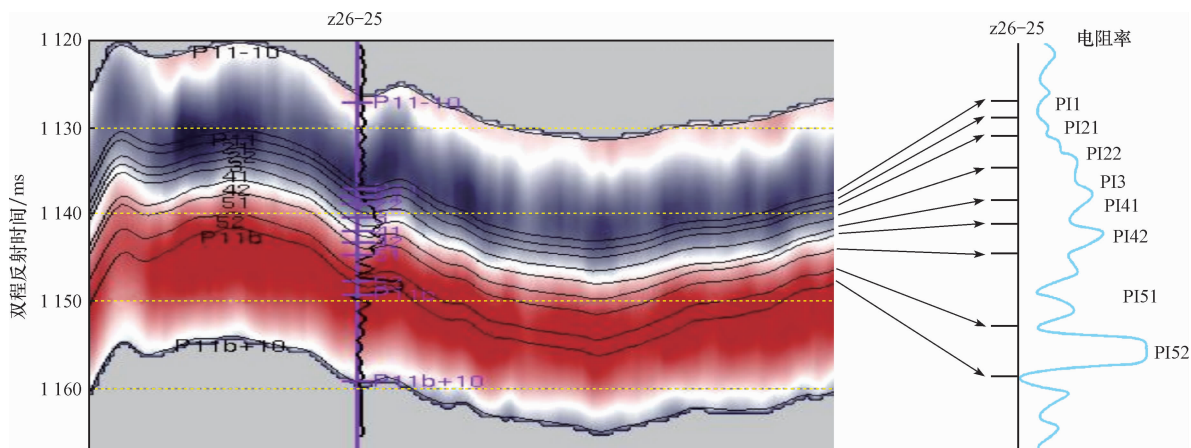


图3 葡萄花油层小层格架划分剖面

Fig. 3 Profile of sub-layer division in the Putaohua Formation

2.4 稀疏脉冲反演

稀疏脉冲反演(CSSI)是基于稀疏脉冲反褶积的递推反演方法,其基本假设是地层的强反射系数是稀疏的,即地层反射系数由一系列叠加于高斯背景上的强轴组成。该方法的主要优点是能获得宽频带的反射系数,能较好的解决地震记录的欠定问题,从而使反演得到的波阻抗数据更趋于真实。

2.4.1 测井资料标准化处理

由于测井资料是在不同的时间、不同环境条件以及不同的仪器进行测量的,因此存在随机误差和系统误差。为了减少或消除这些误差,必须对测井资料进行标准化处理,主要包括环境校正、深度校正和刻度校正等。测井资料的标准化的关键是选好标准井,即这个标准井目的层段的岩性、电性、物性要具有区域代表性,这样其它井的测井数据要按该井进行标准化,从而消除因数据因素对反演结果的不利影响。

2.4.2 建立低频模型

由于地震采集系统的限制,地震直接反演结果中不包含 10 Hz 以下的低频成分,须从其它资料提取予以补偿。从地震资料出发,以测井资料和钻井数据为基础,建立基本反映沉积体地质特征的低频初始模型。地质模型中的地层模型是根据精细的层位解释结果建立的地层框架表,地层框架表对反演目的层段的地层特征应具有代表性,建立合适的地层框架表是测井数据进行内插的关键。具体做法是根据地震解释层位,按沉积体的沉积规律在大层之间内插出很多小层,建立一个地质框架结构;在这个地质框架结构的控制下,根据一定的插值方式对测井数据沿层进行内插和外推,产生一个平滑、闭合的实体模型。因此,合理地建立地质框架结构和定义内插模式是最关键的部分。

2.4.3 约束稀疏脉冲反演

反演可以被定义为获得地下地层模型的一个过程,而这个模型足以描述所观测到的数据体。解释人员根据地震数据对地下地层特征做出推断与所谓的“反演问题”的解决方案应该是一致的。相反,“正演问题”是记录下对于一个给定的地下地层模型遵照一定地球物理学法则产生的地震数据。提高地震反演的分辨率和精度。

2.5 地质统计反演和随机模拟

地质统计反演或随机反演的真正优势是它能够适当反映地层分布的一定的规律性和随机性,并且对这种不确定程度做出定量的评估,在反演结果的分辨率上有提高的空间。序贯协同模拟算法又可以允许建立除了波阻抗模型以外的储层地质模型,这是常规反演方法所难以实现的。从而对于提高油藏数模的历史拟合水平和储量的预测精度有重要意义。

随机反演的逻辑基础是基于模型反演的多解性,而随机储层模拟的目的也正是为了弥补确定性建模中所缺乏的适当的不确定性,地震资料作为三维空间的约束条件将随机建模与随机反演技术紧密结合到一起,这也正是今后两种技术发展的一个主要趋势。从更深层次上讲,这一发展为将地震资料更好地服务于油气田的开发指出一个方向。

为了解决反演剖面上纵向分辨率问题,首先对电阻率曲线与声波曲线进行分析。声波曲线反应的是地下岩石的声波穿过速度,可以与地震波旅行时很好地对应,本区葡萄花油层砂岩速度明显高于其上下围岩速度,电阻率曲线特征表现为储层含不同流体后的电阻率特征,储层含油后电阻率最高,因此电阻率曲线可以表征储层的含油性,本区含油储层砂岩的电阻率大于 $8 \Omega \cdot \text{m}$ 。同时根据地层层速度确定含油砂岩为小于 4000 m/s ,过度性致密砂岩大于 4000 m/s ,含油性砂岩微电极幅度差大于 1.5,而过度性致密砂岩则小于 1.5。

根据地质任务要求,从本区的地震地质条件出发,针对本区实际资料的信噪比和分辨率的特点,采用地质统计反演(stratmod)模块进行了全区葡萄花油层的反演工作(图4)。

2.6 深度域反演剖面及应用

我们常说的地震反演是在时间域进行的,原因是地震旅行时是所能接收到的地下岩层信息中最准确的变量,因此地震剖面通常是时间域剖面,因而多数的地球物理数学算法是在时间域内开展的。但是为了研究工作的深化,我们通常需要深度域的资料,比如目前广泛开展的油田精细地质建模就是基于深度域。在 JASON 反演软件中,可以根据研究区所有测井声波速度建立地层三维速度场,然后通过全区三维速度场模型把时间域的反演剖面转换成深度域的反演剖面。

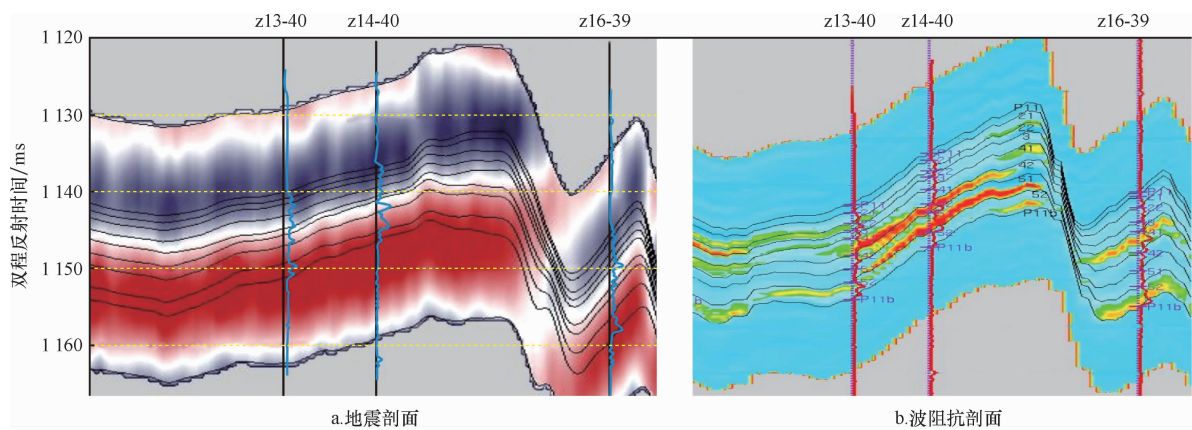


图 4 葡萄花油层地震波阻抗反演剖面

Fig. 4 Profiles of seismic wave impedance inversion in the Putaohua Formation

2.7 储层岩性变换

在研究工作中,为了储层表征的直观性,需要把地球物理特征剖面转换成岩性剖面,转换的直接方法是设定阈值,将电阻率剖面变换成岩性剖面,变换关系为泥岩深侧向电阻率值小于 $8\ \Omega\cdot\text{m}$,大于 $8\ \Omega\cdot\text{m}$ 则为砂岩,大于 $9\ \Omega\cdot\text{m}$ 定义为含油砂岩。对地层层速度小于 $4\ 000\ \text{m/s}$,微电极幅度差大于 1.5 定义为含油性砂岩,地层层速度大于 $4\ 000\ \text{m/s}$,微电极幅度差小于 1.5 定义为过度性致密砂岩。

根据研究目的要求,需要得到各目的层段的砂岩厚度平面分部规律,可以针对各目的层段的Jason反演成果岩性剖面进行数据转换^[3~5]。具体作法是:利用FunctionMod模块功能对岩性数据体在各小层的砂岩样点行垂向累加,得到时间厚度

图,并根据地层砂岩层速度平均值对时间厚度进行转换得到深度厚度图,或者直接对深度域岩性数据样点进行垂向累加,这样就实现了储层定量预测的目的(图5、图6)。

3 结论与认识

- 1) 是利用测井资料分层数据的深时转换结果,在地震剖面上进行小层框架的精细解释划分。由于本区储层在横向上的变化,在小层框架下的研究结果会更符合沉积学特征,而地层的沉积结果应是更接近于小层解释层面而横向延伸的,通过小层框架可以真实地表达储层的横向变化特征或规律,细化储层表征级别。
- 2) 利用储层特征值反演,其原理类似于井约束下的地震宽频带反演技术,利用的测井不仅限

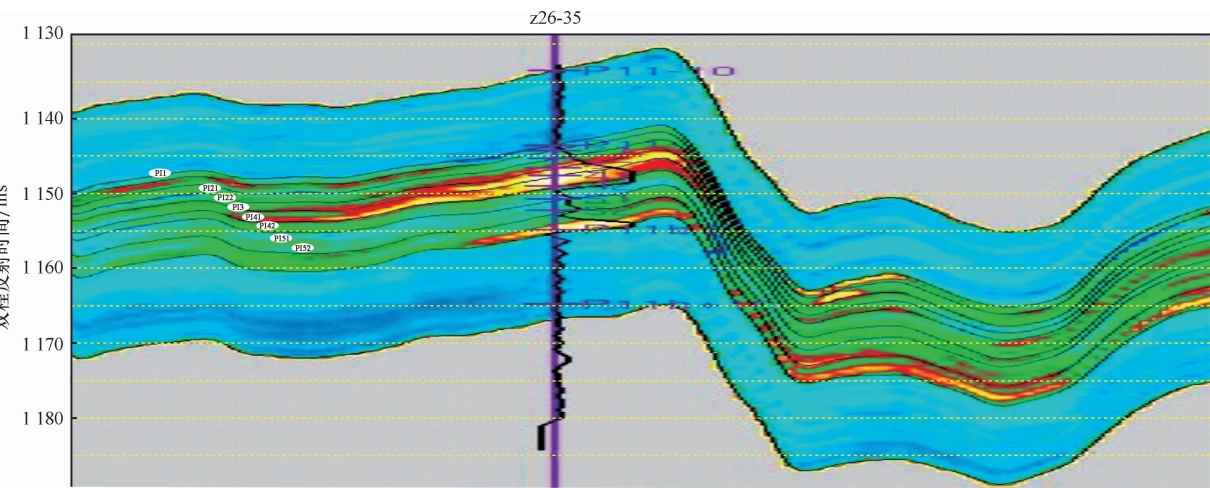


图 5 葡萄花油层段电阻率反演剖面

Fig. 5 Profile of resistivity inversion in the Putaohua Formation

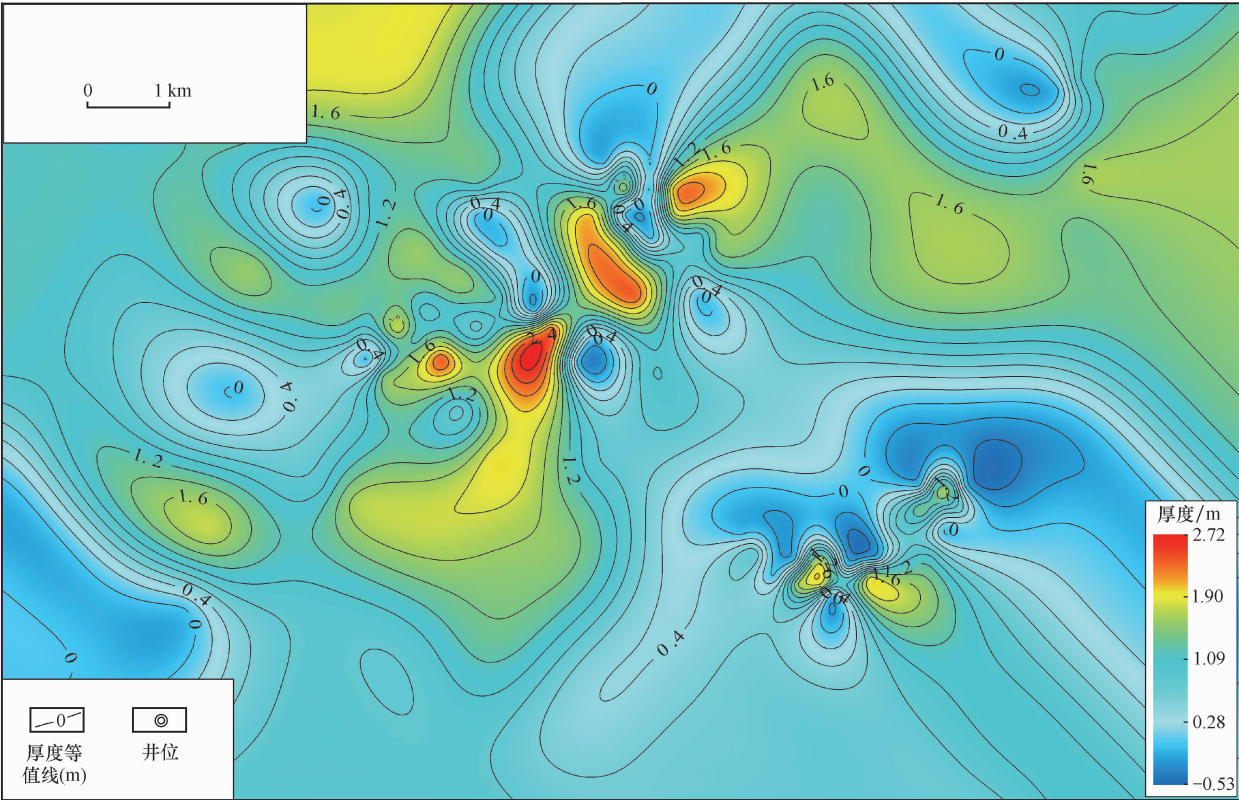


图6 PI22 小层砂岩预测厚度

Fig.6 Prediction of the thickness of some sublayers (PI21, PI22, PI3\PI41)

于声波或密度测井,而是利用更能反映储层特征及其变化的测井资料,如自然伽玛、自然电位或电阻率测井。通过随机模拟的方法反演出虚拟的测井剖面,虽然该方法可能没有完全遵循地震波反演原理,但利用了地层序列变化所引起的电性和波阻抗特征的变化具有相似的原理,只是弱化或强化了某些局部特征,这种方法反演的结果不可能将分辨率提高到分辨每个单砂层能力。但是,其特征值在统计上与储层更具有相关性。

3) 是可以利用特征值反演结果的阈值设定,进行岩性的转换,从而解释出储层的厚度变化或延伸范围。虽然这可能是多个单砂层垂向叠置和横向叠合的结果,但这必定有效地揭示了地下储层变化的规律性,其也可以作为储层空间变化的软信息,为储层随机模拟提供依据。

参 考 文 献

1 吕晓光,赵翰卿,付志国. 1997. 河流相储层平面连续性精细描述[J]. 石油学报,18(2):66~71
2 马立祥. 砂岩油气储层构形分析及其在国内的应用前景[J]. 天然气地球科学,1992,3(2):11~16

3 穆龙新,贾爱林,黄石岩. 河流-三角洲储层露头和现代河流沉积综合研究[M]. 北京:大庆石油管理局勘探开发研究院、石油勘探开发科学研究院,1998,1~102
4 单敬福,纪友亮,史榕,等. 基于神经网络和开窗技术的储层渗透率的预测方法——以大庆萨尔图油田葡萄花油层组PI1—PI4小层砂岩为例[J]. 地质科学,2007,42(2):395~402
5 张红薇,赵翰卿,麻成斗. 泛滥-分流平原相储层中河间砂体的精细描述[J]. 大庆石油地质与开发,1998,17(6):164~167
6 朱伟,马朋善,谭承军,等. 渤海凹陷蓬二号构造地震资料测井约束反演[J]. 石油与天然气地质,2005,26(1):120~124
7 叶泰然,付顺,吕其彪,等. 多波地震联合反演预测相对优质储层——以川西深层致密碎屑砂岩为例[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):357
8 孙耀华,王华,陆永潮,等. 泌阳凹陷复杂圈闭地震地质综合研究方法[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):370
9 宋章强,赖维成,牛成民,等. 渤海海域湖相碳酸盐岩地震-地质综合预测方法及应用[J]. 石油与天然气地质,2009,30(4):444
10 崔永谦,秦凤启,卢永和,等. 河流相沉积储层地震精细预测方法研究与应用——以渤海湾盆地冀中坳陷古近系河道砂为例[J]. 石油与天然气地质,2009,30(5):668
11 毛凤鸣,陈安定,严元锋,等. 苏北盆地复杂小断块油气成藏特征及地震识别技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):827~840