

doi: 10.13745/j.esf.2015.06.013

叠后地质统计学反演在碳酸盐岩储层预测中的应用： 以哈拉哈塘油田新垦区块为例

闫玲玲^{1,2,3}, 刘全稳^{4,*}, 张丽娟³, 祁红林⁵

1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500

2. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500

3. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

4. 广东石油化工学院 石油工程学院, 广东 茂名 525000

5. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院 地下储库中心, 河北 廊坊 065007

YAN Lingling^{1,2,3}, LIU Quanwen^{4,*}, ZHANG Lijuan³, Qi Honglin⁵

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

4. College of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China

5. Underground Gas Storage Center of Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang 065007, China

YAN Lingling, LIU Quanwen, ZHANG Lijuan, et al. Post-stack geo-statistics inversion in the application of the carbonate rocks reservoir prediction: In Xinken area, Halahatang oil field as an example. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 177-184

Abstract: Based on method of post-stack geostatistical inversion, some key techniques, such as construction of the fine geological model, classification of reservoir and analysis of statistics parameters, equivalent simulation for porosity and geo-statistical inversion, have been discussed in details. Aimed at the problem resulted from prediction of carbonate reservoir, the further study procedures which are to optimize systematically the relevant inversion parameters and their reasonable distribution in local reservoirs were carried out in order to get the better prediction precision through well seismic reservoir fine calibration. The prediction results showed this method performed well in spatial distribution of reservoir and non-reservoir; 35 wells were used to test the precision of inversion results; the accumulative thickness of the reservoir when their total porosity is above 1.8% was quantitatively analyzed combined with the local geologic features, it showed high conformity to the real situation of reservoir distribution. The conformity rate is over 80% between the prediction results and practical drilled reservoirs occurrence, so that the prediction results from poststack-based geostatistical inversion have the better precision and approach the actual geologic situation; it has better prediction identification between the reservoir and non-reservoir heterogeneity than conventional wave impedance inversion in practical field operation.

Key words: Halahatang oil field; Xinken area; post-stack geo-statistics inversion; variation function; reservoir prediction

摘要:以叠后地质统计学反演方法为依托,重点论述了精细地质模型的建立、储层划分及统计学参数分析、地质统计学反演和等效孔隙度协模拟等关键技术。针对碳酸盐岩储层预测的难题进一步研究,系统地优化了反演的相关参数,通过井震精细标定,提高了储层预测的准确性。本次共有 35 口井参与试验,结合本区地质特征对总孔隙度大于 1.8% 的储层进行储层厚度和积分厚度定量分析。结果显示,储层及非储层的空间展布

收稿日期:2014-10-29;修回日期:2015-01-26

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05004-004)

作者简介:闫玲玲(1978—),女,博士研究生,主要从事油气田开发地质研究工作。E-mail:yll7245522@163.com

* 通讯作者简介:刘全稳,男,教授,博士生导师。E-mail:liu005777@hotmail.com

特征直观、清楚,与测井解释结果符合程度高,目的层段已钻井储层与叠后地质统计学反演的储层吻合率达80%以上,说明叠后地质统计学反演预测的远离井的储层分布合理,接近实际地质特征。反演结果具有较高的分辨能力,能更好地反映储层的非均质性,这是常规波阻抗反演无法实现的。

关键词:哈拉哈塘油田;新垦区块;叠后地质统计学反演;变差函数;储层预测

中图分类号:P618.130.21 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2015)06-0177-08

哈拉哈塘油田奥陶系碳酸盐岩储层的特征是:碳酸盐岩基质的孔隙度小,渗透率极低,难以构成有效的储集空间,次生溶蚀孔洞、裂缝和洞穴是奥陶系碳酸盐岩主要的有效储集空间,因此识别和预测缝洞体是获得高产、稳产的关键^[1]。研究区碳酸盐岩储层埋藏深,目的层的成像精度低,预测碳酸盐岩储层十分困难。针对碳酸盐岩储层预测的难点,本文以哈拉哈塘油田新垦区块为研究对象,根据储层发育特征和地质规律,基于地质统计学理论,采用构造建模、马尔科夫链蒙特卡罗算法等新的技术手段进行储层预测,有效地预测了碳酸盐岩缝洞发育带,形成了一套碳酸盐岩缝洞型储层预测技术^[1]。

1 研究区概况

哈拉哈塘油田位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起西南斜坡,该地区北靠轮台凸起,南接北部坳陷,西邻英买力低凸起,东为轮南低凸起^[2-3]。研究

区构造比较平缓,受走滑断裂改造作用影响,沿断裂发育一系列不规则的断鼻或断背斜(图1)。研究区的储层主要发育在一间房组,受北西及北东向走滑断裂控制且沿断裂分布,呈条带状或片状分布,北部储层发育程度较高^[4-5],储层类型以洞穴型和裂缝-孔洞型为主。

哈拉哈塘油田自2009年发现以来,经过几年的探索和实践,形成了独具特色的碳酸盐岩储层预测技术方法,在指导油田勘探开发中发挥了重要作用。为了进一步提高经济效益,需更准确地预测储层。本文探索性地开展了以岩石物理为理论出发点、地震为工具、地质为指导、适合本区地质特点的储层预测的技术思路的研究工作。

2 叠后地质统计学反演

2.1 反演方法原理

本次反演所采用的叠后地质统计学,在纵向时

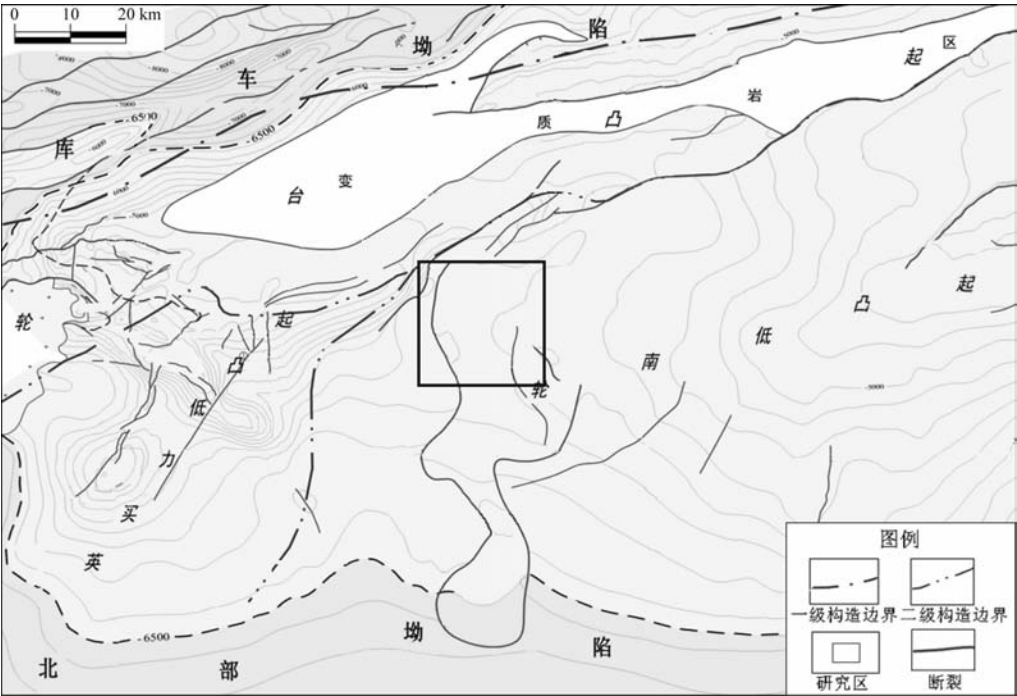


图1 研究区构造图
Fig.1 Structure diagram of the study area

间域上采用马尔科夫链蒙特卡洛模拟,横向上采用多网格蒙特卡洛模拟方法,它将地质统计学的高斯随机空间概念和非线性最优化求解的迭代过程结合起来^[6]。

地质统计学基于“数据点的距离越近越相似”的原理,用 n 个相关已知点 $Z(u)$ 的加权线性综合来估算未知点数据,每个 $Z(u)$ 都有对应的权重,可以简写为

$$Z^*(u) = \sum_{a=0}^n \lambda_a Z(u_a)$$

式中: $Z^*(u)$ 是未知点数据; $Z(u)$ 是和未知点相关的已知点数据; λ_a 是已知点估算未知点的权重。运算分不同地质层段来计算,一起参与运算的数据有相似的统计学特征,每个参与运算数据点的权重(λ_a)原则是:离未知点距离近的已知点,参考价值大,其权重高,但提供的信息量大致相同,只算一次;利用已知点得到未知点的多个合理的结果,有助于不确定性的定量分析。

2.2 反演过程

叠后地质统计学反演主要包括精细地质模型的建立及优化、储层划分及统计学参数分析、地质统计学反演和等效孔隙度协模拟 4 个部分。

2.2.1 精细地质模型的建立

精细的地质模型对于叠后地质统计学反演这种利用模型驱动的反演方法是非常重要的,在反演时,建立合理、准确的初始模型,可以提高最终反演结果

的精度。

地质统计学反演对地层框架的要求比确定性反演高,需要处理好断层、层位以及它们的交切关系。首先根据地质条件差异,确定合理的层数目,然后添加储层段的顶底镶边层,镶边层厚度为半个子波长度,最后根据确定性反演结果对层位进行精细调整,也可以根据确定性反演结果定义地层接触关系。

一间房组是本次项目研究的主要目的层段,图 2 为新垦区块的地质模型,图中分层清楚,地层的尖灭清晰,为后续的精反演及储层预测打下了良好的基础。

2.2.2 储层划分及统计学参数分析

2.2.2.1 储层划分

储层的划分是叠后地质统计学的重要部分,因为叠后地质统计学反演中几乎所有的参数都需要分储层类型进行分析。研究区一间房为碳酸盐岩地层,以灰岩为主,储集空间发育大量裂缝并伴生溶蚀孔洞,根据各单井试油成果,通过对地质条件和测井曲线特征的综合分析,确定本区叠后地质统计学反演的储层划分标准如下:

I 类储层: $\Phi \geq 0.052$ (Φ 为总孔隙度); II 类储层: $0.052 > \Phi \geq 0.018$; 非储层: $\Phi < 0.018$ 。据此生成单井储层发育特征曲线见图 3。

2.2.2.2 概率密度分布函数

(1) 概率密度函数: 概率密度分布函数根据储层

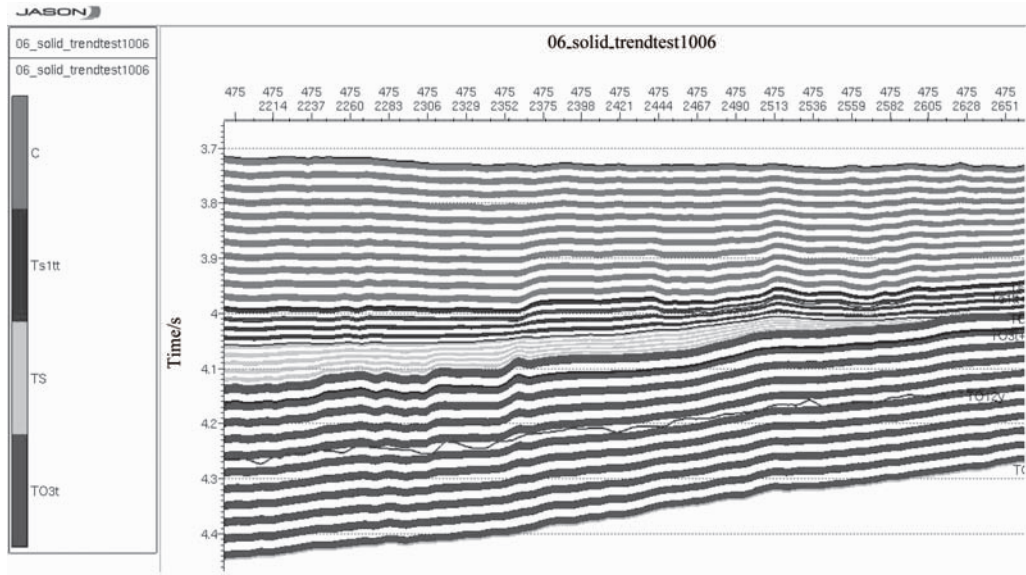


图 2 新垦区块地质模型
Fig.2 Xinken block geological model

对应的岩石物理参数分布,针对本区碳酸盐岩储层段,通过对测井纵波阻抗的分析获得储层概率密度分布函数和非储层概率密度分布函数,统计结果见 图 4。储层纵波阻抗的概率密度分布函数为反对数高斯型,非储层纵波阻抗的概率密度分布函数为高斯型(表 1)。

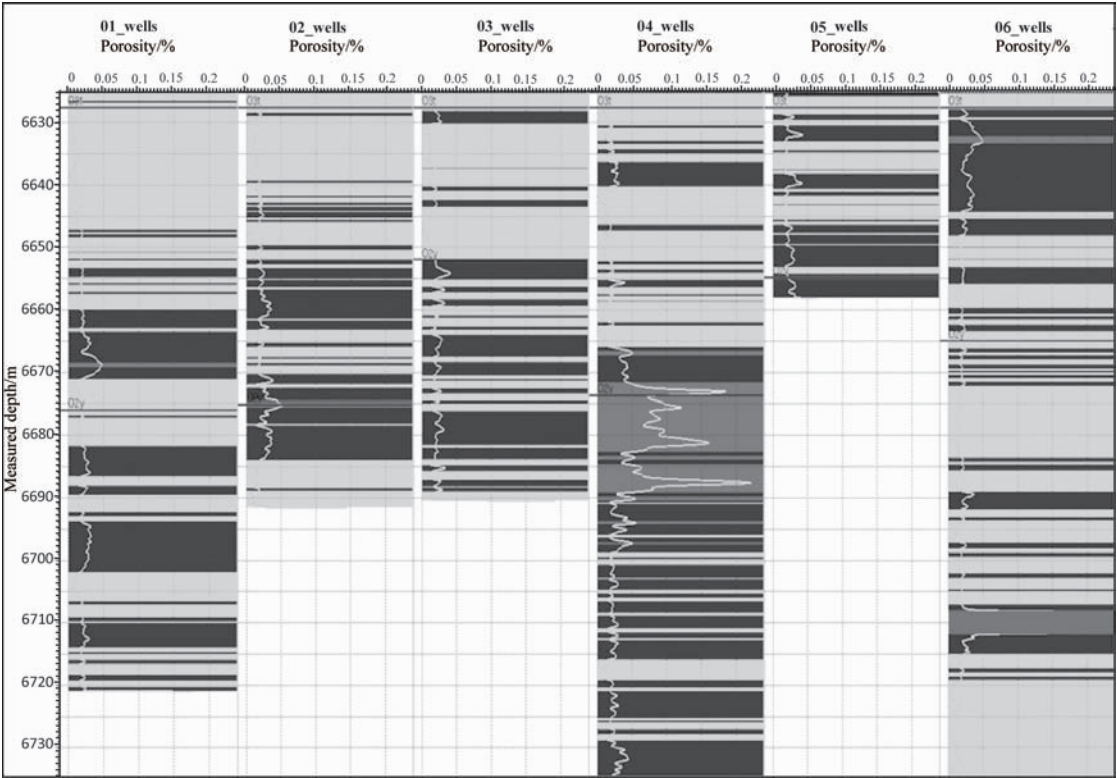


图 3 单井储层发育特征曲线图
Fig. 3 Single well reservoir development characteristics curve

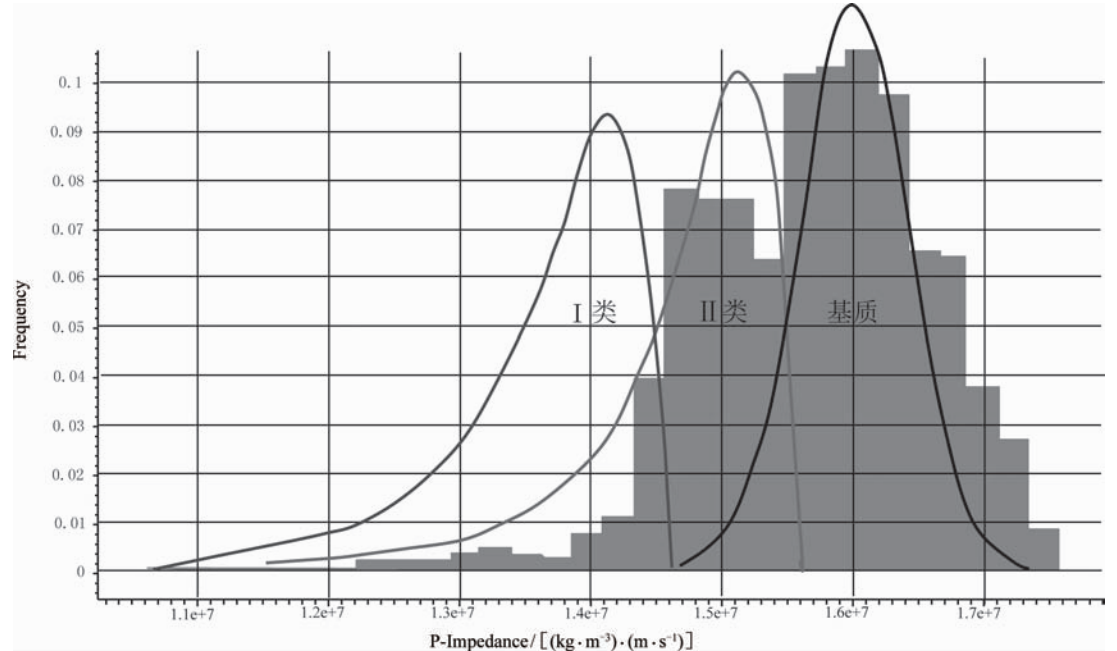


图 4 各岩性测井波阻抗直方图
Fig. 4 Different lithological logging wave impedance histogram

表 1 概率密度函数表
Table 1 The probability density function table

| 储层类型 | 类型 | 均值/ [(kg·m ⁻³)·(m·s ⁻¹)] | 偏差/ [(kg·m ⁻³)·(m·s ⁻¹)] | 最大值/ [(kg·m ⁻³)·(m·s ⁻¹)] |
|------|-----------|---|---|--|
| 基质 | Gauss | 1.685E+07 | 3.300E+05 | |
| Ⅱ类 | Log Gauss | 1.485E+07 | 8.200E+05 | 1.685E+07 |
| Ⅰ类 | Log Gauss | 1.400E+07 | 1.000E+06 | 1.550E+07 |

(2)变差函数:储层属性都具有某种空间连续性,构建实际储层模型需要根据测量数据确定某种属性的空间连续性,在模拟中重现同样的空间连续性,变差函数工具可以帮助我们达到以上要求,将属性的变化用距离的函数来描述,搜索所有的样本点,变差函数的公式为

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(u_i) - z(u_i + h)]^2$$

式中: h 为滞后距; r 为变差函数值; $N(h)$ 表示距离为 h 的个数; $z(u_i)$ 为一个区域变量,在实际应用过程中变差函数是由样品数据来估算的,得到的函数称为实验变差函数 $z(u, h)$ ^[7-8]。调整滞后距离为 $2h, 3h, \dots, nh$,重复上述步骤,滞后距(h)计算垂向实验变差函数值的最小滞后距离,根据该滞后距搜索到的样本点对应 h 该大于 30,这样才具有统计意义;最大滞后距离计算垂向实验变差函数值的最大滞后距离,不超过层段厚度的 1/3;横向容差按最大横向距离全方位搜索数据,搜索到的数据点参与实验变差函数计算。

变差函数的主要参数及理论拟合见图 5。图中横坐标为 h ,纵坐标为变差函数 $r(h)$ 。随着 h 的增大, $r(h)$ 值也增大,当 $r(h)$ 稳定时对应的 h 值称为变程,它表示空间上的最大相关距离。变程越小,反映区域变量空间分布的相关性尺度越小,变化速度越快,随机性越强,相关性越弱,反之亦然。 h 稳定时的对应值为基台值, h 为 0 时对应的非零 $r(h)$ 为块金值,代表区域化变量的随机性变化,块金值亦称为跃迁值。当基台值一定时,跃迁值越大,说明区域化变量的空间分布随机性越强,结构性越差;跃迁值越小,说明区域化变量的空间分布结构性越强,随机性越弱^[9]。这 3 个参数值反映了储层参数的空间变化特征,计算出不同方向上的变程,即能确定储层参数的各向异性,模拟的岩性空间结构变化关系与井点统计的变差函数相吻合,就会取得较好的反演效果。

因测井资料的垂向分辨率较高,垂向变差函数用测井资料计算;而水平变差函数从横向上连续的

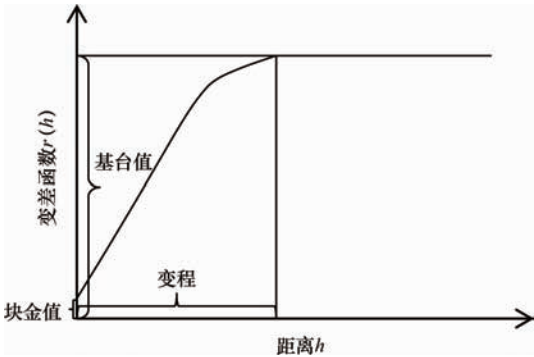


图 5 变差函数主要参数
Fig. 5 Main parameters of variogram

地震数据中计算,可以比较精确地求取任意方向上的变差函数,地质统计学反演综合了测井数据的垂向分辨率和地震数据的横向分辨率高的优势,较准确地反映储层的空间变化特征。

(3)储层比例和信噪比:储层比例对叠后地质统计学反演起到软约束的作用,它能使反演结果融入更多的地质信息,与实际的地质条件更符合。信噪比参数是地震资料的一个权重值,建立在对地震资料品质的评价基础之上。信噪比愈大,表明地震有效信号所占比重愈大,若资料较差,信噪比低,所得纵波阻抗模型与地震资料残差则相对会变大^[10]。对于叠后波阻抗反演,先设定合适的信噪比参数,调整离散属性变差函数的纵横向变程和离散属性分布,优化离散属性体的连续性和厚度,地震资料信噪比至少要达到 12dB 其反演结果才具有一定的可靠性^[11]。

叠后地质统计学反演的参数要考虑到实际的地质情况和客观的资料,在认识的基础上进行多组测试,选择一组最为合理的组合作为最终反演的参数,本工区进行的测试结果见表 2。

2.2.3 反演结果

叠后地质统计学反演方法兼顾了地震数据的横向分辨率与测井数据的纵向分辨率,以确定性反演导出的声波阻抗作为输入,并建立阻抗与储层参数(岩性、物性、含油气性)间的线性关系,进而得出高分辨率的储层敏感参数数据体^[12]。

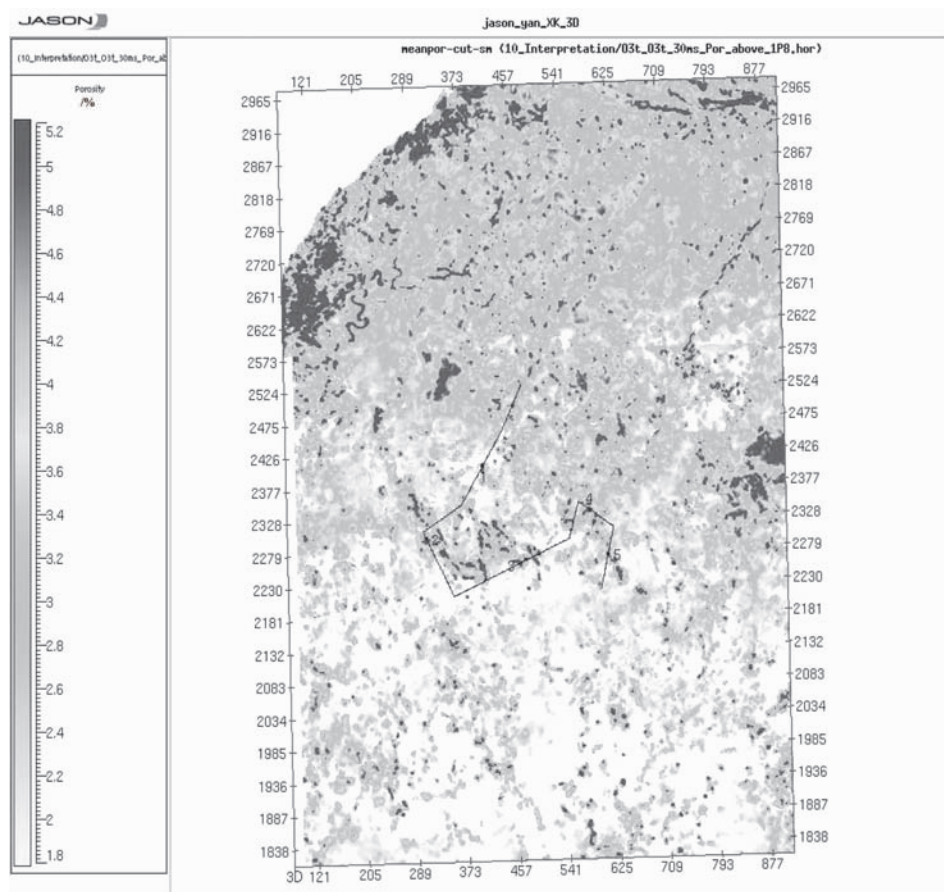


图 7 $\text{TO}_3\text{t}-\text{TO}_3\text{t}30\text{ms}$ 反演孔隙度平面图
Fig. 7 $\text{TO}_3\text{t}-\text{TO}_3\text{t}30\text{ms}$ inversion porosity plan

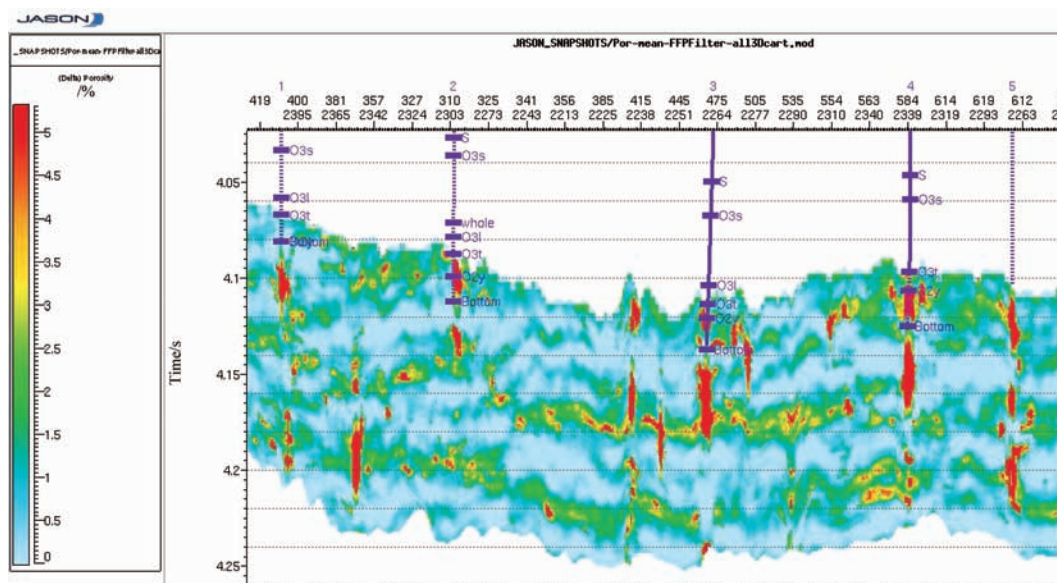


图 8 地质统计学反演孔隙度剖面图
Fig. 8 Geo-statistical inversion porosity profile

用变差函数建立统计关系来描述空间数据场中数据之间的相互关系,进而得出地质统计学反演的预测结果。通过地质统计学反演,得到了多个与测井曲线完全符合的岩性体,但每一次实现都存在一定不确定性。为降低结果的不确定性,需对多个地质统计学的岩性概率实现综合统计计算,以得到最终

的岩性概率体^[12]。最终的岩性概率体通过精细井震标定以及反演方法优化,解决了串珠型强反射储层预测中洞穴型储层的顶部异常高阻现象,刻画了溶洞空间形态特征,提高了洞穴型储层预测精度。针对哈拉哈塘地区溶洞型储层非均质性的特点,进一步完善了等效孔隙度原理及“部分井约束”进行储层预测的思路。

本次研究是针对前期存在的问题进一步研究,系统地优化了反演的相关参数,注重储层区域分布的合理性。随着完钻井的增加,通过井上储层的精细标定,提高了储层预测的准确性(图7),利用地质统计学反演建立了研究区精细储层地质模型,结合本区地质特征对反演结果进行三维可视化分析,对总孔隙度大于1.8%的储层进行储层厚度和积分厚度定量分析,得到一间房组储层平面分布图,见图7,结果显示储层及非储层的空间展布特征直观、清楚。

本次的波阻抗反演共有35口井参与试验,目的层段的储层与统计学反演预测的储层吻合率达80%,这说明地质统计学反演预测的远离井的储层空间分布更加合理,更接近于实际地质情况^[15]。叠后地质统计学反演结果大大提高了地层的纵向分辨率,对指导井位部署具有重要意义,它与已知井吻合率极高,这是常规波阻抗反演无法实现的。

3 存在的问题及研究方向

近年来物探技术研究围绕油气勘探开发中碳酸盐岩储层预测的问题,逐步形成了一套适合哈拉哈塘油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层的预测技术,为油田增储上产提供了强有力的技术支撑。但是由于碳酸盐岩储层的复杂性,加上任何一种储层预测技术都有其局限性,只有综合分析多种储层预测成果,并结合地质背景、断裂构造、岩性特征及生产动态资料进行综合分析,才能减少多解性,提高缝洞体的地震成像精度^[1]。

参考文献

- [1] 韩革华,漆立新,李宗杰,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):860-870.
- [2] 朱光有,杨海军,朱永峰,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J].岩石学报,2011,27(3):827-843.
- [3] 张丽娟,马青,范秋海,等.塔里木盆地哈6区块奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层特征识别及地质建模[J].中国石油勘探,2012(2):1-7.
- [4] 徐国强,邵大力,刘树根,等.塔北隆起区一间房组礁滩沉积体特征[J].天然气工业,2006,26(8):16-19.
- [5] 杨松荣,潘文庆,韩剑发,等.轮南奥陶系碳酸盐岩储集体控油机理探讨[J].天然气地球科学,2006,17(1):85-88.
- [6] 李宗杰,陈丰,姜进勇.缝洞型碳酸盐岩储层的等效孔隙度模型及定量储层建模研究[C]//国际地球物理会议论文集.北京:中国石油学会,2009:1225-1229.
- [7] 秦月霜,郭海晓,陈友福.变差函数对地震反演精度的影响[J].大庆石油学院学报,2009,33(5):37-40.
- [8] 高金玉,马明福,沙雪梅,等.随机模拟方法在阿尔及利亚Oued Mya盆地的应用[J].岩性油气藏,2009,21(3):86-89.
- [9] 孙炜,王彦春,李玉凤,等.基于地质统计学反演的碳酸盐岩孔缝洞预测研究[J].现代地质,2012,26(6):1258-1264.
- [10] 张睿,贾晓静,徐浩,等.塔里木盆地塔中北坡志留系致密碎屑岩地震反演技术及应用[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2013,15(5):14-17.
- [11] 付跃东.信噪比对波阻抗反演效果影响研究[J].地球物理学进展,2013,28(5):2659-2666.
- [12] 刘文波,汪益宁,滕蔓,等.反演技术在喇嘛甸油田储层预测中的应用[J].石油天然气学报,2011,33(12):63-67.
- [13] 刘学利,汪彦.塔河缝洞型油藏溶洞相多点统计学建模方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(6):53-58.
- [14] 陈亚新,魏粉云,高立峰.松辽盆地英台断陷营二段火山碎屑岩储层预测技术[J].中国石油勘探,2013,18(3):50-56.
- [15] 曹丹平,印兴耀,张繁昌.连井井间地震资料反演中的关键问题分析[J].石油物探,2008,47(5):455-460.