

地质统计学反演及其在吉林扶余油田储层预测中的应用

孙思敏, 彭仕宓

(中国石油大学, 北京 102249)

摘要: 地质统计学反演方法将随机建模技术与常规地震反演相结合, 有效地综合地质、测井和三维地震数据, 可以更加精确地描述储层的变化。在执行地质统计学反演前, 首先应用稀疏脉冲约束反演, 了解储层的大致分布, 以求取子波和水平变差函数。地质统计学反演从井点出发, 井间以原始地震数据作为硬数据, 通过随机模拟的产生井间波阻抗, 然后将波阻抗转换成反射系数, 并用确定性反演方法求得的子波褶积产生地震道, 通过反复迭代直至合成地震道与原始地震数据达到一定程度的匹配, 反演结果是多个等概率的波阻抗数据体实现。反演结果符合输入数据的地质统计学特征并受地质模型的约束, 它综合了测井的垂向分辨率高和地震的横向分辨率高的优势, 结果的多个实现用于不确定性评价。

关键词: 吉林扶余油田; 地质统计学反演; 随机模拟; 储层预测

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2007)01-0051-04

我国陆相储层砂体规模小, 横向变化快, 空间展布复杂。目前常用的储层预测方法主要有2类: 一是地震反演, 二是储层随机建模方法。地震反演由于受到垂向分辨力的限制, 往往难以满足油田开发阶段的需要, 并且反演结果具有不确定性和多解性。而储层随机建模方法对井间储层参数内插主要依靠井点的储层参数的空间相关性, 在井点较稀或分布不规则情况下, 变差函数难以准确求取, 对于储层的复杂变化难以准确表征。虽然建模过程中也可以引入地震数据, 但主要是用作软数据 (secondary data), 没有充分发挥地震数据的应有作用。

地质统计学反演由 Bortoli 等^[1] 及 Haas 等^[2] 提出, Dubrule 等^[3] 和 Rowbotham 等^[4] 加以发展。它以地震反演为初始模型, 从井点出发, 井间遵从原始地震数据, 即以地震数据为硬数据 (hard data), 建立定量的波阻抗三维地质模型, 进行储层横向预测。其特点在于综合了地震反演与储层随机建模的优势, 充分利用地震数据横向密集的特点, 精确求取不同方向上的变差函数, 反演结果的多个实现可用于定量评价结果不确定性。

1 地质统计学反演思路

地质统计学反演是一种将随机模拟理论与地震反演相结合的反演方法。它由2部分组成, 即随机模拟过程以及对模拟结果进行优化并使之符合地震数据的过程^[5]。随机模拟方法很多, 目前较为成熟

的地质统计学反演方案是将序贯高斯模拟与基于模型反演相结合。反演过程中充分发挥随机模拟技术综合不同尺度数据的能力, 如可以综合层序地层研究与对比与地震解释成果建立精细地质模型; 序贯随机模拟沿任一随机路径进行, 不同的随机路径得到不同的结果和实现, 不同实现的差异反映了地下地质的非均质性和随机性, 差异越大, 非均质性越强。可以通过不同实现的差异评价反演结果的风险, 因此, 这也是对地震多解性的有效反映。尽管实现各不相同, 但每次实现都满足: 在井点处与测井数据计算的波阻抗一致; 在井间符合地震数据和已知数据的地质统计学特征。具体步骤为:

- (1) 建立随机路径;
- (2) 随机地选取井间1个网格点;
- (3) 估计该网格点的条件概率密度函数;
- (4) 从该条件概率分布函数中随机抽取1个值, 利用反射系数公式计算反射系数并与子波进行褶积生成合成地震道;
- (5) 根据合成地震道与实际地震道匹配程度, 决定是否接受该地震道, 若接受则计算终止, 转向下一个地震道即转向(2), 否则重复(4)~(5)^[6-7];
- (6) 直到完成整个数据体的模拟。

井点间地震道的内插采用克里金技术, 克里金技术是一种按照控制点间的空间相关程度进行加权的空间内插, 即对于给定属性, 按照其控制点间相关

程度,用相关图或方差图建立空间相关模型,用此模型指导内插。

在多数情况下,井间距较大,井资料较少,我国储层多为陆相沉积,储层横向变化大,而储层预测中更关心的是井间储层性质的实际变化。因此,直接用井资料来计算横向上的变差函数存在采样点不足的问题,横向试验变差函数在小滞后距上不具有统计效应。为此,应当利用确定性反演得到的三维波阻抗来计算横向变差函数,使初始波阻抗模型的建立更为合理。例如目前三维地震数据 CDP 一般为 20~25 m,地震数据横向上较为密集,这样,不仅可以精确求取任意方向上的变差函数,更能反映储层空间结构特性变化。由于测井资料垂向分辨率高,因而垂向变差函数从测井资料计算,水平方向变差函数从确定性反演得到的波阻抗数据体中计算,因此,该方法综合了测井的垂向分辨率和地震的横向分辨率的优势^[8]。

2 技术流程及应用

扶余油田三号构造于 2004 年新部署了近 300 km² 的三维地震勘探,目的是在油区内部进行挖潜的同时,在油田边部寻找新的有利目标以“增储上产”。围绕这一目标,在三号构造北翼选择了研究区。作为目的层的扶余油层属于泉头组四段,厚度约 100 m,沉积相研究认为属于三角洲内前缘亚相,岩性组合呈现明显的完整向上变细的层序,单砂层厚度 3~5 m,横向变化大,常规的确定性反演方法受地震频带的限制难以准确识别,对砂体的不确定性和非均质性也难以进行估计,因此,选用了地质统计学反演方法进行尝试。

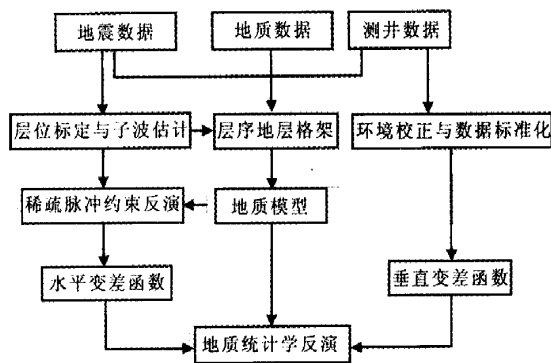


图 1 地质统计学反演流程

从图 1 中可以看出,进行地质统计学反演前需先做确定性反演,主要是了解储层的大致分布,提供计算变差函数的波阻抗数据体。该阶段估计的子波

可用于随后的地质统计学反演。本次研究采用稀疏脉冲约束反演方法^[9]。

2.1 稀疏脉冲约束反演

该反演假定地下的强反射系数界面稀疏分布,通过从地震道中根据稀疏的原则抽取反射系数,与子波褶积生成合成地震记录,利用合成地震记录与原始地震道的残差修改反射系数,得到新的反射系数序列,再做合成记录。如此迭代,直到得到 1 个能最佳逼近地震道的反射系数序列。之后,就可以求得相对波阻抗。稀疏脉冲约束反演增加了地质模型和井约束控制波阻抗的趋势和范围,由于地震数据存在带宽限制,因此得到的数据缺少低频信息,必须通过建立地质模型进行低频补偿才能获得 1 个全频带的绝对波阻抗。由于它是一种基于地震道的反演方法,因此,反演结果更能反映地震数据本身的空间变化,更多地保留了地震数据的原始特征。文后彩图 4 为稀疏脉冲约束反演的 1 条剖面,目的层下部砂体明显发育,厚度大,向上部砂体发育程度减弱,厚度减小。

通过与扶北 14-7 及扶北 14-2 井井旁波阻抗曲线对比可以看出,二者吻合较好,即反演结果基本反映了储层的大致变化规律。但剖面上砂体以块状为主,垂向分辨率有待于进一步提高。虽然其垂向分辨率有限,但仍能反映波阻抗的总体变化特征,用于求取水平变差函数。在反演过程中求得的地震子波可直接用于随后的地质统计学反演。

2.2 地质统计学反演

序贯高斯模拟要求数据服从高斯分布,因此反演前应对数据进行统计分析,若不服从高斯分布需要进行数据转换。还应当根据地震数据 CDP 面元大小并考虑计算量确定网格,例如,根据本区三维地震 CDP 面元将网格定义为 20 m×20 m,纵向上考虑到计算量定为 2 ms。由于储层预测关注的重点是井间储层的变化情况,储层的空间各向异性用变差函数表征,因此求取空间变差函数是地质统计学反演的关键步骤之一。传统上随机建模直接应用井点数据拟合变差函数,但井点数据只在垂向上数据点密集,求取变差函数精度高,而在水平方向可供用于拟合的数据点稀少,点距大,常常需要给定较大的容错角,拟合出的变差函数不仅精度低,也难以反映井间小尺度的变化。如文后彩图 5 所示,在滞后距 600 m 以内实验点对很少,缺少统计效应。地质统计学反演中垂向变差函数从井数据求取,水平方向变差函数从稀疏脉冲约束反演波阻抗数据体中计算(文后彩图 6,彩图 7),充分发挥地震波阻抗数据横

向上密度的优势,对各个方向进行扫描计算,精确求取各个方向的变差函数,充分表征储层性质空间分布的各向异性。可以看出,在水平方向上,不同方向变差函数变程不同,反映了不同方向数据相关性的差异。

根据地震反演波阻抗计算的水平方向变差函数精度明显高于从井数据得到的结果,这样充分发挥二者在垂向和水平方向的分辨率优势,然后通过实验选取合适的变差函数模型,将其拟合成三维变差函数。变差函数计算在地质模型控制下分层求取,再分别赋予相应的层进行反演。由于地质模型是在地震资料精细解释和高分辨层序地层学分析的基础上建立的,这就保证了层位对比方案的精确性。

反演中首先随机选取 1 个网格点并计算该点的局部概率密度函数,从中选取 1 个波阻抗值,然后将波阻抗转换成反射系数,并用稀疏脉冲反演方法求得的子波与其褶积产生地震道,通过反复迭代直至合成地震道与原始地震数据达到一定程度的匹配。这样,逐个网格点进行模拟和优化。在这里,地震数据和井数据一样作为硬数据得到尊重,并且由于随机模拟方法包容了噪声,并考虑到数据在一定空间内的相关性,拓宽了地震数据频带,反演结果同时符合测井数据、地震数据和输入数据的地质统计学特征,并受建立的地层模型的约束,反演结果是多个等概率的波阻抗数据体实现^[9-10]。

如文后彩图 8 所示是本次地质统计学反演的过 fb19、fb1-10 和 fb10 的波阻抗剖面的一次与二次实现对比,可以看出垂向分辨率较稀疏脉冲约束反演有了很大提高,井点处地震与测井完全吻合。在井间尤其是井距较大时,2 次实现之间有一些差异,反映了反演结果的随机性与不确定性。砂体底部的高波阻抗钙质砂岩非常清晰,这种钙质砂岩非常致密,通常被解释成干层,但砂岩含钙后脆性增强,在构造应力作用下易产生裂缝,因此是潜在的裂缝发育段,了解其分布对研究裂缝的发育与分布具有很强的指导作用。

3 结论

在油田开发阶段,在常规确定性反演的基础上,应用地质统计学反演进行储层表征与预测,不仅可以大大提高地震资料的垂向分辨率,而且可以对反演结果的不确定性进行分析和评价。通过在吉林扶余油田的应用,表明该方法可以有效地综合地质、测井和地震数据进行储层预测,尤其在预测薄砂体方面效果良好。

参考文献:

- [1] Dubrule O, Thibaut M, Lamy P, et al. Geostatistical reservoir characterization constrained by 3d seismic data[J]. *Petroleum science*, 1998, v:4121.
- [2] Torres-Verdin C, Victoria M. Trace-based and Geostatistical inversion of 3-D seismic data for thin-sand delineation: An application in San Jorge Basin, Argentina[J]. *The Leading Edge*, 1999, sept: 1070.
- [3] Pendrel J, Riel P van. Methodology for seismic inversion and modeling: a western Canadian example[A]. Paper submitted for publication in CSEG recorder[C]. CSEG1.
- [4] Pendrel J, Riel P van. Using seismic inversion and geostatistics to estimate porosity: A western Canadian reef example[C]. Paper presented at the 1997 CSEG Convention, 1997.
- [5] Gambus M, Torres-Verdin Carlos. High-resolution geostatistical inversion of seismic data set acquired in a Gulf of Mexico gas reservoir[A]. SEG 2002 Expanded Abstract[C]. Tulsa: SEG, 2002.
- [6] Haas A, Dubrule O. Geostatistical inversion-A sequential method for stochastic reservoir modeling constrained by seismic data[J]. *First Break*, 1994, 12(11):561.
- [7] Debeye H W, Sabbah, E, van der Made P M. "stochastic inversion" presented at 65th Annual International SEG meeting[R]. Denver, 1996, 1212.
- [8] Sams M S, Atkins D. Stochastic inversion for high resolution reservoir characterization in the Central Sumatra Basin[R]. SPE 57260, 1999.
- [9] Debeye H W J, Van Riel P. Lp-Norm Deconvolution[J]. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38:381.
- [10] Marcos Victoria. Lateral and vertical discrimination of thin-bed fluvial reservoir: Geostatistical inversion of a 3d seismic data set [R]. SPE 69485, 2001, 1.

GEOSTATISTICAL INVERSION METYOD AND ITS APPLICATION TO RESERVOIR PREDICITION OF FUYU OILFIELD IN JILIN PROVINCE

SUN Si-min, PENG Shi-mi

(China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Geostatistical inversion (GI) combines the advantages of stochastic modeling and seismic inversion, integrates geological, logging and seismic data, and delineates the reservoir more precisely. Constrained sparse spike inversion is conducted to predict the general distribution of reservoirs before GI, and the results including wavelet and 3D acoustic impedance (AI) can be used later. The inversion uses both well-log and seismic data. The inter-well AI is created by stochastic simulation, and the subsequent work includes (1) simulating an AI at the interwell point, followed by computing reflectivity series, (2) convolving it with the wavelet selected to simulate a local trace, and (3) implementing iterations to make the simulated and seismic trace reach a desired fit. The results are of multi-equiprobable 3D AI volume realization, which can be used for uncertainty evaluation. The inversion integrates the high resolution of logging and lateral directions of the seismic data. The results fit the geostatistical features of the input data, and are constrained by structural and stratigraphic earth models.

Key words: Geostatistical inversion; seismic inversion; stochastic simulation

作者简介: 孙思敏(1967-),男,博士,讲师,从事地震资料解释与储层预测方面的教学与科研工作,公开发表学术论文数篇。

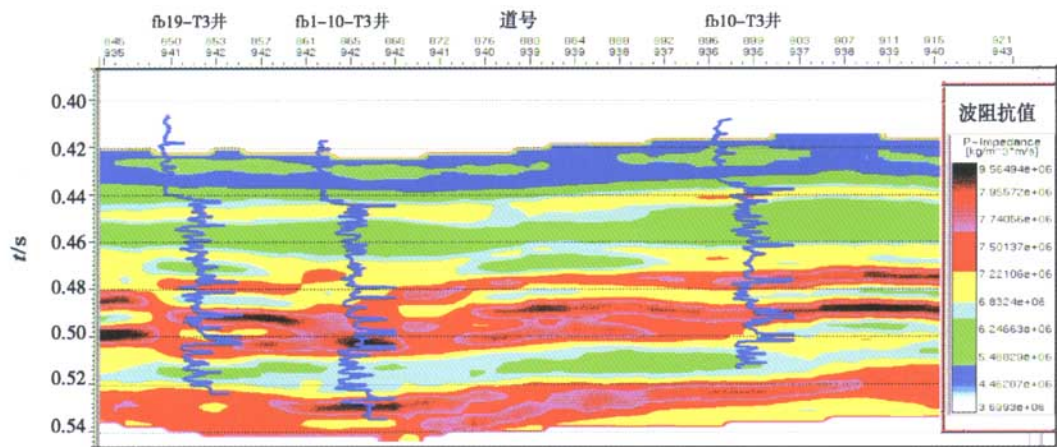
上接 50 页

Abstract: At present, the researches on 2D inversion of IP data mainly aim at the HD (high density) IP data, which is mainly due to the equivalent distances between neighboring poles during data collection. Under such a condition, the division of finite element grid is convenient and the forward and inverse operation is easy. In forward operation, the finite element grid is automatically divided according to the practical data, and dual-grid system is used. The finite element modeling with linear variation of conductivity within each block is done, and the error of modeling result can be modified. In inversion, the partial derivatives of the apparent resistivity with respect to model resistivity are calculated by means of the relationship between the source and receiver locations and Broyden's method. And it is solved by using the conjugate gradient method, in which the calculation precision is almost the same as that in the SVD method. Through inverting the modeling data and observed data, it is shown that the algorithms of this paper are workable.

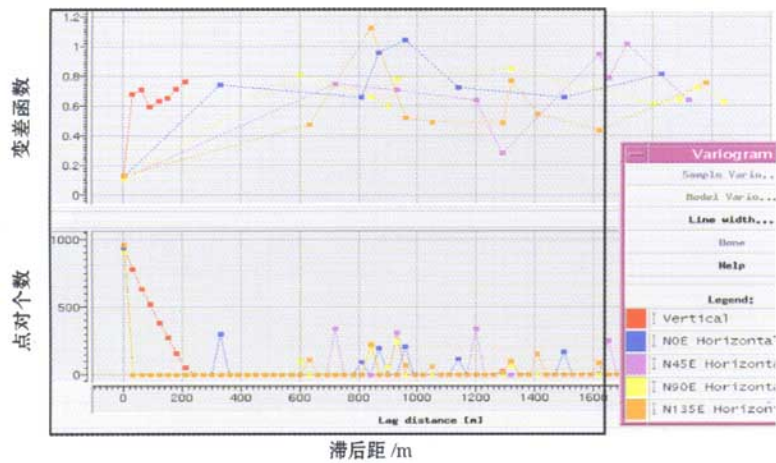
Key words: 2D inversion; IP sounding; partial derivatives matrix; conjugate gradient

作者简介: 刘海飞(1975-),中南大学信息物理工程学院博士研究生,主要从事电磁法方面的资料处理及其正反演研究工作,已发表学术论文6篇。

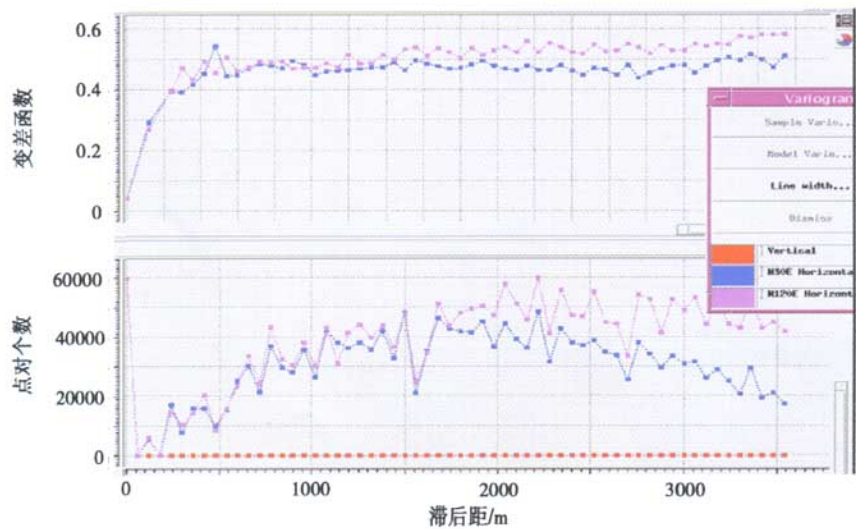
彩图 4~6 文字见 p51: 地质统计学反演及其在吉林扶余油田储层预测中的应用 (孙思敏, 彭仕宓)



彩图 4 稀疏脉冲约束反演的波阻抗剖面

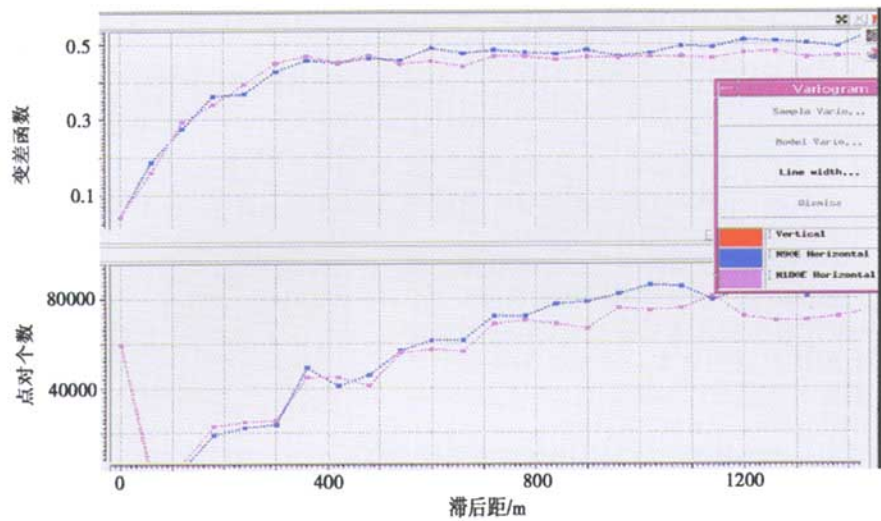


彩图 5 根据测井数据求取变差函数

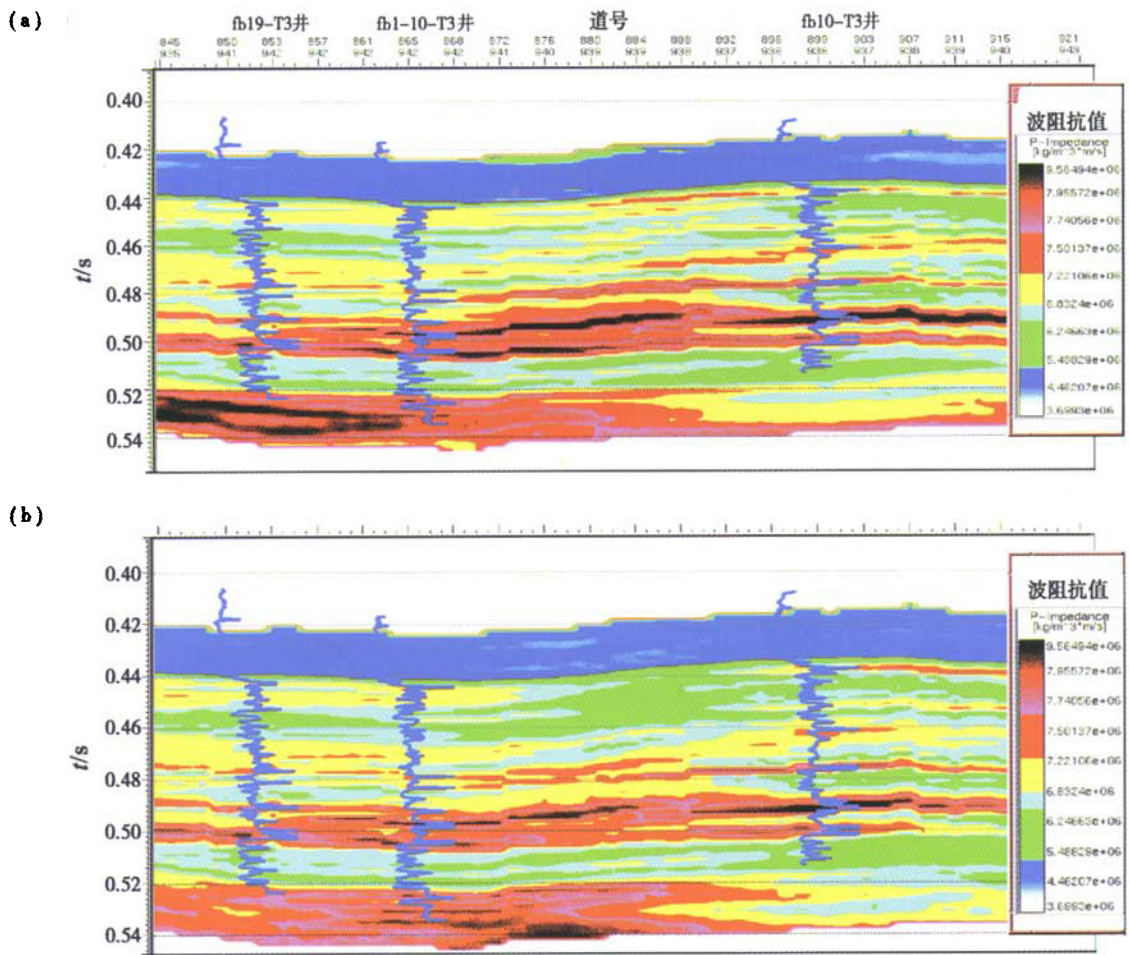


彩图 6 根据地震波阻抗求取变差函数 (方位角为 30° 和 120°)

彩图 7~8 文字见 p51: 地质统计学反演及其在吉林扶余油田储层预测中的应用 (孙思敏, 彭仕忠)



彩图 7 根据地震波阻抗求取变差函数 (方位角为 90° 和 180°)



a—一次实现; b—二次实现

彩图 8 地质统计学反演典型剖面