减少地震岩性模拟技术多解性的方法

梁 光 河

（长春地质学院应用地球物理系）

摘　要

梁光河. 减少地震岩性模拟技术多解性的方法. 石油地球物理勘探，1994，29(增刊 1)：58～63

地震勘探的最终目的是岩性的直接识别，这就需要能从地震反射资料中准确地反演出它所包含的岩性参数。最近发展起来的地震岩性模拟方法 SLIM(Seismic Lithological Modelling)，通过对初始模型的反复修改，并采用迭代技术，可较好地解决地震岩性参数的反演问题，因而在实际应用中取得了较好的效果。但同时也发现了该方法具有多解性的缺陷。导致这种多解性的因素很多，本文就其主要原因作了理论上的探讨，并对主要参数密度 ρ 和速度 v 的步长变化作了新的约束，使多解性有了一定的收敛。对实际资料的计算表明，该方法是有效的。

主题词　岩性参数　反演　地震岩性　模拟　多解性

地震岩性模拟技术(SLIM)是美国西方地球物理公司最先提出的一种岩性参数反演方法，并由该公司发展成一套完整的商业性软件。80 年代初，石油地球物理勘探局研究院从美国引进了这套处理技术，并进行了试验性处理和实际资料的处理。此后，许多研究单位都依据 SLIM 技术的原理相继研制了各有特色的处理模块。我们在对 SLIM 方法进行研究和处理的同时，编制了一套完整的 SLIM 处理软件。在实际应用中，我们还发现该方法具有多解性。实际上，也正是因为它的多解性，才限制了它的更为广泛的的应用。本文讨论的重点，就是如何更有效地减少、甚至消除其多解性。

SLIM 方法的特点

地震岩性参数的反演方法，基本上可划分为两大类：第一类是基于波动方程的参数直接反演方法(如 Born 类反演，特征线类反演，广义脉冲谱技术等)，这类方法是从波动理论出发，通过对波动方程的求解来达到参数反演的目的；第二类是基于褶积模型的反演方法(如 V-LOG，SLIM 等)，此类方法对波的传播规律都作了不同程度的假设，并简化了反演方法。

人们经过长期的反演研究发现，基于波动理论的反演方法对实际地震资料的反演极不稳定，效果也不理想。其主要原因有三个方面：①地震记录频带宽度的限制；②反演方法本身的缺陷；③地震记录中噪声的影响。这些因素的影响，限制了该方法的实际应用，此方法目前还处

本文于 1993 年 4 月 24 日收到。

于理论研究阶段。

第二类反演技术,由于作了不同程度的假设,使反演方法大为简化。同时对它们的解进行了一定的约束,从而使反演的稳定性大为提高。

SLIM 技术由于原理简单,且能同时反演出 ρ、v 两个参数而受到地震勘探学家们的关注,并得到了较为广泛的应用。仔细分析该方法的原理,我们不难发现 SLIM 方法具有以下特点。

(1)该方法所基于的岩性初始模型为它的基本约束条件,它有两方面的作用:首先,它相当于对地震资料中所缺失的至关重要的低频成分作了补偿,因为初始模型本身包含了低频成分;其次,对岩性参数解范围的控制相当于对解施加了约束,使 SLIM 的处理结果能够被限制在地球物理数据的合理范围之内,有利于增强解的稳定性。

(2)对初始模型细分层,相当于对地震数据中的高频成分作了一定的补偿,从而使 SLIM 所依据的信息频带范围展宽,即加大了信息量。

(3)该方法采用的是多道处理方式,对随机噪声有压制作用,因而可增强解的抗干扰能力和稳定性。

由此可以看出,SLIM 方法在很大程度上解决了地震波动方程反演所不能解决的两个主要问题,即频带宽度的有限性(信息量不足)、及随机噪声的影响。然而方法本身的理论依据是否可靠,仍是影响其反演效果的主要原因之一。

SLIM 方法的多解性

我们知道,SLIM 方法首先要求解释人员从测井资料或地震解释的结果中提供一初始岩性剖面,这种岩性剖面应当包括速度、密度和深度值(当然,这一初始模型并不一定十分可靠);然后由这一初始模型与子波结合形成初始合成记录;在对初始岩性模型进行细分层的基础上,通过逐次修改各个细层的速度、密度和厚度值,形成新的合成记录;将该合成记录道与所在位置的实际地震道相比较,如果这种参数的改变能使得两者之间的振幅均方差减小,则接受这种改变,否则,将放弃此次参数的改变。显然,由于它对多参数的改变,很可能出现不同的岩性参数组合而得到相同或相近的合成地震记录的情况。下面我们通过模型来讨论其解的变化情况。

假设我们基于图 1 所示模型,并假定反射界面的位置是真实的。

我们一般认为,这种多解性是速度改变(密度不变),或者是密度改变(速度不变)所造成的结果。而实际上,在 SLIM 方法的处理流程中,这种情况并不存在,因为 SLIM 方法对参数的改变是串行的,v 改变后,接着就改变 ρ,即按顺序变化。如图 1 中间层的初始参数 ρ_{0n}、v_{0n},按顺序它应先改变 v_{0n},然后再改变 ρ_{0n}。但如果 $\rho_{0n}+\Delta\rho$ 改变方向正确的话,不该 v_{0n} 变化时,它却产生了变化;对于 ρ_{0n} 来说,它不会往相反方向变化,即不会出现 $\rho_{0n}-\Delta\rho$ 的情况,因为每次迭代,ρ_{0n}、v_{0n} 只允许变化一次,或者保持不变,或者再执行 $\rho_{0n}+\Delta\rho$,以继续向这个正确的方向变化。反之,如果 v_{0n} 的变化方向是正确的,也会由于每次迭代只允许参数变化一次而出现同样的情况。

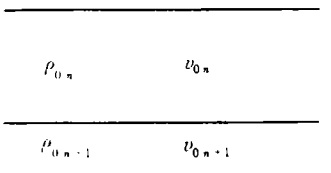


图 1　水平层状介质模型

下面我们讨论两种情况。为方便起见,以下将 ρ_0 简写为 ρ,v_0 简写为 v。

(1)考虑到 Δv、$\Delta\rho$ 的影响，假设 $\rho(v+\Delta v)$能使合成记录与原始记录的振幅均方误差减小，而 $\rho(v-\Delta v)$会使其误差增大，$(\rho+\Delta\rho)(v+\Delta v)$有可能使其误差减小。但对于$(\rho-\Delta\rho)(v+\Delta v)=\rho v+\rho\Delta v-\Delta\rho v-\Delta\rho\Delta v$，要想使其误差有可能减小，必须使

$$\rho\Delta v - \rho v - \Delta\rho\Delta v > 0 \tag{1}$$

如果不满足式(1)的条件，会出现什么情况呢？譬如 ρ_0 比实际值大，而 v_0 比实际值小，那么在 $v_0+\Delta v$ 时，只会出现 $\rho_0+\Delta\rho$ 或 ρ_0 不变的情况，而不会出现 $\rho_0+\Delta\rho$ 逼近真值的情况，因为此时只能使 ρ_0 比实际值变得更大，显然这不符合实际情况。

(2)假设 $\rho(v-\Delta v)$能使振幅均方误差减小，而 $\rho(v+\Delta v)$会使均方误差增大，显然$(\rho-\Delta\rho)(v-\Delta v)$有可能使误差减小。而对于$(\rho+\Delta\rho)(v-\Delta v)=\rho v-\rho\Delta v+\Delta\rho v-\Delta\rho\Delta v$，要想使误差减小，必须使

$$-\rho\Delta v + \Delta\rho v - \Delta\rho\Delta v < 0$$

即

$$\rho\Delta v - \Delta\rho v + \Delta\rho\Delta v > 0 \tag{2}$$

由方程组

$$\begin{cases}\rho\Delta v - \Delta\rho v - \Delta\rho\Delta v > 0\\ \rho\Delta v - \Delta\rho v + \Delta\rho\Delta v > 0\end{cases}$$

可得

$$\rho\Delta v > \Delta\rho v + \Delta v\Delta\rho$$

即

$$\Delta\rho < \frac{\rho\Delta v}{v+\Delta v} \tag{3}$$

也就是说，在 SLIM 迭代计算过程中，只有使其参数迭代变化步长满足式(3)，才能保证参数变化方向接近真值，不会向反方向变化。

例如，当 $v=2\ 000$ m/s，$\rho=2.2$g/cm^3 时，若 $\Delta v=50$ m/s，只有当 $\Delta\rho<\frac{\rho\Delta v}{v+\Delta v}=0.054$ g/cm^3 时才能使 SLIM 反演结果接近实际。

这就是说，在实际资料处理中，由于 ρ、v 参数的变化导致各个细层发生变化是必然的。而以往使用的 SLIM 处理流程则没有考虑到这种参数改变步长对迭代结果产生的影响，因而出现了较严重的多解性。如西方地球物理公司的 SLIM 软件规定，$\Delta v=100$ m/s 时，$\Delta\rho=0.1$ g/cm^3；而 $\Delta v=50$ m/s 时，$\Delta\rho=0.05$ g/cm^3。这种规定对相当数量的细层的 ρ 和 v 来说，都不能满足我们推导出的式(3)，因此很难得到真实的反演结果。

实际资料的处理

为了验证文中导出结果的正确性，我们对某区一条测线的一段实际地震资料进行了处理。在该线上选取记录长度为 600 ms 的一段过井资料(图 2)，共处理 101 道。利用 VSP 资料给出一个粗略的初始模型(图 3)，该模型共分 5 个大层，模型总厚度约 1 000 m，经细分层后得到 87 个细层。图 4 是用本文方法经一次迭代后的结果，图 5 是经三次迭代后的结果，图 6 是七次迭代后的结果。

在处理过程中，我们采用了两种计算方法，第一种是常规的 SLIM 方法，其参数的改变步长不遵循式(3)，而第二种是我们推导出的新方法，此法参数的改变步长遵循式(3)条件。两种方法在相同初始模型(图 3)的基础上，经七次迭代后合成记录与原始地震记录都能较好地拟合(相关系数均在 97%以上)。因此，这里我们只给出了用第二种方法计算出来的合成记录剖

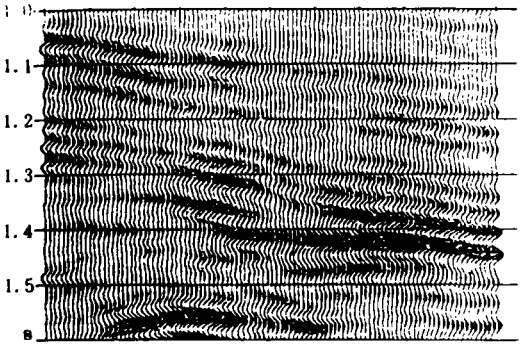


图 2　某测线一段过井原始地震记录

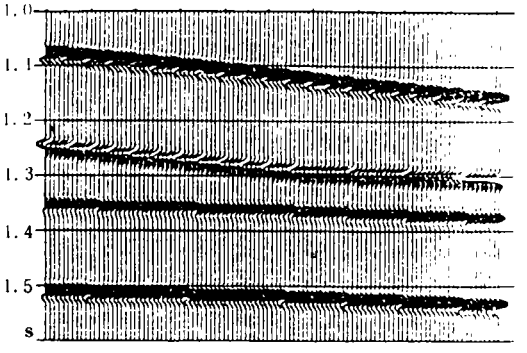


图 3　由 VSP 资料给出的图 2 记录的初始模型

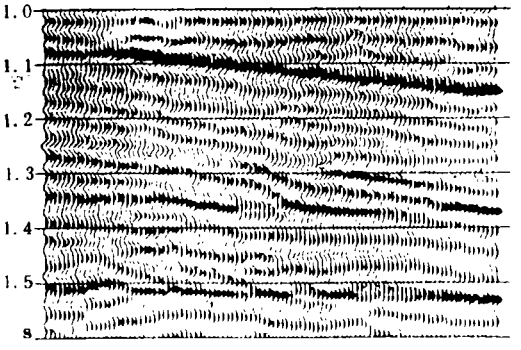


图 4　用本文方法一次迭代的结果



图 5　用本文方法三次迭代的结果

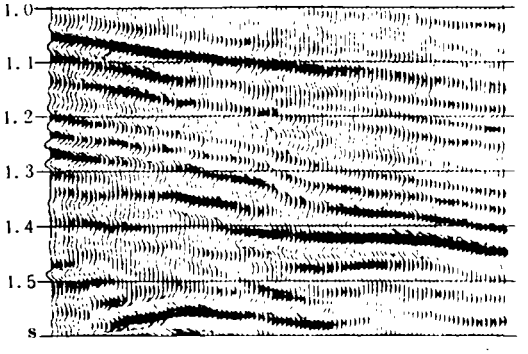


图 6　用本文方法七次迭代的结果

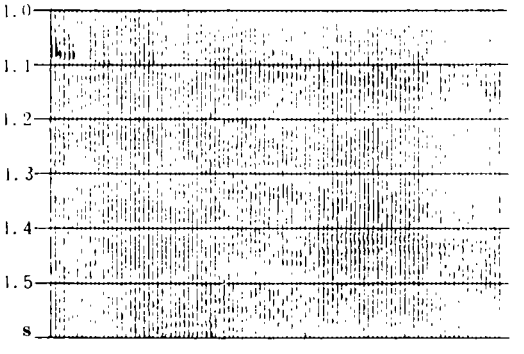


图 7　用本文方法得到的剩余误差剖面

面(图 4、5、6)、剩余误差剖面(图 7)、反射系数剖面(图 8)和波阻抗剖面(图 9)。

但从反演出的速度和密度参数剖面可以看出上述两种方法的区别。图 10、图 11 是用常规 SLIM 方法计算出的速度和密度剖面,图 12 和图 13 是用第二种方法(即本文方法)计算出的速度和密度剖面。图 14 是用两种方法得到的速度反演结果的比较,其中曲线(a)是初始值,(b)是用第二种方法反演出的速度曲线,(c)是用第一种方法反演出的速度曲线,而(d)是由

VSP 测井所得到的层速度曲线。由图中可以看出，第二种方法的反演结果更接近于真值。

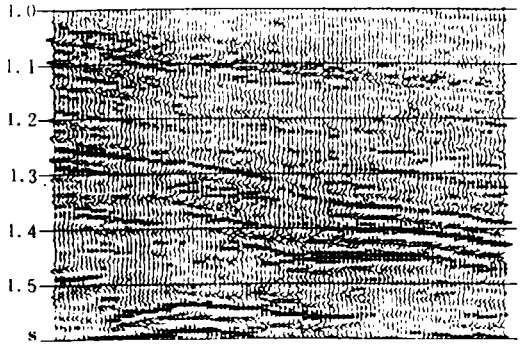


图 8 本文方法得到的反射系数剖面

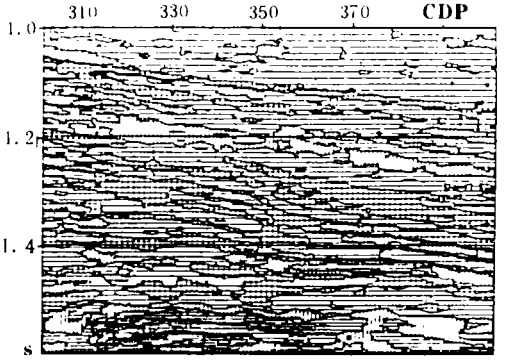


图 9 用本文方法得到的波阻抗剖面

值得注意的是，VSP 计算出的层速度，由于是等间隔的，且初值拾取时有一定的误差，因此，有时并不完全可靠。图 15 是两种方法计算的密度反演结果的比较。对比测井资料(由于比例关系，这里未给出密度测井曲线)可以发现，对于井旁道而言，用本文方法反演出来的密度曲线更接近于实际值。

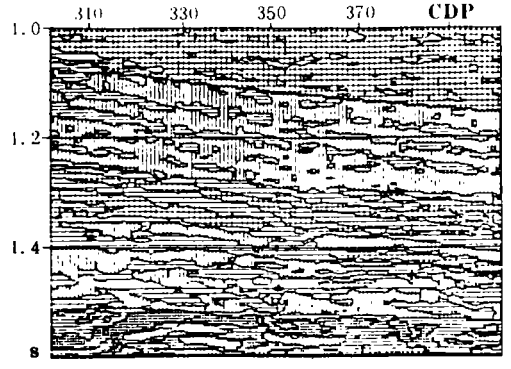


图 10 用常规 SLIM 方法计算的速度剖面

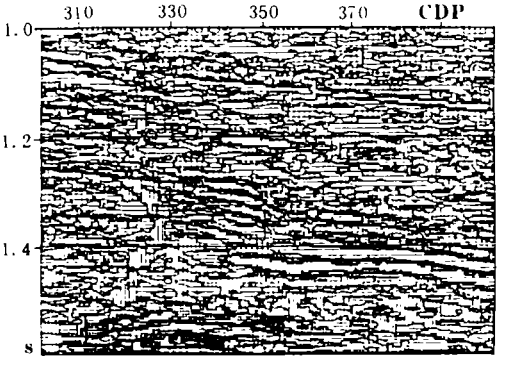


图 11 用常规 SLIM 方法计算的密度剖面

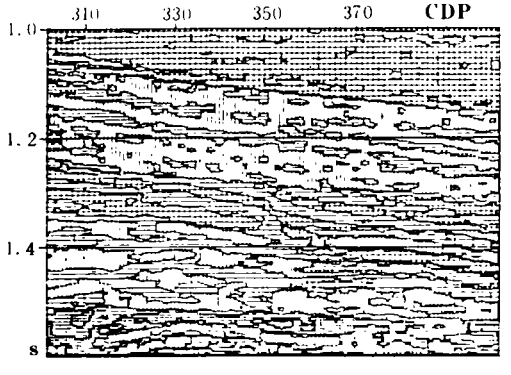


图 12 用本文方法计算的速度剖面

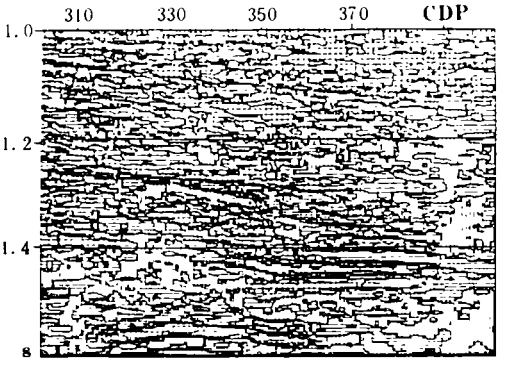


图 13 用本文方法计算的密度剖面

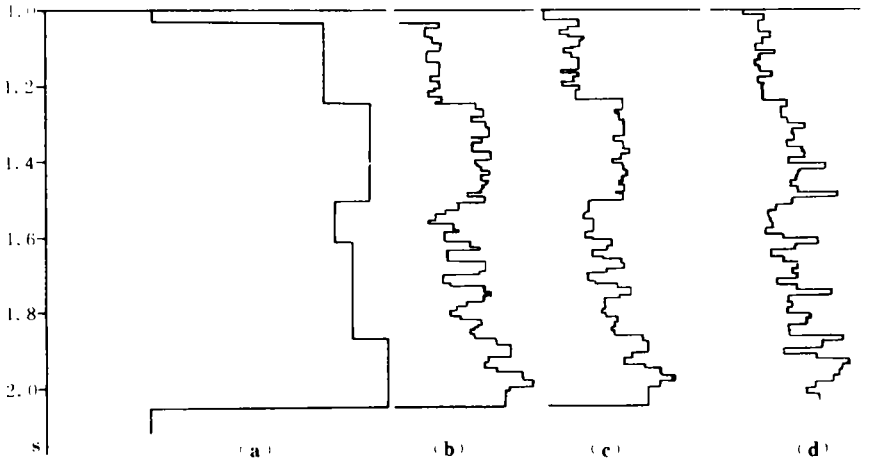


图 14　井旁道速度曲线

(a)为初始值;(b)为用本文方法反演出的速度曲线;(c)为用常规方法反演出的速度曲线;(d)为用 VSP 测井得到的层速度曲线

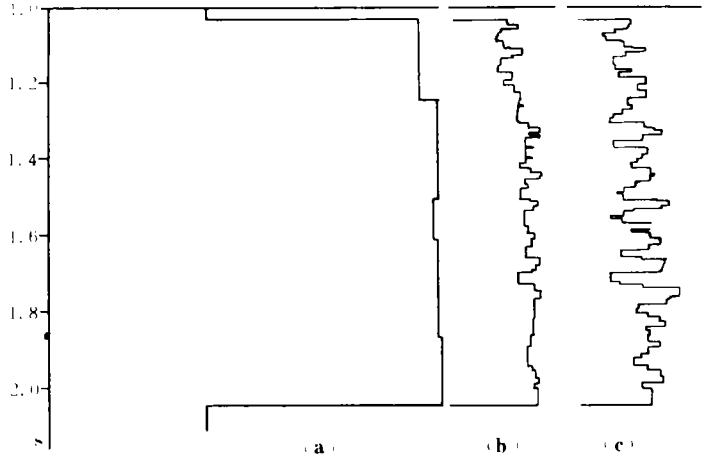


图 15　井旁道密度曲线

(a)为初始值;(b)为用本文方法反演出的密度曲线;(c)为用常规方法反演出的密度曲线

结　束　语

SLIM 法是一种有效的正、反演方法。它能同时反演 ρ、v 参数及波阻抗、反射系数,并能输出深度域和时间域剖面。使用中发现 SLIM 法由于不完善,导致多解的情况较多。文中从理论上推导了一种新的约束条件,此法能减少 SLIM 法的多解性,拓宽 SLIM 法的应用范围。

参　考　文　献

1　吴生玉,王克斌. 地震岩性模拟. 物探科技通报(增刊),1988
2　Western Geophysical. Seismic lithological modelling,1987

作 者 介 绍

焦湘恒　副教授，1936 年生，1961 年毕业于北京地质学院地球物理专业。曾从事过地震资料采集、处理及解释方法研究工作，先后发表过多篇学术论文和译文。现在青岛海洋大学物探教研室任硕士研究生指导教师。

石殿祥　工程师，1947 年生，1982 年毕业于大庆石油学院应用数学专业。从事过计算机软件及通用数据库研究。现在辽河石油勘探局研究院数据处理解释中心从事地震数据处理方法研究工作。

胡中平　工程师，1961 年生，1983 年毕业于长春地质学院石油物探专业。从事过地震资料采集、处理、解释方法研究工作，发表学术论文 10 余篇。现在地质矿产部石油物探研究所从事地震勘探方法研究工作。

吴光大　工程师，1959 年生，1980 年毕业于江汉石油地质学校石油与天然气地质专业。取得过多项科研成果，是台南第四系气田的发现者之一，发表过多篇学术论文。现在青海石油管理局勘探开发研究院从事复杂构造与储层预测研究工作。

马瑞伦　工程师，1965 年生，1986 年毕业于华东石油学院应用地球物理专业，1989 年在成都地质学院获硕士学位。从事过“变速 τ-p 偏移”、“三参数速度分析与应用”等课题的研究。现在海洋石油勘探开发研究中心从事“多次波消除”研究工作。

宋子齐　副教授，1944 年生，1968 年毕业于成都地质学院地球物理勘探系。长期从事教学和科研工作，曾编著地球物理测井方法、解释和资料处理方面教材 8 本，发表学术论文 30 余篇。现在西安石油学院勘探开发系从事储层综合评价、测井资料解释及处理等方面的研究和教学工作。

宋立斌　助理工程师，1965 年生，1989 年毕业于大庆石油学院勘探系石油地质专业。从事过油藏描述工作。现在吉林石油管理局研究院从事储层岩性、物性预测工作。

梁光河　讲师，1965 年生，1987 年毕业于长春地质学院石油地震专业研究生班，获硕士学位。参与过高分辨率处理、储层预测，岩性参数反演等多项课题的研究工作，发表过多篇学术论文。现在长春地质学院地震教研室从事特殊处理和岩性预测的研究工作。

侯安宁　讲师，1961 年生，1988 年毕业于长春地质学院应用地球物理专业，获硕士学位。曾完成 VSP 逆时偏移方法等课题的研究工作。现在长春地质学院应用地球物理系从事地震各向异性正、反演理论及地震数据处理方法研究和教学工作。

易维启　工程师，1962 年生，1983 年毕业于江汉石油学院物探专业，获学士学位；1991 年毕业于上海同济大学地球物理专业，获硕士学位。从事过物探资料解释；发表过学术论文数篇。现在大庆石油管理局勘探部从事技术管理及科研工作。

钱勇先　讲师，1962 年生，1982 年毕业于西南石油学院物理师资班，获学士学位；1988 年毕业于石油大学北京研究生部应用地球物理专业，获硕士学位。从事过物探专业教学和三维地震软件研制工作。现在江汉石油学院物探系从事教学和物探资料处理方法研究工作。

汪炳柱　1970 年生，1991 年毕业于青岛海洋大学应用地球物理专业，现在青岛海洋大学地质系攻读硕士学位，从事位场正、反演及模糊数学、神经网络的应用研究。

李桂元　高级工程师，1938 年生，1964 年毕业于北京地质学院物探专业。先后从事过地震资料处理、解释方法等研究工作，发表过学术论文数篇。现在石油地球物理勘探局研究院从事地震资料处理方法研究。

邓小力　高级工程师，1962 年生，1984 年毕业于华东石油学院物探专业。从事过地震资料解释和物探方法研究工作，获局级科技进步奖 8 项，发表过数篇学术论文。现在石油地球物理勘探局第一地调处研究所从事技术管理和科研工作。

杨建军　工程师，1948 年生，1975 年毕业于华东石油学院物探专业。从事过地震资料处理和解释工作，发表过数篇学术论文。现在石油地球物理勘探局研究院从事地震资料处理工作。