利用时空域预测实现地震资料随机噪声衰减

李国发　李观寿　　张立勤
（大港油田集团物探公司计算中心）（大港油田集团地质勘探开发研究院）

王艳仓
（华北石油管理局物探公司）

摘　要

李国发，李观寿，张立勤，王艳仓. 利用时空域预测实现地震资料随机噪声衰减. 石油地球物理勘探，1998，33(增刊 1)：122～128

本文在对频率—空间域预测滤波压制随机噪声进行分析的基础上，实现了时间—空间域线性预测压制随机噪声。与频率—空间域方法相比，时间—空间域预测法可以自由地控制算子在时间方向的长度，尤其对中、低信噪比地震资料具有更强的压制随机噪声的能力。该方法可以很方便地扩展为全三维随机噪声衰减。文中给出了应用此方法的理论模型和实际资料的例子，表明它是一种很有效的去噪手段。

主题词　地震数据处理　时间—空间域　频率—空间域　随机噪声　噪声衰减　信噪比　预测算子　二维预测滤波

引　言

高信噪比地震资料一直是地震数据处理所追求的目标，人们为此提出了多种去噪方法。但是就目前而言，各处理中心应用最广泛的仍是 f-x 域空间滤波衰减随机噪声的方法（称作 FXDECON 或 RNA）。

FXDECON 在频率—空间域实现，是对各频率成分确定其各自空间预测算子，而且所有频率成分的预测算子在时间—空间域的整体响应是一个二维预测滤波器。该滤波器在空间方向的长度等于 FXDECON 空间预测算子的长度，而在时间方向的长度却是运算时窗在时间方向的长度，即该二维滤波器缺少时间方向的局部性，尤其是远离零时刻的非零系数干扰了被预测点的值，这样就降低了 FXDECON 的去噪能力。

时间—空间域预测方法能够参照地震资料的特点（主要是依据有效信号的道间时差）自由地控制预测滤波器在时间方向的长度，从而能够克服 FXDECON 去噪方法在这方面的不足，增强了去噪能力。本文的理论模型和实际资料的例子证实了这种观点[1]。

本文于 1997 年 5 月 19 日收到。

方 法 原 理

FXDECON 原理及存在问题

假设有地震记录 $d(t,x)$,其中 $x=1,2,\cdots,N_x$, $t=1,2,\cdots,N_t$; 它在频率—空间域被记为 $\boldsymbol{d}_f(f,x)$,其中 $f=-M_f,\cdots,0,\cdots,M_f$。于是对每个频率成分 f_i,有一空间矢量 $\boldsymbol{d}_f(f_i,x)$。FXDECON 的基本依据是空间矢量 $\boldsymbol{d}_f(f_i,x)$具有可预测性,即存在预测滤波器 $p(f_i,x)$ $(x=1,2,\cdots,M_x)$,使得 $p(f_i,x)$与 $\boldsymbol{d}_f(f_i,x)$的褶积和 $\boldsymbol{d}_f(f_i,x)$在最小二乘意义下最接近。将空间预测误差算子 $1-p(f,x)$,$x=1,2,\cdots,M_x$,$f=-M_f,\cdots,0,\cdots,M_f$,写成如下矩阵形式

$$\begin{vmatrix} 1 & -p_{-M_f,1} & -p_{-M_f,2} & \cdots & -p_{-M_f,M_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -p_{-1,1} & -p_{-1,2} & \cdots & -p_{-1,M_x} \\ 1 & -p_{0,1} & -p_{0,2} & \cdots & -p_{0,M_x} \\ 1 & -p_{1,1} & -p_{1,2} & \cdots & -p_{1,M_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -p_{M_f,1} & -p_{M_f,2} & \cdots & -p_{M_f,M_x} \end{vmatrix} \tag{1}$$

将该矩阵的每一列作傅氏变换,得到这组滤波器在时间—空间域的整体响应,即

$$\begin{vmatrix} 0 & -q_{-N_2,1} & -q_{-N_2,2} & \cdots & -q_{-N_2,M_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -q_{-1,1} & -q_{-1,2} & \cdots & -q_{-1,M_x} \\ 1 & -q_{0,1} & -q_{0,2} & \cdots & -q_{0,M_x} \\ 0 & -q_{1,1} & -q_{1,2} & \cdots & -q_{1,M_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -q_{N_2,1} & -q_{N_2,2} & \cdots & -q_{N_2,M_x} \end{vmatrix} \tag{2}$$

其中 $N_2=(N_t-1)/2$。

不难看出,滤波器 $q(t,x)$在空间方向的长度等于 FXDECON 空间预测算子 $p(f,x)$在空间方向的长度 M_x,而时间方向的长度却是输入数据 $d(t,x)$时窗在时间方向的长度 N_t,滤波器 $q(t,x)$缺少时间方向的局部性。设经空间预测滤波 FXDECON 去噪后的结果为 $d'(t,x)$,一般而言,某一被预测点(t,x)的值 $d'(t,x)$只与该点邻域范围之内的有效输入数据 $d(t,x)$有关,而与其邻域范围之外 $d(t,x)$值无关。但是由于滤波器 $q(t,x)$在时间方向没有局部性,$q(t,x)$将被预测点(t_i,x_i)有意义邻域范围以外的输入数据值加权到输出点 $d'(t,x)$上,因而影响了 FXDECON 的去噪效果。当输入资料的信噪比较高时,滤波器 $q(t,x)$中绝对值较大的点集中在零点附近,时间方向缺少局部性对去噪效果的影响很小。但对于信噪比较低的资料,滤波器 $q(t,x)$绝对值较大的点分布比较分散,其远离时间零点的值对被预测点产生的负影响则不容忽视。此外这个问题还可以从另一个角度考虑,即 $d'(t,x)$与 $d(t,x)$在各频率成分上的最小二乘意义下的最佳逼近并不代表 $d'(t,x)$与 $d(t,x)$二者本身也是最小二乘意义下的最佳逼近。

时空域预测压制随机噪声

针对FXDECON存在的问题，我们在时间—空间域利用线性同相轴的可预测性来实现随机噪声的衰减。设有时空域滤波器 $q(t,x)$，其中 $x=1,\cdots,M_x$，$t=-M_t,\cdots,0,\cdots,M_t$，令 $M_x=3$，$M_t=2$，则二维预测误差的形式为

$$\begin{vmatrix} 0 & -q_{-2,1} & -q_{-2,2} & -q_{-2,3} \\ 0 & -q_{-1,1} & -q_{-1,2} & -q_{-1,3} \\ 1 & -q_{0,1} & -q_{0,2} & -q_{0,3} \\ 0 & -q_{1,1} & -q_{1,2} & -q_{1,3} \\ 0 & -q_{2,1} & -q_{2,2} & -q_{2,3} \end{vmatrix} \tag{3}$$

若预测误差算子与输入数据褶积的 L_2 模最小，则 $q(t,x)$ 就是我们希望得到的去噪算子。由于该算子在时间方向的长度可以自由地参照输入资料的特点（主要是参照有效信号的道间时差）进行控制，因而克服了FXDECON去噪方法在这方面的不足。

以上的讨论仅局限于二维形式，从原理上讲，该方法能很方便地扩展为三维形式，从而利用该方法实现全三维随机噪声衰减。

处理效果分析

根据本文的方法我们编制了相应的处理模块XYTRNA。

图1a是一个伪随机噪声模型记录，图1b是图1a经FXDECON处理后的结果（算子长度

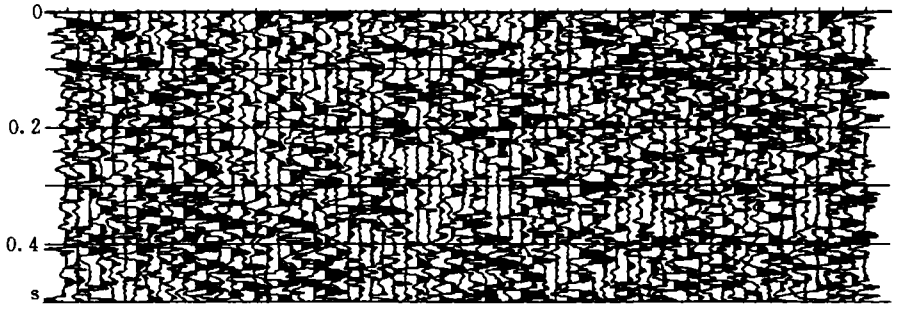


图1a 伪随机噪声模型

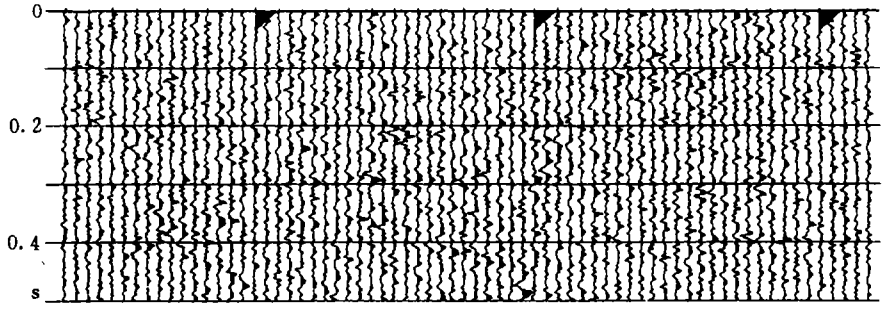


图1b 对图1a作FXDECON处理的剖面

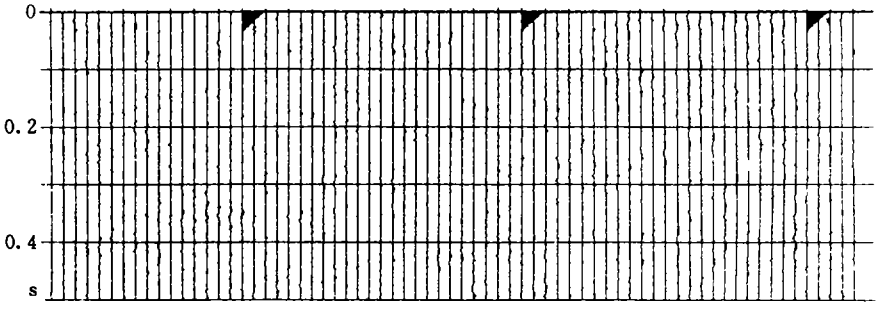


图 1c　对图 1a 作 XYTRNA 处理的剖面

$M_x=5$),图 1c 是图 1a 经 XYTRNA 处理后的结果(算子在空间上的长度 $M_x=5$,在时间方向的长度 $M_t=7$)。可以看出 XYTRNA 较 FXDECON 去噪能力明显增强。

图 2a 是由三条互相平行的同相轴和两条断层组成的三维理论模型中的一条剖面;图 2b 是图 2a 加入随机噪声的情况;图 2c 是图 2b 经二维 FXDECON 去噪的结果,噪声未得到充分压制,断层及断点也比较模糊;图 2d 是图 2b 经三维 FXDECON 处理后的结果,各方面效果较二维 FXDECON 处理有所改进;图 2e 是图 2b 经三维 XYTRNA 处理后的结果,随机噪声得到了很好的衰减,两条断层也十分清晰。

图 3a 是大港某地区的一段叠加剖面,图 3b 是图 3a 经 FXDECON 处理后的结果,图 3c 是

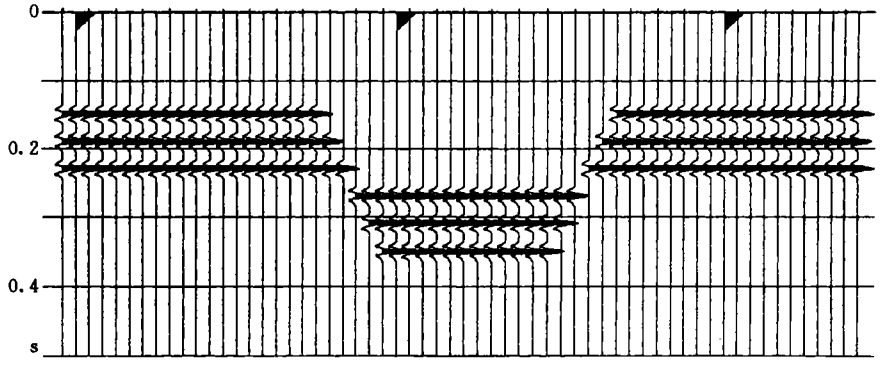


图 2a　地质模型的理论地震记录

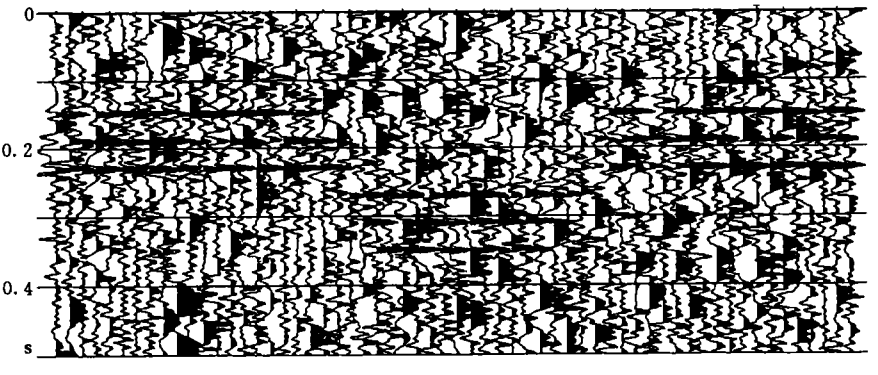


图 2b　对图 2a 加入随机噪声的结果

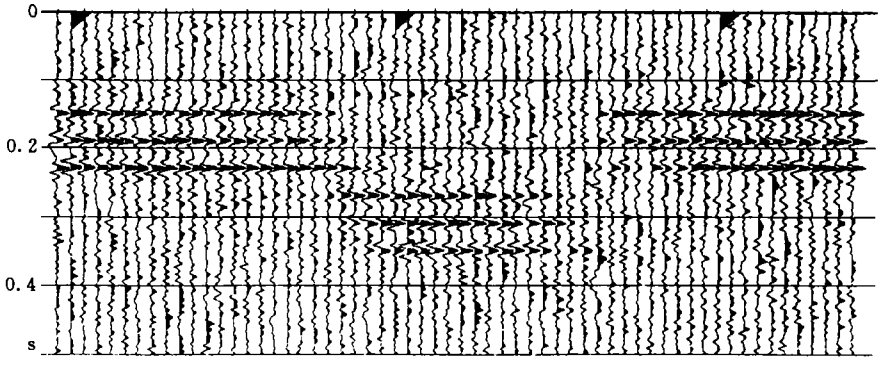


图 2c 对图 2b 作二维 FXDECON 处理的结果

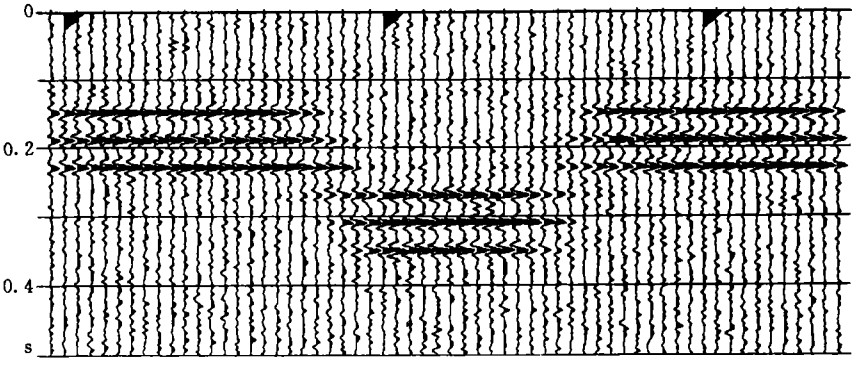


图 2d 对图 2b 作全三维 FXDECON 处理的结果

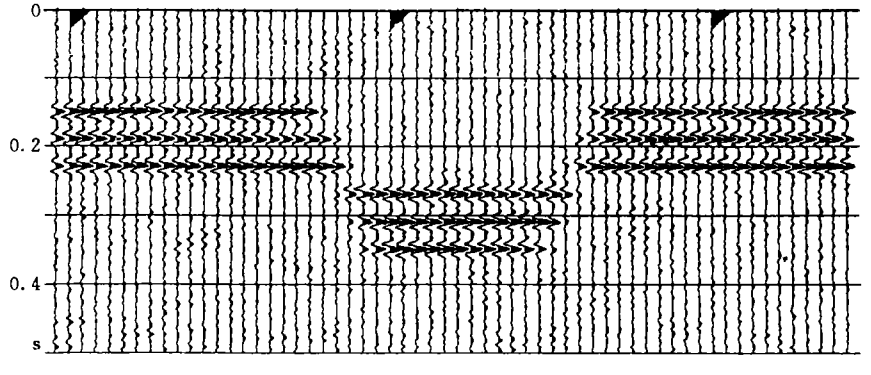


图 2e 对图 2b 作全三维 XYTRNA 处理的结果

图 3a 经 XYTRNA 处理后的结果。与图 3b 相比可以看出，在隆起中部低信噪比区域，图 3c 的去噪效果较好，基本反映出了隆起内部的构造轮廓。

结 束 语

本文的时间—空间域预测滤波(XYTRNA)衰减随机噪声的方法克服了频率—空间域预测滤波(FXDECON)在时间方向缺少局部性的不足，较FXDECON有着更强的去噪能力，从

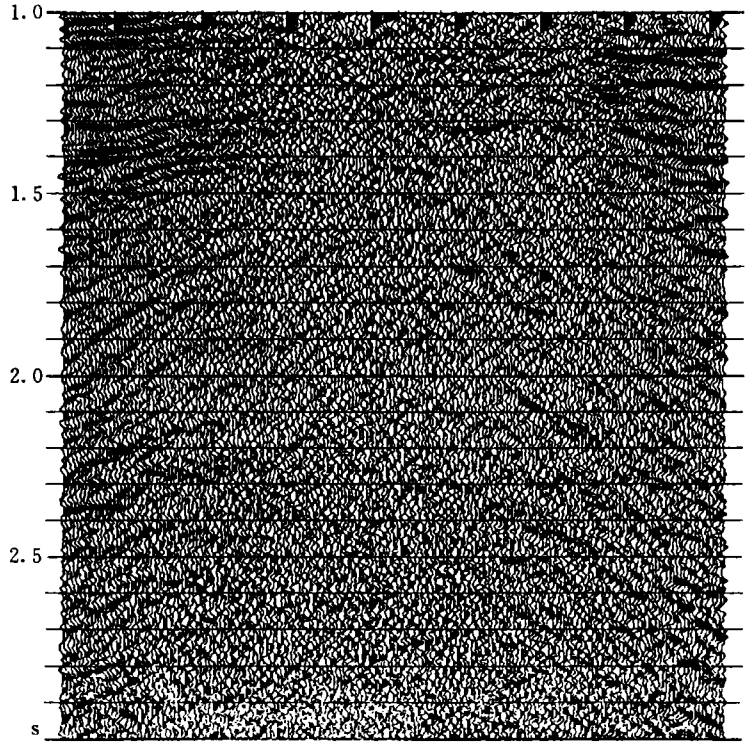


图 3a　某实际原始叠加剖面

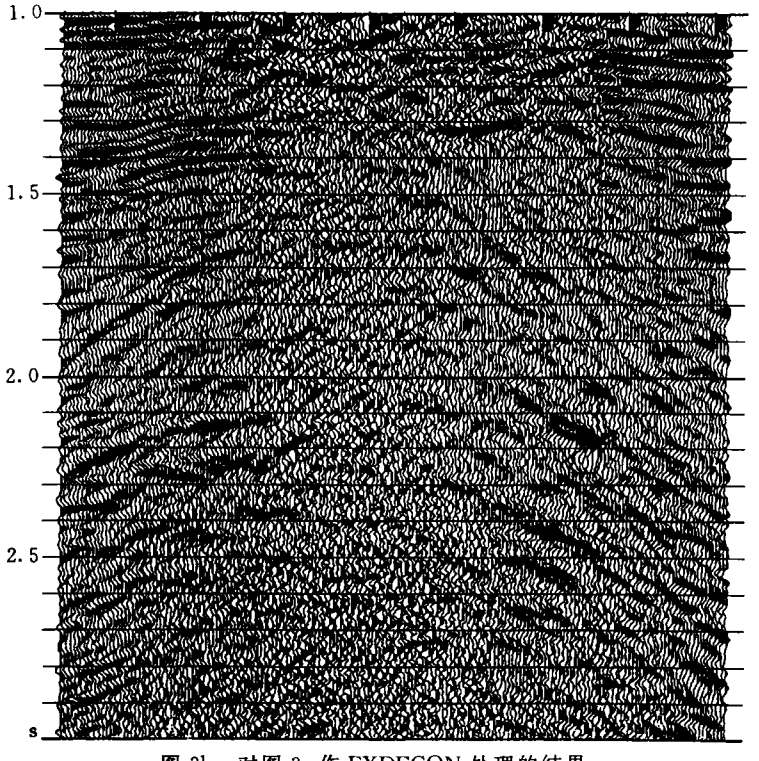


图 3b　对图 3a 作 FXDECON 处理的结果

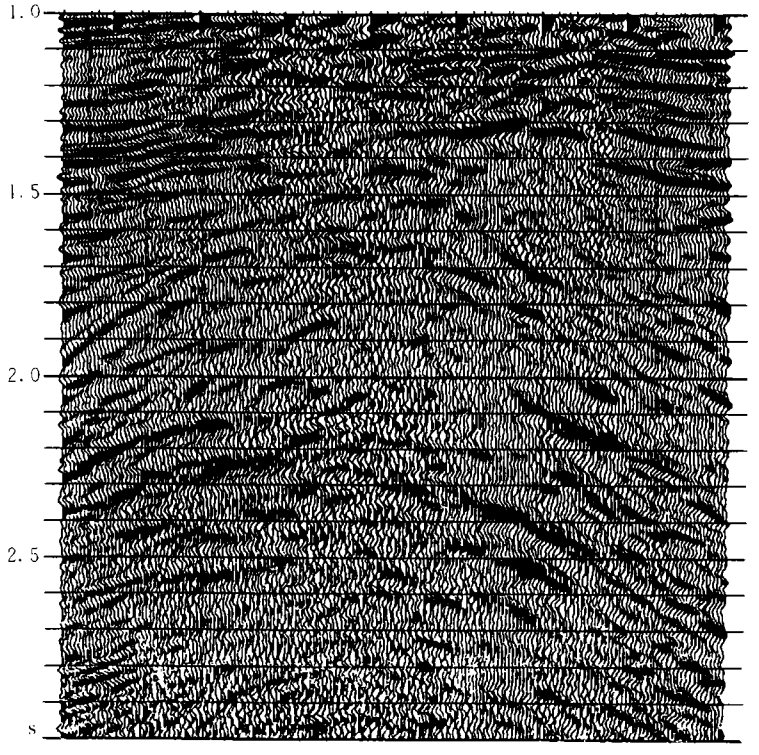


图 3c 对图 3a 作 XYTRNA 处理的结果

理论记录和实际资料的试验可以看出本方法是一种很有效的去噪方法。

在本项研究工作中，自始至终得到了大港油田集团物探公司总工程师刘益强、技术开发室主任曾灏等同志的指导和帮助，分析室的赵益水同志提供了实际地震资料，在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

1 Abma R. Lateral prediction for noise attenuation by t-x and f-x techniques. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1887～1896

2 Luis C. Random noise reduction. Presented at 54th SEG Mtg, 1984

3 李国发. 全三维随机噪声衰减技术. 石油地球物理勘探, 1995, 30(3): 310～318

4 李国发. f-k 域与 f-x 域联合实现道内插. 石油地球物理勘探, 1995, 30(5): 691～701

地质研究院从事解释系统的应用工作。

严建文 工程师，1966年生，1989年毕业于中国地质大学(武汉)应用地球物理专业。曾发表过多篇译文。现在中国新星石油公司物探研究所工作。

李国发 工程师，1966年生，1987年毕业于长春地质学院应用地球物理系。曾从事提高地震资料信噪比与分辨率的研究。现在大港油田集团物探公司计算中心从事地震资料处理新技术开发与研究工作。

陆文凯 讲师，1969年生，1991年毕业于清华大学自动化系，1996年毕业于石油大学(北京)应用地球物理专业，获博士学位。现在清华大学自动化系从事人工智能、神经网络、图像处理在地震资料和测井资料处理中的应用研究工作。

徐常练 高级工程师，1956年生，1984年获石油大学(北京)应用地球物理硕士学位。一直在石油地球物理勘探局研究院从事智能化速度谱、三维多参量速度谱的研制及中值处理方法的推广工作。现在中国地质大学(北京)攻读博士学位。

杨建礼 工程师，1965年生，1988年毕业于江汉石油学院物探专业。曾获局科技进步一等奖，发表过多篇论文。现在中原石油勘探局研究院从事油藏描述、储层预测研究工作。

孔 炜 工程师，1968年生，1989年毕业于青岛海洋大学物探专业，1997年获西南石油学院物探专业硕士学位。现在吉林石油集团公司勘探开发研究院从事地震资料处理与解释工作。

安四喜 高级工程师，1960年生，1982年毕业于河北地质学院物探专业。曾从事大地电磁测深资料的采集、处理工作。现在石油地球物理勘探局第五地质调查处从事电法生产技术的管理工作。

徐维秀 工程师，1966年生，1989年毕业于重庆大学应用数学专业。一直从事物探方法研究及应用软件的开发。现在胜利石油管理局物探公司从事国家863项目“油气勘探开发综合分析评估系统”的研制工作。

李红桃 工程师，1962年生，1986年毕业于长春地质学院物探专业。现在地质矿产部第四物探大队综合研究院从事SUN工作站系统的维护及地震资料人机联作解释工作。

岳永霞 工程师，1962年生，1981年毕业于石油物探学校计算机专业。曾获部级优秀成果三等奖。现在石油地球物理勘探局勘探处从事石油地震勘探数据库管理工作。