

文章编号: 1671-8585(2009)06-0425-07

# F-X-Y 谱估计及其在高密度地震数据分析中的应用

刘玉莲, 蔡希玲, 曾庆芹, 苏世龙

(中国石油集团东方地球物理公司研究院, 河北涿州 072750)

**摘要:** 频率是表征地震波特征的主要参数之一。在地震勘探过程中, 多种因素影响地震波频率的变化, 在数据处理过程中分析和监控各种波场的频率属性能够使处理人员了解数据频率成分的变化规律, 有针对性选择处理中的空变参数和频变参数。F-X-Y 谱估计方法在三维空间上统计有效波的频率, 结果较准确, 对问题的分析更加细致。通过实例, 主要分析了在 3 方面的应用: ①叠前空间子集数据的频率分析; ②叠后数据的频率分析; ③三维数据频率特征的空间分析。结果表明, F-X-Y 谱分析是数据处理中一种有效的量化质量监控手段, 特别是对于高密度采集的地震数据, 使用 F-X-Y 谱能够快速综合出数据中不同的频率成分在空间的分布特征。

**关键词:** 量化分析; 频率; F-X-Y 谱; 叠前子集; 质量监控; 高密度地震

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

频率是地震波最典型、最有价值的属性之一, 因为地震波在地下介质中传播、散射、吸收衰减等均与频率有关。在野外采集设计中, 除了综合考虑各种因素外, 目标区数据的频带宽度是设计人员不容忽视的参数, 如在设计接收道距  $\Delta X$  时, 其大小与反射波的最高频率有关, 即:  $\Delta X = v_{\text{int}} / (4 \sin \theta \cdot f_{\text{max}})$  ( $\theta$  为地层倾角,  $v_{\text{int}}$  为层速度,  $f_{\text{max}}$  为最高无混叠频率); 频率是处理人员最关注的地震波特征之一, 在室内数据分析与处理中, 对数据频率范围的研究贯穿于处理过程的始终<sup>[1]</sup>, 如原始数据中信号与噪声频率差异是频率滤波的前提, 滤波参数选择的依据是频谱分析后信号与噪声的频率分布范围; 在评价处理效果时, 反射波的主频和带宽仍作为主要参量用于衡量成果数据的分辨率<sup>[2]</sup>; 在地质综合研究中, 薄层反射波在频率域的特征可以指示时间厚度的变化, 利用振幅谱的陷频周期可以确定薄层的厚度, 故谱分解作为储层研究的核心技术已在地震解释中广泛应用<sup>[3,4]</sup>; 此外, 从地震沉积学的观点分析, 地震同相轴既不简单地反映等时界面也不单纯地反映岩性界面, 而是受地震资料频率的控制, 不同频段的地震数据反映的地质信息不同<sup>[5]</sup>, 基于分频分析, 地震解释的地质意义更加明确。由此可见, 对地震波频率属性的分析和研究在地震勘探中具有重要的意义。

目前, 地震数据处理中常用的频率分析方法是分频扫描和单道或多道振幅谱分析。分频扫描多以倍频程的频域间隔, 从低到高逐步提升频率, 对原始数据、处理中不同环节的数据或成果数据做分频滤波扫描, 直观地判断数据中反射信号和噪声在各个频带上的分布特点。频谱分析是对单道记录

的单道谱分析或数据组的多道统计谱分析, 分析方式简单方便, 但如果要研究频率成分沿测线方向或在空间上的变化, 需进行多角度的统计分析, 这种谱分析方式有其局限性<sup>[1]</sup>。对于日渐兴起的高密度采集的海量数据, 要对数据中频率成分进行快速分析, 必须有一套相应的技术和方法。

本文介绍一种三维地震数据频率-空间特征的分析方法, 实现 F-X-Y 谱估计。本方法利用求取信噪比谱的相关法估计理论, 通过空间上对多道记录进行互相关来估算信号的功率谱, 通过自相关法获得数据的功率谱, 以此得到三维数据的频率空间分布, 进行叠前数据体的频率特征分析、地表一致性前提下的数据频率特征分析等。通过 F-X-Y 谱分析, 对处理过程中频率成分在空间上的变化进行很好的监控, 有助于处理人员了解数据主频的空间分布, 研究处理过程中数据频率的变化规律, 更有针对性地选择处理中的空变参数和频变参数。

## 1 方法原理

假设地震记录中信号与噪声不相关, 道间的噪声亦不相关, 由此可以依据相关理论估算记录中信号和噪声的平均功率谱<sup>[6,7]</sup>, 具体算法如下。

设相邻两道地震记录分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ , 具有相同的信号  $s(t)$  和不同的噪声  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$ , 即:

$$\begin{aligned} y(t) &= s(t) + n_2(t) \\ x(t) &= s(t) + n_1(t) \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-10-17; 改回日期: 2009-11-19。

第一作者简介: 刘玉莲 (1975—), 女, 2004 年毕业于石油大学 (华东) 地球探测与信息技术专业, 现从事地震资料处理工作。

计算其自相关函数  $c_{xx}(\tau)$ ,  $c_{yy}(\tau)$  和互相关函数  $c_{xy}(\tau)$ , 有:

$$c_{xy}(\tau) = c_s(\tau) \quad (2)$$

式中:  $c_s(\tau)$  表示信号的自相关, 是在一定条件下  $x$  与  $y$  道互相关  $c_{xy}(\tau)$  的结果。

对计算的相关函数作 Fourier 变换,  $C_{xx}(f)$ ,  $C_{yy}(f)$  为记录道的功率谱,  $C_{xy}(f)$  为互功率谱, 对多道记录的互功率谱进行平均就得到信号谱。

对于三维数据, 依据上述相关理论, 可在  $m \times l$  道的范围内求取数据的功率谱和信号谱。以  $m=l=3$  为例说明, 中心道为  $t(i, j)$ , 如图 1 所示。

序号	$j-1$	$j$	$j+1$
$i-1$	$x$	$x$	$x$
$i$	$x$	$t$	$x$
$i+1$	$x$	$x$	$x$

图 1  $m=l=3$  时地震道空间分布示意

计算各道与中心道  $t(i, j)$  的互相关:

$$c(l, m) = t(i, j) \otimes t(l, m) \quad (3)$$

$$l = i-1, i+1; l \neq i$$

$$m = j-1, j+1; m \neq j$$

式中:  $\otimes$  为相关运算符,  $i, j$  为序号。

计算各道的自相关, 包括了中心道:

$$a(l, m) = t(l, m) \otimes t(l, m) \quad (4)$$

$$l = i-1, i+1$$

$$m = j-1, j+1$$

对相关函数做 Fourier 变换, 得:

$$C(l, m) = F[c(l, m)] \quad (5)$$

$$A(l, m) = F[a(l, m)]$$

式中:  $A(l, m)$  为每道记录的功率谱;  $C(l, m)$  是每道记录相对于中心道的互功率谱。由于道间信号具有相关性, 可由互功率谱平均得到信号谱  $S(f)$ :

$$S(f) = \frac{1}{l \cdot m - 1} \sum_{\substack{l=i-1 \\ l \neq i}}^{i+1} \sum_{\substack{m=j-1 \\ m \neq j}}^{j+1} [ | C(l, m) | ] \quad (6)$$

总的平均功率谱为  $S_N(f)$ , 包括了信号和噪声, 即:

$$S_N(f) = \frac{1}{l \cdot m - 1} \cdot \sum_{\substack{l=i-1 \\ l \neq i}}^{i+1} \sum_{\substack{m=j-1 \\ m \neq j}}^{j+1} \sqrt{| A(l, m) \cdot A(i, j) |} \quad (7)$$

由此可以计算出噪声的功率谱为:

$$N(f) = S_N(f) - S(f) \quad (8)$$

对功率谱开方可得到振幅谱。

## 2 实际资料应用

### 2.1 叠前空间子集数据的频率分析

针对野外密集采样的原始地震数据, 数据处理人员或许应该改变以往分析记录的习惯, 将在野外每隔若干炮检查一炮的点分析方式转变为三维空间内的面分析方式, 基于空间子集的分析方法可以方便在平面内检查数据质量, 快速地综合出数据的空间分布特征。在空间子集上统计出 F-X-Y 谱, 能够分析叠前数据中各种波场的频率特征并加以利用, 深化处理人员对地震数据的理解。

对于正交排列观测系统, 炮点线与接收点线布置成正交, 如果激发点与接收点间隔相同, 可以获得均匀分布的地下反射点。抽取的正交子集是由平行于 Inline 方向的一条检波线与垂直该接收线的若干炮数据组成。所选择的数据体在  $x$  与  $y$  方向正交。分选后的子集,  $x$  方向是检波线方向,  $y$  方向是炮线方向, 炮点线与接收点线互为垂直平分。

三维地震观测系统可由纵测线和非纵测线构成多种不同的排列形式, 正交观测是一种典型的观测方式。除此之外, 还有砖墙式、平行式、斜交式、树状、环形等多种方式以满足不同勘探需求。对于斜交式三维观测系统, 能够被分选为交叉排列道集, 即斜交子集。一个斜交子集是由一条检波点线和与其斜交的一条炮点线所组成。

我们从数据分析的角度出发, 在叠前三维数据集中选取这种简单的子集分析, 观察数据的时间-空间特性和频率-空间特性。

实例中的空间子集选自于沙漠地区正交观测的三维数据, 可控震源激发, 扫描频率为 8~80 Hz, 接收线上共 120 道, 在其垂直平分线上取 96 炮, 构成叠前空间子集, 采集参数为: 接收点距 40 m, 炮点距 40 m, 对称规则观测, 构成了一个叠前单次覆盖的三维数据体。

图 2a 为正交子集中的 6 炮原始单炮记录, 按照相关法谱估计原理, 可得到这 6 炮数据的振幅谱 (图 2b), 与常规的频率分析方法不同, 这种分析能够将频率分布与原始  $t-x-y$  域的数据一一对应, 更便于处理人员研究时间域数据与频率域数据的对应关系。图 2b 是整道的频率分析, 在扫描频率 8~80 Hz 以外数据的能量很弱, 在近炮点排列上, 数据中各种频率成分均有较强的能量, 随着炮检距的增大, 数据能量迅速减弱, 强能量主要集中在

20 Hz 以下,是干扰波的反映。

图 3 为空间子集中不同频率(10, 20, 30, 40, 50, 60 Hz)的切片,图中横坐标为炮点号(1~96),纵坐标为接收点号(1~120)。从切片上分析,在

30 Hz 以内数据的频率-能量分布呈明显的规律性,但自 40 Hz 以上特别是 50 Hz、60 Hz 的频率切片上,出现横向条带状分布的能量,经调查为声波干扰所致,在第 58 个接收点上的表现最为突出。

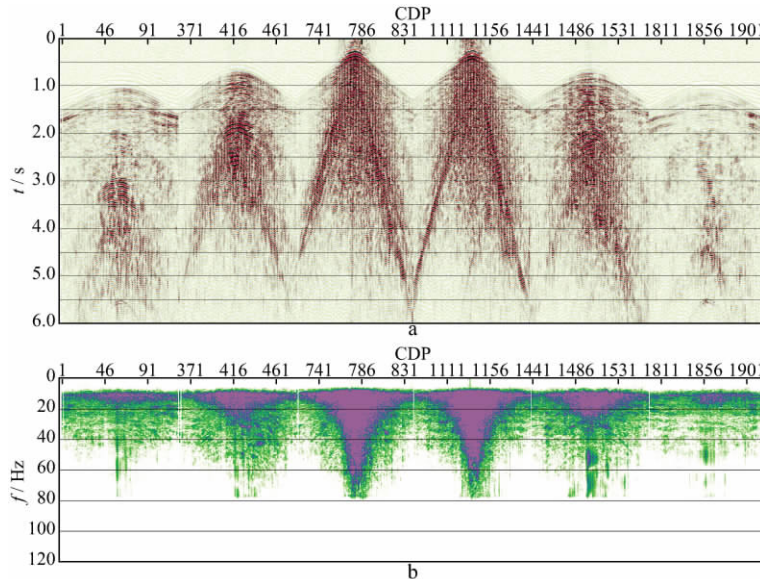


图 2 正交子集中抽取的 6 炮记录显示(a)及与之相对应的振幅谱(b)

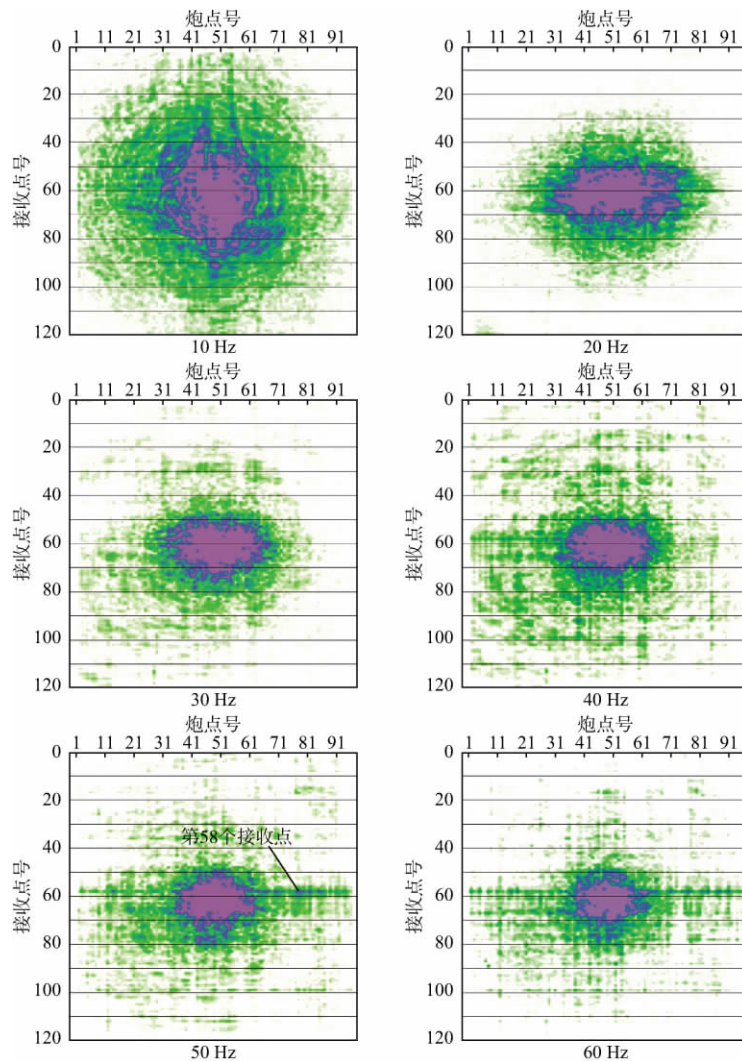


图 3 空间子集的不同频率切片

为了证实这一现象,显示 57,58 和 59 这 3 个共接收点的  $t-x$  域数据,在全频数据中,不易发现这一问题(图 4a),但在高频数据段,第 58 个接收点数据

中存在着很强的声波干扰(图 4b)。由此可见,在  $f-x-y$  域能够很方便地研究叠前空间子集数据的分布规律及其存在的问题。

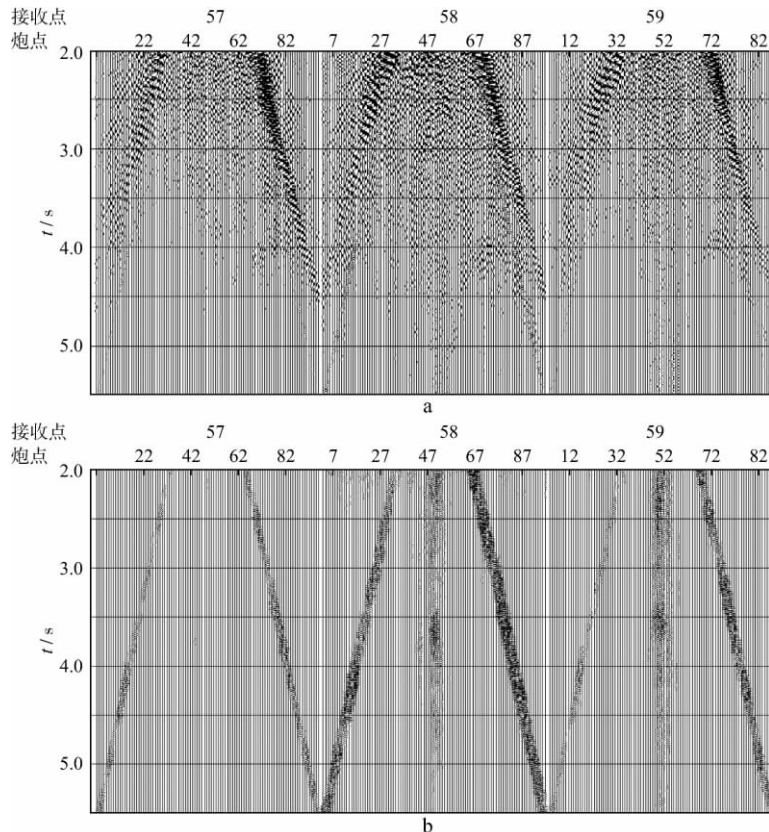


图 4 3 个共接收点集的全频数据(a)和 高频数据(b)

### 2.2 叠后数据的频率分析

对叠后数据进行频率分析时,常用的方法是在试验线上对选择的时窗内的数据做频谱分析,据此来分析处理过程中 3 个关键环节数据频带范围的变化。这种频率分析方法具有很强的统计性,不利于对局部问题的分析和检查。采用本

文所述的方法统计数据中目的层段的信号谱,显示在叠加剖面的下方,可以清晰地展示各个频率成分的能量在空间的分布情况,即空间频率谱不仅能够反映试验线上频率的变化,还可以揭示横向上不同频率间的能量差异。图 5 为原始叠加剖面为目的层对应的频谱。图 6 为异常噪声压制

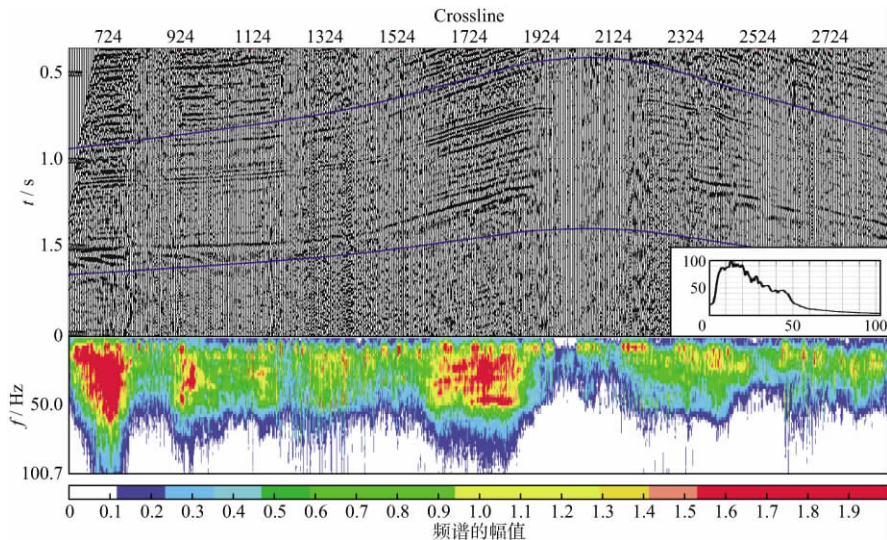


图 5 原始叠加剖面及其频率分布

后叠加剖面为目的层对应的频谱。图 7 为振幅处理及反褶积后叠加剖面为目的层对应的频谱。

图 8 为进一步处理后叠加剖面为目的层对应的频谱。

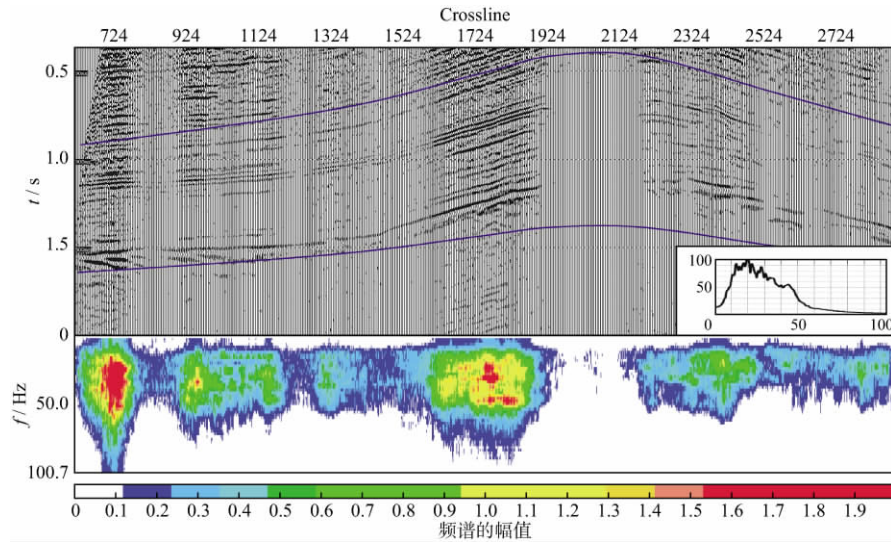


图 6 噪声衰减后叠加剖面及其频率分布

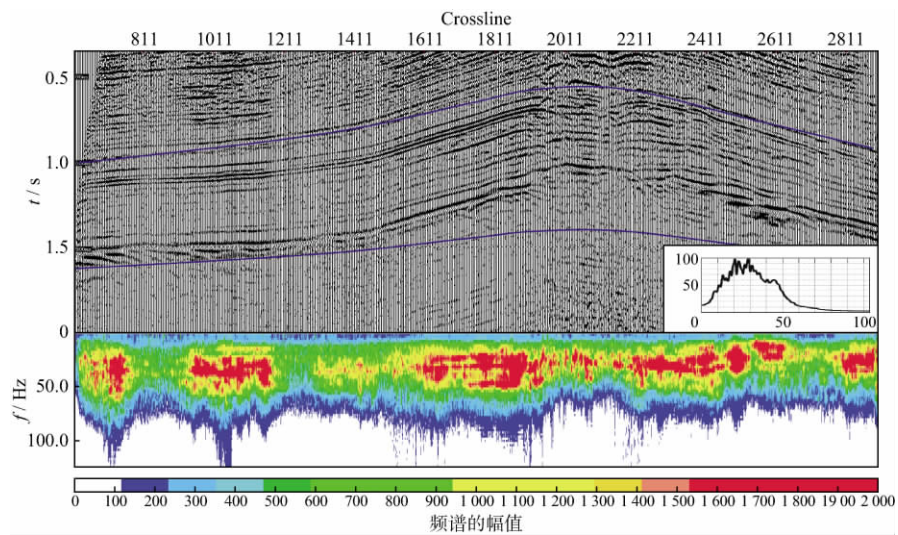


图 7 振幅处理及反褶积后叠加剖面及其频率分布

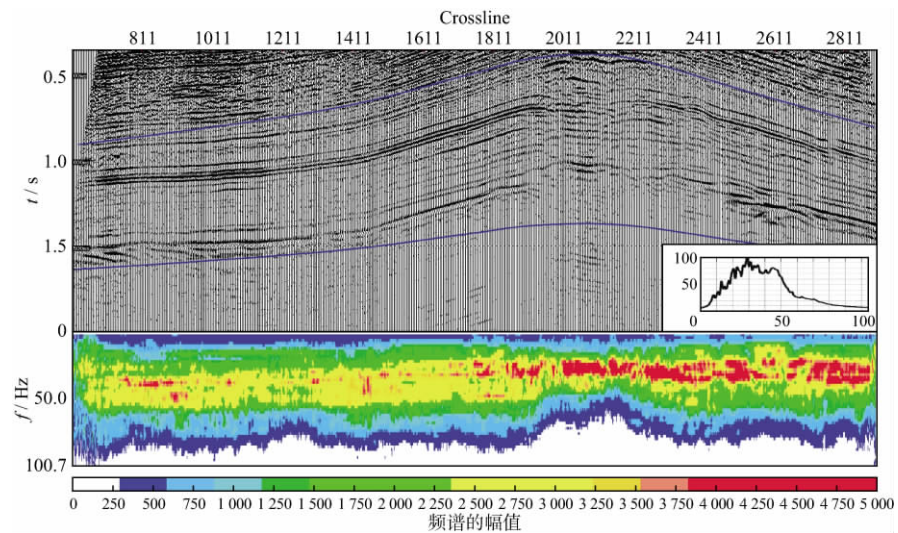


图 8 进一步处理后的叠加剖面及其频率分布

### 2.3 三维数据频率特征的空间分布

与  $t-x-y$  域的等时振幅切片类似,可以在  $f-x-y$  域分析等频切片,研究相同频率切片上振幅的空间分布。对比不同频率的切片,能够发现地震波的振幅随频率的变化情况。在频率切片上逐步分析数据特征的变化,便于处理人员认识所采用的处理方法对数据频率的影响。图 9 为原始叠加数据在

30 Hz 时的切片,在切片中不同的空间位置上,地震波的能量差异较大,可以对照近地表条件、采集因素等,分析产生能量变化的原因,在数据处理中有针对性地进行参数试验和质量监控。图 10 为经数据处理后的最终叠加剖面在 30 Hz 的切片,消除了由于地表原因造成的空间频率、能量不均匀现象,保留了储层的变化特点。

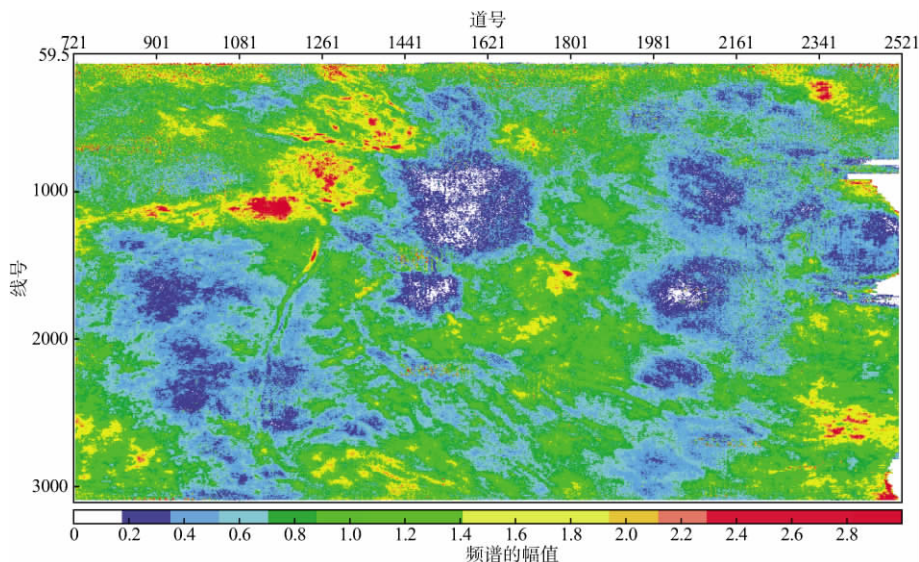


图 9 原始数据在 30 Hz 的切片

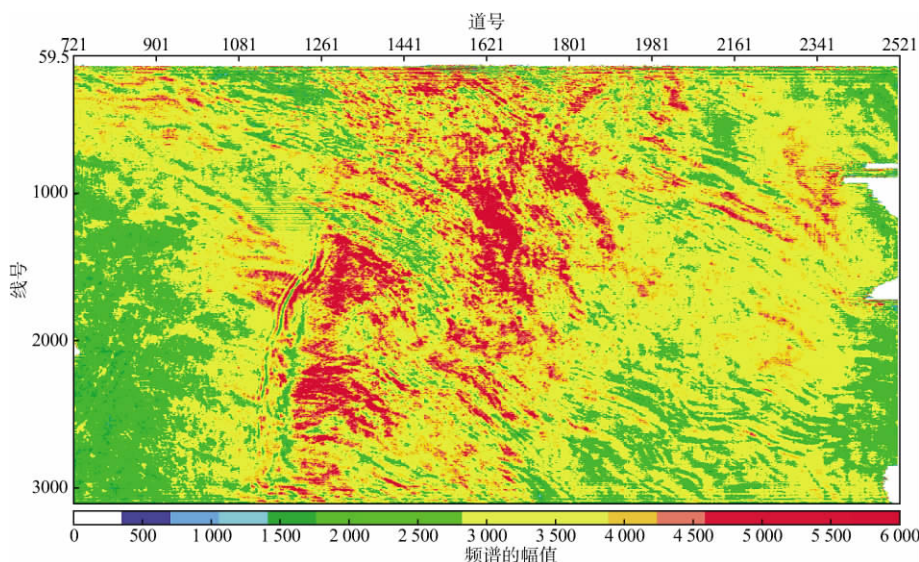


图 10 最终数据在 30 Hz 的切片

在进行数据分析时,可根据需要在频谱  $S(f, x, y)$  中提取某一频带内峰值 ( $A_{\max}$ ) 和峰值频率 ( $f_{\max}$ ),按照其与地面位置关系,显示频率特征参数的空间分布。分析能量变化与近地表结构变化的对应关系,帮助处理人员选择试验点,确定试验方案。峰值频率 ( $f_{\max}$ ) 是所选频带内最大  $A_{\max}$  对应的频率,这一参数使处理人员能快速地了解数据主频的空间分布,在数据处理的各个环节应用该参

数可以研究处理过程中数据频率的变化规律。此外,可通过特征参数的平面显示快速分析全区数据的空间分布情况,确定处理中的空变参数和频变参数,或监控处理过程中数据频率的变化。图 11 为原始数据有效频带内的峰值频率分布图,峰值频率普遍较低,集中在 15~20 Hz 左右;图 12 为处理后数据的有效频带峰值频率分布图,集中在 30~35 Hz,分布特点为:在构造的两翼,峰值频率较

高,在构造的顶部(工区中部),峰值频率偏低。经过处理后有效频带峰值频率得到展宽,范围由 4~

52 Hz 变化到 8~68 Hz,较好地揭示了全区内频率在空间上的变化规律。

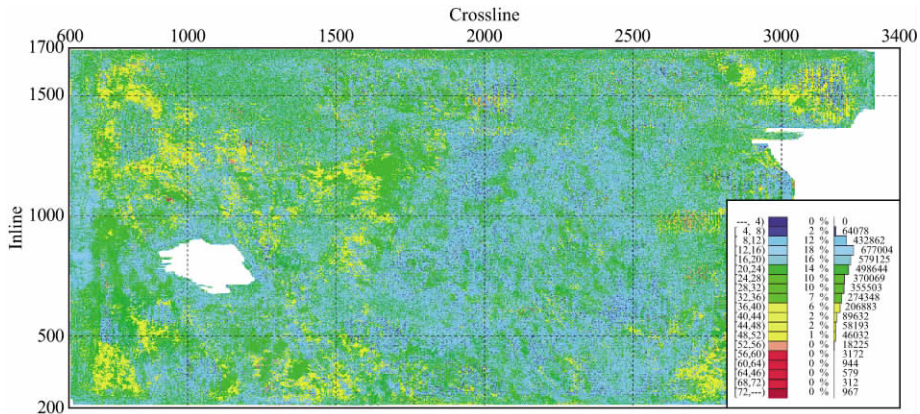


图 11 原始数据的峰值频率分布

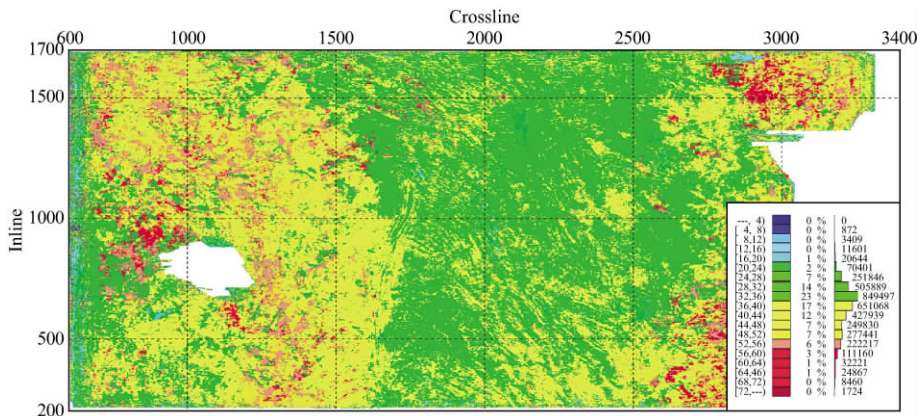


图 12 处理后数据的峰值频率分布

### 3 认识

在 高密度地震数据的室内处理过程中,数据量和参数试验工作量很大,许多模块的应用效果与所选参数密切相关,而参数选择受人为因素的影响,以致于很难达到最佳的处理效果。如反褶积、反 Q 滤波、谱白化等参数试验的效果基本上还依赖于处理人员的视觉判断,缺乏完善的定量化标准。利用本文所述的方法则能较好地统计出数据的频带分布,选择适当的频率做频率切片比常规的三维振幅切片有更清晰的显示,能够监控处理过程中数据频率成分的变化,便于处理人员研究处理方法对数据品质的影响,检查参数使用的合理性,这种量化分析方法较为客观全面,减少了人为因素的影响,有助于对处理方法的认识,提高处理人员的技术水平。

主任、黄志总工程师及质控组专家对本项工作的指导,同时感谢张凤艳、齐月红及吕英梅给予的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 蔡希玲. 统计 F-X 谱估计方法及应用[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(3): 181~186
- 2 Barnes A E. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data[J]. Geophysics, 1993, 58(3): 419~428
- 3 Partyka G, Gridley J, Lpodz J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge, 1999, 18(3): 353~360
- 4 黄绪德. 薄层陷频法[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(5): 1~6
- 5 刘喜武, 宁俊瑞. 地震时频属性及其在油气地震地质技术中应用的综述[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(2): 18~22
- 6 Dash B, Obaidullah K A. Estimation of signal and noise statistics using correlation theory [J]. Geophysics, 1970, 35(1): 24~32
- 7 俞寿朋, 查中圻, 梁杰. 频率加强滤波[J]. 石油地球物理勘探, 1984, 19(3): 200~209

感谢东方地球物理公司研究院处理中心梁桂美

(编辑: 顾石庆)