

· 述评 ·

# 高分辨率资料处理与高信噪比资料

王进海\* 朱 敏

(四川石油管理局地调处成都计算中心)

## 摘 要

王进海,朱敏. 高分辨率资料处理与高信噪比资料. 石油地球物理勘探, 1996, 31(4): 587~596

目前有很多提高地震资料分辨率的方法,如谱白化、外推展谱和小波变换等等。但不论何种方法,制约提高分辨率的主要因素是地震资料的原始信噪比,而不完全依赖所使用的处理方法。高分辨率地震勘探是一项系统工程,需要野外采集、室内处理等各方面的共同努力才能实现。其中高质量的数据采集是最基础性的工作,是目前所有处理方法无法替代的。在处理方法上如何绕过线性滤波范畴和克服常规叠加中非同相叠加因素的影响,是进一步提高地震资料的信噪比、实现高分辨率勘探目标的关键环节。

**主题词** 高分辨率地震 地震数据采集 地震数据处理 分辨率 信噪比

## ABSTRACT

Wang Jinhai and Zhu Min. High-resolution data processing and high signal/noise ratio data. *OGP*, 1996, 31(4): 587~596

There are many methods for raising the resolution of seismic data, such as spectrum whitening, extrapolated spectrum, wavelet transform, and so on. In any method, seismic resolution essentially depends on signal/noise ratio of raw seismic data, but has something to do with the processing methods we use. High-resolution seismic exploration involves good data acquisition, advanced data processing and so on, of which good data acquisition is the most important. In the data processing, both avoiding the use of linear filtering technique and eliminating the influence due to outphase stacking are necessary to improving the signal/noise ratio of seismic data and to achieving high-resolution seismic exploration.

**Subject heading:** high-resolution seismic exploration, seismic data acquisition, seismic data processing, resolution, signal/noise ratio

## 分辨率与信噪比

地震资料的分辨率通常指地震剖面(或记录)反映地层的细分程度。它的度量方法有时间域、频率域的和以能量观点出发的各种度量方法。一般认为,地震资料的分辨率与资料的频带

\* Wang Jinhai, Chengdu Computer Center, Geology Survey Division, Sichuan Petroleum Administration, Postcode: 610212

本文于1995年11月2日收到。

宽度(主频带)成正比,即有效波的主频带越宽则分辨率越高。这里所说的主频带概念,是指具有相同(或相当)能量级别的有效波频率成分的集合;所说的分辨率是个可视性概念,因为只有有效波的频率成分具有一定的能量才能进入主频带,才能在剖面(或记录)上看到它的存在。

关于地震资料的信噪比(S/N)通常指有效波的纯度。其度量方法,从宏观上是看剖面(或记录)的 S/N。但我们强调的是从微观上的度量。图 1 是某测线剖面段的分频扫描图,通过用 S/N 量板比较,可测得不同频段的 S/N,从而可获得一个 S/N 谱(图 2)。

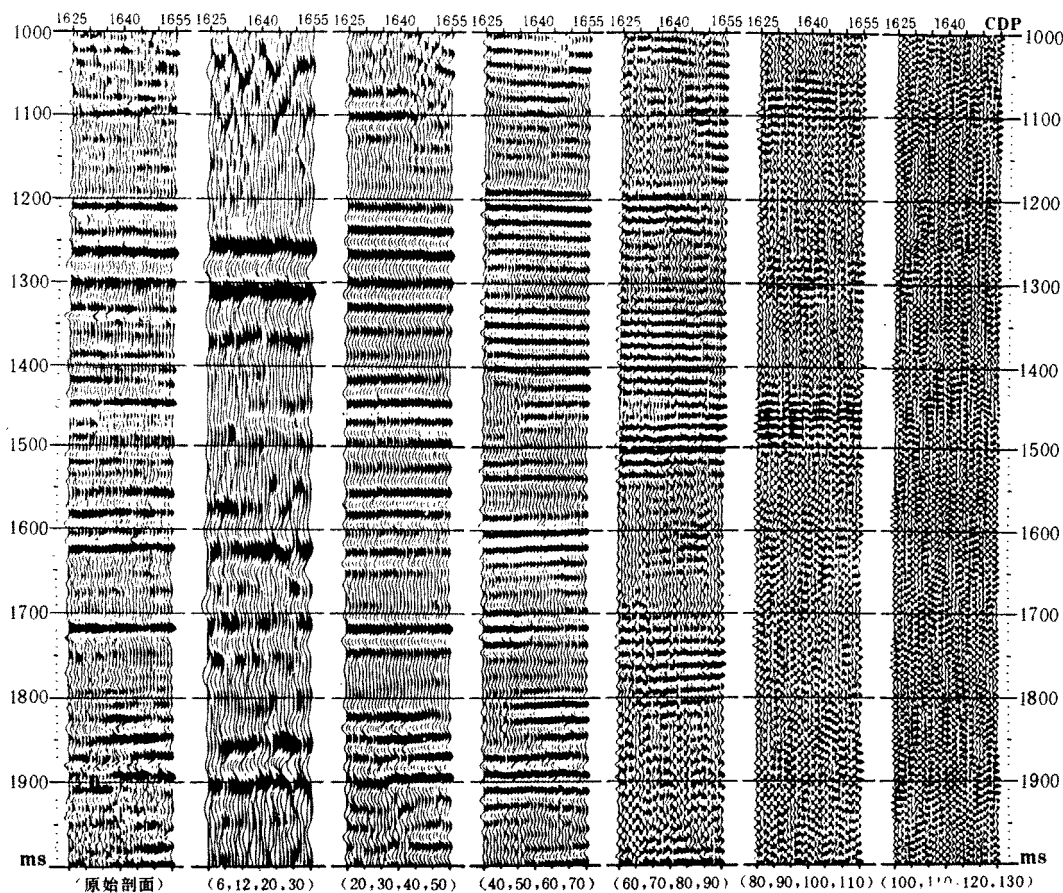


图 1 某测线剖面段的分频扫描图

图中,除原始剖面外,其余为分频扫描剖面,扫描频率单位为 Hz

从以上概念出发,结合解释目标的要求,对分辨率与 S/N 的关系有以下几点认识:

- (1)不同的解释目标需要不同的 S/N 资料<sup>[1]</sup>。这样,根据解释目标的要求,也就确定了对该资料的 S/N 要求,再据资料的 S/N 分布即可确定其有效频带。
- (2)把解释目标所要求的 S/N 范围内的有效频带变为主频带,即通常的提高资料分辨率的处理过程。所以说,S/N 已定,则资料的分辨率也就确定了,即由资料的 S/N 分布可确定资料的分辨率的高低。可见,分辨率问题也可转化为 S/N 问题。
- (3)到目前为止,还没有人知道有效波的高频信息到底有多高,即 S/N 等于零的地方在哪里?从物质可无限分割的观点出发,我们相信,地震信号在传播过程中是不断衰减的,即从大到

小,一般不会从有到无,包括信号的各种频率成分,除非陷波作用的存在。因此,有效波的频带是很宽的,只是S/N不同罢了。

(4)由解释目标确定所需资料的S/N,由资料的S/N分布确定资料的分辨率。而该资料本身的分辨率能否完成该解释目标(地质任务)的要求,这就是该资料的质量问题。所以说,决定资料质量的关键因素是资料原始的S/N。

### 资料原始的S/N制约 资料分辨率的提高

目前,从不同的角度相继提出了不少提高资料分辨率的好方法,这些方法各有其特色和优点。然而,在实际应用中,人们总是企图再向高频端扩展,其结果总是不能令人满意。分析其原因,都是受资料原始S/N的制约。可见,只有存在最佳的S/N区间,才有最佳的处理结果。

#### 谱白化

通常提高分辨率的方法是使地震资料频谱中的最佳S/N区间与最大分辨率相匹配,即把解释目标所确定的S/N区间内的频带变为主频带。一般谱白化的方法就是用的上述原理,所以该方法受资料S/N的制约是比较容易理解的。

谱白化方法和去噪可通过迭代进行处理<sup>[2]</sup>,当要求分辨率太高时,记录要失真,这与S/N有关,也与当前的去噪能力有关。

#### 外推展谱法

利用资料低频段的较高S/N区间内的信息特征,推断较高频段的有效频率成分,是一种新颖的提高分辨率的好方法。它和通常的谱白化方法相比,在相同频带下,其剖面的S/N较高。若继续向高频端推进,则效果不好。

图3为不同频带外推法剖面,从中可以看到,当分辨率不断提高时,强的反射层或S/N高的反射层,分辨率可以提得很高,且波组特征清晰,一些薄层也能分辨出来,如1270ms左右的强反射。当主频为180Hz时,主瓣宽只有3ms,这时大安寨底部(大三底部)8m厚的石灰岩也已经被分辨出来了。而一些弱的反射,即S/N较低的区域则畸变严重或噪声增强,如1100~1200ms之间的区域是低S/N区;当主频为110Hz时,上部还可以看到一些比较连续的同相轴。为什么当主频提到140或180Hz时,反而在1100~1200ms之间看不到比较连续的同相轴呢?这是因为高频端的S/N越来越低,高频端所代表的薄层、弱层反射信息在低频端的特征也越来越不明显。可见,此法还是受资料原始S/N的制约。

#### 小波变换法

我们可以把这种实现高分辨处理的过程‘分解’为两步。首先,利用小波变换实现对资料的“子波分解”,然后,对各子波实施反动校拉伸变换,从而压缩子波,实现资料的高分辨处理。

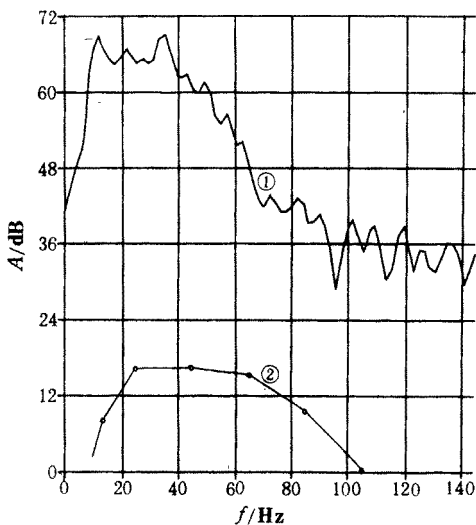


图2 1600ms反射记录的S/N谱

图中:①为振幅谱曲线;②为S/N谱曲线



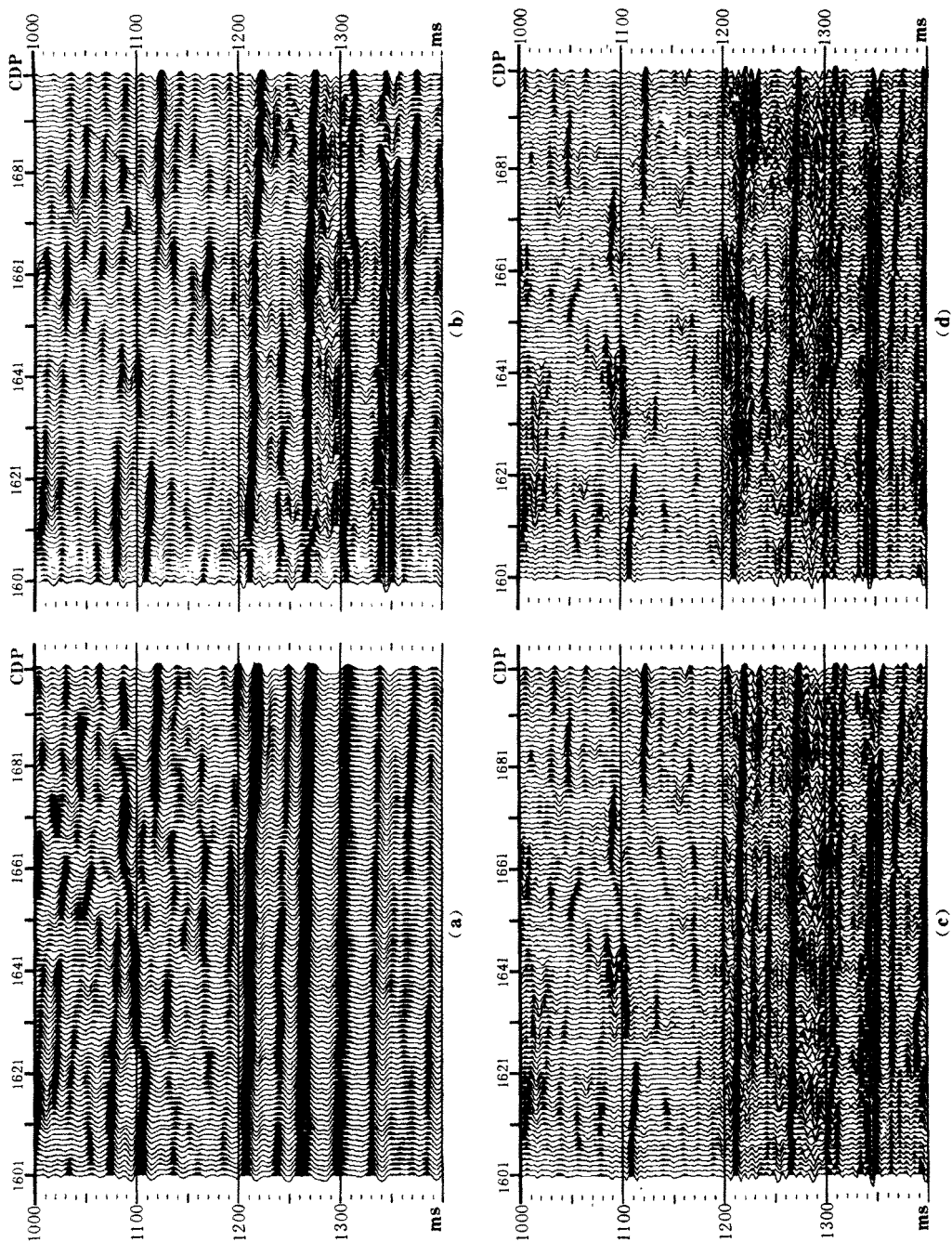


图 3 不同频带外推法剖面  
图中:(a)原始剖面;(b) $f=110\text{Hz}$ ;(c) $f=140\text{Hz}$ ;(d) $f=180\text{Hz}$

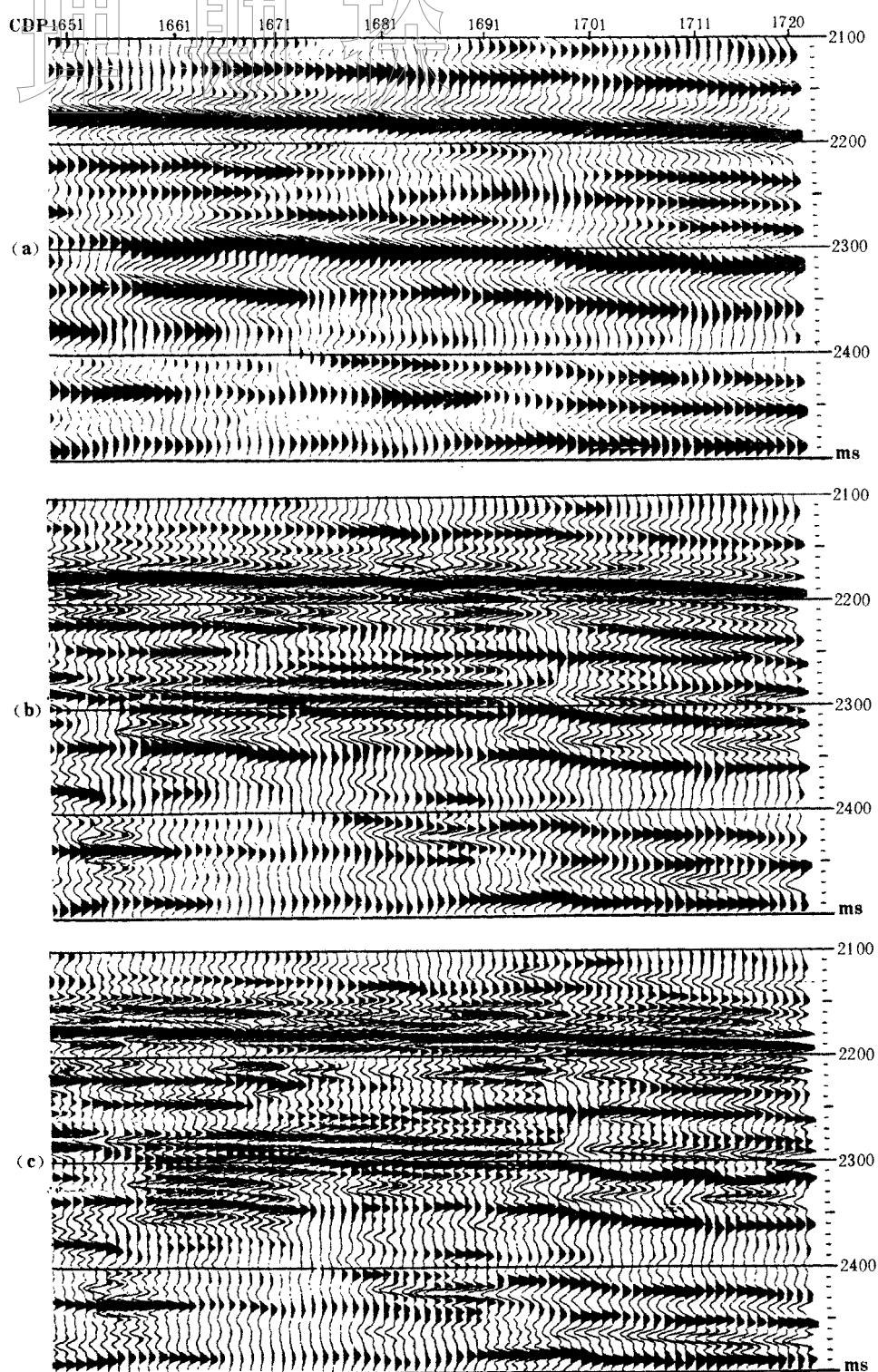


图 4 不同频带的小波变换剖面

图中:(a)原始剖面;(b) $f=80\text{Hz}$ ;(c) $f=100\text{Hz}$

该方法可以对子波实施无限的压缩,使剖面上的主要目的层分辨率相当高,使整个剖面的视觉效果很好。但是,这并不能说明小波变换的结果一定能使所有的薄层、弱层的分辨率都很高。

图 4 为小波变换高分辨率处理剖面,以图中 1720 道、2200ms 处强同相轴为中心的波组为例,当分辨率提到 80Hz 时,该同相轴上下波组特征明显比原叠加剖面清晰,主要强层,如 2150ms,2200ms 及 2240ms 处的强层波形主瓣变窄,连续性更好,强层之间的复波带都增加了两个较弱的同相轴,连续性也较好,且平行于强层。它们可能是弱层或薄层的反映,也许是上下强同相轴的旁瓣叠合的结果。当分辨率增加到 100Hz 时,2150~2200ms 波组特征更清晰了,但 2200~2240ms 波组则出现了畸变,其它部位也有畸变现象,而这些畸变部位,都是在原剖面上比较弱的复波带中。同时,还发现,在一些弱的复波带中分辨率提高了还是看不到较连续的薄层反射,而 S/N 较高的强层反射,随着分辨率的提高,波形压缩变窄,特征更为清楚。

S/N 与反射层的强弱有关,反射越弱,S/N 就越低,弱的薄层反射信息就会淹没在小波变换分离子波的误差中。可见,该方法中制约分辨率的因素还是资料原始的 S/N。

## 常规资料处理会降低资料分辨率

地震勘探经历过从单次到多次覆盖的转变时期。在多次覆盖初期,野外施工的严格程度有明显地下降,好像多次覆盖技术是专为野外放宽质量尺度而设计的。随着多次覆盖资料处理手段的不断完善和加强,对野外施工的要求也越来越宽,以致于使野外采集质量于 1988 年降到了最低点。这完全是一种误解,至今还有少数同志,一旦野外没有采集好,就把希望寄托在资料处理上。殊不知室内的资料处理是不会对野外采集质量有所帮助的。相反,我们在考察了全部资料处理过程以后认为,常规的资料处理过程实际上是一个降低野外资料分辨率的过程。

理论分析认为,多次覆盖资料经过叠加,其背景噪声降低了  $\sqrt{N}$  倍( $N$  为覆盖次数),即使得叠加资料比单炮记录的 S/N 提高了  $\sqrt{N}$  倍。这是一个理论上的极限值,也是人们对资料处理的期望值,能否达到取决于资料处理技术的进步和处理员的水平。

动校正、静校正、叠加和偏移是通常资料处理中的四个主要环节。实践证明,动、静校正误差经叠加会使资料的分辨率大大降低<sup>[3]</sup>。因此,处理人员的选择是,努力作好动、静校正,在动、静迭代分析中力求有一个合理的速度和正确的静校正值,以便实现正确的同相叠加,尽量少降低原始资料的分辨率。

然而,目前常规叠加的先天不足很多(如动校拉伸、AVO 现象、非双曲现象等),使得叠加总是达不到真正的同相叠加。

偏移处理是第二次叠加,同样是一个降低分辨率的过程。当前所有偏移方法中,均要求建立正确的速度模型,其次是偏移方法本身的精度。只有当我们把这些影响成像的因素解决了,我们才能最大限度地获得一个少降低分辨率的偏移剖面。

## 传统去噪方法的弱点

可以想像,若没有噪声地震勘探就会变得极其简单。因此,地震资料处理中,大多数程序设



计时都要考虑噪声问题。

为了进一步提高资料的  $S/N$ , 人们自然地想到了去噪问题。确实, 目前已经从各种处理角度设计出了许许多多的针对不同噪声的去噪程序, 而且在实际生产中也起到了一定的促进作用。

如何评价这些程序, 李庆忠院士提出了一个重要命题, 即“地震资料本身没有获得的分辨率, 不可能通过高明的数学方法来获得”<sup>[4]</sup>, 这是很值得我们思考的一个问题。

不管怎么讲, 就目前传统的去噪方法而论, 我们认为有以下致命弱点。

(1) 以信号定义噪声。不少去噪程序的前提条件标示, 信号是相干的, 噪声是不相干的, 把二者对立起来, 一旦它们有连系该方法就不适用了。

(2) 没有脱线性滤波的范畴。目前, 大多数去噪程序都有混波效应, 可视为相干程序。这是没有脱线性滤波范畴的有力证据。

滤波的本质是一个能量的再分配问题<sup>[5]</sup>。我们之所以一定要滤波, 是因为地层横向上有稳定性, 相干的方法无损于它, 相反能加强有效信号。但相干的方法有损于脉冲, 脉冲经滤波面目全非, 其能量都附着在(或隐藏于)同相轴中。所以, 有效信号分辨率降低, 保真度降低, 这就是滤波的代价。

因此, 加强新思路下的去噪方法研究很重要。看是否能通过“高明的数学方法”把资料的  $S/N$  再提高一步。

野外资料采集的潜力

以上分析说明, 对整个地震勘探来讲, 野外采集时的资料质量是决定性的。室内的资料处理及其采用的各种处理模块, 从某种意义上讲, 都还没有能使其超脱资料原始的  $S/N$ 。

在目前还没有更高明的手段的情况下, 回过头来研究一下采集上的潜力, 我们认为是十分必要的。

图 5~图 7 为同一地段不同时期采集的资料, 是用同一处理流程和参数处理的剖面。四张剖面的采集参数见表 1。

表 1 图 5~图 7 的野外采集参数

图 号	图 5	图 6a,b	图 7
测线号	D8718	GS1-2	GS1-B4
地震仪器	OPSEIS	DFS- V	DFS- V
每炮道数	120	56	56
炮点位置	中点	端点	端点
道距/m	30	20	30
覆盖次数	6	14	15
采样率/ms	2	1	1
平均药量/kg	>2	2	2
平均井深/m	15	20	20
检波器主频 $f_0$ /Hz	12	28	28
生产性质	批生产	试生产	试验点
生产年月	1987	1990. 2	1990. 11

图 5~图 6 的采集参数不同(表 1),这无疑是采集技术上的一个巨大进步,它是四川地区地震勘探认识上的一次飞跃的结果。图 5 代表了 1989 年以前的认识水平,图 6 代表了 90 年代的认识结果。

图 6a、6b 和图 7 说明什么呢?剖面的质量差异是明显的,图 7 明显地比图 6a、6b 的干扰背景小,因此,S/N 分布也大不相同(图 8),相同 S/N 下的频带宽度也不同。当 S/N 等于 1 时,

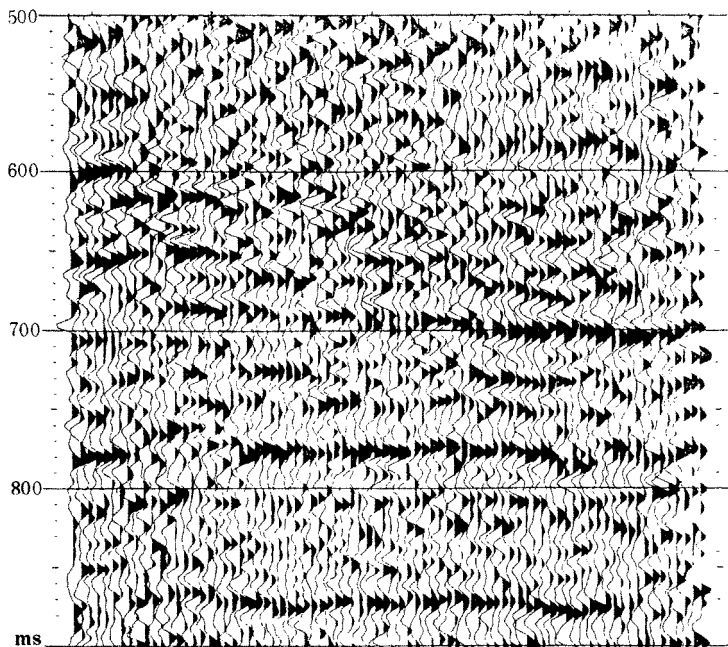


图 5 1987 年采集、现在处理的剖面(与图 6a 为同一地段)

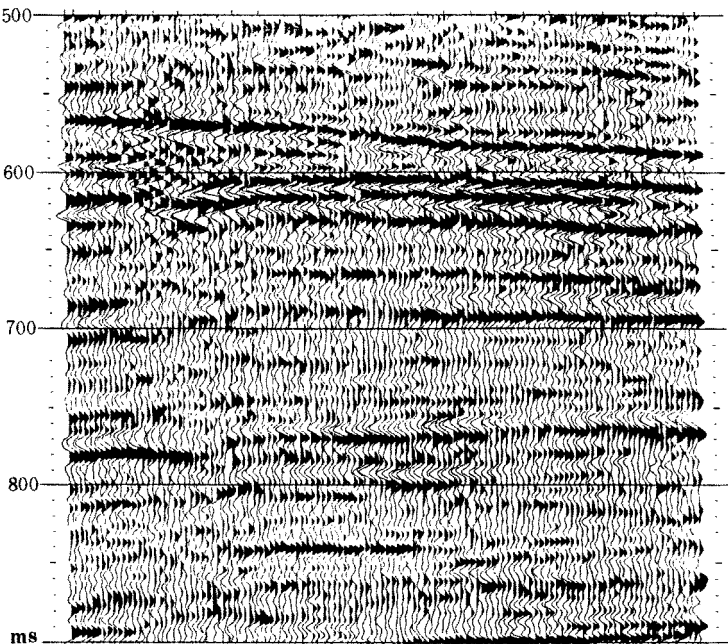


图 6a 1990 年采集、现在处理的剖面(与图 5 为同一地段)



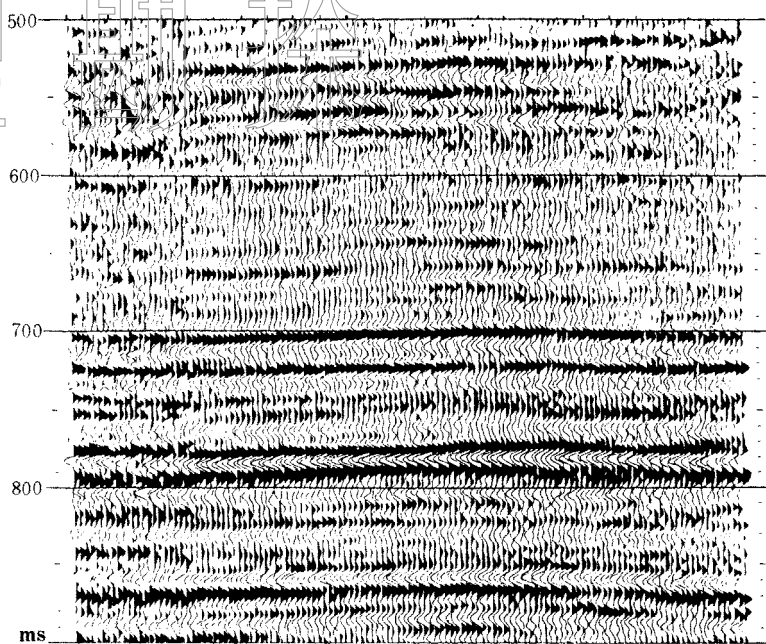


图 6b 1990 年采集、现在处理的剖面(与图 7 为同一地段)

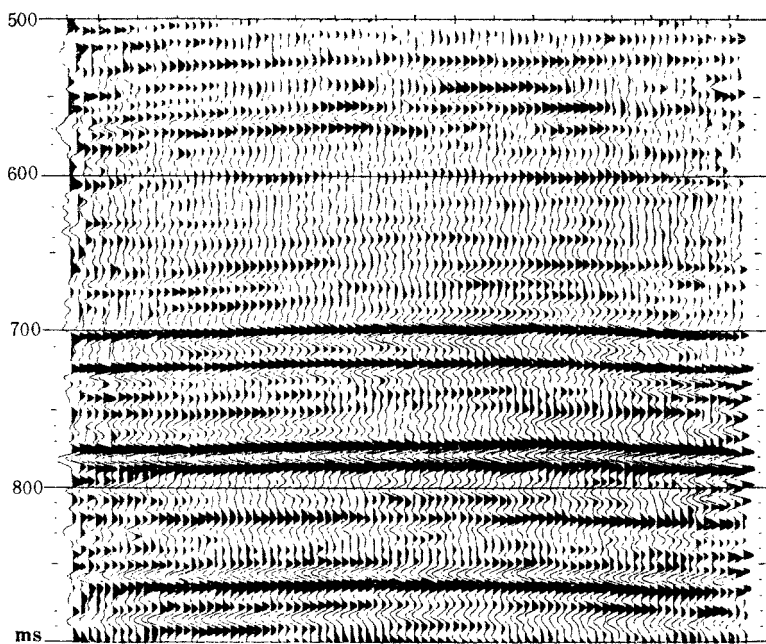


图 7 1990 年采集的点上试验段剖面(与图 6b 为同一地段)

图 7 的频带可达到 160Hz 以上,而图 6 则小于 120Hz。

我们仅从表 1 的采集参数上看不到图 6 和图 7 在施工上的差别。要害在于图 7 为点上的试验段(笔者曾亲临试验现场),为摆好这一段排列,所有检波点都作了精心地挖坑,埋置得相当稳固,且对位置进行了优选。所有炮井深度均在 20m 以上,且充满了水。放炮时全队职工在

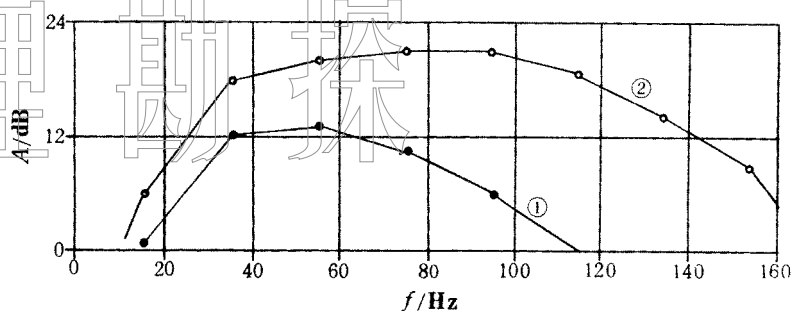


图8 图6、图7于700ms处的S/N谱

图中:①图6的S/N谱曲线;②图7的S/N谱曲线

排列上戒严,其生产环境优于图6。

因此,我们认为图7质量好的主要原因在于发挥了人的主观能动性,创造了宁静的施工环境。这里所说的环境包括埋置条件、激发条件、人文条件等近地表条件。这一条很重要,它降低了记录的高频背景噪声,提高了记录高频端的S/N。这个提高量是当前所有去噪程序所无法实现的,即使你用再先进的手段也无法用图6的资料处理出图7的效果来,更不可能用图5的资料处理出图7来。

可见,处理手段再先进,也代替不了野外采集上的有效措施。采集上的每一点进步,采集质量的每一点提高是何等的重要啊!

## 结 束 语

高分辨率地震勘探是一个系统工程,需要在采集和处理方法等各方面进行不懈的努力,才能实现分辨率的不断提高。就目前的状况来看,野外采集是最基础性的工作,采集上的每一点进步和提高是极其重要的,是目前所有处理方法所无法替代的。

在处理方法上,如何绕过线性滤波范畴,加强新思路下的去噪方法研究,诸如文献5中所提到的检测剔除法等,也可以进一步提高资料S/N,从而利用一切提高分辨率的方法,扩展频带提高资料的分辨率。

资料处理在于手段的不断提高,克服目前常规叠加中的非双曲性以及动静校正误差等因素影响,使之达到真正的同相叠加,从而最大限度地实现野外采集资料所应有的分辨率。

## 参 考 文 献

- 1 李庆忠. 关于低S/N地震资料的基本概念和质量改进方向. 石油地球物理勘探, 1986, 21(4): 243~364
- 2 王进海. 一种地震资料高分辨率处理流程. 石油物探, 1993, 32(1): 82~92
- 3 李庆忠. 作好波阻抗反演的几个难点及今后的改进方向, 《石油物探信息》报, 1992年12月15日
- 4 李庆忠. 我国石油地球物理勘探今后的发展方向. 石油地球物理勘探, 1993, 28(2): 241~247
- 5 田树仁, 李庆忠. 一维空间域噪声剔除法及应用. 石油地球物理勘探, 1991, 26(2): 239~253