

数据驱动的采集脚印量化分析

蔡希玲* 李东升 杨兆斌 王梅生 夏建军

(东方地球物理公司研究院,河北涿州 072750)

蔡希玲,李东升,杨兆斌,王梅生,夏建军. 数据驱动的采集脚印量化分析. 石油地球物理勘探,2014,49(2):230-235.

摘要 针对三维束线观测系统的特点,提出了实际数据驱动的面元属性量化分析方法,在实际的 CMP 道集数据上统计时空变的覆盖次数图及炮检距分布的均匀性。针对 BGP 海外 A 区块三维地震数据的特点,采用量化方式研究了观测系统中的脚印现象及其在叠加剖面中的表现,表明采集脚印图像与理论分析、模型正演相吻合;面元属性的空间变化对地震数据的成像效果具有十分明显的影响。认识采集脚印的分布规律可以有针对性地选择试验参数,优化处理流程,改善成像品质。

关键词 采集脚印 面元属性 量化分析 覆盖次数 炮检距分布 均匀度

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

采集脚印在三维原始地震记录中普遍存在,它是束线三维地震观测系统的固有属性。采集脚印是指在三维地震数据采集过程中,由于炮点和接收点在地面上布设为较规则的几何图形造成的叠加或偏移后地震波属性(振幅、频率等)在时间和深度切片上呈现出一种周期性的现象,其实质是由于观测系统模板以及排列片的滚动方式导致 CMP 面元内覆盖次数、炮检距、方位角等分布的不均匀性,并呈周期性变化,从而使得叠加或偏移后的地震波属性在空间上出现相应的周期性。

关于采集脚印的形成机理及分布规律,学者们从不同的角度进行了相应的研究。Hill 等^[1]分析了采集脚印与叠加次数的关系;Marfurt^[2]、Gerard 等^[3]、Milos 等^[4]研究脚印在属性图上的出现规律,提出了脚印压制方法;熊金良等^[5]通过物理模拟和理论计算认识采集脚印的特征,针对模型进行不同方式的三维观测系统模拟,对脚印现象进行定性和定量分析,确定观测系统属性与脚印的关系;碗学俭等^[6,7]提出了三维观测系统脚印的量化分析方法。

削弱采集脚印的方法研究集中在两个方面^[8~11]:

一是在采集中通过优化观测系统设计,合理设计模板和滚动方式,使 CMP 面元内的属性分布尽可能均匀;二是在室内处理中针对观测系统的特点和地震波场的变化规律,采取相应措施,如在叠前采用面元均化和数据规则化等方法减小面元间的属性差异,在叠后使用 $f-k_x-k_y$ 域滤波、SVD 分解等方法,在一定程度上减弱脚印的影响^[12,13]。

本文以海外 A 区块实际数据为例,讨论观测系统造成的采集脚印问题。在实际三维数据体上采用数据驱动的方式量化分析三维观测系统中的脚印现象,以便清晰地观察到与理论分析、模型正演相吻合的采集脚印图像,有助于数据处理人员正确认识脚印现象及其影响,为有效压制采集脚印提供较准确的信息。

2 实例分析

表 1 为 BGP 于 2010 年 6 月海外 A 区块采集的三维观测系统参数。炮线与接收线正交,每次滚动 1 条接收线距。图 1 为局部放大后的炮/检位置图,炮点与接收点不重叠,检波线错开 $\frac{1}{2}$ 个道距,炮线错开 $\frac{1}{2}$ 炮点距,为 CMP 面元细分提供了条件。标准

* 河北省涿州市东方地球物理公司研究院,072751。Email:cxlgs@263.net

本文于 2012 年 12 月 3 日收到,最终修改稿于 2014 年 1 月 5 日收到。

面元为 $25\text{m} \times 25\text{m}$, 可细分为 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ 。在数据处理中采用标准面元, 即网格为 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 。图 2 为水平叠加数据在 300ms 处的振幅切片, 切片上周期性出现图像是采集脚印的体现。对于图 1 所示的观测系统, 采用标准面元处理, 在叠加数据的浅层切片上, 存在着明显的采集脚印现象。

表 1 图 1 观测系统参数

观测系统	12 线 \times 128 道
排列滚动方式	一次移动一个排列
覆盖次数	48
接收点距/m	50
炮点距/m	50
炮线距/m	400
接收线距/m	300
炮数/ km^2	52
标准面元尺寸/m	25×25

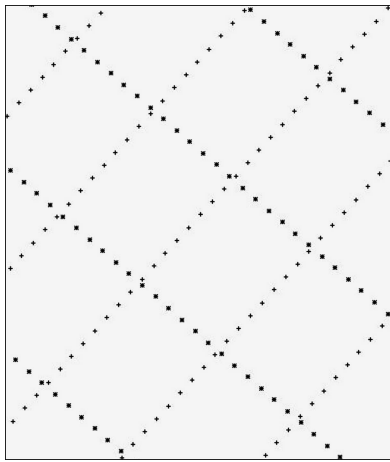
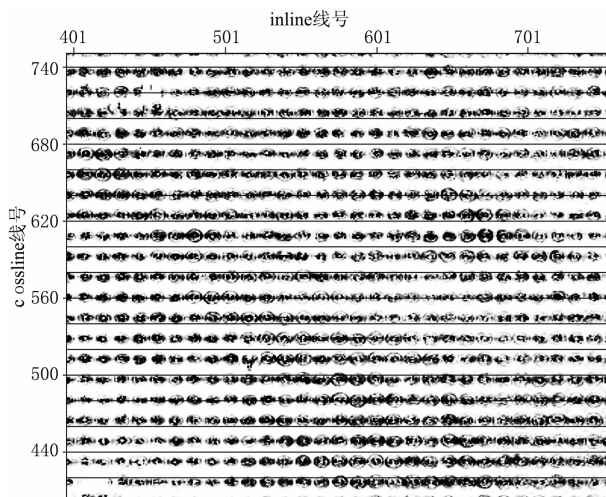


图 1 炮检位置局部放大图

图中 * 为炮点位置, \times 为接收点位置

图 2 水平叠加 300ms 处的振幅切片

3 数据驱动的面元属性量化分析技术

鉴于图 2 中明显的采集脚印现象, 有必要对实际三维数据的 CMP 面元属性进行量化分析。借鉴钱荣钧^[14]、蔡希玲等^[15]、王梅生等^[16]的研究思路, 探讨面元属性在空间分布的连续性和均匀性, 分析三维观测系统中脚印图像, 明确其对地震成像数据的影响。

3.1 数据驱动的面元内覆盖次数统计分析

CMP 面元网格尺寸和覆盖次数是观测系统设计两个重要参数, 在室内处理中一般按照采集设计的 CMP 面元网格尺寸进行处理, 输出成像数据。由于实际采集过程中各种因素造成 CMP 面元内的实际覆盖次数与设计覆盖次数不一致, 因此实时统计道集内真实的覆盖次数很有必要。

在每一个 CMP 道集内考虑切除区内有效道数的变化, 计算出每一个时间点上的有效道数(即非零道数), 统计出该时间上的记录道数, 称为有效覆盖次数。沿时间方向逐点统计, 可得到该 CMP 的时变有效覆盖次数, 进而得出全区 CMP 的覆盖次数分布图。

图 3a 为一条二维测线叠加剖面, 设计覆盖次数为 40 次; 图 3b 为与图 3a 对应的逐一统计 CMP 得到的覆盖次数图。图 3b 展示了与叠加剖面相对应的时间—空间上真实的覆盖次数。说明在浅层切除区内, 有效覆盖次数除了与观测系统有关外, 还与切除参数有关, 是逐渐变化的。在满覆盖后的非切除区(1200ms 以下), 基本上可以达到设计的覆盖次数, 但沿测线方向, 覆盖次数略有变化。

3.2 数据驱动的炮检距分布均匀性统计分析

在三维采集观测系统设计中, 通常追求面元内炮检距分布的均匀性。当最大、最小炮检距、面元尺寸和总的覆盖次数确定后, 炮检距分布主要受接收线距、接收线数、炮点数和炮线数的控制^[17,18]。一个面元内炮检距分布的均匀性可由式(1)计算, 即

$$P(b_i) = \sqrt{\frac{1}{F} \sum_{n=1}^F \left\{ \frac{\alpha(n) \left[x_n - \frac{x_{\max}}{F}(n-1) \right]^2}{\frac{x_{\max}}{F}} \right\}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{(n-1)x_{\max}}{F} < x_n \leq \frac{nx_{\max}}{F} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中： $P(b_i)$ 为某一面元的炮检距分布变化系数； F 为覆盖次数； x_n 为面元内第 n 个炮检距； x_{\max} 为面元内的最大炮检距； $\alpha(n)$ 为第 n 个炮检距的加权系数。一般情况下，权系数 $\alpha(n)$ 取常数。 P 值越小，炮检距分布越均匀。在细分面元的数据中选择3个CMP面元，统计面元内炮检距分布的均匀度。

图4下是三个不同位置的CMP道集，图4上为图4下对应的炮检距变化情况，以线性比例显示。由图4下可以看出，道集间炮检距的分布差异较大，计算的面元内炮检距的变化系数分别为：0.53, 0.64, 0.90。可见式(1)能够较好地反映CMP面元内炮检距的分布状态。

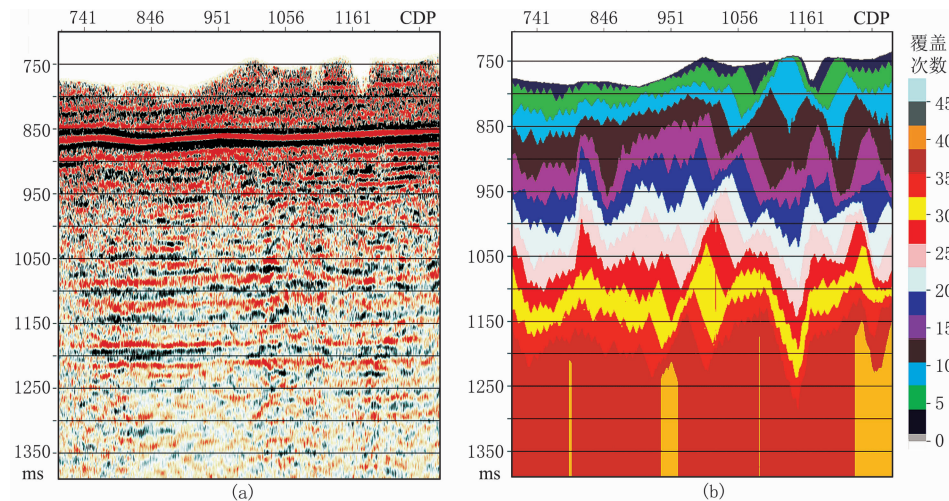


图3 叠加剖面(a)及对应的覆盖次数图(b)

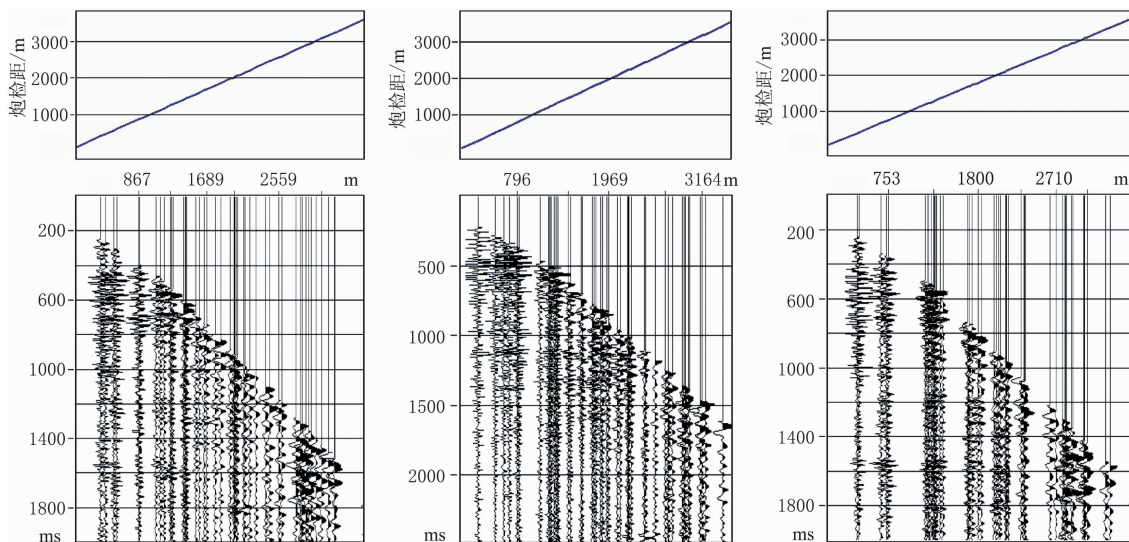


图4 不同位置的CMP道集

面元内炮检距的变化系数从左至右分别为：0.53, 0.64, 0.90

4 面元属性与采集脚印的关系

图1、图2展示了试验区块的细分面元观测系统及其数据中的脚印现象，采集脚印所呈现出的规律是面元属性在空间的有序变化，在数据处理中的网格固定后(面元尺寸为 $25\text{m} \times 25\text{m}$)，量化分析这

种观测系统的数据脚印现象与面元属性的关系。

处理中采用了标准面元($25\text{m} \times 25\text{m}$)的网格划分。图5是叠加数据在300, 500, 700, 1000ms 振幅切片的局部放大，在浅层振幅切片上(300ms)呈现出周期性的几何图像，是典型的脚印现象。随着 T_0 时间的增大，有效覆盖次数的提高，覆盖次数逐渐均匀，脚印影响随之减弱(如700ms和1000ms)。脚

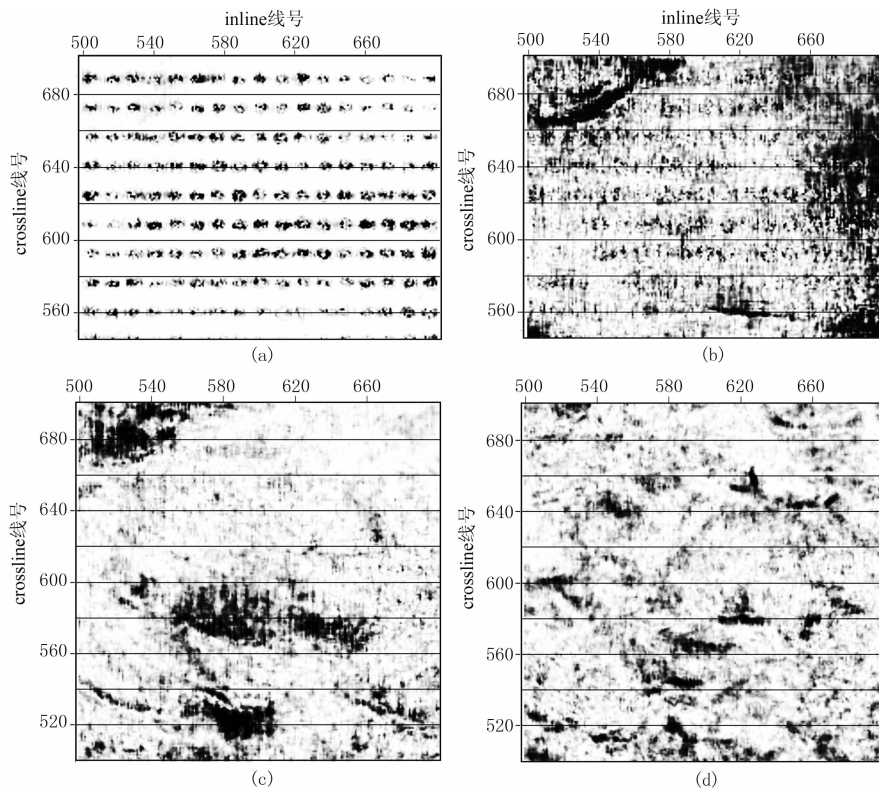


图 5 不同时间的振幅切片

(a)300ms; (b)500ms; (c)700ms; (d)1000ms

印图像有如下规律:

- (1)在横向上,以滚动的束线距为周期;
- (2)在纵向上,以纵向滚动的炮线距为周期。

选择纵向和横向两条 CMP 线、各取 100 道剖面元属性。图 6 为横测线的叠加剖面、覆盖次数图及炮检距分布均匀性曲线。由图可以看出,在 CMP566 附近炮点略有偏离,但对整体均匀性分布特性几乎没有影响。除此之外,炮检距的分布均匀性曲线呈规律性变化。图 7 为纵测线的叠加剖面、覆盖次数图及炮检距分布均匀性曲线。

显然,在选择不同方向的 CMP 线上,覆盖次数和炮检距分布的均匀性有一定的差异,故采集脚印的强度不同。利用式(1)计算出的炮检距分布变化系数 $P(b_i)$,反映了面元内炮检距分布的均匀程度。 $P(b_i)$ 值越小,炮检距分布越均匀;否则表明面元内的炮检距分布越不均匀。对于不同地表条件下不同的观测方式,实际炮点位置和检波点位置与设计的位置会出现偏离,采用式(1)计算出的炮检距变化系数 $P(b_i)$ 值则表现出相应的变化。

对应图 1 所示的观测系统,由实际数据驱动的面元内炮检距分布均匀度如图 6、图 7 中的曲线所

示。图 6 中炮检距分布的变化系数(在 0.59~0.67 之间)整体上小于图 7 中的炮检距变化系数(在 0.65~0.69 之间),所以叠加剖面上的脚印现象影响较弱,即炮检距分布的变化系数值越小,表明 CMP 面元内的炮检距分布越均匀,对成像效果的影响越小。

由于横向和纵向面元属性分布呈周期变化,在水平切片上的振幅也呈现出横向和纵向条带状异常现象。在空间上面元内炮检距分布均匀性的周期性变化是采集脚印出现的主要原因,其周期性与上面描述的规律相吻合。

在实际地震资料处理过程中,我们通过数据驱动的面元属性分析,认识到三维资料中采集脚印出现的规律性和影响程度,便可以采取相应措施削弱采集脚印的影响。削弱采集脚印的室内处理方法主要分为两类:一类是进行叠前面元均化、五维道内插(三维空间坐标和炮检距、方位角方向)、数据规则化等减小面元间的属性差异,达到弱化采集脚印的目的;另一类是在叠后或偏移后的数据上根据脚印呈现出的规律性,设计空间域滤波器,如使用 $f-k_x-k_y$ 域滤波、频率切片自适应滤波、SVD 分解等方法,在一定程度上减弱脚印的影响,改善成像品质。

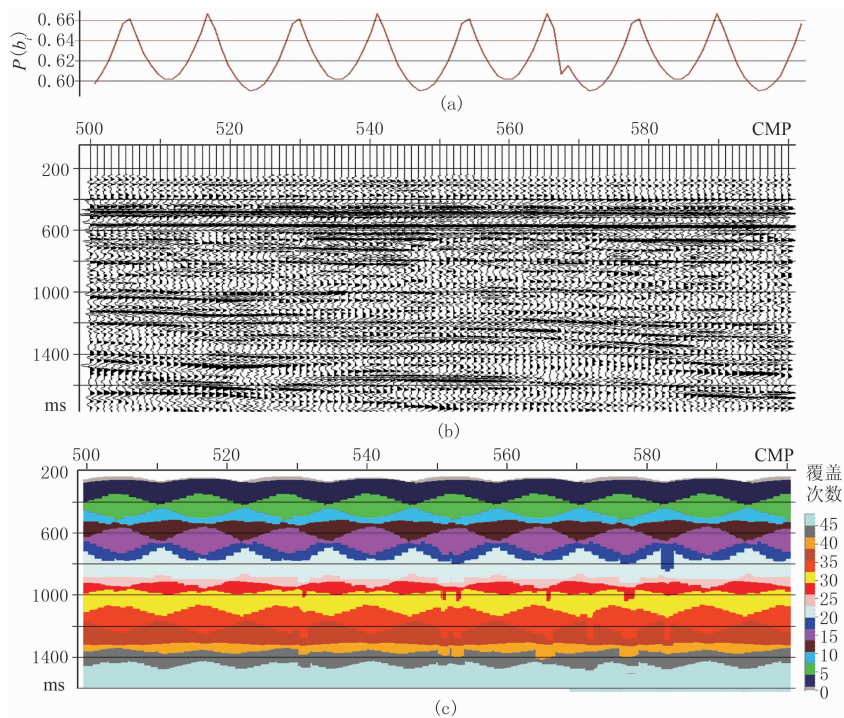


图6 横向面元内炮检距分布变化系数曲线(a)、叠加剖面(b)及有效覆盖次数图(c)

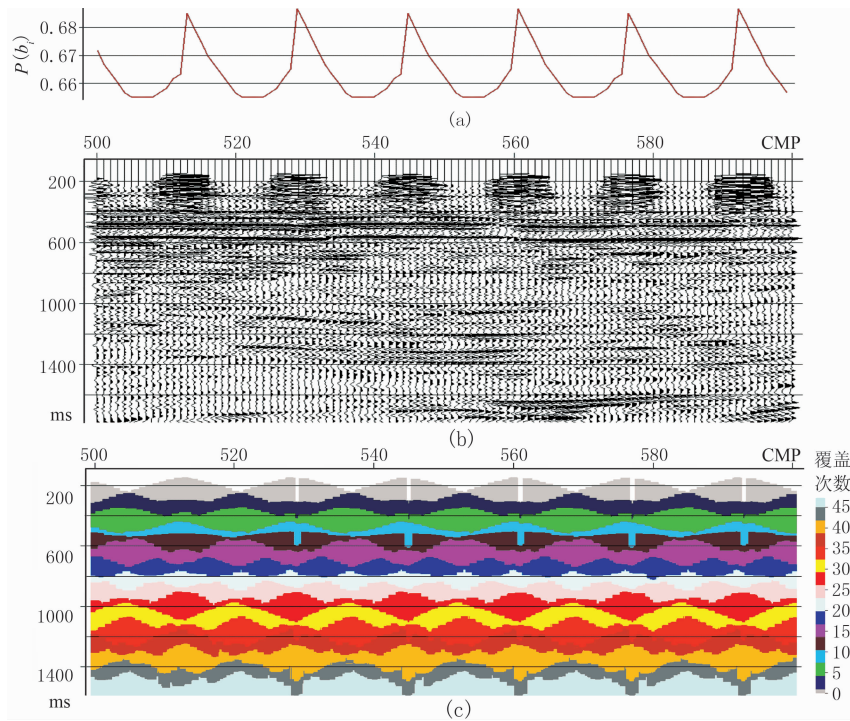


图7 纵向面元内炮检距分布变化系数曲线(a)、叠加剖面(b)及有效覆盖次数图(c)

5 主要认识

(1)采集脚印出现的周期性与面元属性的周期性完全一致,两者反映了采集脚印的空间规律,即炮

检距的均匀度和覆盖次数分布决定了叠加剖面的脚印分布情况,面元内炮检距分布的不均匀是导致成像数据中出现脚印的主要原因,覆盖次数在空间的变化加剧了采集脚印对成像效果的影响。因此,进行炮检距分布的均匀性度量是认识成像数据中采集

脚印分布特征及其影响的有效方法。

(2)量化的面元属性值(均匀性和覆盖次数)在空间上的离散变化反映了采集脚印的严重程度,即其值在空间上的变化越大,离散度越大,采集脚印越严重。

(3)基于 CMP 道集的实际数据驱动的覆盖次数统计方法,考虑了采集时空道、变观的影响和室内处理中切除(内切、外切)的变化,统计的覆盖次数与叠加剖面上样点值一一对应,能够真实地反映面元内的有效叠加次数,有助于处理人员分析数据中的各种现象。此外,不同类型的观测系统引起的面元内覆盖次数的差异及其在空间的分布规律(时变性和空变性),可以通过覆盖次数统计图件体现出来,便于采集人员进行针对目的层的观测系统优化设计。

参 考 文 献

- [1] Hill S, Shulta M and Brewer J B. Acquisition footprint and fold-of-stack plots. *The Leading Edge*, 1999, 18(6):688-695.
- [2] Marfurt K J. Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping. *Geophysics*, 1998, 63(3):1024-1035.
- [3] Gerard T S et al. Seismic array theorem and rapid calculation of acquisition footprint noise. *Geophysics*, 2001, 66(6):1843-1849.
- [4] Milos C, Scott F, Marfurt K J. 2D stationary wavelet transform based acquisition footprint suppression. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26:2590-2593.
- [5] 熊金良,狄帮让,岳英等.基于地震物理模拟的“采集脚印”分析. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(5):493-497.
Xiong Jingliang, Di Bangrang, Yue Ying et al. Analysis of acquisition footprints based on seismic physical simulation. *OGP*, 2006, 41(5):493-497.
- [6] 碗学俭,王广智,杨波等.影响观测系统采集脚印的因素分析. *中国石油勘探*, 2009, 14(6):60~64.
Wan Xuejian, Wang Guangzhi, Yang Bo et al. Analysis on factors affecting acquisition footprint of geometry. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(6):60-64.
- [7] 碗学俭,杨波,孙德福等.三维观测系统采集脚印定量分析技术. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(3):357-363.
Wan Xuejian, Yang Bo, Sun Defu et al. Quantitative analysis of 3-D geometry footprint. *OGP*, 2011, 46(3):357-363.
- [8] 董世泰,刘雯林,乐金.压制三维地震数据“采集脚印”的方法研究. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(1):7-10.
Dong Shitai, Liu Wenlin and Yue Jin. Approach of suppressing acquisition footprint of 3-D seismic data. *OGP*, 2007, 42(1):7-10.
- [9] 王彦仓,叶秋焱,张树森等.地震勘探中的“采集脚印”问题. *物探与化探*, 2011, 35(5):652-657.
Wang Yancang, Ye Qiuyan, Zhang Shusen et al. A tentative discussion on “acquisition footprint” in seismic exploration. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2011, 35(5):652-657.
- [10] Drummond J M et al. Adapting to noisy 3D data - attenuating the acquisition footprint. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19:9-12.
- [11] Kelamis P G et al. Al-bannagi, Kenfang, Panos G. Acquisition footprint suppression via the truncated SVD technique. Case studies from Saudi Arabia. *The Leading Edge*, 2005, 24(8):832-834.
- [12] Morse P F and Hildebrandt G F. Ground-roll suppression by the stack-array. *Geophysics*, 1989, 54(30):290-301.
- [13] 曹国滨.频率-空间域数据规则化压制采集脚印技术研究. *石油物探*, 2010, 49(4):359-363.
Cao Guobin. Study of suppressing acquisition footprint by data regulation in frequency-space domain. *GPP*, 2010, 49(4):359-363.
- [14] 钱荣钧.关于地震采集空间采样密度和均匀性分析. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(2):235-243.
Qian Rongjun. Analysis on spatial sampling density and uniformity of seismic acquisition. *OGP*, 2007, 42(2):235-243.
- [15] 蔡希玲,刘学伟,勾丽敏.地震采样波场的空间连续性分析方法. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(4):370-379.
Cai Xiling, Liu Xuewei and Gou Limin. Analytic approaches for spatial continuity of seismic sampled wavefield. *OGP*, 2007, 42(4):370-379.
- [16] 王梅生,王彦娟. CMP 属性空间连续性问题分析. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(2):165-169.
Wang Meisheng and Wang Yanjuan. CMP attribute spatial continuity analysis. *OGP*, 2010, 45(2):165-169.
- [17] 尹成,吕公河,田继东等.三维观测系统属性分析与优化设计. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(5):495-498.
Yin Cheng, Lü Gonghe, Tian Jidong et al. Attributes analysis and optimum design of 3D geometry. *OGP*, 2005, 40(5):495-498.
- [18] 中国石油勘探与生产分公司.碳酸盐岩储层地震勘探关键技术及应用.北京:石油工业出版社, 2009:37-48.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



蔡希玲 教授级高级工程师,1962年生;长期从事物探方法研究、信号分析和地震数据处理等工作。现在东方地球物理公司研究院工作。