

地震子波频率浅析

云美厚, 丁 伟

(中国石化胜利石油管理局地球物理勘探开发公司, 山东东营 257100)

摘要:地震子波频率概念的合理选择与准确应用对于地震采集设计、地震模拟研究、地震资料处理、地震属性分析以及质量评价等是非常重要的。针对目前地震子波频率由于定义方式出现的各种概念(视频率、主频、峰值频率、中心频率等)以及理解上出现的偏差等问题, 首先从时间域定义和频率域定义 2 个方面进行了归纳和总结, 并在此基础上对 3 种常用地震子波(Ricker 子波, Zinc 子波, 正弦指数衰减子波)进行了分析和研究, 得出视频率与主频概念一致, 但不同地震子波的峰值频率、中心频率和视频率(或主频)之间并不完全一致的结论; 而对于实际地震资料, 将峰值频率近似看作地震子波的主频是可以的, 但在地震子波已知的情形下这样做是不恰当的, 甚至可能会得出错误的结论和认识。

关键词:视频率; 主频; 峰值频率; 中心频率; 调谐厚度

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

由于地震子波频率定义方式的多样性, 目前出现了视频率、主频、峰值频率和中心频率等多种概念, 而且对于不同类型的地震子波这些频率概念之间的相互关系不尽相同, 定义也并不十分严格。这些均造成了人们理解上的偏差和实际应用中的混乱现象, 甚至产生错误的结论。张军华等人曾通过模拟分析对薄层的地球物理特征进行了再认识^[1], 但由于其在薄层合成记录正演计算中对于 Ricker 子波主频认识上的偏差, 结果得出“薄层实际调谐厚度小于 1/4 波长”的错误结论。类似的问题在凌云研究组发表的论文中同样存在^[2]。我们对地震子波频率的概念进行了简单的概述和必要的分析, 进而给出一些客观、清楚的结论和认识, 以便人们能够正确地应用地震子波频率的概念。

1 地震子波频率概述

1.1 时间域定义

地震子波是由震源激发的尖脉冲经过大地滤波器滤波作用后形成的具有一定延续时间的稳定波形, 是组成地震记录的基本单位^[3~5]。对于正弦波, 通常采用波长、周期、频率等参数来描述波的特征, 且其周期和频率均为固定值。考虑到地震波为非正弦波, 没有固定不变的频率和波长, 为了有别于正弦波, 地震勘探中习惯上采用视波长、视周期、视频率等来描述地震波的特征。仿照正弦波的定义方式, 波剖面中 2 个相邻波峰(或波谷)之间的距离 λ_b 称为视波长, 波的振动图形中相邻极大(或极小)值之间的时间间隔 T_b 称为视周期, 视周期的

倒数 $f_b = 1/T_b$ 称为波的视频率。若波的传播速度为 v , 则由波动理论可知, 视波长、视周期、视频率和波的传播速度之间有如下关系^[6]:

$$\lambda_b = vT_b = \frac{v}{f_b} \quad T_b = \frac{1}{f_b} = \frac{\lambda_b}{v} \quad (1)$$

由于视周期、视频率和视波长实际上是地震波主要频率和主要波长的体现, 因此, 大多数情况下又将其称为主周期、主频率(或主频)和主波长。陆基孟认为采用“主”比采用“视”更合适一些^[7], “主”不仅反映了地震波与正弦波的不同, 同时也揭示了概念的本质, 更重要的是这样还可避免与讨论波沿着测线传播时所采用的视波长和视速度等概念混淆。一般来说, 地震子波波形主要是指其振动图形而不是波剖面, 所以最常用的描述地震子波的参数是主周期或主频率。

李庆忠针对带通子波曾定义主频为眼睛能够看到的地震剖面上同相轴的胖瘦程度^[8]。俞寿朋在宽带 Ricker 子波研究中, 曾将子波主波瓣两侧过零点之间的时间间隔长度定义为主瓣宽度, 并将主瓣宽度的倒数定义为主瓣的等效频率^[9]。

1.2 频率域定义

Kallweit 和 Wood 在讨论零相位地震子波分辨率时, 将子波振幅谱极大值(或称峰值)所对应的频率称为峰值频率^[10]。陆基孟则定义振幅谱极大值所对应的频率为主频, 并认为这个频率就是一般

收稿日期:2005-01-01; 改回日期:2005-02-21。

作者简介:云美厚(1965—), 男, 副教授, 现主要从事开发地震研究和教学工作。

基金项目:国家自然科学基金(40174018)项目资助。

所说的地震脉冲(即地震子波)的主频率^[7]。谢里夫和吉尔达特也将零相位 Ricker 子波的谱峰值频率看作是主频^[11]。陈遵德将功率谱的极大值所对应的频率称为地震信号的主频率^[12],这与陆基孟的定义本质上是一致的。与此同时,他还将功率谱的频率加权累加和与总能量的比值定义为能谱中心频率 f_m ^[12],它反映了信号能量按频率分配的特点,高频能量强,则中心频率高,高频能量弱,低频部分能量强,则中心频率低,用公式表示为

$$f_m = \frac{\int_{f_L}^{f_H} P(f) f df}{\int_{f_L}^{f_H} P(f) df} \quad (2)$$

式中, $P(f)$ 为功率谱, f_H 和 f_L 分别为功率谱的高、低截频。

此外,Youli Quan 和 Jerry M Harris 利用振幅谱的频率加权累加和与相同频带范围内振幅谱累加和的比值来定义中心频率或质心频率^[13](为便于区别,这里将其称为振幅谱中心频率)。还有一种定义中心频率的方式是将振幅谱曲线包含的面积分成高频和低频面积相等的两部分,则分界处的频率称为平均中心频率。这些定义均可反映地震信号简谐成分按频率分布的特征。但通过对几种子波实际计算结果的对比分析,发现振幅谱中心频率一般高于能谱中心频率,而平均中心频率则可能低于或高于甚至等于能谱中心频率。在地震属性分析中,应用较多的是能谱中心频率,下文所提及的中心频率均指能谱中心频率。

俞寿朋和李庆忠通过对带通子波的分析均认为通频带的中心频率与其视频率(或称主频)是一致的^[3,8]。

2 不同频率概念的比较

从前面的分析不难看出,关于地震波主频的定义有2种方式,一是基于时间域波形特征的定义,二是基于频率域频谱特征的定义。那么,这2种定义方式给出的主频是否一致呢?或者说基于时间域波形特征的主频概念和基于频率域频谱特征的峰值频率概念是否是一回事呢?我们利用地震勘探中最常用的3种地震子波,即零相位 Ricker 子波、Zinc 子波和正弦指数衰减子波来说明其相互关系和差异。

时间域 Ricker 子波的数学表达式为^[3,9~11,14]

$$r(t) = [1 - 2(\pi f_p t)^2] e^{-(\pi f_p t)^2} \quad (3)$$

式中, f_p 为峰值频率,杨宝俊称其为谱峰频率^[5]。

主频 f_b 定义为子波宽度 T_b (或称主周期)的倒数,且有 $f_p \approx 0.77 f_b$ 或 $f_b \approx 1.3 f_p$ ^[5,10,14]。俞寿

朋指出,Ricker 子波的峰值频率 f_p 大约是视频率的0.9倍^[3],笔者认为该结论有误。Ricker 子波主瓣的等效频率为 $f_a = \pi f_p / \sqrt{2} \approx 1.110 7 f_p$ ^[9]。显然,不论是 Ricker 子波的主频 f_b 还是主瓣的等效频率 f_a 均高于其峰值频率 f_p 。这说明基于时间域波形特征的主频定义与基于频率域频谱特征的主频定义是不一致的,至少对于 Ricker 子波是这样的。

Zinc 子波是一种振幅谱为箱形的信号,其数学表达式为^[3,9,10,14]

$$z(t) = \frac{2f_H \sin 2\pi f_H t}{2\pi f_H t} - \frac{2f_L \sin 2\pi f_L t}{2\pi f_L t} \quad (4)$$

式中, f_H 为子波的上限频率或称高截频或高端频率; f_L 为子波的下限频率或称低截频或低端频率。同样,其主频 $f_b = 1/T_b$,且 $f_b \approx 0.7 f_H$ 或 $f_H \approx 1.43 f_b$ ^[10,13]。中心频率 $f_m = (f_H + f_L)/2$ ^[3,8,9]。

正弦指数衰减子波的数学表达式为^[15]

$$w(t) = e^{-\beta^2 t^2} \sin 2\pi f_b t \quad (5)$$

式中, β 为子波衰减系数, f_b 为子波主频。

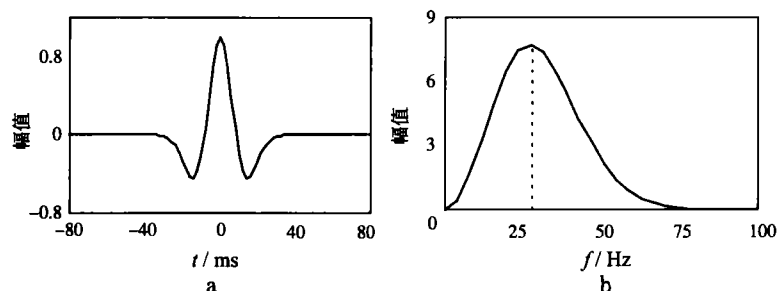
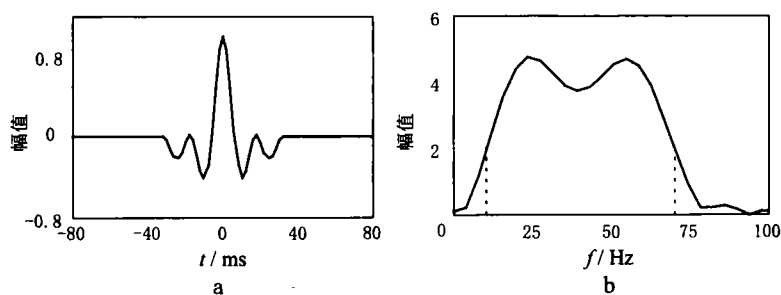
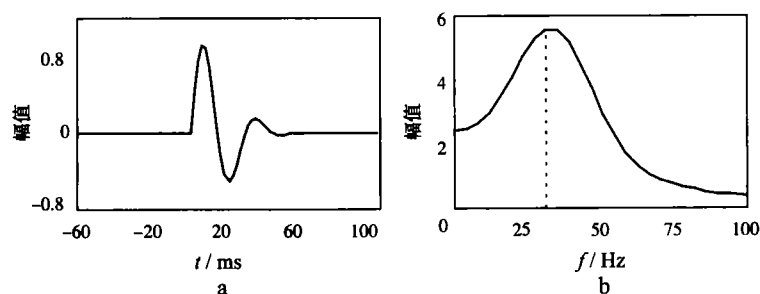
图1~图3分别展示了3种子波的时间域波形曲线和振幅谱图。利用这3组图和关于各种频率的定义,经理论计算和图形拾取得到3种子波的频率特性参数(表1)。

表1 三种子波频率参数对比分析表

子波	频率及相互关系	理论计算	实测结果
Ricker	主频 f_b	35.00	35.71
	峰值频率 $f_p \approx 0.77 f_b$	26.95	27.34
	中心频率 f_m		28.70
Zinc	主频 $f_b \approx 0.7 f_H$	49	50.00
	低截频 f_L	10	
	高截频 f_H	70	
	中心频率 $f_m = (f_H + f_L)/2$	40	39.99
正弦指数衰减子波	主频 f_b	35	35.71
	峰值频率 f_p		31.25
	中心频率 f_m		31.95

注:表中加粗数据为已知

对表1中的理论计算结果与实测结果的对比分析可见,Ricker 子波的主频、峰值频率和中心频率是不一致的;Zinc 子波的主频与中心频率也不相同;正弦指数衰减子波的峰值频率和中心频率非常接近,可主频与峰值频率却不等。通过简单的换算发现峰值频率近似为主频的0.9倍,即 $f_p \approx 0.9 f_b$ 。Ricker 子波和正弦指数衰减子波均表明主频和峰值频率是不相等的,因而,将峰值频率看作是

图1 零相位 Ricker 子波波形曲线(a)和振幅谱(b) ($f_b = 35$ Hz)图2 零相位 Zinc 子波波形曲线(a)和振幅谱(b) ($f_L = 10$ Hz, $f_H = 70$ Hz)图3 正弦指数衰减子波波形曲线(a)和振幅谱(b) ($f_b = 35$ Hz, $\beta = 40$ s $^{-1}$)

地震子波的主频只能是一种简单的近似,而不代表客观实际。

对于实际地震资料,由于地震子波是未知的,因而难以通过时间域子波波形确定其主频,只能通过频谱确定其峰值频率。同时,由于峰值频率和主频的关系是不确定的,所以,通常将峰值频率近似看作是地震子波的主频是可以的。笔者认为这种近似对于实际地震资料是合理的。因为实际地震资料中总是存在噪声,这使得根据实际地震记录频谱确定的峰值频率必然会存在一定的误差。但由于主频一般高于峰值频率,所以,采用峰值频率代替主频可以得到关于地震资料分辨率的较为保守的估计,实用中可信度更高。

然而,在已知地震子波情形下,近似用峰值频率作为子波主频的地震分析可能会得出不正确的结论。

3 薄层调谐厚度的计算

众多的研究结果表明^[3,10,11,14,15],薄层调谐厚

度位于 $1/4$ 主波长处。张军华等人和凌云研究组基于 Ricker 子波模拟分析给出“薄层实际调谐厚度小于 $1/4$ 波长”的结论和模拟结果^[1,2],这并不表明前人的研究结论存在局限性,而是由于他们错误地将 Ricker 子波的峰值频率看作是主频的缘故。从前面的分析可知,Ricker 子波峰值频率和主频存在如下关系:

$$f_p \approx 0.77 f_b \quad (6)$$

在储层速度为已知的情况下,利用公式(1)可得:

$$\lambda_b \approx 0.77 \lambda_p \quad \text{或} \quad \frac{\lambda_b}{4} \approx 0.77 \frac{\lambda_p}{4} \quad (7)$$

显然,由峰值频率计算的波长 λ_p 大于 Ricker 子波主波长 λ_b ,因而得出“薄层实际调谐厚度小于 $1/4$ 波长”的错误结论也就不足为奇了。

采用与文献[1]相同的楔状模型,即取密度不变,最大厚度为 100 m, $v_1 = 4\,000$ m/s, $v_2 = 2\,500$ m/s, Ricker 子波主频为 35 Hz,笔者得到的薄层合成记录和相应的振幅调谐曲线如图 4 所示。图中调谐点位于第 19 道,层厚度为 18 m。经理论计算

$\lambda_b/4 \approx 17.9$ m, 而 $\lambda_p/4 \approx 23.2$ m, 相当于第 24 道。显然, 调谐厚度位于 $\lambda_b/4$ 处, 小于 $\lambda_p/4$ 。

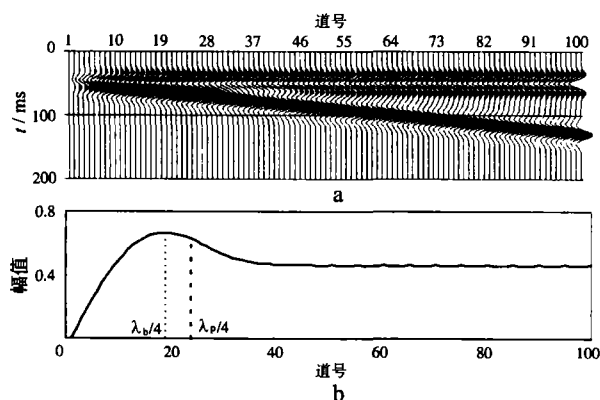


图4 楔状模型合成记录(a)和振幅调谐曲线(b)

进一步由(7)式和(1)式可得基于2种频率概念的调谐厚度差 Δh 为

$$\Delta h = \frac{\lambda_p}{4} - \frac{\lambda_b}{4} = 0.075 \frac{v}{f_b} \quad (8)$$

(8)式表明, 在速度一定的情况下, 基于主频和峰值频率计算的调谐厚度差值将随主频的减小而增大; 在频率一定的情况下, 该差值将随速度的增加而增大。这一变化特点与文献[1]中图9所描述的调谐厚度理论值和实际值的差值变化规律是完全一致的, 说明文献[1]中之所以会出现调谐厚度理论值和实际值的差异完全是由于错误地将峰值频率用作主频的缘故。同理, 文献[1]关于视厚度的分析结论也值得商榷。

4 结束语

视频率, 通常也称为主频率或主频, 是一个描述地震子波时间域波形特征的重要参数, 数值上等于地震子波波形中相邻极大(或极小)值之间时间间隔的倒数。

峰值频率是一个描述频率域地震子波频谱特性的重要参数, 通常定义为地震子波振幅谱极大值所对应的频率。对于不同的地震子波, 峰值频率通常不等于视频率或主频, 因此将峰值频率看作是地震子波的主频是不严格的。Ricker子波的峰值频率约为主频的0.77倍; 正弦指数衰减子波的峰值频率约为主频的0.9倍; 带通Zinc子波, 不存在峰值频率, 其主频取决于高截频或上限频率, 且为高截频的0.7倍。

对于实际地震资料, 由于子波通常是未知的,

因此, 可以将地震记录的峰值频率近似看作是地震子波的主频, 这种近似作为含噪声记录的一种保守估计基本上是合理的, 但不够准确和严格。

中心频率同样是一个描述频率域地震子波频谱特性的重要参数, 一般定义为功率谱的频率加权累加和与总能量的比值。对于Ricker子波, 中心频率与主频和峰值频率均不相等; Zinc子波的中心频率等于高截频与低截频之和的一半, 但不等于主频; 正弦指数衰减子波的中心频率同样不等于主频, 但其与峰值频率近似相等。

参考文献

- 1 张军华, 陆文志, 王月英, 等. 薄层地球物理特征再认识[J]. 石油物探, 2004, 43(6): 541~546
- 2 凌云研究组. 应用振幅的调谐作用探测地层厚度小于1/4波长的地质目标[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3): 268~274
- 3 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 1~34
- 4 牟永光. 地震勘探资料数字处理方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981. 56~98
- 5 杨宝骏, 牛滨华, 闫贫. 勘探地震学导论[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992. 75~137
- 6 何樵登. 地震勘探原理和方法[M]. 北京: 地质出版社, 1986. 18~26
- 7 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 石油工业出版社, 1982. 1~82
- 8 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 12~30
- 9 俞寿朋. 宽带Ricker子波[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(5): 605~616
- 10 Kallweit R S, Wood L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. Geophysics, 1982, 47(7): 1035~1046
- 10 谢里夫 R E, 吉尔达特 L P. 勘探地震学(第二版上册)[M]. 初英, 李承楚, 王宏伟, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1999. 234~235
- 12 陈遵德. 储层地震属性优化方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 20~22
- 13 Quan Y L, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 895~905
- 14 钱绍瑚, 刘来祥. 零相位子波的垂向分辨率[J]. 石油物探, 1988, 27(3): 1~9
- 15 赵晨光. 薄互层地震反射波的特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 1986, 21(1): 32~46
- 16 苏盛甫. 薄储集层的反射特征和定量解释方法[J]. 石油地球物理勘探, 1988, 23(4): 387~402

(本文编辑: 张仪宁)

attribute analysis

Zhang Hui, State Key Laboratory of Ore Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

The effect of caprock anisotropy on time-lapse seismic AVO. Li Jingye, Chen Xiaohong, Hao Zhenjiang and Rui Zhenhua. *GPP*, 2005, 44(6): 563~567

The effect of anisotropy of reservoir caprock on seismic AVO curves is the same before and after the reservoir is developed. However, whether this effect of anisotropy of reservoir caprock can be diminished and neglected after subtract the seismic AVO curve from two times. According to the rock physics model in oilfield and Gassmann equations, the relation curve of compressional-to-shear velocity versus oil saturation is gained, and the double reservoir model designed. By the P-P wave and P-S converted wave reflection coefficients can be obtained by solving the linear equations set for reflection and transmission coefficients on the interface of VTI medium. Then how the Thomsen parameters variations affect the P-P wave and P-S converted reflection coefficients and differences have been analyzed quantitatively. Based on the data, the conclusion is followed that the caprock anisotropy can be neglected in P-P wave reflection coefficient difference analysis when incident angle is small, but under other conditions, such as far offset or multiple time-lapse seismic AVO study, they can not be neglected.

Key words: Time-lapse seismic; AVO; petrophysics; anisotropy; caprock

Li Jingye, Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Interpretation of depositional bodies in the parasequence sets from 3-D seismic data. Ling Yun, Sun Desheng, Gao Jun, Wang Shirui and Lin Jixiang. *GPP*, 2005, 44(4): 568~577

It is a controversial problem whether seismic resolution and exploration capability can be enhanced by effectively interpreting the spatial exhibition of depositional bodies in the parasequence set based on 3-D seismic data and sequence stratigraphy. Nevertheless, this is obviously a problem worth studying in the field of seismic and geological comprehensive interpretation. In consideration of relative preservation of amplitude, frequency, phase and waveform, we have interpreted a 3-D dataset with the large bin size, collected from an area of 560 square kilometers in the Junggar Basin, using sequence stratigraphy-guided seismic stratigraphy and reservoir evolution methods combined with sequence interpretation of well data and calibration of the reference marker. Finally, we have obtained the effective spatial exhibition and superposition relationship of depositional bodies $J_1 s_2^1$ and $J_1 s_2^2$ in parasequence set $J_1 s_2$.

Key words: Junggar Basin; 3-D seismic data; sequence stratigraphy; parasequence set; parasequence; seismic stratigraphy

Ling Yun, Ling Yun Group, BGP, CNPC, Zhuozhou 072751, China

Analysis of seismic wavelet frequency. Yun Meihou and Ding Wei. *GPP*, 2005, 44(6): 578~581

It is very important to choose accurately seismic wavelet frequency for seismic acquisition parameter design, seismic forward modeling, seismic data processing, seismic attribute analysis, seismic data appreciation etc. The issues of present seismic wavelet frequency caused by different concepts, such as apparent frequency, dominant frequency, peak frequency and centroid frequency, etc., which are defined by different methods, and understanding deviation,

definition of seismic wavelet frequency for time and frequency domain are concluded and summarized. On this basis, three kinds of seismic wavelets in common use such as Ricker and Zinc wavelets as well as sine wavelet with exponential attenuation characteristics are analyzed and a conclusion is achieved that apparent frequency and dominant frequency are consistent in essence, but peak frequency and centroid frequency as well as apparent frequency or dominant frequency are not completely consistent with different seismic wavelets. For actual seismic data, peak frequency can approximately be used as dominant frequency, but it is not suitable when seismic wavelet is known for it can give out any wrong knowledge and results.

Key words: Apparent frequency; dominant frequency; peak frequency; center frequency; tuning thickness

Yun Meihou, Geophysical Exploration and development Corporation of Shengli Petroleum Administrative Bureau, SINOPEC, Dongying 257100, China

The signature recognition of comprehensive logging parameters in sedimentary microfacies of clastic reservoirs. Zhao Xigang, Wu Hanning, Yang Jianjun, Wang Jinghua and Bai Guanjun. *GPP*, 2005, 44(6): 582~587

The signature parameters such as the curve shape, amplitude, numerical value are utilized to establish the different homographic relationship between clastic sedimentary microfacies and logging feature parameter, the logging features of different sedimentary microfacies are recognized and described in detail. The sedimentary microfacies of oil-gas pools are researched in three procedures, such as single well analysis, section correlation, regional studying. The sand body of the Yang-61-2 oil layer in Y oil field is accurately identified in its configuration, the river channel is considered the best exploration and exploitation area for oil-gas pools in the Ordos basin.

Key words: Oilfield exploitation; clastic oil-gas pools; sedimentary microfacies; logging parameter; signature recognition

Zhao Xigang, Geology Department of Northwest University, Xi'an 710069, China

The application of lithological traps identifying technology in the Yaoyingtai area of Changling depression, southern Songliao basin. Liu Younian, Shi Haiying and Cai Xianhua. *GPP*, 2005, 44(6): 588~592

The trap amplitude is small and reservoir is thin in the Yaoyingtai Area, southern Songliao basin. According to this condition and from 3-D high resolution seismic data, seismic attribute extraction, seismic phase analysis and well-constrained inversion technique are applied comprehensively, the sediment environment and sediment state of sand were deduced after the comprehensive analysis, the favorable lithological-structural traps are determined. Implementation of these technologies shows good results.

Key words: the Yaoyingtai Area; seismic attributes; seismic facies; seismic inversion; lithological trap identification

Liu Younian, Geology Department of Northwest University, Xi'an 710069, China

Processing methods for seismic data with low signal-to-noise ratio in Junggar basin. Qin Tian, Wang Yanchun and Ling Xun. *GPP*, 2005, 44(6): 593~597

Because of the complex surface and seismogeologic conditions, the raw seismic data acquired in Junggar basin had a low quality, with strong shallow refraction, multiple refractions, low frequency noise and various random noises on the records. Based on the processing of amount of actual seismic data in the area, we carried out researches on techniques such as static correction, pre-stack attenuation, surface consistency processing method, velocity analysis for