

琼东南盆地深水油气勘探中复杂地震多次波特征及压制对策

刘金朋,方中于,钟明睿,赵明,邓敏,杨薇

(中海油能源发展工程技术特普公司,广东湛江 524057)

摘要:深水已是目前油气勘探的主战场之一,但其复杂的地震多次波严重地影响了地震资料的信噪比和中深层成像。近来基于地震波动理论的多次波压制技术已经显现出明显的优势,并通过匹配相减的方法衰减多次波,具有更好的保幅性。但在实际地震资料处理中仍面临诸多多次波压制难题,深水崎岖海底的地震多次波压制依靠单一的方法不能解决全部问题。从地震多次波特征分析入手,研究了深水区主要的多次波类型,进行了多次波压制技术的优化和组合,使其具有更好的适用性和多次波压制效果。

关键词:深水区;地震多次波压制;多次波特征分析;信噪比;琼东南盆地

中图分类号:TE51;P315

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.12007

南海北部深水区已成为目前油气勘探的主战场,虽然相对于其他区域其整体勘探程度较低,但其油气勘探潜力巨大。特别近年来陵水 17-2 气田的重大发现证明了我国南海深水区勘探前景非常广阔。深水区的地震多次波情况复杂,由于水深从百余米到几千米的巨大变化,导致多次波严重影响了地震资料的信噪比和中深层地质成像,亦严重地制约了深水油气勘探进程^[1]。多次波历来是海洋资料处理的难点,对多次波问题的研究,虽然一些科研人员已经尝试利用多次波进行成像,但目前多次波还是作为一种严重的干扰波进行消除,也产生了众多的压制方法。但随着勘探的推进,其对资料品质要求也越来越高,对多次波的压制也提出了更高的要求。

目前压制多次波的方法主要分为以下几大

类:

(1)利用多次波的周期性来衰减多次波

Backus^[2]、Rabison^[3]分别深入讨论了反褶积压制短周期多次波的问题;陈瑜等^[4]采用 Tau-p 域自适应步长取得较好的应用效果。

(2)基于多次波与一次波的时差来压制多次波

Ryu^[5]进行了二维 FK 滤波多次波压制研究;Thorson 等^[6]提出了倾斜叠加变换的技术来区分压制多次波;Hampson^[7]对倾斜叠加进行改进,提出了抛物线 Radon 变换压制多次波方法;国内外很多专家都对 Radon 变换压制多次波开展了大量的研究。

(3)基于模型预测压制多次波方法

目前业界模型预测多次波主要有 2 种:①波场延拓法压制多次波;其可认为是模型驱动的一种方法,利用波场延拓模拟出波场在水中的多次传播求出多次波模型;②褶积反馈 SRME。该方法与波场延拓不同,可以认为是基于全数据驱动的,主要是用于压制表面多次波。Berkhout 等^[8]、Verschuur 等^[9]提出了“反馈环”的思想;

收稿日期:2017-07-08

基金项目:中海油能源发展科技项目“陵水凹陷中深层弱信号识别方法应用研究”(HFKJ-GJ2015001)

作者简介:刘金朋(1983—),男,高级工程师,主要从事地震资料处理方法研究与应用工作。E-mail:Liujp1@cnooc.com.cn

Dedem 和 Verschuur^[10] 将该方法扩展到三维数据中。国内也基于此类方法进行了大量研究,孙维嵩等^[11],马继涛等^[12]李振春等^[13]等研究了保幅多次波自适应减去方法;宋家文等^[14]进行了层间多次波相关研究。

目前基于模型预测的多次波压制技术在实际资料处理中仍面临诸难题,如近偏移距和海底缺失严重影响 SRME 的建模;宽缆采集及观测系统的变化影响方法的适用性;且单一的方法不能解决全部问题需要优化组合衰减复杂波场的多次波。鉴此,本文首先分析深水区复杂多次波的特征,并对多次波压制技术进行优化组合,使其具有更好的适用性和获得多次波压制的最佳效果。

1 琼东南盆地深水区多次波特征

深水区海底面与海平面是 2 个极强阻抗界面,地震波在这 2 个强阻抗界面内反复传播形成了普遍发育的深水海底多次波。若存在强阻抗界面的地层反射,也会形成层间多次波,由于深水区往往存在海底的起伏变化,引起的绕射多次波进一步导致了多次波的复杂性。深水多次波一般为水深的多次振荡,速度在一般情况下与有效波有较大差异,多次波的速度谱形态往往为串状分布特征;通常海底平缓时易于对多次波和有效波进行识别。然而在大部分情况下尤其是在深水坡折区,海底地形崎岖多变,导致多次波具有更加复杂的三维特性,如图 1 所示海底复杂情况下的多次波路径示意图,如果海底地形较平缓时,其多次波明显在二维平面内震荡传播,当海底起伏变化大时,多次波路径是在三维空间内震荡传播。

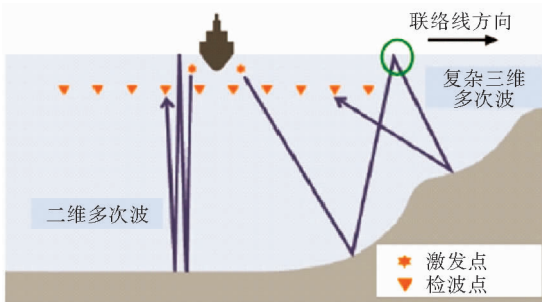


图 1 多次波路径示意图

Fig. 1 Diagram showing multiple paths

图 2 展示了在海底崎岖变化时的含有多次波的炮集及叠加剖面,从炮集的多次波可以看出,在复杂区域多次波已经完全非双曲线形态,波场复杂,而从叠加剖面来看,平缓海底处多次波规律性较明显,但崎岖海底下的多次波波场非常复杂,能量极强,往往是有效信号能量的数十倍,完全掩盖了有效地层的反射波组。

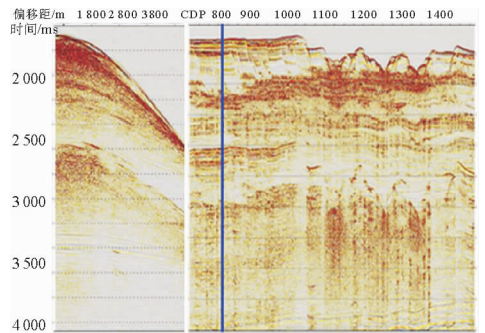


图 2 含有复杂多次波的炮集(左)及叠加剖面(右)

Fig. 2 For complex multiples: shot gather (left), stack section (right)

为了更好地识别琼东南盆地深水区多次波类型,根据该深水工区特点建立了地质模型,如图 3,与正演后的叠加剖面(图 4)对比,可更清楚地识别出深水区域的多次波的发育情况,通过分析主要包含海底多次波、微曲多次波、层间多次波等几种类型。

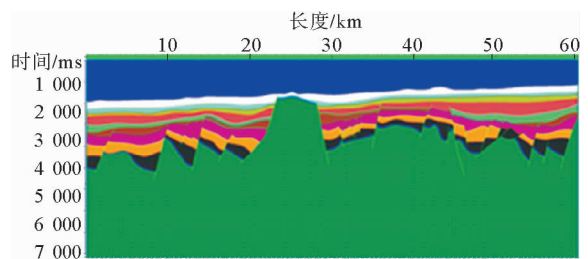


图 3 靶区某深水区地质模型时间域

Fig. 3 Deep water geologic model in time domain

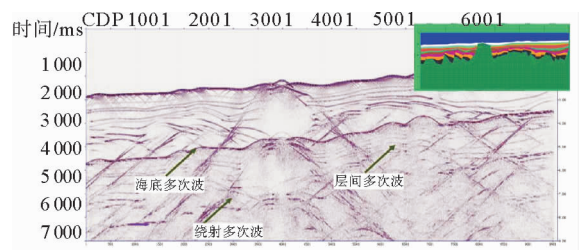


图 4 正演模拟数据的叠加剖面

Fig. 4 Stack section by forward modeling data

通过对琼东南盆地深水区实际资料及正演数据的多次波分析,总结归纳出深水区多次波特征:①深水海底多次波周期较长,与一次波时差、形态等差异较大,在剖面上、道集上都较易于区分;②深水海底平缓处多次波受海水深度和记录长度影响主要表现出一阶、二阶全程多次波,海底多次波具有较好的倍数关系;③深水区几乎不存在短周期的鸣震干扰;④深水区层间多次波同样存在,但能量相对于海底多次波弱一些;⑤深水崎岖海底区导致绕射多次波发育,具有明显的三维特性,加重了多次波的复杂性。

2 多次波压制技术及应用

随着勘探的推进,对地震资料品质要求也越来越高,常规多次波压制方法越来越满足不了勘探的需求,基于波动理论的多次波模型预测方法已在生产中展开了广泛应用。目前模型预测多次波压制的方法应用主要可以分为:波场延拓法和褶积法。波场延拓方法是根据波场外推来模拟表面相关多次波,也可认为这种方法是模型驱动的;而褶积法可认为是完全数据驱动的,是通过地震资料的褶积来预测多次波模型,这两种方法要求已知信息少,先预测出多次波模型再通过自适应相减消除多次波,具有更好的保幅性,但在实际资料中仍需尝试多种方法组合进行复杂多次波压制。

2.1 褶积 SRME 多次波衰减技术

一阶的自由表面多次波是由两个有效的地震反射波在表面相加而成的。在均匀地下介质中的传播情况下,地震波在地下的响应可以定义为 $x_0(t)$,如果这些波作为二次激发点在表面反射点处再次发生向下传播,不考虑其他因素的影响,其响应就是一阶的自由表面多次波。从而所有一阶的表面多次波可以表示为:

$$m_1(t) = -x_0(t) * x_0(t) \tag{1}$$

式(1)中负值是由表面的反射系数为-1 决定的。同样二阶的多次反射波可以表示成:

$$m_2(t) = -x_0(t) * m_1(t) = x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) \tag{2}$$

从而包含的所有自由表面相关多次波的地震

波就可以表示成如下级数的展开式:

$$x(t) = x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) + x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) - \dots \tag{3}$$

式(3)代表着所有表面相关多次波都可以由其整个响应与一次反射波进行褶积得到。这样就对应一个反馈的系统。依据褶积定理,得到不含表面多次波的响应满足:

$$x_0(t) = x(t) + x(t) * x(t) + x(t) * x(t) * x(t) + \dots \tag{4}$$

如果考虑震源具有子波特性,其可以表示成:

$$p_0(t) = p(t) - a(t) * p(t) * p(t) + a(t) * a(t) * p(t) * p(t) * p(t) - \dots \tag{5}$$

式中: $p(t)$ 为原始采集接收到的地震记录;

$a(t)$ 为反子波。

这是一维假设下平面波入射条件下的自由表面多次波衰减的公式,直观地展现了 SRME 技术的基本思想。这可明显看出,SRME 方法就是通过原始记录进行自身褶积,使得一次反射波变成多次反射波,低阶多次波变成高阶多次波。该方法不需要地下介质的速度等信息,要想准确预测出多次波,需要保证所有所需的地震子反射都能够接收到,如果部分缺失或存在误差,往往不能准确预测相关的多次波,为此该类方法对野外采集观测系统的规则性及密度都提出了较高的要求。

目前海上拖缆采集的数据普遍缺失近道信息,在进行模型预测前,做近道波场外推及数据规则化插值使得近道多次波模型能有效预测,优化的模型多次波预测压制流程见图 5。

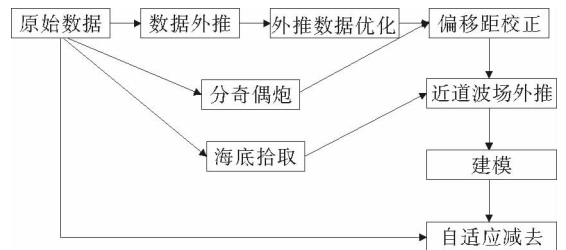


图 5 多次波衰减优化流程

Fig. 5 Optimized flow of multiple suppression

经过多次波模型衰减流程优化后的多次波压制效果更加理想。图 6 为未进行优化压制多次波的动校正道集和进行优化后的对比,可以看出,方法优化后多次波得到了更好的压制,尤其近偏移

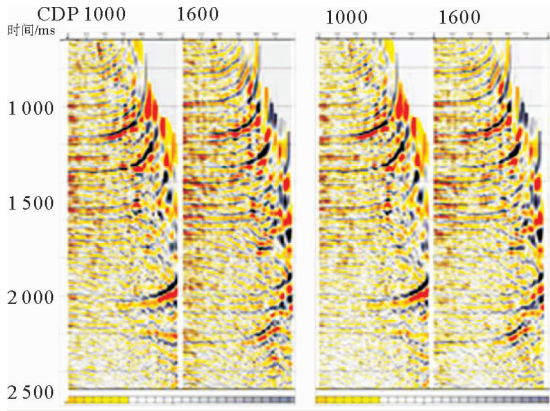


图6 压制多次波校正道集 (左:未优化,右:优化后)
Fig. 6 NMO gathers with de-multiple
(left: un-optimized, right: optimized)

距的短周期多次未经优化前还有较多的残留,严重影响道集的质量及 AVO 分析,因此,经过多次波模型优化流程,各类多次波衰减更加干净。

2.2 波场延拓压制多次波技术

波场延拓法是一种典型的模型驱动压制多次波方法,利用地震记录及水深等信息进行记录延拓,这样就可以预测出表面多次波的模型,之后利用自适应匹配减去估计的多次波模型来压制多次波。波场延拓 3DSRME 就是利用波场外推模拟表面相关多次波,其流程如图 7 所示。

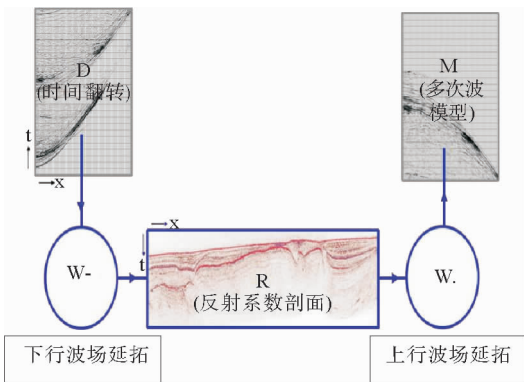


图7 波场模拟示意图(据文献[15])

Fig. 7 Wavefield simulation (from reference [15])

基于波场延拓压制方法是基于模型驱动原理,但往往要求多次波具有较好的规律性,否则建立多次波模型不够准确。为此发展了一套基于 Tau-p 域波场延拓的多次波压制技术。其依据多次波在 Tau-p 域具有较好的周期性特征。在 Tau-p 域中,通过水层旅行时的延拓,估计出水层

相关多次波模型,各阶多次波的估计是上一阶继续延拓,这样就可以得到所有阶次的海底多次反射波, Tau-p 变换和波场延拓示意图^[16](图 8)。

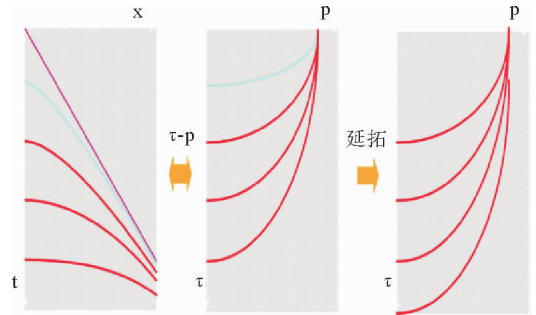


图8 Tau-p 变换和波场延拓技术原理示意图

Fig. 8 Tau-p transform and wavefield extrapolation

2.3 拉东 RADON 变换多次波压制技术

拉东变换原理是沿不同的路径作积分,积分路径为线性时是线性拉东变换又称 Tau-p 变换,积分路径为抛物线时称作抛物线拉东变换,积分路径为双曲线时为双曲拉东变换,这些变换使得在拉东域内信号更易于分离,为此广泛应用于勘探地震中的多次波衰减、噪音衰减、速度分析等。目前工业化生产已经将拉东变换作为一种必备的压制多次波处理手段,对存在一定时差的一次波与多次波有着明显的效果。高精度 RADON 变换,可以输入的动校正后的 CDP 道集。图 9 为高精度拉东变换法压制多次波示意图,为去除多次而不损伤有效信息,须根据零偏移距时间增加,改变最大偏移距处切除量的大小。

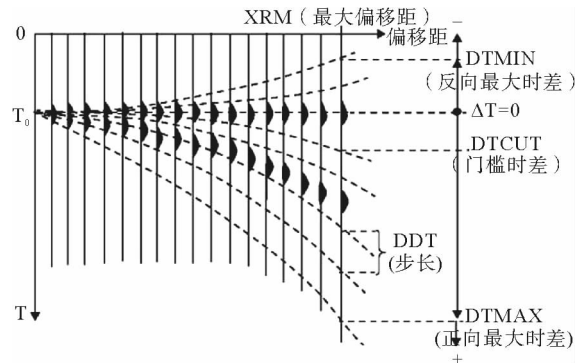


图9 高精度拉东变换法压制多次波示意图

Fig. 9 High precision RADON de-multiple diagram

2.4 深水实际资料多次波压制对策

在琼东南盆地深水区,由于在复杂海底地形条件下多次波表现为复杂的三维空间特性,多次波的周期性差和波场的复杂变化,用常规预测反褶积效果较差,需要三维的多次波压制解决方案。如某深水工区三维资料处理,海底相关的强多次波完全掩盖了有效信号。如图 10,某深水工区未作多次波衰减的叠加剖面及速度谱可以看出,存

在绕射等强多次波,其多次波具有明显的三维特性。从原始资料的分析可以看出,有效波能量完全被淹没在多次波之中,测试了高精度 RADON 变换及褶积 3D SRME、波场外推 3D SRME 等几种方法进行组合衰减多次波。

图 11 可以明显看出褶积 SRME 相对于波场外推 SRME 具有更好的多次波衰减效果。图 12 为在进行 3D SRME 的基础上继续进行 RADON 多次波衰减效果图,可以看出补充方法将多次波

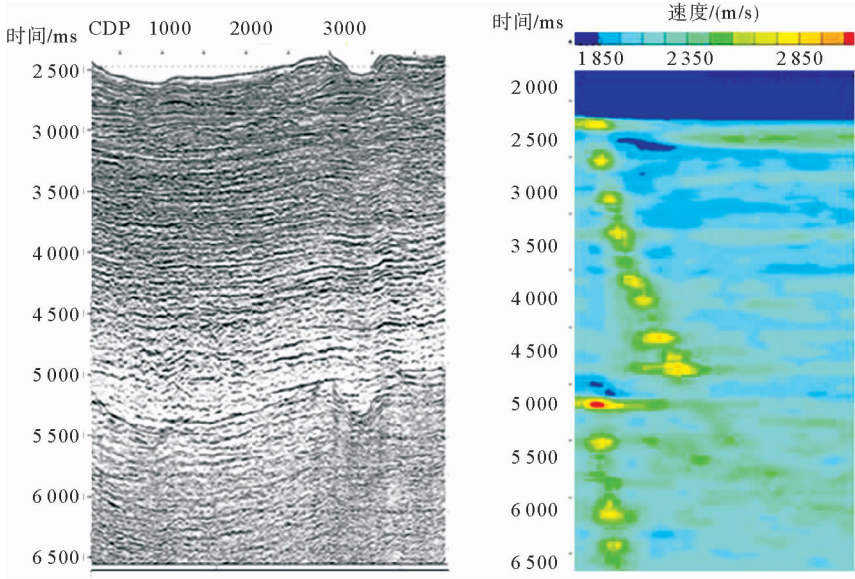
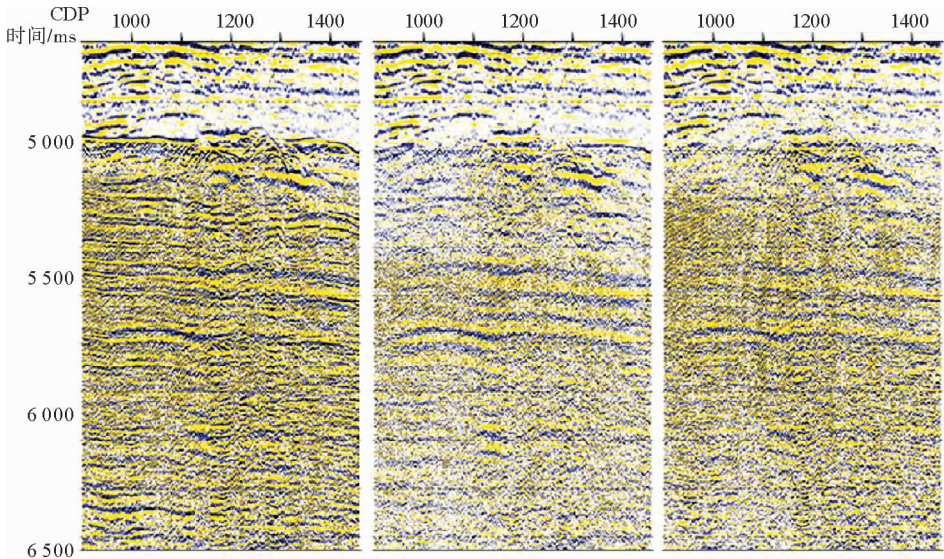


图 10 左:未进行多次波衰减的叠加剖面;右:速度谱

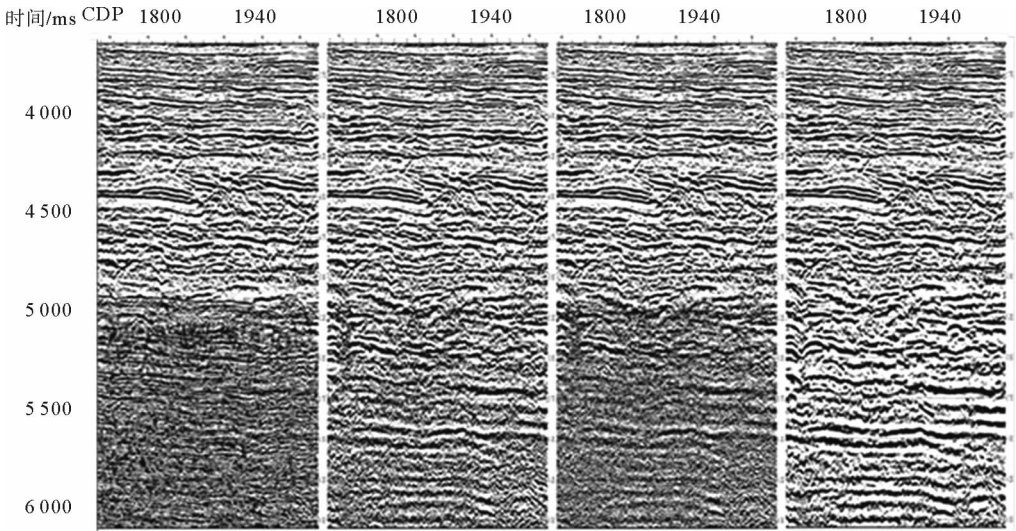
Fig. 10 Left: without de-multiple stack section; Right: Velocity spectrum



左:原始叠加;中:褶积 3D SRME 后叠加;右:波场外推 3D SRME 后叠加

图 11 处理剖面对比

Fig. 11 Stack comparison



(从左到右依次为:原始、褶积 3D SRME、RADON、褶积 3D SRME+RADON)

图 12 衰减多次波的叠加对比

Fig. 12 Stack after de-multiple

压制更加干净。

从 3D SRME 和高分辨率 RADON 衰减多次波的效果分析中可以看出,单用一种方法,3D SRME 是远远优于 RADON,其不需要先知道速度等相关信息,但仍不能达到多次波的完全衰减,两种方法结合使用效果更好,基本可以比较有效去除多次波干扰,使有效波得到较好的呈现,从而更加有利于中深层目标的识别。

3 结论

(1)通过正演结合实际地震资料分析表明,琼东南盆地深水区的多次波类型复杂,且有明显的三维特性。

(2)目前海上拖缆采集的数据普遍近道信息不足,电缆受海况影响产生漂移,通过重构近道,进行规则化校正及插值处理,可使地震多次波模型预测更加精确。

(3)在地震数据采样较好的情况下,或进行一定地震预处理,其褶积 SRME 在复杂深水区的多次波压制效果要明显好于波场外推 SRME。

(4)针对复杂深水区的多次波单一的方法难以完全衰减,采用褶积 3D SRME+RADON 组合压制地震多次波效果明显,但针对性的层间地震多次波压制技术仍需进一步攻关。

致谢:对特普公司同事给予建议及帮助表示感谢,同时向本文所引用文献和资料的作者表示衷心的感谢,他们的研究成果为本论文提供了大量的依据和思路。

参考文献:

- [1] 朱伟林. 南海北部深水油气勘探关键地质问题[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1059-1064.
- [2] Robinson E A. Predictive decomposition of seismic trace [J]. Geophysics, 1957, 22(3): 767-778.
- [3] Backus M M. Water reverberation; their nature and elimination[J]. Geophysics, 1959, 24(5): 23-32.
- [4] 陈瑜, 魏赞, 葛勇. 东海盆地 L 凹陷多次波分析与压制[J]. 中国海上油气, 2004, 16(6): 371-376.
- [5] Ryu J V. Decomposition (DECOM) approach applied to wave field analysis with seismic reflection records[J]. Geophysics, 1982, 47(6): 869-883.
- [6] Thorson J R, Claerbout J F. Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion[J]. Geophysics, 1985, 50(12): 2727-2741.
- [7] Hampson D. Inverse velocity stacking for multiple elimination[C]//56th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts, 1986: 422-424.
- [8] Berkhout A J, Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: Theoretical considerations[J]. Geophysics, 1997, 62(5): 1586-1595.
- [9] Verschuur D J, Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and

- examples[J]. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [10] Dedem E J, Verschuur D J. 3D surface-related multiple prediction: A sparse inversion approach[J]. *Geophysics*, 2002, 70(3): 31-34.
- [11] 孙维嵩,王华忠,胡江涛. 一种基于相似系数谱约束的多次波自适应减法[J]. *石油物探*, 2014, 53(2): 174-180.
- [12] 马继涛,姚逢昌,陈小宏,等. 倾角分解多次波自适应相减方法研究[J]. *石油物探*, 2012, 51(4): 356-361.
- [13] 李振春,刘建辉,郭朝斌,等. 基于扩展伪多道匹配的保幅型多次波压制方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(2): 207-210.
- [14] 宋家文,陈小宏. 基于地表数据分离的层间多次波压制方法[J]. *石油物探*, 2014, 53(1): 1-7.
- [15] CGG 软件. CGG 软件说明文档[CP]: 2003: 23-27.
- [16] 冯全雄,王彦春,李三福,等. t-p 域水体模型驱动压制浅水波[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(1): 41-47.

COMPLEX MULTIPLES AND THEIR SUPPRESSION STRATEGY IN DEEP WATER SEISMIC EXPLORATION IN QIONGDONGNAN BASIN

LIU Jinpeng, FANG Zhongyu, ZHONG Mingrui, ZHAO Ming, DENG MIN, YANG Wei

(CNOOC Energy Technology-Drilling & Production Co., Development &
Prospecting Geophysical Institute, Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

Abstract: Exploration and discoveries have confirmed that oil and gas are rich in deep water areas. However, complex multiples seriously affect the signal-to-noise ratio of the dataset and the quality of images in the middle to deep water areas. Recently, multiple technology based on the theory of multiple wave has rapidly developed. Comparing to the traditional multiple suppression technology including predictive deconvolution and 2D filtering and so on, it requires less prior information and may predict multiple models to attenuate multiples by matching subtraction so as to better preserve the primary amplitudes. However, there are still many difficulties in actual data processing, for examples, losing near offset in shallow water region and the influence of water bottom topography. There need integrated approaches to eliminate multiples with complex wave field. In this paper, we studied the model prediction for multiple attenuation and summarized the differences and application of multiple models.

Key words: deep water; multiple attenuation; character analysis; SNR; Qiongdongnan Basin