

崂山隆起地震资料多次波特征与压制策略

施 剑^{1,2,3,4}, 刘江平¹, 陈建文^{3,4}, 刘 俊^{3,4}, 王小杰^{3,4}

(1 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074; 2 中国地质科学院, 北京 100037;

3 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

4 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘 要:多次波压制是海洋地震资料处理的重要环节。在南黄海盆地崂山隆起区, 印支期以来强烈的改造作用使得中生界遭受大面积整体剥蚀, 部分区域新生界直接叠覆在古生界之上形成不整合屏蔽层。海面、海底及不整合屏蔽层这 3 个强反射系数界面的存在使得该区多次波异常发育, 中—古生界有效反射湮没在多次波干扰中无法识别, 有效地压制多次波已成为本区中—古生界成像的基础和关键。通过理论模拟及实际资料分析, 总结了研究区多次波特征, 认为自由表面多次波、长周期多次波、折射多次波及绕射多次波是主要的多次波类型。对各类型多次波采用了针对性方法进行压制, 介绍了压制方法的基本原理, 并对其适用性进行了评价。针对横跨本区的南北向测线的多次波压制及偏移成像结果表明, 使用的组合压制策略能够较好地压制各类型多次波, 最终提升该区中—古生界的地震成像质量。

关键词:组合压制; 多次波; 崂山隆起; 南黄海盆地

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.10005

位于南黄海盆地中部的崂山隆起是我国近海中—古生界油气勘探的远景区。独特的地质构造格架, 典型的浅水采集环境, 导致其地震资料中的多次波干扰远远多于其他海域, 能否有效地压制多次波已成为提高该区中—古生界地震成像的重要环节。因此, 有必要针对该区的多次波类型、传

播路径及特征进行细致的分析。在此基础上采用组合压制的策略, 针对不同类型的多次波使用适合的压制方法, 才能达到去除多次波、突出深部弱反射的目的。最终获得高质量的地震资料, 为推动该海域的油气勘探进展提供基础和支撑。

1 地质背景

南黄海盆地位于郯庐断裂带以东的下扬子地块东部, 是一个在前震旦系基底之上, 经中—古生代和陆相中—新生代多期沉积叠覆形成的叠合盆地, 也是中国近海唯一一个尚未获得工业性油气流的大型盆地。其陆相中—新生代盆地自北往南分布烟台拗陷、崂山隆起、青岛拗陷 3 个二级构造单元, 从而形成“两拗一隆”的构造格局, 各构造单元具有不同的地质构造发展史和构造层特点^[1-7]。

收稿日期: 2016-08-30

基金项目:国家自然科学基金(41506080, 41506084); 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金(MRE201314); 南黄海油气资源调查(DD20160512); 南黄海前三系油气前景研究(XQ-2005-01); 南黄海海域油气资源普查(GZH200800503); 南黄海崂山隆起和滩海区海相地层油气资源战略选区(XQ-2009-15)

作者简介:施 剑(1984—), 男, 在读博士, 助理研究员, 主要从事海洋地震资料处理方法及应用方面的研究工作。E-mail: shijian_geop@163.com

盆地北侧为千里岩隆起区,其南为勿南沙隆起区(图 1)。

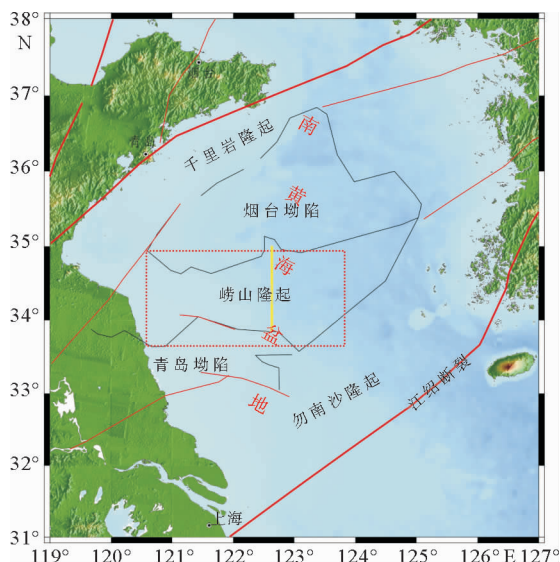


图 1 构造位置

Fig. 1 Map of structural location

崂山隆起,亦有学者称之为中部隆起^[8-10],夹持于烟台凹陷和青岛凹陷之间,大致位于 33°40′ 以北,35°15′ 以南,124°以西,江苏东部海岸线以东海域。该区整体近东西展布,重力异常高,磁力异常以块状平缓变化的正负磁场为特征,磁性基底埋藏>7 km。崂山隆起是探讨中国大陆与朝鲜半岛间地质构造历史和确定扬子板块向海域延伸及海陆关系的关键地区,又是整个南黄海盆地中—古生界油气勘探的有利区和远景区。前人的调查研究表明:崂山隆起发育较为完整的中—古生代海相地层,其古生代地层构造变形相对较弱,是寻找古生代油气藏的有利区^[6, 7, 11]。

崂山隆起目前尚无钻井资料,青岛凹陷内与之邻近的 WX5-ST1 井仅钻至二叠系龙潭一大隆组,其下的古生界多根据地震反射特征及区域地质认识进行推测划分。根据前人的研究成果,崂山隆起可划分为 7 套地层层序,对应的地质属性自上而下分别为第四系—新近系、中—下三叠统、上二叠统、下二叠统—上泥盆统、中—下志留统、奥陶系—震旦系及前震旦系变质岩系。崂山隆起的形成演化大致可划分为前震旦纪基底形成、震旦纪—早古生代克拉通发育、晚古生代—中三叠

世稳定台地—陆内裂陷、晚三叠世—古近纪断陷、新近纪—第四纪拗陷沉降^[6, 9, 10, 12]等 5 个阶段。

2 崂山隆起的多次波特征

印支期以来强烈的抬升改造使得崂山隆起中生界遭大面积整体剥蚀,从而形成了新生界直接覆盖在古生界之上的地层格架。海陆已有的钻测井结果显示,本区中—古生界普遍发育海相碳酸盐岩,并具备速度高、密度变化小的特征。新生界碎屑岩与古生界碳酸盐岩间巨大的阻抗差异形成不整合屏蔽层(T_2 界面),该界面具有分布广、埋藏浅、反射屏蔽强的特点。海面、海底及屏蔽层这 3 个强反射界面的存在使得能量在此之间极易发生多次反射,从而产生多组多阶的多次波干扰。

为了进一步分析其多次波特征,设计了如图 2 所示的模型,主要的海相地层为高速碳酸盐岩夹中速碎屑岩结构。图 3 为理论模拟结果及其与实际单炮资料的对比,可以看到两者具有较好的一致性,有效反射被大量的多次波湮没其中不易识别。理论模拟结果中 3 个界面的有效反射下均跟随大量的短周期多次波,表明地震反射能量到达接收电缆后又在海面 and 海底之间多次振荡。同时,800 ms 处的不整合界面存在多阶强能量的全程多次波,表明大量的地震能量在此处发生多次反射,只有少量的能量能够下传至屏蔽层以下地层界面,进而导致下伏地层有效反射能量弱。由于屏蔽层埋藏过浅,入射角极易达到临界角产生折射波,单炮上可见折射及折射多次波穿插于有效反射之中。

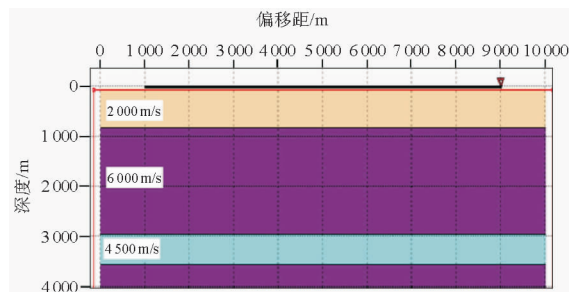


图 2 理论模型

Fig. 2 Theoretical model

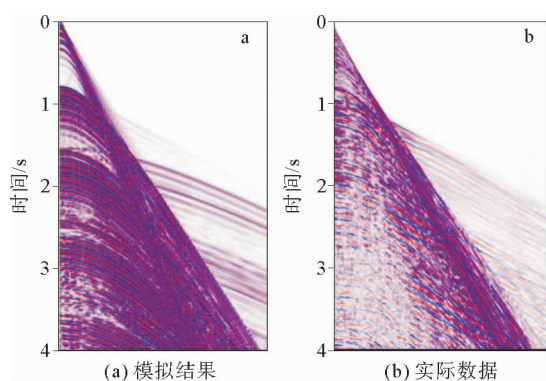


图3 模拟结果与实际资料对比

Fig. 3 Comparison of simulation result and practical shot-gather data

为了进一步说明该区多次波特征,选取了实际资料中典型的速度谱及近偏移距剖面。速度谱及对应的动校正道集可见新生代地层同相轴尚能校平,而 T_2 界面下中—古生代地层被低速的多次波同相轴掩盖,速度谱上显示为近偏移距处的纵向低速能量团,动校正道集显示大量近平行的未校平同相轴(图4)。图5为实际资料近偏移距剖面,可见受强烈的多次波干扰,除海底及 T_2 反射尚可识别外,其他有效反射同相轴均无法辨

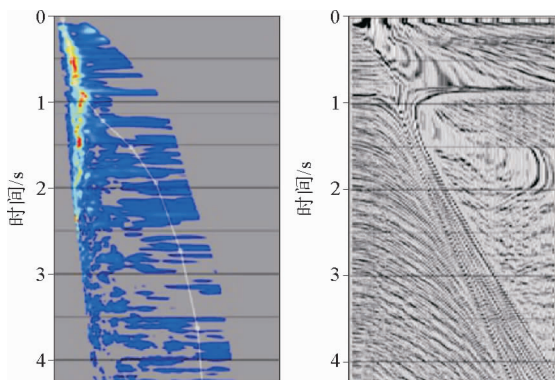


图4 原始数据速度谱与CMP道集

Fig. 4 Velocity semblance and CMP gather of raw data

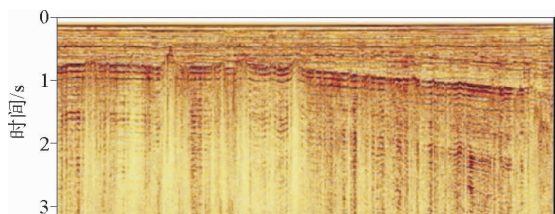


图5 实际资料近偏移距剖面

Fig. 5 Near offset profile of practical seismic data

识。剖面横向上存在明显的振幅强弱变换条带,是多种类型的多次波相互干涉叠合的结果。

对理论模拟结果、实际单炮、速度谱及近道剖面的分析表明,由于特殊的地震地质条件,本区地震资料存在大量的多次波干扰,已严重影响有效反射的正确成像。多次波能量强,阶次高,类型多,既存在短周期的水层多次波,也存在长周期的全程多次波;既存在反射多次波,也存在折射多次波。多次波压制已成为本区地震资料处理的关键环节,多次波压制效果的好坏直接关系到海相中—古生界的地震成像效果。因此,必须采用针对性的压制方法压制各类型多次波干扰,恢复有效反射能量。

3 压制的主要方法

多次波的压制方法可以分为2类:一类是基于一次波和多次波在空间上特征差异的去噪方法,利用两者在地下传播路径的不同形成的速度或者反射结构差异,通过设计多道滤波器来实现多次波压制,F—K滤波、Radon变换滤波方法等均属这一范畴;另一类是基于多次波的周期性和可预测性的去噪方法,这类方法一般分为预测和衰减2个步骤,通过一次波来预测多次波模型,然后再从输数据中减去预测的多次波模型,代表性方法包括SRME(surface related multiple elimination)、逆散射级数法等^[13-16]。

根据本区地震资料的特点,将存在的主要多次波干扰分为自由表面多次波、长周期多次波、绕射多次波和折射多次波,针对这几种多次波类型,采用了不同的压制策略进行压制。

3.1 自由表面多次波压制

传统的自由表面多次波压制方法多采用预测反褶积或SRME方法,两者在浅水区均有一定的局限性。反褶积方法利用多次波的周期性预测滤波方法来消除多次波。但对于时间域炮集,严格意义上的多次波预测步长是无法计算的。 τ — p 域预测反褶积方法能够改善多次波在不同偏移距处的周期性特征,但如果多次波的预测周期内包含周期与其相近的有效波成分,使用该方法存在损伤有效波的风险^[17, 18]。SRME方法无需先验

信息、完全数据驱动的特点使其应用越来越广泛,但它对于输入数据有一定的要求:空间采样较密,近偏移距需要采集信息,规则化采集无羽角。对于崂山隆起地震资料,由于水深多在 100 m 以内的浅水陆架区,地震资料中一近偏移距处海底反射和直达波难以区分,从而使得插值至零偏移距时存在误差。同时,该区地震采集方式以二维为主,在海上采集过程中,电缆中一远偏移距难免受海流影响而偏离设计测线方向形成羽角(图 6),这是海上二维地震资料采集的固有特点。羽角的存在使共反射点发散无法满足 SRME 对规则化采集的要求,从而影响后续的多次波预测^[19]。

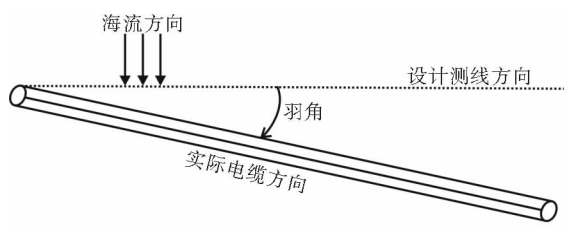


图 6 海洋地震采集羽角的形成

Fig. 6 Formation of feather during marine seismic acquisition

为了更好地压制自由表面多次波,优选了确定性水层多次波压制方法(deterministic water-layer de-multiple, DWD)和 SRME 的组合。首选采用基于波场延拓理论的 DWD 方法来压制自由表面多次波中的水层多次波成分,其基本理论是:利用多次波在 $\tau-p$ 域良好的周期性特征,将数据变换到 $\tau-p$ 域后在水层中延拓一个双程旅行时,从而使一次波变成二次反射波,各阶多次波变成高一阶多次波。不同 p 值处的延拓周期按公式(1)计算:

$$\alpha(p) = \alpha(0)(1 - p^2 v_w^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\alpha(0)$ 为海底反射时间, s;

v_w 为水速, m/s。

图 7 和图 8 分别为利用 DWD 方法压制水层多次波前后单炮和剖面对比。单炮上可见由于地震波在海面和海底间振荡造成的“多轴”现象在压制后变得简单。剖面上明显可见 T_2 界面下的水层多次波反射能量的极大衰减。

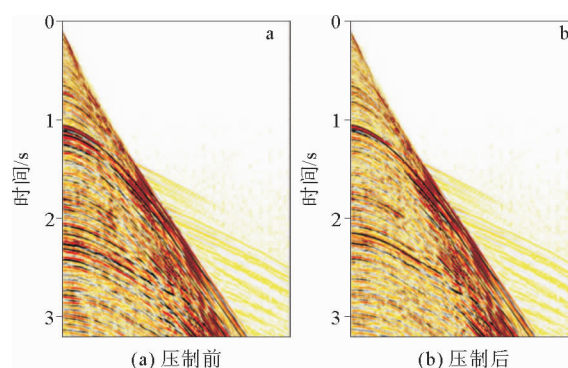


图 7 确定性水层多次波压制前后单炮对比

Fig. 7 Shot-gather comparison with DWD approach

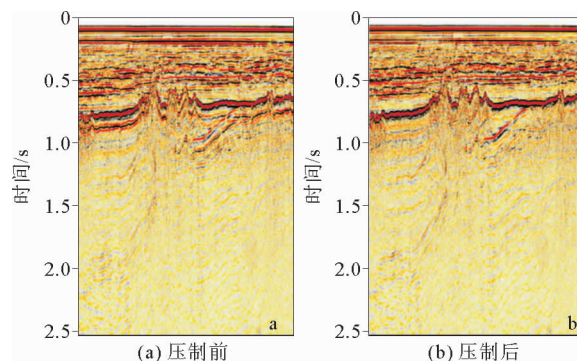


图 8 确定性水层多次波压制前后剖面对比

Fig. 8 Stacking section comparison with DWD approach

DWD 方法主要针对最后的传播路径在海面和海底间的水层多次波。对于非水层的自由表面多次波,可针对切除海底反射后的数据采用 SRME 进行压制,SRME 的方法原理不再赘述^[20, 21]。图 9 和图 10 为 SRME 前后的单炮及剖面,可见经 SRME 后多次波能量进一步减弱,特别是 T_2 界面的全程多次波尤为明显。

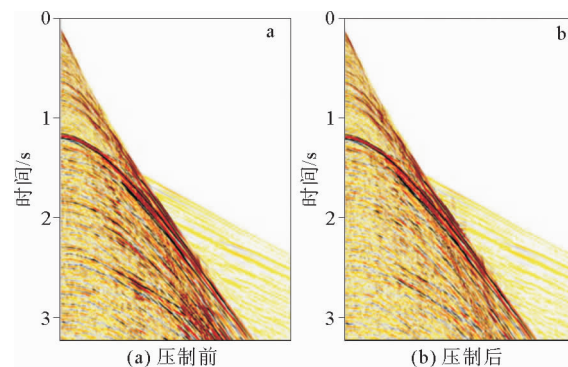


图 9 SRME 前后单炮对比

Fig. 9 Shot-gather comparison with SRME

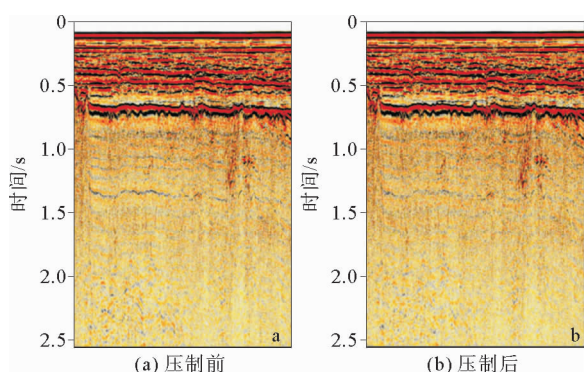


图 10 SRME 前后剖面对比

Fig. 10 Stacking section comparison with SRME

3.2 长周期多次波

部分多次波传播路径在低速层中,旅行时相对于一次反射长,速度相对一次波偏低,时距曲线表现为不同的动校时差。此类长周期多次波多采用抛物线 Radon 变换方法进行压制,对 CMP 道集进行动校正后一次波被校平,多次波可近似为抛物线,因此,通过 Radon 正变换在 $\tau-q$ 域可分离多次波。该方法主要针对的是中—远偏移距多次波,图 11 为 CMP 道集运用抛物线 Radon 变换去多次波前后的对比,可以看到,通过对长周期多次波的有效压制,2.6 s 左右的反射同相轴得以凸显。图 12 为压制前后的剖面对比,可见压制后 T_2 界面下的平层多次波得到大幅衰减,中深层资料成像质量得到提高。

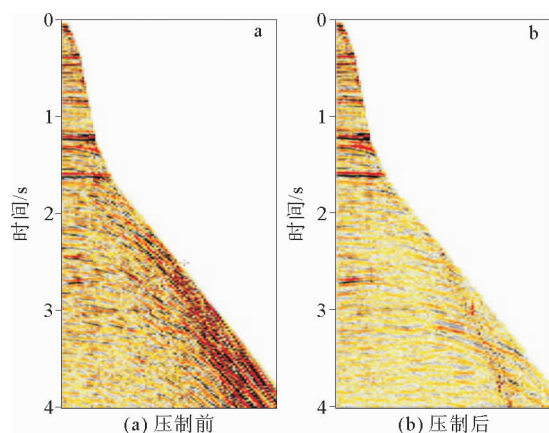


图 11 Radon 变换去多次波前后 CMP 道集

Fig. 11 CMP-gather comparison with Radon transform de-multiple

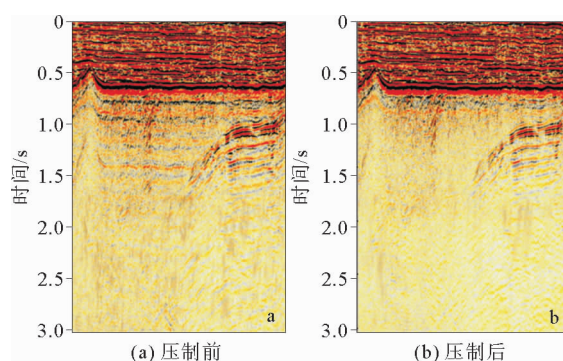


图 12 Radon 变换去多次波前后剖面对比

Fig. 12 CMP-gather comparison with Radon transform de-multiple

3.3 折射多次波

崂山隆起区 T_2 界面埋藏过浅,同时界面上下间存在巨大的波阻抗差异导致入射角极易达到临界角形成折射波,实际资料可见,在较小偏移距时就已出现折射波及折射波多次波,这也是该区地震资料的特点。折射及折射多次波与中—远偏移距同相轴相交,影响了对于中—远偏移距资料的利用。根据折射多次波的线性特点,采用 F—K 滤波方法可对其进行压制。图 13 为折射及折射多次波压制前后的单炮对比,可以看到,压制后远偏移距端的有效反射波阻特征得以显现,利用中—远偏移距资料提高成像质量成为可能。

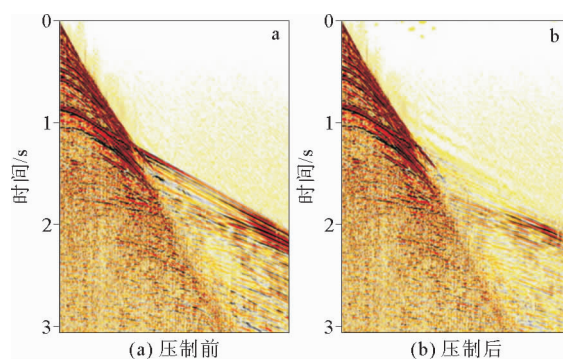


图 13 折射多次波压制前后单炮对比

Fig. 13 Shot-gather comparison with refraction multiple suppression

3.4 绕射多次波

崂山隆起中—古生代地层存在风化剥蚀的不均一,从而使得风化壳面形态多变,剖面上表现为

局部的丘状凸起。凸起处易形成较强的绕射及绕射多次波。针对本区二维浅水地震资料绕射多次波特点,采用了信噪分离的压制思路:首先在共道域将超过一定倾角的绕射多次波进行分离,然后分选到炮集对其进行 F-X 域的绕射多次提取,最后从输入数据中利用减去法去除提取的绕射多次波。同时,在剔除的噪音中再次进行信噪分离,以最大限度地保护有效信号。图 14 和 15 分别为绕射多次波压制前后单炮和剖面的对比,可以看到对成像影响较大的绕射多次波能量得到了较好的衰减,剖面中高频、高倾角的绕射能量得以压制,为后续的偏移成像打下了坚实的基础。

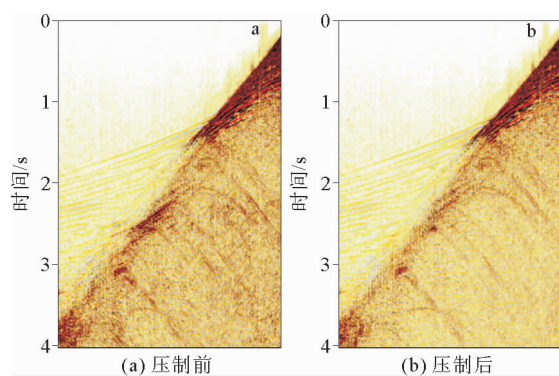


图 14 绕射多次波压制前后单炮对比

Fig. 14 Shot-gather comparison with diffraction multiple suppression

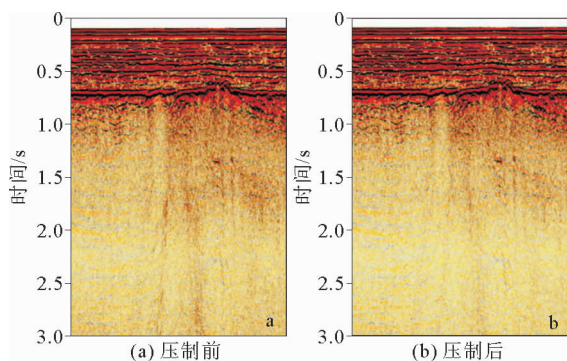


图 15 绕射多次波压制前后剖面对比

Fig. 15 Stacking section comparison with diffraction multiple suppression

4 压制结果

选取过崂山隆起的南北向地震测线,测线位

置如图 1 黄色段,采用上述的多次波组合压制方法进行测试。从图 16 所示初叠加剖面可以看到,虽然叠加的过程也压制了部分多次波,但多次波仍非常发育,导致 T_2 之下除 1.5 s 处隐约可见有效反射外,整个剖面中一古生界有效信号被多次波掩盖。图 17 为经过上述的多次波压制方法组合压制后的叠加剖面,可见多次波能量被压制的较为彻底, T_2 界面以上浅部地层波阻特征更加清晰,深部有效反射得以部分显现,为偏移成像提供了良好的基础数据。最终通过叠前时间偏移成像及叠后处理,中一古生界的反射能量得到极大的增强,显示出多套振幅较强的同相轴(图 18)。特别是 1.8 s 处 2 套极性完全相反的同相轴揭示了从碎屑岩到碳酸盐岩又到碎屑岩的岩性变化引起的正负极性变化,印证了本区海相中一古生界为碳酸盐岩与碎屑岩互层的观点。图 19 为多次波压制前后的速度谱对比,同样可以说明使用本文提出的联合压制策略,能够较好地解决崂山隆起多次波干扰问题,最终提高地震成像质量。

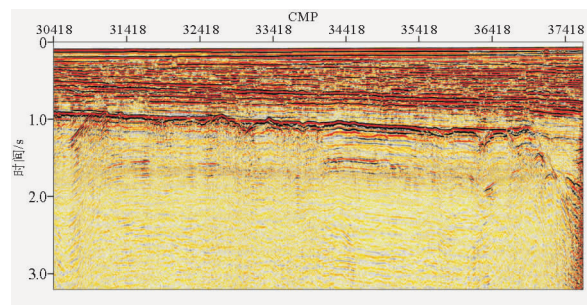


图 16 初叠加剖面

Fig. 16 Stacking section of raw data

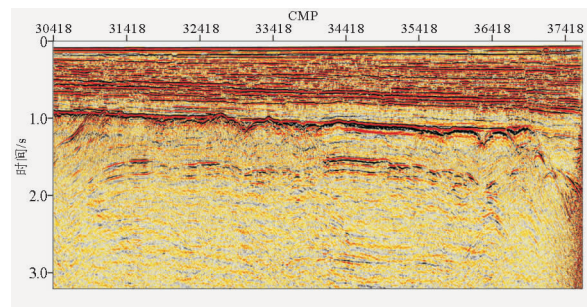


图 17 去多次波后剖面

Fig. 17 Stacking section after multiple suppression

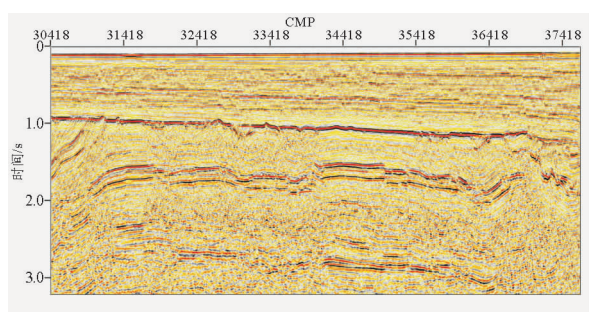


图 18 最终叠前时间偏移剖面

Fig. 18 Final PSTM section

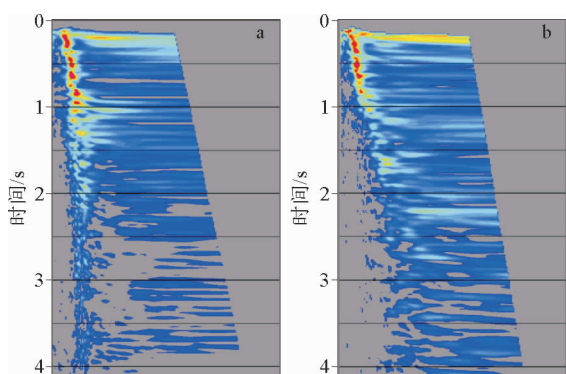


图 19 多次波压制前后速度谱对比

Fig. 19 Velocity semblance comparison

5 结论

通过对崂山隆起地震资料进行多次波特征分析及实际资料多次波压制,得出以下结论:

(1)崂山隆起地震资料多次波极其发育,多次波压制是中—古生界成像的前提和关键;

(2)本区多次波的主要类型包括自由表面多次波、长周期多次波、折射多次波和绕射多次波。其中自由表面多次波是多次波的主要成分,折射多次波发育是本区资料的特点;

(3)采用 DWD 和 SRME 联合的方法可较好地压制本区浅水自由表面多次波;

(4)二维资料绕射多次波压制是多次波压制工作的难点,如何有效地识别和分离绕射多次波而不伤害有效反射,需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 陈建文,龚建明,李刚,等. 南黄海盆地海相中—古生界油气资源潜力巨大[J]. 海洋地质前沿, 2016,32(1): 1-7.

[2] 张海敏,陈建文,李刚,等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009,29(3): 107-113.

[3] 袁勇,陈建文,张银国,等. 南黄海盆地崂山隆起海相中—古生界构造地质特征[J]. 海洋地质前沿, 2016,32(1): 48-53.

[4] 王丰,李慧君,张银国. 南黄海崂山隆起地层属性及油气地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010,30(2): 95-102.

[5] 欧阳凯,张训华,李刚. 南黄海中部隆起地层分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009,29(1): 59-66.

[6] 姚永坚,夏斌,冯志强,等. 南黄海古生代以来构造演化[J]. 石油实验地质, 2005,27(2): 124-128.

[7] 王连进,叶加仁,吴冲龙. 南黄海盆地前第三系油气地质特征[J]. 天然气工业, 2005,25(7): 1-3.

[8] 蔡乾忠. 横贯黄海的中朝造山带与北、南黄海成盆成烃关系[J]. 石油与天然气地质, 2005,26(2): 185-192.

[9] 赵文芳,杨凤丽,庄建建. 南黄海中部隆起中—古生界构造特征分析[J]. 油气藏评价与开发, 2011,1(5): 6-13.

[10] 杨长清,董贺平,李刚. 南黄海盆地中部隆起的形成与演化[J]. 海洋地质前沿, 2014,30(7): 17-21.

[11] 林年添,高登辉,孙剑,等. 南黄海盆地青岛拗陷二叠系、三叠系地震属性及其地质意义[J]. 石油学报, 2012,33(6): 987-995.

[12] 马立桥,陈汉林,董庸,等. 苏北—南黄海南部叠合盆地构造演化与海相油气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2007,28(1): 35-42.

[13] Verschuur D J. 地震多次波去除技术的过去、现在和未来[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.

[14] Weglein A B. Multiple attenuation: an overview of recent advances and the road ahead[J]. The Leading Edge, 1999,18(1): 40-44.

[15] 宋家文, Verschuur D J, 陈小宏. 多次波压制的研究现状与进展[J]. 地球物理学进展, 2014,29(1): 240-247.

[16] 石颖,邢小林. 表面多次波压制的研究进展: 回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2011,26(6): 2046-2054.

[17] 冯全胜,王彦春,李三福,等. $\tau-p$ 域水体模型驱动压制浅水区水层多次波[J]. 石油地球物理勘探, 2015,50(1): 41-47.

[18] 张军华,缪彦舒,郑旭刚,等. 预测反褶积去多次波几个理论问题探讨[J]. 物探化探计算技术, 2009,31(1): 6-10.

[19] 张治忠,李三福,方中于,等. SWMA 与 SRME 组合衰减自由界面多次波技术——在珠江口盆地 A 区的应用[J]. 物探化探计算技术, 2016,38(2): 244-251.

[20] Berkhouit A J, Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: Theoretical considerations[J]. Geophysics, 1997,62(5): 1586-1595.

[21] Verschuur D J, Berkhouit A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples[J]. Geophysics, 1997,62(5): 1596-1611.

CHARACTERISTICS OF SEISMIC MULTIPLES ON THE LAOSHAN UPLIFT AND THEIR SUPPRESSION METHOD

SHI Jian^{1,2,3,4}, LIU Jiangping¹, CHEN Jianwen^{3,4}, LIU Jun^{3,4}, WANG Xiaojie^{3,4}

(1 Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;

2 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources,

Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

4 Laboratory for Marine Mineral Resource, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Multiple suppression is an essential procedure in marine seismic data processing. On the Laoshan Uplift of the South Yellow Sea Basin, The Mesozoic was almost completely denudated since the strong Indo-China movement, and the Cenozoic directly covers the Paleozoic. There are three strong reflection coefficient interfaces, i. e. the sea surface, the sea bottom and the unconformity between the Cenozoic and the Paleozoic. They lead to the formation of various multiples, because of the interference of multiples. As the result, the primary reflection from the Meso-Paleozoic boundary is hard to be effectively identified. Therefore, multiple suppression is the key step to Meso-Paleozoic seismic imaging. Based on the theory of simulation and practical data analysis, we summarized the characteristics of multiples of the area. It is found that there are three main types of multiple in this sea area. They are the surface-related, long period and refraction multiples. These types of multiple are suppressed with appropriate methods described in this paper. The authors introduced the main principle first and then evaluated the applicability of these methods. The removal and migration results of multiples from the south-north survey line across the Laoshan Uplift show that the multiples are suppressed thoroughly with the integrated suppression methods described in this paper and the quality of Meso-Paleozoic seismic imaging is improved.

Key words: joint suppression; multiple; Laoshan Uplift; South Yellow Sea Basin

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部

2013 年 1 月