

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.011

# 南黄海崂山隆起浅水多次波压制及成像分析

刘俊<sup>1,2,3</sup>, 吴淑玉<sup>1,2</sup>, 陈建文<sup>1,2</sup>, 施剑<sup>1,2</sup>, 雷宝华<sup>1,2</sup>

(1. 国土资源部海洋油气资源与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;

2. 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;

3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074)

**摘要:**南黄海崂山隆起的中、新生代碎屑岩与下伏的古生代碳酸盐岩地层分界面是一个强反射界面,对地震波向下传播具有强烈的屏蔽作用,加之海上多次波比较发育,使得深部地震反射能量弱、成像困难。在浅水区,由于缺少近偏移距的海底反射信号,利用常规 SRME(Surface related multiple elimination)方法不能有效地衰减海底相关多次波, Taup 域预测反褶压制制多次波会破坏与海底多次波周期相近的一次有效反射信号,特别在硬海底多次波的振幅能量比海底反射还更强,这种情况下预测反褶积不能完全压制制多次波。采用 DWD+SRME 组合法来衰减海底相关多次波,其中 DWD(deterministic water-layer demultiple)方法用来衰减与海底相关的短周期多次波, SRME 方法压制自由表面相关的长周期多次波,另外运用高精度 Radon 变换去除层间多次波,使多次波得到了良好的压制,深部有效反射信号逐步得以体现。通过以上处理效果揭示了崂山隆起为一个平缓的背斜构造,背斜上发育多个逆冲断裂,崂山隆起是在加里东期形成雏形,印支期隆起形成,燕山期为主要发展阶段。

关键词:浅水区;多次波;DWD+SRME组合法;Radon变换;崂山隆起;南黄海

中图分类号: P631.4      文献标识码: A      文章编号: 0256-1492(2017)03-0111-09

南黄海盆地处于下扬子板块东缘(图1),平均水深50 m,在印支期时随着华南板块向北俯冲,华南板块和华北板块逐渐靠近,至三叠纪拼合在一起<sup>[1,2]</sup>。印支运动的动因除了与华南板块和华北板块的碰撞拼贴及三江地区古特提斯的关闭外,与古西太平洋由晚古生代后期一中三叠世的拉开及中三叠世末转为沿台湾南澳蛇绿混杂岩带向中国东南部的俯冲作用有关<sup>[1]</sup>。中、晚三叠世印支运动使得崂山隆起整体抬升,形成比较平缓的格局,局部遭受少量剥蚀。同时由于苏鲁造山带向南挤压,在崂山隆起西北缘形成逆冲推覆构造带,隆起内NE和近EW向逆冲断裂构造发育。

南黄海盆地崂山隆起是中、新生代盆地的一级构造单元,地层发育一直是海洋石油地质学家关注的焦点,由于该区中、新生界的碎屑岩和古生界的碳酸盐岩地层分界面是一个强反射界面,对地震向下传播具有很强的屏蔽作用<sup>[3]</sup>,同时地震资料多次波

类型十分复杂,除了海底相关多次波外,还存在新近系和古近系界面以下产生的层间多次波,多次波的存在影响地震成像的真实性和可靠性,干扰地震资料的解释<sup>[4]</sup>。

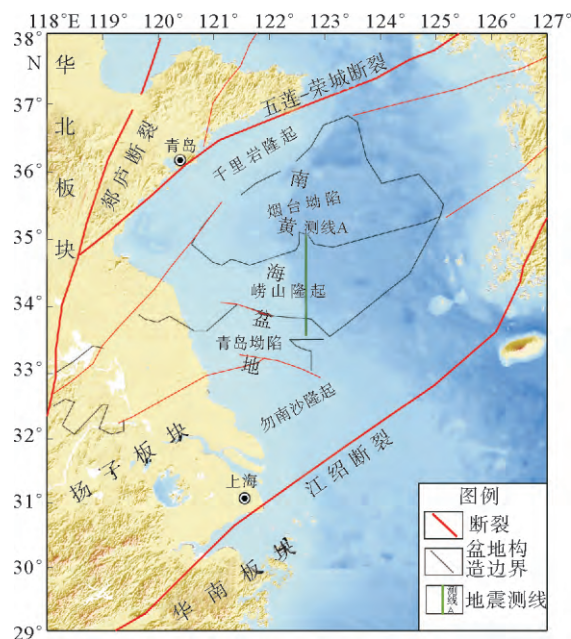


图 1 南黄海盆地区域构造图与测线位置图

Fig. 1 The south Yellow Sea basin tectonic map and survey line locations

基金项目:国家海洋局海底重点实验室基金(KLSG1603);青岛市市南区科技发展资金项目基金(2016-3-009-ZH);国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金(MRE201318, MRE201121);南黄海油气资源调查(DD20160512);国家自然科学基金项目(41476053)

作者简介:刘俊(1978—),男,高级工程师,从事地震资料采集与处理,E-mail:vnli@163.com

收稿日期:2016-04-21;改回日期:2016-07-12. 文凤英编辑

为了改善地震资料中—古生界地震成像效果,浅水多次波压制是该区地震资料处理的关键环节。多次波一般分为长周期多次波和短周期多次波,短周期多次波包括虚反射、表层多次波和微屈多次波;长周期多次波主要指全程多次波和强波阻抗界面产生的层间多次波<sup>[5,6]</sup>。

对于短周期多次波压制传统方法主要有 SRME(Surface related multiple elimination)和预测反褶积方法,但在海洋拖缆地震的浅水海区调查中,由于水深很浅,直达波的初至时间与海底反射波时间很接近,地震资料中很难分辨海底反射信号,同时由于最小偏移距的存在,一般最小偏移距比水深大很多(如最小偏移距一般 100 m 以上,而水深一般只有 50 m),缺少近偏移距的海底反射信息,因此直接采用预测相减法,如 SRME 方法不能有效地衰减海底多次波,主要因为:①浅海海底反射与直达波不能完全区分,最小偏移的存在,导致插值后的近偏移距海底反射不够准确,预测多次波模型时受影响;②预测的多次波模型存在互相干涉现象,在自适应匹配相减阶段,道集与多次波模型能量不易匹配,容易伤害有效波<sup>[7]</sup>。对于海底多次波衰减,采用预测反褶积也可以取得一定的效果,但反褶积会破坏与海底多次波周期相近的一次有效反射信号,特别是在硬海底,多次波的振幅能量比海底反射还强的情况下,预测反褶积方法的效果不够好。

本文针对南黄海崂山隆起地震资料多次波的特殊性,对于海底相关多次波,采用两步法来衰减,第一步采用 DWD(Deterministic water-layer demultiple)方法,来衰减与海底相关的短周期多次波,第二步采用常规 SRME 方法压制剩余的长周期自由表面多次波,通过应用 DWD+SRME 方法,海底相关的多次波得到了很好的压制;对于层间多次波,则采用高精度 Radon 域多次波衰减方法来进行压制,通

过多轮多次波压制,多次波得到了较好的衰减,最后采用叠前时间偏移使深部有效地层反射得到较好的成像。

## 1 多次波特征分析

南黄海崂山隆起区水深较浅,新近系和古近系界面为一强阻抗界面( $T_2$ ),多次波类型较多,主要为与海底相关的短周期多次波、海底相关的长周期多次波和层间多次波(图 2)。选取穿越崂山隆起南北向地震测线 A 进行分析(图 1),从最小偏移距的共炮检距剖面上看(图 3),多次波干扰比较严重,在新生界以下无法识别有效反射信号,海底相关多次波与强阻抗界面(新近系和古近系界面)产生的多次波混叠在一起,多次波类型以短周期为主。

## 2 主要方法原理

南黄海崂山隆起区水深较浅,同时存在强阻抗界面,使得地震资料多次波类型丰富,为了更好地压制多次波,首先通过自相关拾取精确的海底反射时间(海底多次波周期),然后采用 DWD+SRME 组合方法,压制海底相关的多次波;对于层间多次波,采用高精度 Radon 多次波衰减方法来进行压制。

### 2.1 海底多次波周期拾取

该地震测线水深范围为 26~56 m,由于水深较浅,海底反射波与直达波旅行时差较小,不能完全区分,在共炮检距剖面上(图 4)只有左侧能够识别直达波和海底反射波,但在右侧直达波与海底反射波重叠在一起,无法拾取准确的海底反射时间,不能反映海底多次波的真实周期。

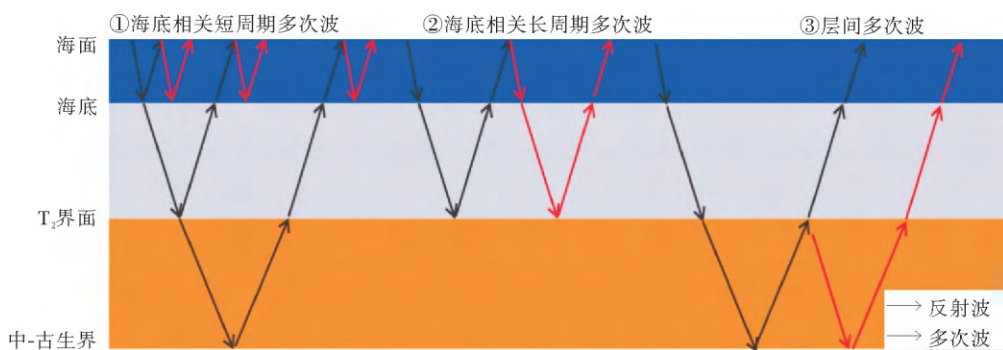


图 2 南黄海崂山隆起多次波示意图

Fig. 2 Sketch showing various multiples on the Laoshan uplift of south Yellow Sea



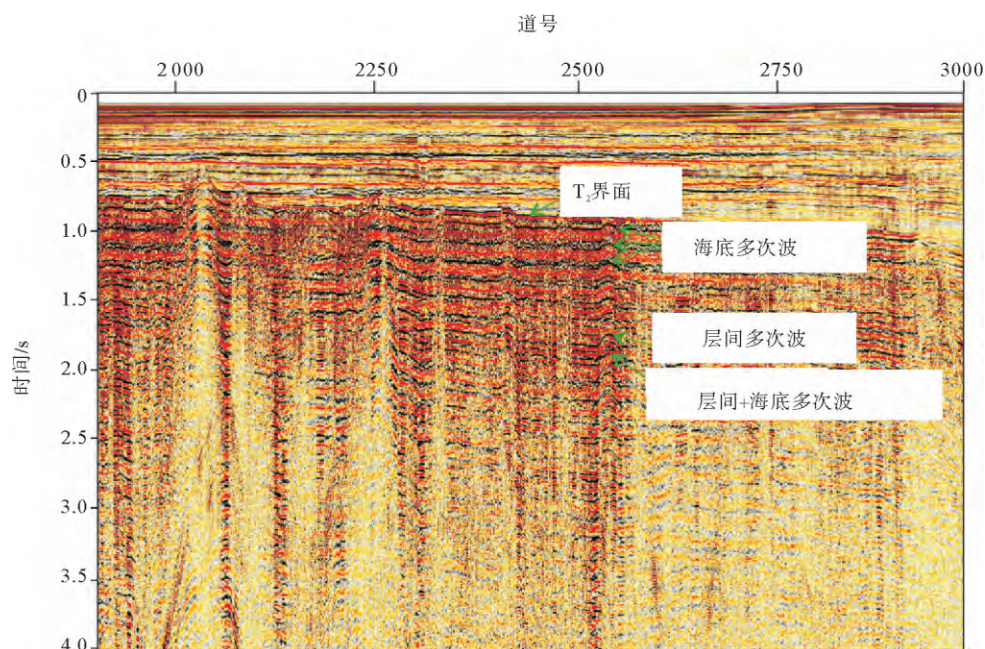


图 3 最小偏移距的共炮检距剖面

Fig. 3 Common-offset profile of minimum offset

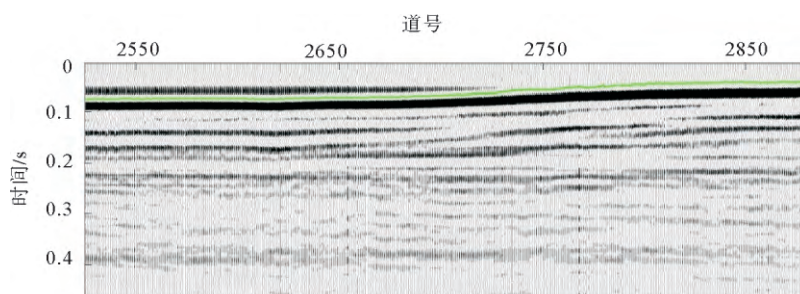


图 4 共炮检距剖面

Fig. 4 Common-offset profile

众所周知自相关谱上可以直观地显示多次波的周期变化,因此,在共炮检距剖面拾取海底反射时间的基础上,选取合适的时窗,进行自相关分析,在自相关谱上,在已拾取的海底反射时间约束下,提取地震最大振幅属性来自动拾取海底多次波周期。由图 5

可以看出,仅根据共炮检距剖面上拾取的时间与真实的海底多次波周期还存在一定差异,而通过自相关谱上最大振幅属性提取获得的时间与自相关谱上多次波同相轴非常吻合,表明提取的海底多次波周期非常准确,为下一步海底多次波的压制奠定了基础。

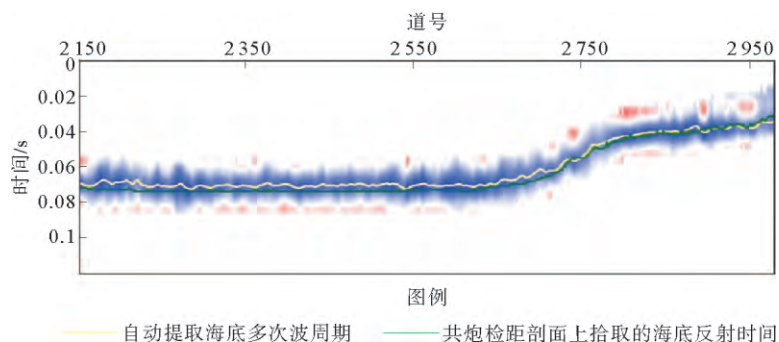


图 5 自相关谱上自动提取海底多次波周期

Fig. 5 Submarine multiple cycles automatically extracted from autocorrelation spectra

## 2.2 海底相关多次波压制方法

DWD(Deterministic water-layer demultiple)是浅水区压制多次波的有效方法,该方法与传统反褶积压制多次波的方法相比,避免了反褶积对资料造成的“伤害”;DWD 与 SRME 方法相比,对近道数据的要求更低,更易于实现,并且更适合浅水海洋环境地震资料的处理<sup>[8-10]</sup>。DWD 方法首先通过自相关分析获得海底多次波周期时间,然后变换到 Taup 域计算海底多次波周期,将数据静校正到一阶多次波,乘以测算的反射系数,采用自适应相减,再经过 Taup 反变换,得到海底多次波模型,最后通过自适应相减,来压制海底相关的短周期多次波(图 6)。

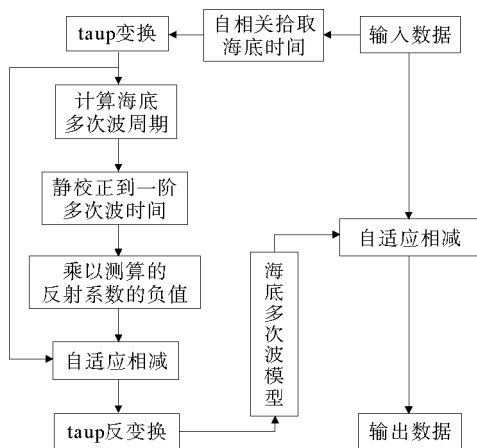


图 6 DWD 方法工作原理

Fig. 6 The principle of DWD method

DWD 方法对海底相关的短周期多次波可以较好地压制,但还存在自由表面相关的长周期多次波,该类多次波可以用 SRME 方法来进行压制,在使用 SRME 方法前,需要对海底反射进行切除<sup>[11-13]</sup>,避免 SRME 对短周期多次波再次预测。

SRME 方法基于波动方程的多次波衰减方法<sup>[14]</sup>。在均匀介质模型下,把地震波在地下介质的脉冲响应定义为  $x_0(t)$ ,它包含了地下所有有效波和层间多次波,那么一阶表面多次波可表示为:

$$m_1(t) = -x_0(t) * x_0(t) \quad (1)$$

同理,二阶表面多次波表示为:

$$m_2(t) = -x_0(t) * m_1(t) =$$

$$x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) \quad (2)$$

因此,所有表面相关多次波可以由整个响应与一次反射褶积得到,这种通过地震数据自身褶积,一次反射波变成多次波,低级多次波变成高级多次波,

这样就可以同时预测出自海底表面向下反射的一次或多次的所有与表面有关的多次波。SRME 方法适用于压制长周期的海底相关多次波,最大的优势是预测过程不需要知道地下介质信息<sup>[14,15]</sup>,缺点是要求待处理的地震数据中包含从零炮检距到最大炮检距的全波场地震数据<sup>[14]</sup>。

## 2.4 层间多次波压制方法

Radon 变换是基于一次波与多次波速度时差的滤波方法<sup>[16,17]</sup>。对 CMP 道集进行动校后,一次波同相轴被拉平,多次波同相轴呈向下弯曲状,把动校后的 CMP 道集进行 Radon 正变换后,一次波能量分布在零 P 道附近,而多次波能量呈弯曲条带状分布在远离零 P 道的地方<sup>[16]</sup>,这样就可以在  $\tau-p$  域中把多次波从地震资料中分离出来。该方法分辨能力强、振幅和相位的保真性好,其缺点是可能损伤浅层的高频成分,且对近道的多次波压制相对不足<sup>[14]</sup>。

抛物线 Radon 正变换公式:

$$v(\tau, q) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t = \tau + qx^2, x) dx \quad (3)$$

反变换公式:

$$u(t, x) = \int_{-\infty}^{\infty} v(\tau = t - qx^2, q) dq \quad (4)$$

式中:  $u(t, x)$  是在时空域数据,  $v(\tau, q)$  是抛物线 Radon 域数据,  $q$  是以零偏移距为中心的抛物线的曲率;  $\tau$  是抛物线在时间轴的截距。

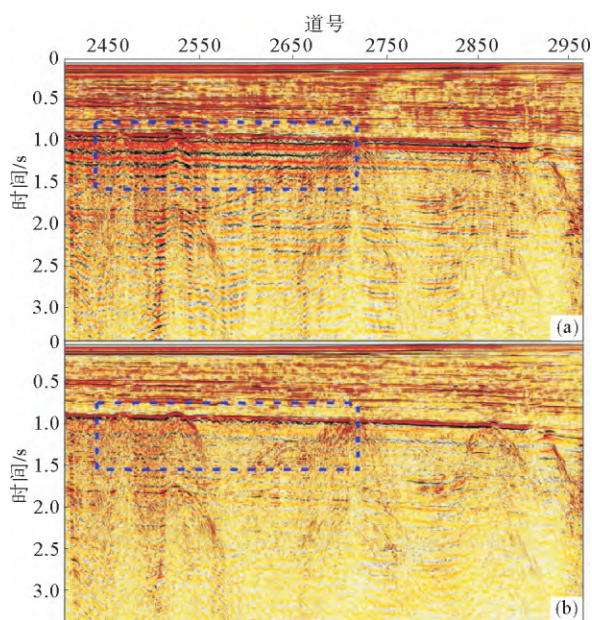
## 3 多次波压制效果分析

### 3.1 DWD+SRME 组合方法

南黄海崂山隆起区水深较浅,海底相关的多次波发育,首先采用确定性水层多次波压制方法(DWD),对海底相关的短周期多次波进行压制,通过 DWD 方法压制多次波后,与海底相关的短周期多次波得到了较好的压制(图 7(b)),特别是强阻抗界面(新近系和古近系界面)的海底相关短周期多次波压制效果明显,从图 7(b)蓝色虚线框中可以看出,海底相关多阶多次波得到了衰减,这种海底相关的短周期多次波压制,改善了地震剖面的波组特征。

在 DWD 方法去除短周期海底相关多次波的基础上,采用 SRME 技术对自由表面长周期的多次波进行压制,图 8(a)为 DWD+SRME 组合去除多次波后的叠加剖面,从剖面上可以看出海底相关的多次波得到了很好的压制,波组特征较好,与常规的



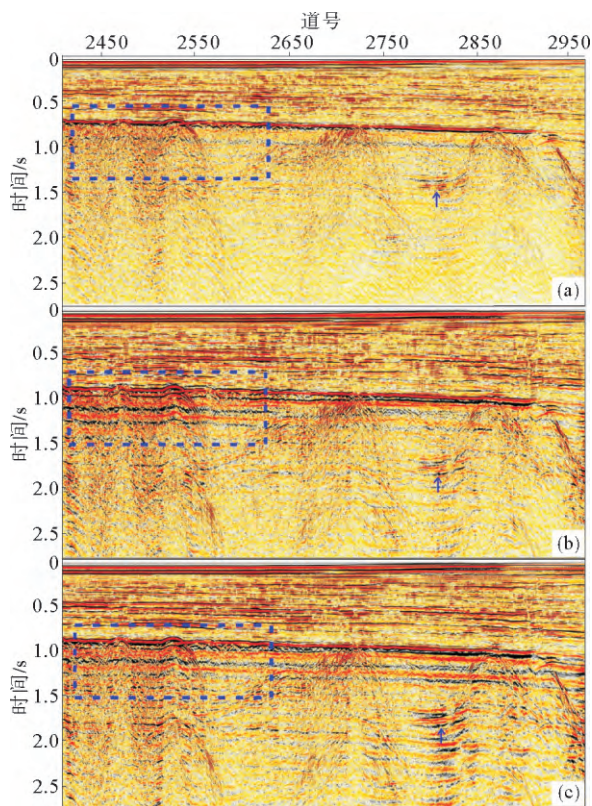


a. 去多次波之前剖面; b. DWD 后剖面

图 7 DWD 压制多次波效果分析

Fig. 7 Effectiveness analysis of multiple waves suppressed by DWD method

(a) profile before multiples wave depression; (b) profile after DWD



(a) DWD+SRME 组合后叠加剖面; (b) SRME 后

叠加剖面; (c) Taup 域预测反褶积后叠加剖面

图 8 DWD+SRME 组合去多次波对比分析

Fig. 8 Comparison analysis after multiples wave depression with combined DWD and SRME methods

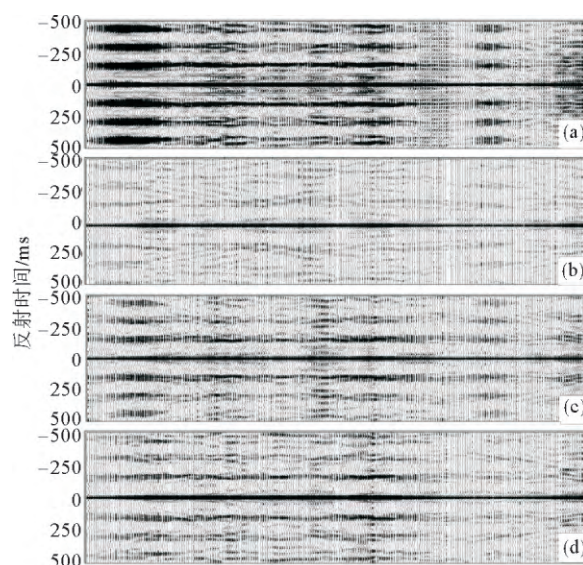
(a) Stack profile after DWD and SRME methods;

(b) Stack profile after SRME method;

(c) Stack profile after Taup domain predictive deconvolution

SRME 方法相比(图 8(b)),剖面上 1~1.5 s 处, DWD+SRME 组合去多次波法对强阻抗界面产生的多次波压制较好;而采用 Taup 域预测反褶积去除多次波(图 8(c)),剖面上深部还存在比较明显的多次波。

分别对以上 3 种去多次波后的叠加剖面做自相关分析,从自相关谱上(图 9)来看, DWD+SRME 组合法压制海底相关多次波取得了良好的效果,图 9(b)中主要能量集中于零时间处,两侧的同相轴较少;图 9(c)中,零时间的两侧还存在短周期的同相轴,说明 SRME 方法没有完全去除短周期的海底相关多次波; Taup 域预测反褶积方法后,自相关谱上存在间隔时间较大的同相轴,表明长周期多次波衰减不彻底。



(a) 去多次波前; (b) DWD+SRME 组合去多次波后;

(c) SRME 去多次波后; (d) Taup 域预测反褶积去多次波后

图 9 DWD+SRME 组合去多次波后自相关谱对比分析

Fig. 9 Comparison analysis of Spectrum autocorrelation after DWD and SRME methods to suppress multiples wave

(a) Spectrum autocorrelation before multiples wave depression;

(b) After multiples wave depression with combined DWD

and SRME method; (c) After multiples wave depression

with SRME method; (d) After multiples wave depression

with Taup domain predictive deconvolution

通过对 DWD+SRME 组合法、SRME 方法和 Taup 域预测反褶积去除多次波的效果对比,表明在浅水区,采用 DWD+SRME 组合法压制海底相关多次波效果较好, DWD 方法主要压制海底相关的短周期多次波, SRME 方法用来衰减自由表面相关的长周期多次波。



3.2 Radon 变换

在压制海底相关多次波的基础上,对于剩余的层间多次波采用 Radon 变换来进行衰减,由于地震资料信噪比较低,在速度谱上(图 10(a)),1.2 s 以下无法识别有效的能量团,存在严重的多次波干扰,有效信息基本被多次波湮没,很难从速度谱上获取可靠的速度,经过 DWD+SRME 组合去除多次波后(图 10(b)),速度谱上多次波能量得到一定衰减,1s 以下的有效波能量团逐步显现出来,采用 Radon 变换去除多次后(图 10(c)),有效波的能量信息得到很大的提升,多次波信息基本被压制干净。

图 11 为 Radon 变换衰减多次波后,经过叠前时间偏移的叠加剖面,剖面上多次波基本被压制,在 2.5 s 附近有效反射同相轴得到了体现,可以看出在南黄海低信噪比资料中,多次波压制非常关键,采用 DWD+SRME 组合压制多次波和 Radon 变换衰减多次波方法,在该研究区是比较适用的。

4 地质解释

南黄海盆地崂山隆起地震资料深部中—古生界地震成像较弱,波组不连续—较连续,原因主要是经历了多期构造运动改造。在晚印支—早燕山时期华

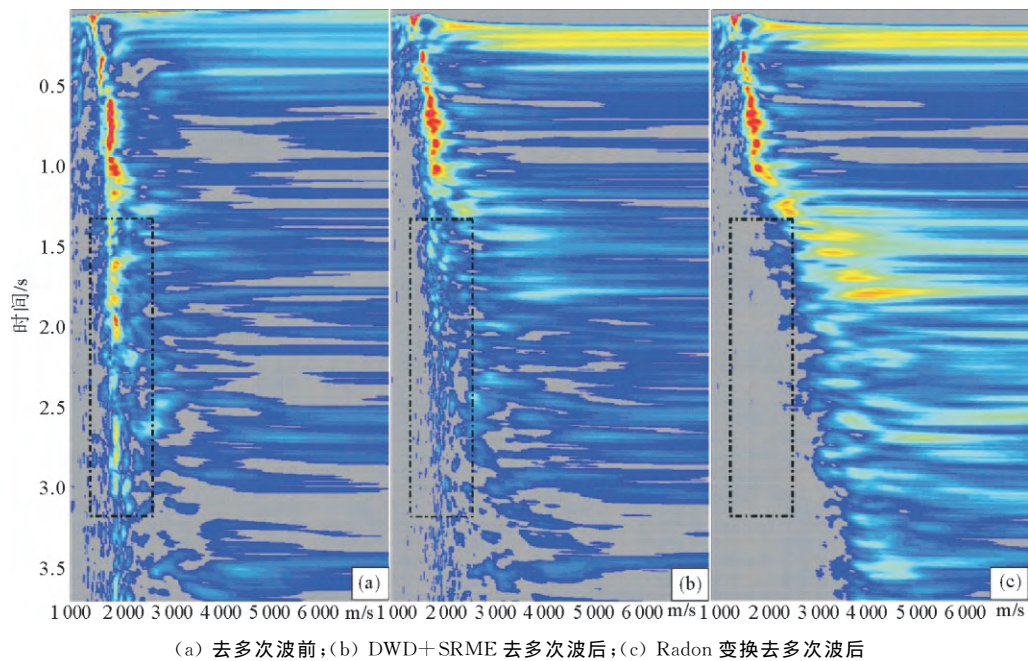


图 10 Radon 变换去除多次波速度谱分析

Fig. 10 Velocity spectrum analysis after multiples wave depression with Radon transform  
(a) Before multiples wave depression; (b)After multiples wave depression with combined DWD and SRME methods; (c)After multiples wave depression with Radon transform

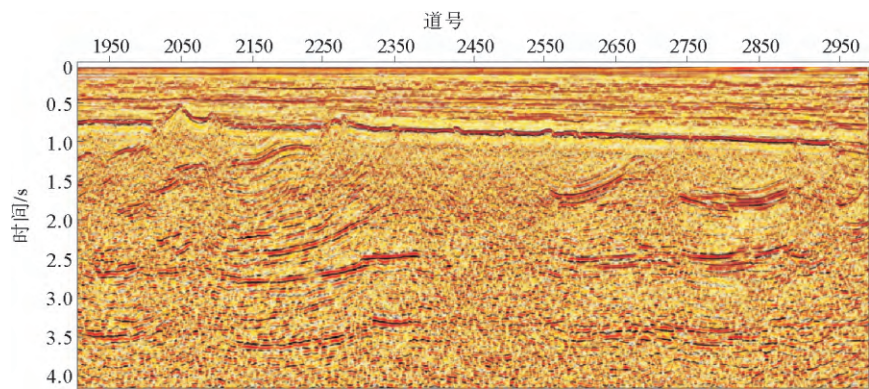


图 11 Radon 变换去多次波后叠前时间偏移剖面

Fig. 11 Prestack time migration profile after multiples wave depression with Radon tranform

南板块继续向华北板块之下俯冲,陆-陆碰撞造成秦岭-大别-胶南造山带隆升,产生前陆盆地,造山带南侧发生了扬子板块北缘前陆盆地<sup>[18]</sup>,该期的构造运动使得崂山隆起基本定型,同时断裂的逆冲活动加剧,造成部分海相中—古生界的缺失<sup>[19]</sup>;晚燕山至早喜马拉雅期扬子地区为张性构造环境,由于太平洋板块对欧亚板块俯冲产生的弧后拉张效应与燕山期挤压冲断后的应力松弛有关<sup>[20]</sup>,崂山隆起的北缘早期的逆冲断裂呈现负反转,形成早白垩世—古近纪的断陷;渐新世—中新世时期,印度板块和欧亚板块最终碰撞拼接,以及菲律宾板块的吕宋弧与欧亚板块斜向碰撞,南方遭受强烈挤压<sup>[21]</sup>,古近系的回返,伸展构造被掀斜或褶皱、剥蚀,形成古近系和新近系之间的角度不整合,断裂活动减弱,崂山隆起形成新近纪以来的区域性覆盖沉积。

崂山隆起为刚性的结晶基底,为稳定地块<sup>[22]</sup>,基底之上具有上、中、下三元结构<sup>[23]</sup>(图 12,地质剖面测线位置图见图 1),上部为第四系—新近系构造层;中部为古近系—泥盆系构造层,位于下志留统高

家边组滑脱面之上,构造相对复杂,以滑脱、冲断结构为主,褶皱及逆冲叠瓦断裂发育;下部为志留系—震旦系构造层,位于下志留高家边组滑脱面之下,内幕反射层比较简单,断裂不发育,地层较平缓,构造变形相对较弱<sup>[24]</sup>。崂山隆起在加里东和海西期造成了区内幅度不大的差异沉降,其中在加里东期开始初步隆升,海西期出现凹凸锥形,局部还形成了逆冲作用不强的逆断裂,但总体上这两期的构造运动对崂山隆起的改造作用不强。

崂山隆起总体是一个比较平缓的箱状背斜构造,由于逆冲推覆作用,隆起上发育多个逆冲背斜构造(图 12),EW 向断裂是崂山隆起上的主体断裂,断裂规模较大,控制了崂山隆起的边界和主要构造轮廓,早期 NE 向和 NW 向断裂为一对共轭断裂,后期被卷入盖层滑脱。隆起上海相中、古生代地层发育齐全,且厚度较大,古生代发育一套陆棚—台缘斜坡相沉积,在印支—早燕山时期大规模隆升、剥蚀,局部缺失上古生界、中生界大部分地层。

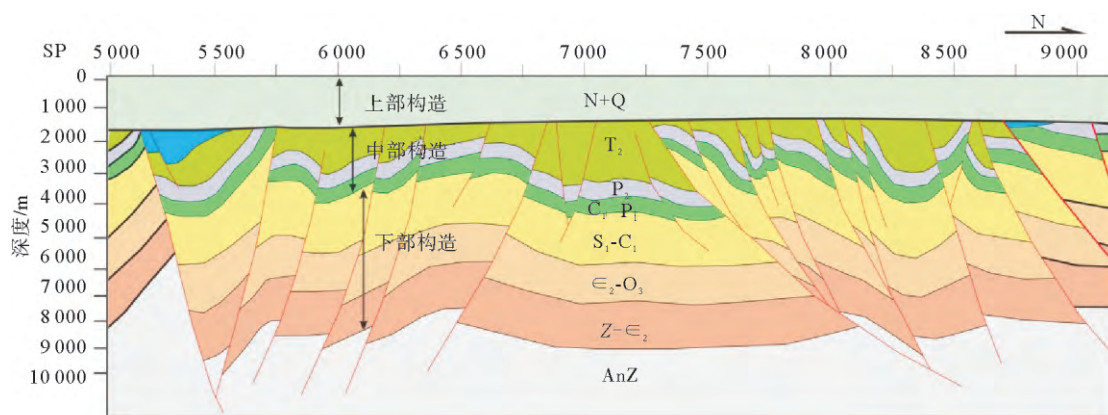


图 12 南黄海崂山隆起地震解释剖面 (据文献[25])

Fig. 12 Seismic interpretation profiles of Laoshan Uplift of the South Yellow Sea Basin

## 5 结论

(1) 南黄海地震资料多次波类型丰富,除了海底相关的多次波外,还存在强阻挡界面(新近系和古近系界面)产生的层间多次波,另外信噪比较低,深部有效的反射信号弱,给多次波压制、目的层成像工作带来了极大困难。

(2) 采用 DWD+SRME 组合法应用于南黄海地震资料,通过与 SRME 方法、Taup 域预测反褶积方法去除多次波的效果对比分析,表明 DWD+SRME 组合法适用于南黄海地震资料,该方法有效地去除了海底相关多次波,并且没有损害有效的一

次反射信号。采用 Radon 变换较好地衰减了层间多次波,在速度谱上,有效信号能量团得到了加强,采用叠前时间偏移技术,使深部地层有效反射信号得到较好成像。

(3) 通过地震资料构造分析崂山隆起是一个比较平缓的箱状背斜构造,背斜上发育多个逆冲断裂,在加里东期初具雏形,印支期隆起形成,整体抬升,形成比较平缓的格局;晚印支—早燕山隆起大幅度抬升,格局基本定型,并形成滑脱构造;晚燕山—喜山早期,北缘早期逆冲断裂负反转活动,形成晚白垩—古近系断裂;新近纪开始断裂活动减弱,崂山隆起形成新近纪以来的区域性覆盖沉积。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵宗举, 俞广, 朱琰, 等. 中国南方大地构造演化及其对油气控制[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(2): 155-168. [ZHAO Zongju, YU Guang, ZHU Yan, et al. Tectonic evolution and its control over hydrocarbon in southern China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(2): 155-168.]
- [2] 梅廉夫, 戴少武, 沈传波, 等. 中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J]. 地质科技情报, 2008, 27(4): 1-7, 14. [MEI Lianfu, DAI Shaowu, SHEN Chuanbo, et al. Formation and disintegration of Mesozoic-Cenozoic intra-continental ramp zone in Middle and Lower Yangtze Region[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(4): 1-7, 14.]
- [3] 董思友. 南黄海地震资料多次波形成机理及压制技术研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2010. [TONG Siyou. The formation mechanism and the suppression technology study of multiple wave of the South Yellow Sea seismic data[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2010.]
- [4] 牛滨华, 沈操, 黄新武. 波动方程多次波压制技术的进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 480-485. [NIU Binhua, SHEN Cao, HUANG Xinwu. Progress in multiple attenuation techniques based on wave equation[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(3): 480-485.]
- [5] 陈见伟, 庄锡进, 胡冰, 等. 多次波压制组合技术在海洋地震资料处理中的应用[J]. 海相油气地质, 2011, 16(1): 68-73. [CHEN Jianwei, ZHUANG Xijin, HU Bing, et al. Application of the combination method to multiple attenuation in marine seismic data processing[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(1): 68-73.]
- [6] 张洪昌. 衰减多次波的几种方法[J]. 中国海上油气. 地质, 1996, 10(4): 261-265. [ZHANG Hongchang. Methods to attenuate multiples[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(4): 261-265.]
- [7] 范宝仓, 谢涛. 部分去除表面多次波技术在浅水海域的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(12): 73-75. [FAN Baocang, XIE Tao. The application of partial SRME in Shallow Sea[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(12): 73-75.]
- [8] 刘俊, 吴淑玉, 高金耀, 等. 南黄海中部浅水区多次波衰减技术及其效果分析[J]. 物探与化探, 2016, 40(3): 568-577. [LIU Jun, WU Shuyu, GAO Jinyao, et al. An effectiveness analysis of multiple depression technique in the shallow water of the central uplift in South Yellow Sea[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 568-577.]
- [9] 张亚斌, 施荣富, 姚刚. Q-Marine 技术和特色处理技术在东海海域油气区的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(6): 47-52. [ZHANG Yabin, SHI Rongfu, YAO Gang. Application of Q-Marine seismic exploration technology and specialized processing technology in Donghai oil and gas area[J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2013, 35(6): 47-52.]
- [10] 张志军, 魏天罡. 浅水多次波的联合衰减技术在渤海海域 LD 地区的应用[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(1): 59-65. [ZHANG Zhijun, WEI Tian'gang. Application of joint shallow-water multiple attenuation technique in LD zone of Bohai sea[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(1): 59-65.]
- [11] Moore I, Bisley R. Multiple attenuation in shallow-water situations [C]//68th EAEG Meeting, Expanded Abstracts, F018. Vienna, Austria: EAEG, 2006.
- [12] Chauhan S, Djmaludin I, Pham L, et al. Surface multiple attenuation in shallow water, case study on data from the Bonaparte Basin, Australia [C]//10th Biennial International Conference & Exposition. Le Meridien, Kochi: International Convention Center, 2013.
- [13] Hung B, Yang K L. Workflow for surface multiple attenuation in shallow water [C]//International Petroleum Technology Conference. Bangkok, Thailand: International Petroleum Technology Conference, 2011.
- [14] 郭梦秋, 赵彦良, 左胜杰, 等. 海上地震资料处理中的组合压制多次波技术[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(4): 537-544. [GUO Mengqiu, ZHAO Yanliang, ZUO Shengjie, et al. Combined multiple attenuation in marine seismic data processing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(4): 537-544.]
- [15] 肖二莲, 陈瑜, 万欢, 等. SRME 多次波衰减方法在海洋地震资料中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1057-1064. [XIAO Erlan, CHEN Yu, WAN Huan, et al. Surface-related multiple elimination on marine seismic data[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 1057-1064.]
- [16] 王立歆, 李强, 姬小兵, 等. 用 Radon 变换法消除沙丘鸣震的应用及效果分析[J]. 石油物探, 2002, 41(1): 88-91. [WANG Lixin, LI Qiang, JI Xiaobing, et al. Application of Radon transformation to elimination of dune ringing and its effect analysis[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1): 88-91.]
- [17] 黄兆林. SRME 与 Radon 滤波方法组合衰减深水多次波[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(6): 659-665. [HUANG Zhaolin. Multiple attenuation in deep water seismic exploration with combined application of SRME and Radon filtering[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(6): 659-665.]
- [18] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247. [ZHANG Yueqiao, XU Xianbing, JIA Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 234-247.]
- [19] 李慧君, 林年添, 金兴, 等. 南黄海盆地崂山隆起中、古生界断裂特征[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(6): 69-75. [LI Huijun, LIN Niantian, JIN Xing, et al. The fracturing characteristics of Mesozoic and Paleozoic Eras in Laoshan uplift of South Yellow Sea Basin[J]. Journal of



- Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(6): 69-75.]
- [20] 叶舟, 梁兴, 马力, 等. 下扬子独立地块海相残留盆地油气勘探方向探讨[J]. 地质科学, 2006, 41(3): 523-548. [YE Zhou, LIANG Xing, MA Li, et al. An approach to exploration direction of oil gas in the marine residual basins of independent lower Yangtze block[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(3): 523-548.]
- [21] Stephan J F. 晚始新世以来台湾-吕宋-民都洛地带的地球动力学演化[J]. 地球物理学进展, 1987, 2(3): 70-86. [Stephan J F. Since the late Eocene Taiwan-Luzon-people zone of geodynamic evolution[J]. Progress in Geophysics, 1987, 2(3): 70-86.]
- [22] 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. [OUYANG Kai, ZHANG Xunhua, LI Gang. Characteristics of stratigraphic distribution in the Middle uplift of South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(1): 59-66.]
- [23] 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. [WANG Feng, LI Huijun, ZHANG Yinguo. Stratigraphic geologic attribute and hydrocarbon geology in Laoshan uplift of South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(2): 95-102.]
- [24] 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. [WANG Lianjin, YE Jiaren, WU Chonglong. Petroleum geological characteristics of pre-tertiary in South Yellow Sea Basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 1-3.]
- [25] 陈建文, 李慧君. 南黄海崂山隆起和滩海区海相地层油气资源战略选区成果报告[R]. 2009. [CHEN Jianwen, LI Huijun. Results report about strategic constituency of oil and gas resources of marine strata in the Laoshan uplift of the South Yellow Sea and beach area[R]. 2009.]

## SHALLOW WATER MULTIPLES DEPRESSION AND IMAGING ANALYSIS ON THE LAOSHAN UPLIFT OF THE SOUTH YELLOW SEA BASIN

LIU Jun<sup>1,2,3</sup>, WU Shuyu<sup>1,2</sup>, CHEN Jianwen<sup>1,2</sup>, SHI Jian<sup>1,2</sup>, LEI Baohua<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resource, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071;

3. Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract:** The boundary between the Ceno-Mesozoic clastic deposits and the underlying Palaeozoic carbonate is a strong reflection interface on the Laoshan Uplift of the South Yellow Sea Basin. It acts as a strong shield to prevent the seismic waves from propagation downward, in addition to the multiples in the sea. As the results, deep seismic reflections are usually weak and difficult to image. Furthermore, there is lack of nearly offset reflected signals from seabed in shallow water, the seabed related multiples can not be depressed effectively by conventional SRME (Surface Related Multiple Elimination) method. The Taup domain predictive deconvolution method always destroy valid reflected signals if the wave cycle is similar to the seabed multiple, particularly if the seabed is hard. The amplitude of the seabed multiple wave energy is stronger than the seabed reflection. In this case, the method of predictive deconvolution can not be used to depress seabed related multiples entirely. In this paper, seabed related multiples wave depression is performed by using the DWD + SRME combination method. DWD (Deterministic Water-layer Demultiple) method is used for attenuating short period seabed related multiples, and the SRME method is used for suppressing long period free surface related multiples. In addition, the method of Radon transform is also used for remove inter-layer multiples, so the multiples are depressed effectively, and thus deep reflection signals appear gradually. Through the above mentioned seismic processing it is revealed that the Laoshan Uplift is a gentle anticline structure, and there are multiple thrust faults cutting through it. The Laoshan Uplift was embryonic in the Caledonian stage, formed in the Indosinian period and matured in the Yanshan period.

**Key words:** shallow water; multiples wave; DWD+SRME method; Radon transform; South Yellow Sea Basin; Laoshan Uplift