

刘玉萍, 李福元, 顾元, 等. 南海南部盆地老地震资料攻关处理关键技术分析[J]. 华南地震, 2020, 40(3): 124-136. [LIU Yuping, LI Fuyuan, GU Yuan, et al. Analysis of Key Techniques for Processing Old Seismic Data in the Southern South China Sea Basin [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(3): 124-136]

南海南部盆地老地震资料攻关处理关键技术分析

刘玉萍^{1,2,3}, 李福元^{1,2,3}, 顾元^{1,2,3}, 李丽青^{1,2,3},

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;
3. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075;)

摘要: 南海南部盆地地质条件复杂, 崎岖地层发育。老地震资料受早期采集装备和处理技术落后的影响, 地震资料中深层成像无法满足油气预测和目标评价的需求。通过在老资料地质环境和采集方式的基础上总结了其特征, 包括导航信息不全面、采集参数参差不齐且部分采集信息未知、覆盖次数低、多次波复杂、中深层成像困难等。同时, 针对老地震资料特征, 采用自适应鬼波压制、复杂多次波衰减、子波一致性处理等系列针对性处理技术。新处理成果剖面证明, 地震剖面从浅至深成像质量得到了显著改善, 为后续油气资源勘探提供了高品质的数据保证。

关键词: 崎岖地层; 多次波; 中深层成像; 鬼波; 子波一致性

中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)03-00124-013

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.017

Analysis of Key Techniques for Processing Old Seismic Data in the Southern South China Sea Basin

LIU Yuping^{1,2,3}, LI Fuyuan^{1,2,3}, GU Yuan^{1,2,3}, LI Liqing^{1,2,3}

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;
2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China;
3. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geology Survey, Guangzhou 510760, China;)

Abstract: The geological conditions of the southern South China Sea Basin are complex and rugged strata are well developed. The old seismic data are affected by the backwardness of the acquisition equipment and processing technology, and the mid-depth imaging of seismic data can not meet the needs of oil and gas prediction and target evaluation. This paper summarizes the characteristics of the old data on the basis of their geological environment and acquisition methods, including incomplete navigation information, different acquisition parameters and indeterminate part of the acquisition information, low coverage times, complex multiple waves, and difficulty in mid-depth imaging. At the same time, according to the characteristics of old seismic data, a series of processing

收稿日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0307405); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019D0208); 中国地质调查局项目(DD20201118, DD20191007) 联合资助

作者简介: 刘玉萍(1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地震资料分析与处理方面的工作。

E-mail: liu-yuping@163.com

通信作者: 李丽青(1971-), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事海洋地震资料处理研究工作。

E-mail: 995032693@qq.com

techniques are adopted, such as adaptive ghost wave suppression, complex multiple wave attenuation, wavelet consistent processing, etc. The new processing results show that the imaging quality of seismic profile has been improved significantly, which provides high quality data guarantee for oil and gas resource exploration.

Keywords: Rugged strata; Multiple wave; Mid-depth imaging; Ghostwave; Wavelet consistency

0 引言

近年来我国海上勘探显示，南海南部深水区是未来海上油气勘探的主要目标。随着海上油气勘探和开发技术的发展，有必要将南海南部油气勘探逐渐向陆坡和深海盆等深水地区推进。有必要针对新的勘探目的层地震地质条件，发展适用的油气勘探新技术^[1]。利用已有资料和成果，预测油气资源远景区，是油气资源勘探的重要发展方向。

南海南部深水区具有复杂的地质条件，以往的二维地震勘探技术方法较难获得高品质地震资料，不能满足中深层油气勘探的要求^[2]。受喜山期多期构造运动影响，地层断裂发育，构造复杂，岩性变化快，特殊地质体如三角洲扇体、泥丘、火成岩、礁体等存在，加之坳陷中的古近系目的层埋藏较深，地震反射波能量弱，使得中深层成像较差。广州海洋地质调查局在南海南部已有的二维多道地震资料采集时间集中在20世纪80~90年代，当时的处理技术落后，多次波压制方法有限，仅仅采用预测反褶积压制多次波，残留较多的多次波不利于深部目的层成像，而且较差的地震资料品质无法开展后

期的地震属性分析。

现今计算装备和资料处理技术水平的发展为老地震资料重处理提供了必要的技术条件。为了获得更加清晰的高分辨率图像，需要获得更宽的频谱信息，要求处理过程中同时兼顾低频和高频信息，这对于深部目的层高分辨率成像尤为重要。近十年来发展的保幅保真叠前去噪技术和多次波衰减技术，可以获取更高质量的叠前剖面。偏移算法的优化和超级计算机资源的配置，为偏移成像质量提供了基础保证。因此，采用前沿高新处理技术对老地震资料开展攻关处理与技术研究，为南海南部盆地综合研究与资源评价提供高品质的资料保障具有十分重要的意义。

1 老资料特点及处理的重难点

20世纪80~90年代采集的装备和技术较落后，资料品质较差，为后续的地震资料处理增加难度，本文的研究内容是基于表1所示的6条不同时间采集的二维多道地震测线，野外采集参数见表1所示。

表 1 老地震资料采集参数统计表
Table 1 The statistical table of old seismic data acquisition parameters

测线名称	采集时间 / 年	震源容量 /(c.i.)	工作压力 /(p.s.i)	覆盖次数	排列长度 /(m)	道数	炮间距 /(m)	道间距 /(m)	最小偏移距 /(m)	记录长度 /(ms)	采样率 /(ms)	低截频率 /(Hz)	高截频率 /(Hz)
1	1989	2059	1800	12	1425	48	50	25	250	6998	2	8	128
2	1996	2250	2000	30	3344.54	120	53.32	26.66	172	9214	2	6	188
3	1997	1500	2000	15	1716.27	120	53.32	13.33	130	7166	2	6	188
4	1998	2059	2000	15	1725	60	50	25	250	6998	2	8	128
5	1998	1500	2000	15	1716.27	120	53.32	13.33	130	7166	2	6	188
6	2002	5680	2000	30	3237.5	240	50	12.5	250	9214	2	无	206

2000年之前,广州海洋地质调查局导航资料一直采用纸质班报记录方式来记录地震数据的导航信息。如表1所示,研究区测线分1989年、1996—1998年和2002年度采集,其中,2002年度采集的导航数据是标准格式P190文件,其他年份采集的原始导航数据是纸质文件,后期有专业人员对纸质导航文件数字化录入。图1是录入后的数字化导航文件,可以看出数字化后的导航文件仅包含激发点经纬度坐标,无检波点位置信息。且1989年度的导航文件间隔100

炮记录一个坐标坐标,1996—1998年度导航文件每炮记录一个经纬度坐标。图2为标准P190格式导航文件,红色框为炮检点坐标信息,P190文件详细记录了每个炮点和检波点的位置信息。针对没有P190文件的导航资料,处理过程中,只能根据现有炮点的坐标线性插值出未记录的震源点和检波点的坐标。插值出的坐标与真实坐标存在一定的误差,这些误差无可避免会对多次波压制、偏移等处理效果造成负面影响。

SP号	纬度	经度	SP号	纬度	经度
1	90111.130	1091915.749	1	75907.76	1102432.89
101	90120.671	1092140.383	2	75906.10	1102432.39
201	90123.311	1092416.006	3	75904.43	1102431.90
301	90124.331	1092652.760	4	75902.77	1102431.41
401	90125.401	1092929.894	5	75901.10	1102430.92
501	90101.180	1093244.898	6	75859.43	1102430.44
601	90035.409	1093551.902	7	75857.76	1102429.98
701	90009.648	1093856.027	8	75856.09	1102429.52
801	85943.878	1094203.531	9	75854.41	1102429.07
901	85918.167	1094510.285	10	75852.73	1102428.62
1001	85847.246	1094815.920	11	75851.05	1102428.17

(a) 测线1数字化导航文件

(b) 测线4数字化导航文件

图1 测线1(a)和测线4(b)数字化的导航文件

Fig.1 Digital navigation files of line 1 and line 4

```

S105-2-14      11 005725 090230.86N1111440.51E 526880.3 999494.21574.8132123058
T105-2-14      1 1005725090421.05N11115 6.72E 527678.41002878.81574.8132123058
V105-2-14      1 005725090228.49N1111440.34E 526875.4 999421.51574.8132123058
A105-2-14      1 1005725090227.63N1111440.39E 526876.8 999395.11574.8132123058
A105-2-14      1 2005725090227.87N1111440.08E 526867.5 999402.41574.8132123058
R0240 527600.41002656.911.90239 527596.41002645.111.90238 527592.31002633.311.91
R0237 527588.31002621.511.90236 527584.31002609.611.90235 527580.21002597.811.91
R0234 527576.21002586.011.90233 527572.21002574.111.90232 527568.31002562.311.91
R0231 527564.31002550.411.90230 527560.31002538.611.90229 527556.31002526.711.91
R0228 527552.41002514.911.90227 527548.51002503.011.90226 527544.51002491.211.91
R0225 527540.61002479.311.90224 527536.71002467.411.90223 527532.81002455.611.91
R0222 527528.91002443.711.90221 527525.01002431.811.90220 527521.11002419.911.91
R0219 527517.31002408.011.90218 527513.41002396.211.90217 527509.61002384.311.91
R0216 527505.71002372.411.90215 527501.91002360.511.90214 527498.11002348.611.91

```

红色框为炮检点坐标信息

图2 测线6标准P190格式导航文件

Fig.2 Navigation file with standard P190 for line 6

地质条件方面,南海南部陆坡的水深变化大(100~2000 m),崎岖的海底易造成地震波散射,削弱有效反射波的能量。南海南部盆地发育众多的岩体、海山和海丘,海底底质多变,部分海域海底底质坚硬,易引发鸣震现象。油气

勘探目的层较深,地质构造复杂。海盆区最大沉积厚度超过万米,且上覆主体水深1800~2000 m,造成深部地震反射较弱。图3是测线5的原始叠加剖面,该测线是研究区典型的二维地震剖面。

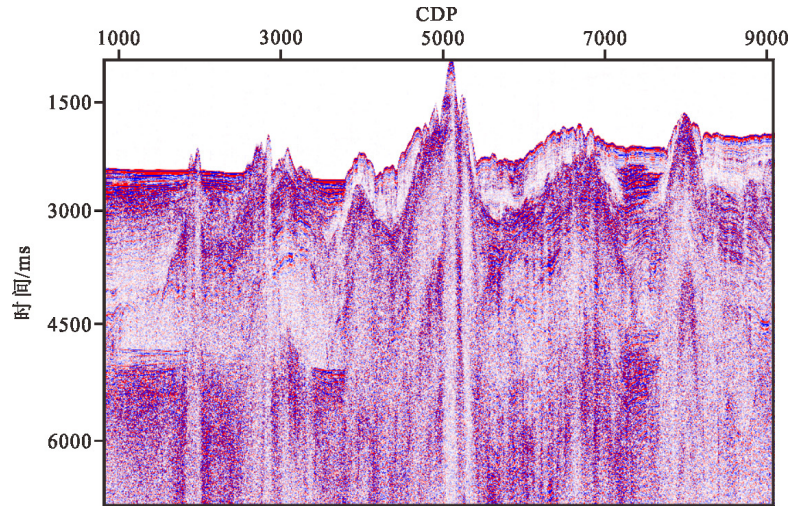


图3 测线5 原始叠加剖面
Fig.3 The original stack profile of line 5

此外，由于数据采集时间久远，部分数据的采集报告及班报无法查找，导致一些采集参数无法确定，例如：震源参数，炮深、缆深及班报等等，这些参数不确定直接导致很多先进的处理方法不适用。且早期采集的原始地震资

深层反射信息。针对不同地质属性和地震成像条件的地层建立合理的成像速度场是地震资料成像的关键，同时也是具有很大难度和挑战性的工作。图4是12次和15次速度分析界面，覆盖次数低，速度谱能量团发散，速度分析缺乏参考依据。

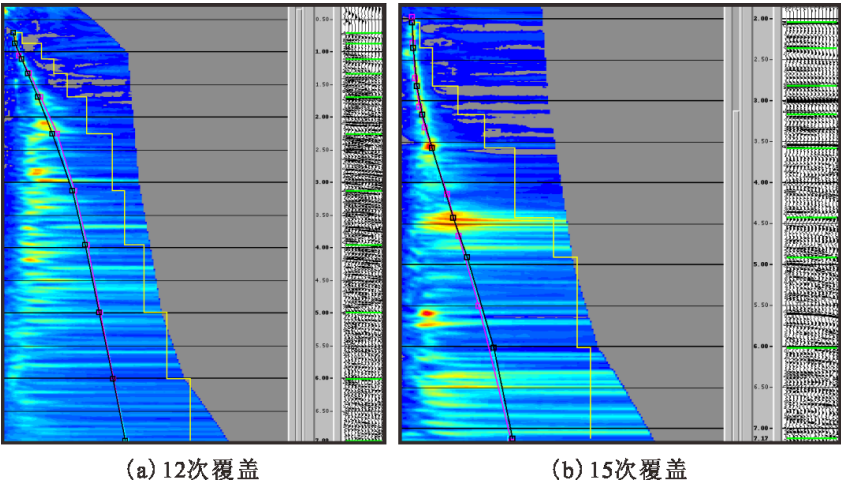


图4 测线1 (a) 和测线4 (b) 速度分析界面
Fig.4 Velocity analysis interface of line 1 and line 4

综合以上对老地震资料的分析，从资料处理的角度总结处理的难点主要有以下三点：

1.1 鬼波

本文研究的老资料全部采用常规拖缆采集方式，即震源和电缆沉放在一定深度，受海面强反射界面的作用下造成鬼波的干涉作用，导致地震资料分辨率降低且频谱出现明显的限频。

鬼波的存在严重干扰地层反射的识别，影响低频有效反射对中深层成像的作用。

1.2 多次波复杂

研究区老资料水深变化大且海底崎岖，造成多次波波场复杂不易预测。覆盖次数低、最小偏移距较大、排列长度短造成近道和远偏移距信息缺失，对多次波压制增加难度。其中测

线 1 的覆盖次数仅 12 次,震源能量较弱,信噪比低,中深层反射信号弱,普遍发育多阶海底反射多次波、鸣震、层间多次波,正确识别并有效压制存在较大难度。图 5 为测线 3 发育强能量多次波的炮集,图 6 为测线 6 崎岖海底多

次波的原始炮集,图 7 是测线 6 的初叠剖面。可以看出,多次波能量强且边界不清晰,炮集上多次波双曲特征变形,叠加后多次波与有效波混叠,中深层有效反射信号弱。总而言之,复杂多次波衰减是本次处理的难点和重点。

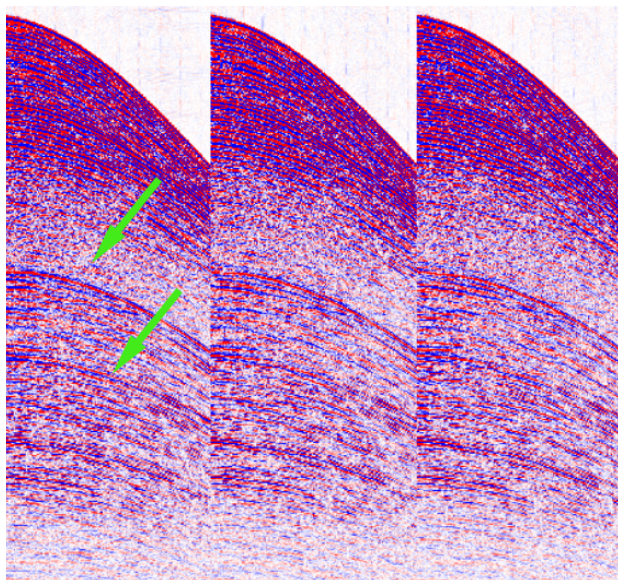


图 5 测线 3 发育强能量多次波的炮集

Fig.5 The shot gather of line 3 developed multiple waves with strong energy

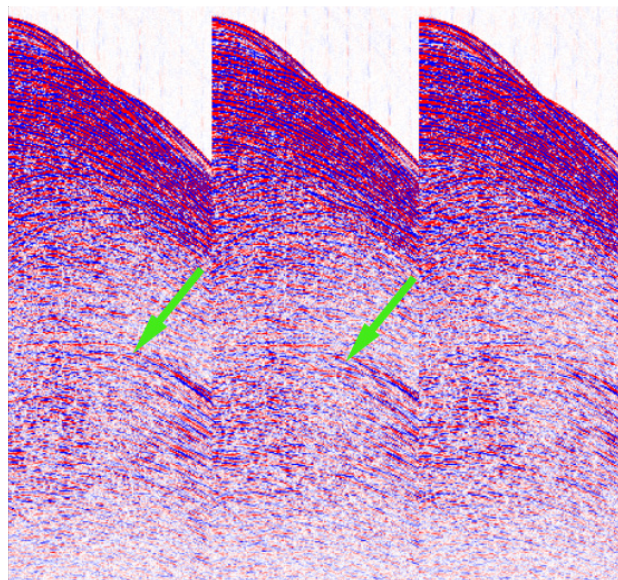


图 6 测线 6 崎岖海底多次波的原始炮集

Fig.6 The original shot gather of line 6 developed multiple waves in rugged water bottom

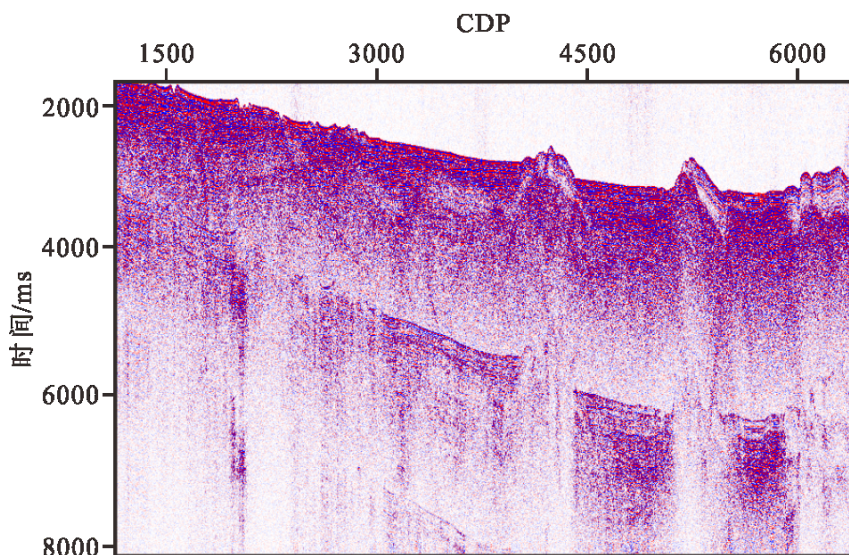


图 7 测线 6 的初叠加剖面

Fig.7 The original stack profile of line 6

1.3 子波不一致

老地震资料采集时间不同,分不同航次不同作业船采集,采集参数自然不同。地震资料频率、相位与波组特征具有明显差异,严重影响

响叠加效果。后续的综合对比解释,要求不同航次采集的老地震资料在频带宽度、子波、坐标系统、采样率等参数必须一致,因此,需要进行子波一致性处理。

2 处理对策及应用效果

针对上述老资料重处理的难点,本文在鬼波压制、复杂多次波压制以及子波处理三个方面提出针对性的处理策略。

在数据处理之前,针对只有炮点坐标的导航文件,根据野外采集船只的施工方向,采用线性内推外推方式将没有激发点和接收点位置信息的数据插值补充完整,保证每道地震数

据都有同样格式的位置坐标。为了保证为了保证整个工区的坐标信息度量单位一致,统一以 111° 中央经线,采用 UTM 投影方式进行坐标转换,最终的坐标格式均是以米为单位的平面坐标。

2.1 自适应鬼波压制

海上拖缆采集的地震数据受鬼波影响限制了地震数据的频带宽度,鬼波产生的波场传播示意图如图 8 所示:

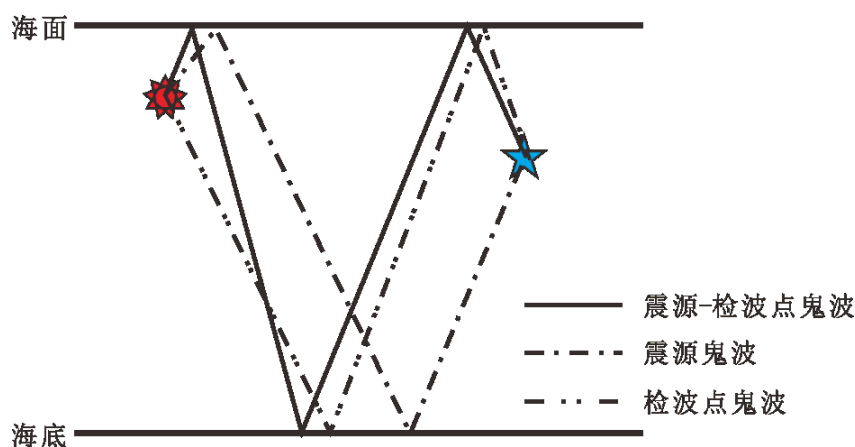


图 8 二维水平拖揽鬼波传播示意图

Fig.8 Ghost wave propagation diagram with the 2D horizontal cable

目前,鬼波压制的采集方式有多种,包括上下源、上下缆、双检波器、三分量拖揽、海底电缆以及变深度电缆等采集方式,配合后期针对性的处理方法,实现鬼波压制^[3-5]。适用于常规水平拖揽的鬼波压制方法也有很多种^[6-9],但大部分都是基于震源和电缆沉放深度确定且海面反射系数为-1的假设前提。而实际采集受海浪影响造成海面起伏且反射系数并非绝对为-1,从导航文件中读取的炮检点深度也存在精度误差,从而导致鬼波压制效果受限制。

本文采用 omega 系统高端信号处理包中的鬼波自适应压制技术对研究区的资料进行鬼波压制,该技术是 Rickett, J.E. 于 2014 年在 EAGE 年会上提出的一种新型鬼波压制技术^[10,11]。假设每个 p-x 对具有单一的鬼波延迟时,电缆在分析段内是拉直的,在时空域有一定的稀疏度,通过局部 Tau-P 域建模,加权最小平方数据匹配,上行波场平面波稀疏度约束及边界

控制延迟时约束,构建上行波场和延迟因子。自适应鬼波压制可用于水平电缆沉放、浅沉放或是斜缆数据,对噪音容忍度高,完全数据驱动,能够调整鬼波模型来克服缆深误差。自适应鬼波压制可以恢复鬼波产生的陷波效应,可以有效恢复低频信息,改善波组特征,提高地震资料保真度。

该技术突破了传统鬼波压制技术假设条件的限制,直接依赖于数据本身驱动,无需先验信息,同时压制震源鬼波和电缆鬼波。图 9 是测线 4 鬼波压制前后炮集及频谱的效果对比。效果对比图显示,浅层分辨率得到提升,波组特征更加合理。频谱上看,陷频点补偿之后,数据低频信息增加的同时频带得以拓宽。图 10 是测线 4 鬼波压制前后叠加及频谱的效果对比。叠加剖面“雕塑感”更强,深层弱反射信号得到增强,为后续速度分析和多次波衰减提供更真实可靠的有效信号。

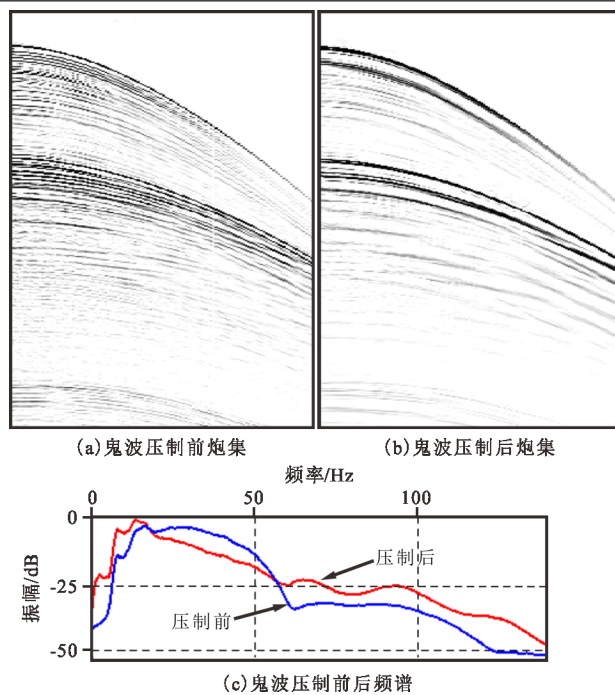


图 9 测线 4 鬼波压制前后炮集及频谱对比

Fig.9 The comparison of shot gather and spectrum before and after ghost wave suppression of line 4

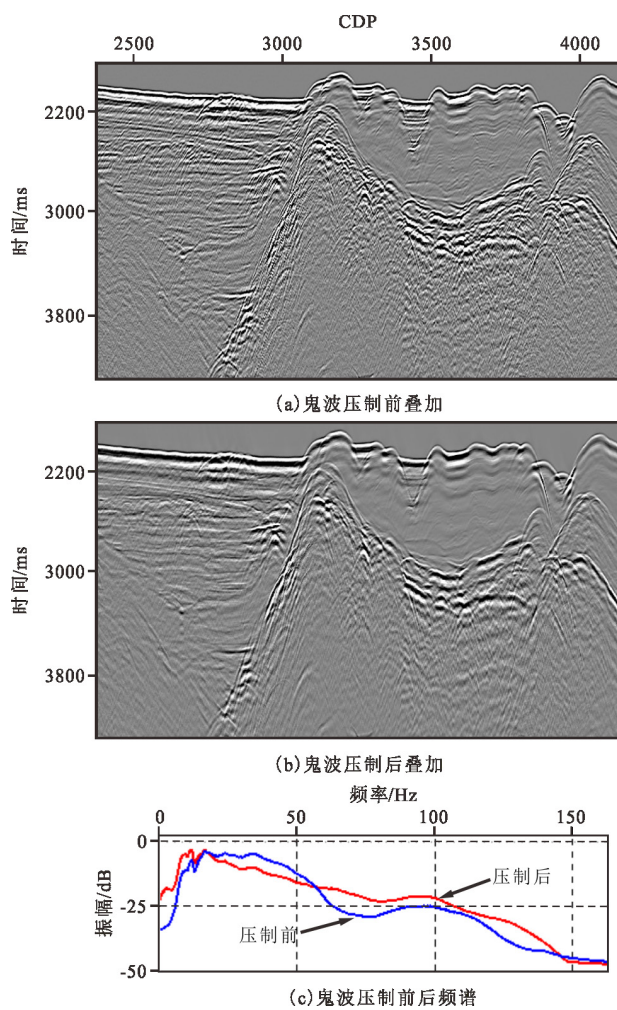


图 10 测线 4 鬼波压制前后叠加效果对比

Fig.10 The effect comparison of line 4 before and after ghost wave suppression

2.2 复杂多次波衰减

消除多次波始终是海上地震资料处理的重点和难点。由于研究区域跨度比较大，水深及地下构造都有较大的差异，因此多次波的类型及特征也比较复杂，针对不同特征的多次波要使用相应的配套压制技术^[12]。图 11 是多步串联组合压制多次波的技术流程图，针对不同多次波产生的原理，针对性的分步串联组合压制。

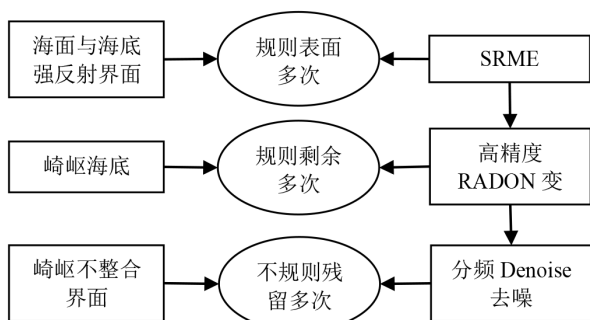


图 11 多步串联组合压制多次波流程图

Fig.11 The flowchart of multi-step series combined suppression multiple-waves

2.2.1 SRME 方法压制海底多次

在进行 SRME 表面多次波压制前输入数据应进行了异常振幅压制，防止强振幅值影响多次波模型的稳定性。SRME 不需要预先知道地下介质的任何信息，地震数据与自身进行时空褶积，所有的子反射就被褶积在一起，从而来预测出自由表面多次波，然后利用自适应相减的方法去除多次波。SRME 需要偏移距外插至零偏移距，近偏移距外插数据的质量将直接影响多次波预测的可靠性。本文采用的近偏移距插值方法是利用每一个 CMP 的近道数据采用 Tau-P 域波场外推重构至零偏移距数据，这种方法重构的数据质量可靠，有利于 SRME 对多次波的预测。在缺炮或变观等情况下这种方法也可以取得较好的结果。针对老资料最小偏移距较大的问题，在近道插值时选择插值偏移距范围选择较小的参数，使得预测的多次波模型更准确。另外，多次波自适应相减时遵循时窗由大到小渐进过度的原则，对多次波模型分多个时窗进行自适应相减能较好的减去大部分海底多次。

2.2.2 高精度 Radon 变换压制规则剩余多次

在本次研究区内发育有海底山，属于崎岖海底地貌，这种崎岖海底的表面多次波无法采

用 SRME 技术压制。Radon 变换去剩余多次，它的原理是利用中远偏移距一次波和多次波的速度差异来压制多次波。影响 Radon 变换效果的主要参数是一次波和多次波速度。这个阶段做好精细叠加速度分析，取准叠加速度，保证衰减多次波而不伤害一次波。然而，本次资料覆盖次数有限，排列长度短缺乏远偏移距信息，导致有效反射和多次波速度差异较小，因此，Radon 变换去剩余多次在本次研究区的应用效果并不十分显著。

2.2.3 分频 Denoise 去噪压制不规则残留多次

以上两种多次波压制技术虽然很常用，在地层平坦地方能较好的压制多次波，但对于崎岖地层多次波及绕射多次就无能为力了，而崎岖地层多次波却是偏移成像过程中“画弧”的罪魁祸首，偏移画弧覆盖在中深层有效反射之上，严重影响最终成果数据的成像效果。在本次研究区内剖面中——深层发育一套强能量的崎岖不整合界面，该界面产生强能量的反射波、绕射波和散射波，这些强反射及其绕射、散射的多次波波场极其复杂且常常表现为高频强能量，在二维观测条件下，其压制难度要远高于崎岖海底多次波。加之，经过高精度 Radon 变换处理之后，由于崎岖海底的测线不是严格垂直海底山的构造走向，多次波常表现为侧面多次波，二维观测系统下的地震数据无法预测侧面多次波，通常有较强的多次波残留。

Denoise 技术是 omega 系统中一项常用的去相干和随机噪声方法，他的原理并非针对多次波衰减。多次波是有效波在地层中来回传播产生的，它具有一定的传播规律，并非随机噪声。假如把多次波视为相干噪声，利用 Denoise 技术将它从地震数据中分离出来作为多次波模型，再结合自适应相减技术就可以达到衰减多次波的目的。

图 12 为测线 2 多步串联压制多次波的单炮效果图。可以看出，SRME 压制了大部分规则海底多次波，而远道多次波仍然有残留；Radon 滤波压制了远道倾斜的多次波能量，使得远道的低频多次波能量明显减弱，但剖面上仍然残留一些顽固强能量多次波；Denoise 进一步压制残留的强能量剩余多次。至此，多次波能量基本消除掉，剖面变得均匀，有效信号得以突显。图 13 为测线 2SRME 压制多次波的叠加效果图，可以看出，SRME 在海底平坦区域对海底多次衰

减效果比较理想,对崎岖海底多次衰减显得无能为力。图 14 为测线 6Denoise 压制崎岖地层多次波的叠加和偏移叠加效果对比。显然 Denoise 技术对崎岖地层剩余多次压制效果显著,彻底

消除残余多次波的偏移“画弧”效应,中深层被“画弧”覆盖的弱反射得以显示。总之,多步串联压制了大部分的多次波,极大提高了剖面信噪比,有利于后续的偏移处理效果。

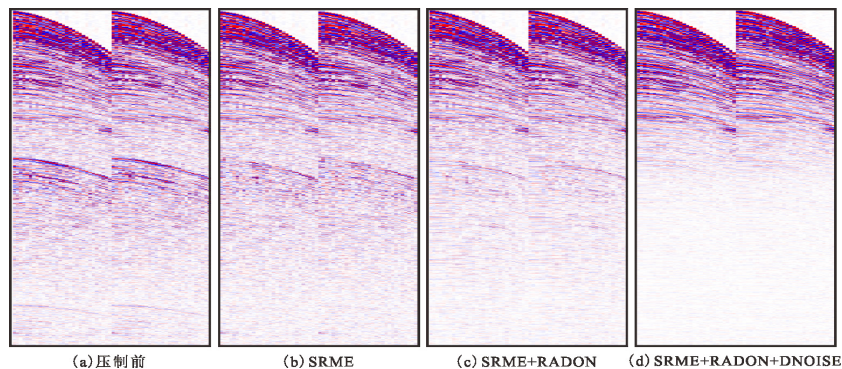


图 12 测线 2 多步串联压制多次波的单炮效果图

Fig.12 The shot gather effect of multi-step series suppression multiple waves of line 2

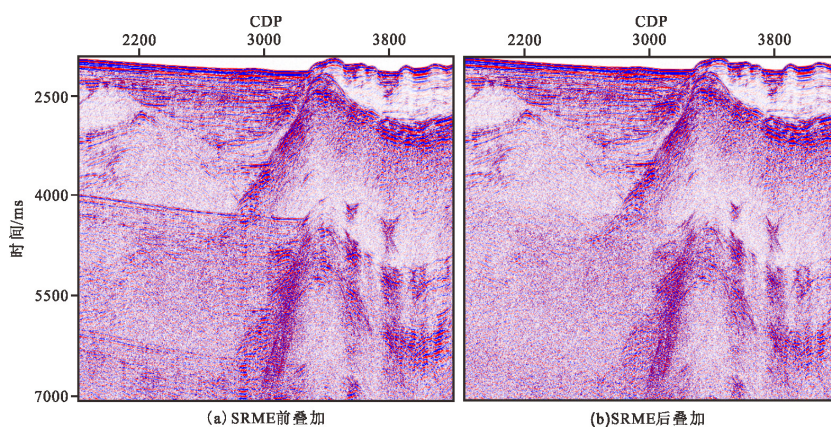


图 13 测线 2SRME 压制多次波的叠加效果图

Fig.13 The stack effect of SRME suppression multiple waves of line 2

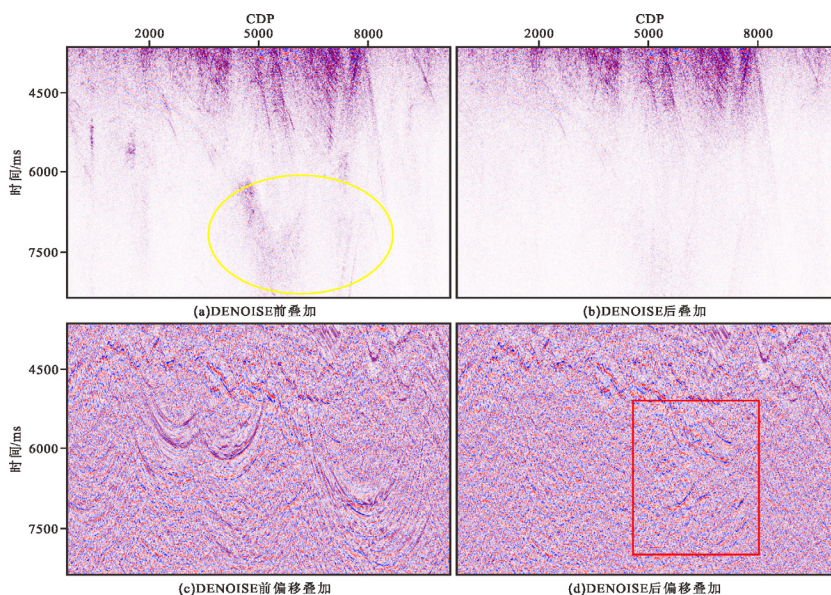


图 14 测线 6 DENOISE 处理前后叠加和偏移的效果对比

Fig.14 The Denoise processing effect before and after stack and migration of line 6

2.3 子波处理

叠后子波处理包括两部分内容：去气泡和子波一致性处理。

2.3.1 去气泡

海上勘探中气枪震源激发的是混合相位地震子波，处理中应消除气枪响应以便得到没有气泡影响的成果资料。气枪震源激发通常产生一个长周期的信号，伴有很多随时间振幅衰减的旁瓣，然而与地下地质构造有重要关联的是主瓣部分，因此，需要通过子波整形来压制气泡。由于老资料没有远场子波，处理可采用确

定性海底波形统计的办法求取地震子波。该技术分三步来实现：第一步选取海底平缓地震资料信噪比高的近偏移距数据进行加权求和来求取地震子波；第二步根据虚反射的频率振幅响应特征对子波波形进行微调；第三步进行子波整形压制气泡，输出反算子并应用到地震数据上，消除震源的气泡响应，解决不同期资料的相位匹配问题。图 15 是测线 1 去气泡前后的叠加剖面及子波，可以看出，气泡压制处理后，旁瓣影响得以消除，同相轴能量更聚焦，波组特征更加清晰，分辨率得以提升。

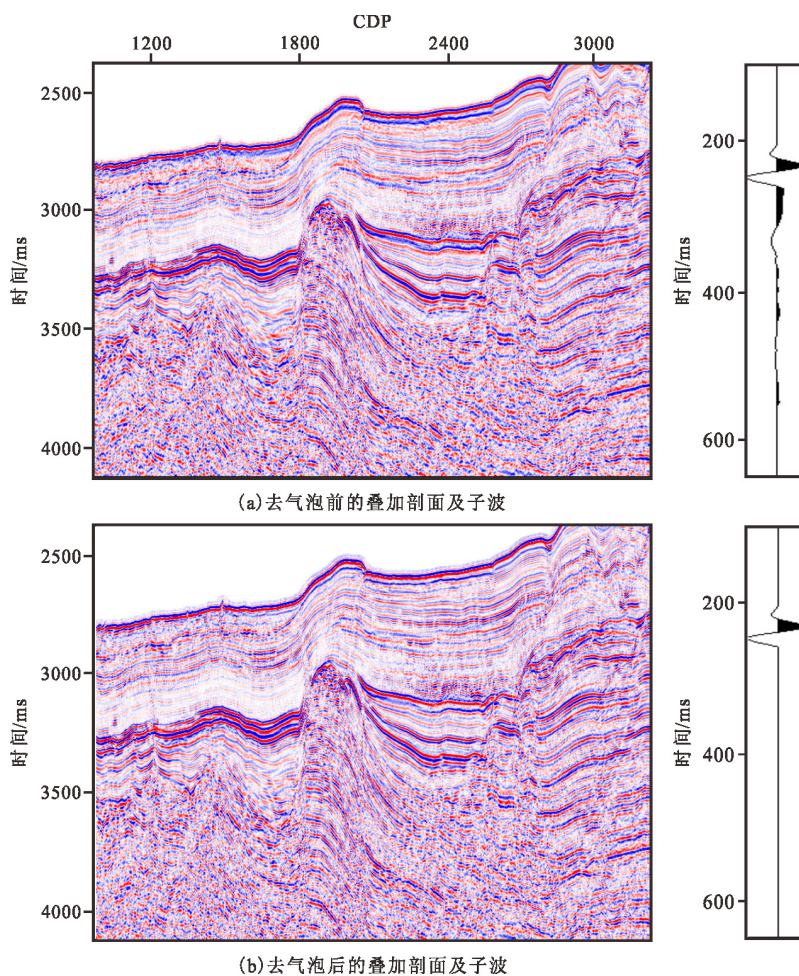


图 15 测线 1 去气泡前后的叠加剖面及子波

Fig.15 The stack profile and wavelet of line 1 before and after de-bubble

2.3.2 子波一致性处理

老地震资料频率、相位与波组特征具有明显差异，有必要进行子波一致性处理。本文子波一致性处理应用的是确定性子波匹配技术^[13-14]，以其中一条线的子波作为期望输出，对其他子波向目标子波进行匹配滤波，求取滤波算子，并应用到地震数据上。子波匹配处理的核心是

将一个子波的振幅谱整形到目标子波振幅谱，因此子波匹配处理在匹配频率的同时实现了振幅匹配。

根据表 1 采集参数统计情况，本次资料分为六组采集参数，每组采集参数下的地震子波必然不同。图 16 是六条测线子波一致性处理前后的子波，可以看出 6 条测线的子波具有明显

差异，其中测线 4 的地震子波视觉效果最为接近雷克子波。因此，考虑将测线 4 的地震子波作为目标子波，分别对其余 5 条测线的子波向目标子波进行匹配滤波获得各自的滤波算子，再将 5 个算子分别应用到各自的叠加剖面。

图 17 是测线 6 子波一致性处理前后的叠加剖面，经过子波一致性处理之后，叠加剖面的波组及构造特征有所提升，有助于整个研究区的对比解释。

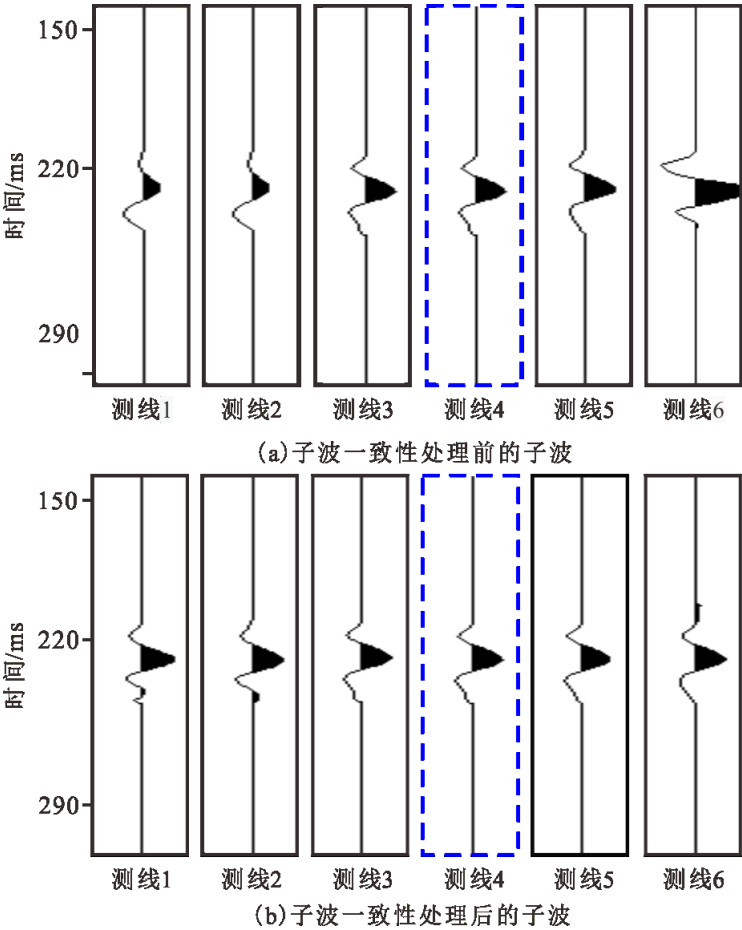


图 16 六条测线子波一致性处理前后的子波

Fig. 16 The wavelets of six lines before and after wavelet consistency processing

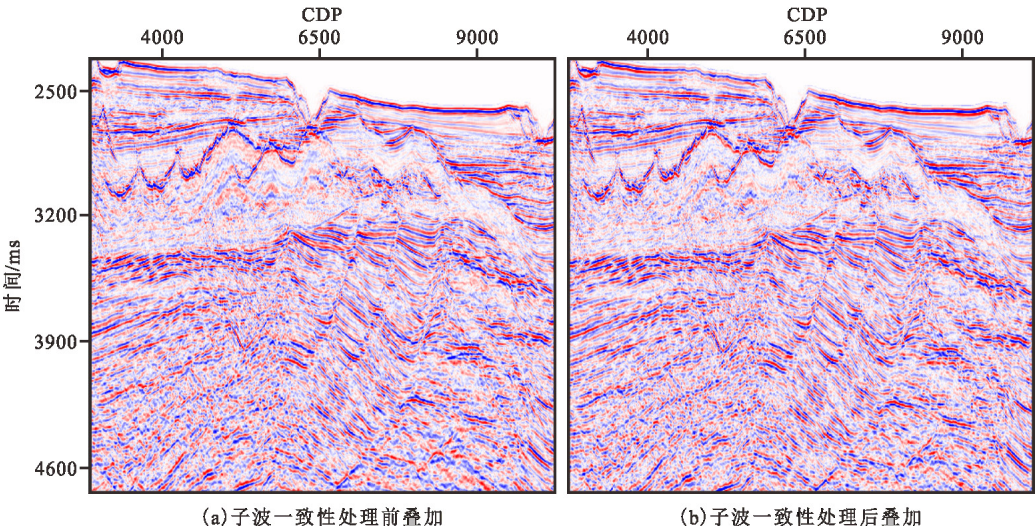


图 17 测线 6 子波一致性处理前后的叠加剖面

Fig. 17 The stack profile of line 6 before and after wavelet consistency processing

3 结语

图 18 是测线 3 新成果剖面与旧成果剖面的效果对比图。旧成果剖面基底不连续，断层不清晰，基底以下的中深层反射若隐若现。本文处理成果剖面的信噪比和分辨率都得到提高。多次波和强线性干扰被压制，原来隐约存在的模糊同相轴都清晰展示出来，绕射波收敛归位，蝴蝶结被解开，断点断面清晰，凹陷内部反射清晰展现，断层边界以及盆地边界明确。与旧成果剖面相比，在多次波衰减、波组特征、中

深层成像等方面都有显著的质量提升。总的来说，处理后的剖面中深层信噪比得到明显提高，分辨率也得到一定提高，能够满足区域构造及沉积相的划分。

图 19 是测线 2 与测线 6 交点闭合情况，测线 2 是采用导航数字化插值导入的坐标，测线 6 有标准导航 P190 文件。从测线交点闭合情况可以看出，交点测线的主要地层都能完整闭合，证实了本文采用的导航数字化差值导入法计算的坐标具有可靠性和准确性。

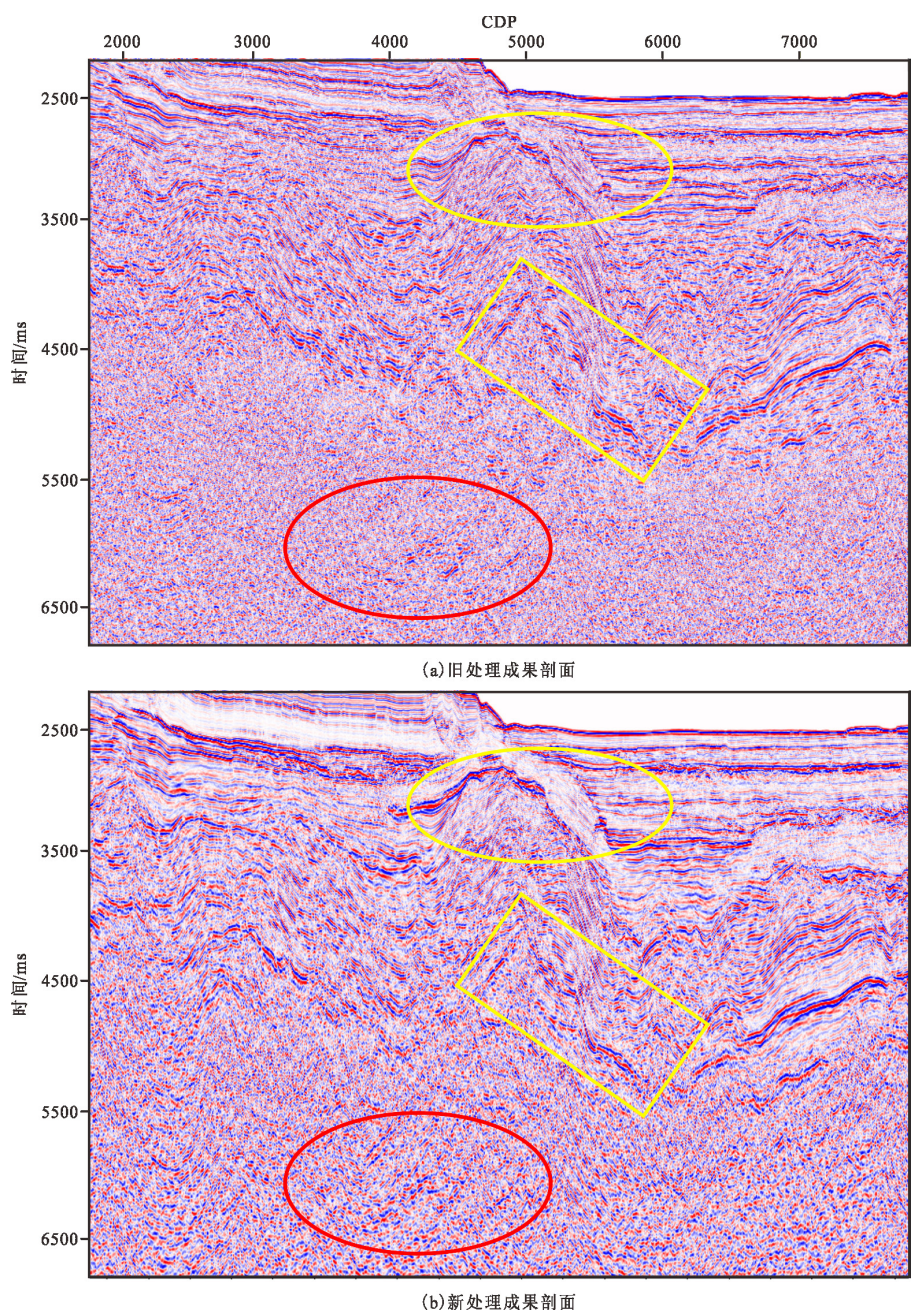


图 18 测线 3 新成果剖面与旧成果剖面的效果对比图
Fig.18 The effect comparison between the new profile and the old profile of line 3

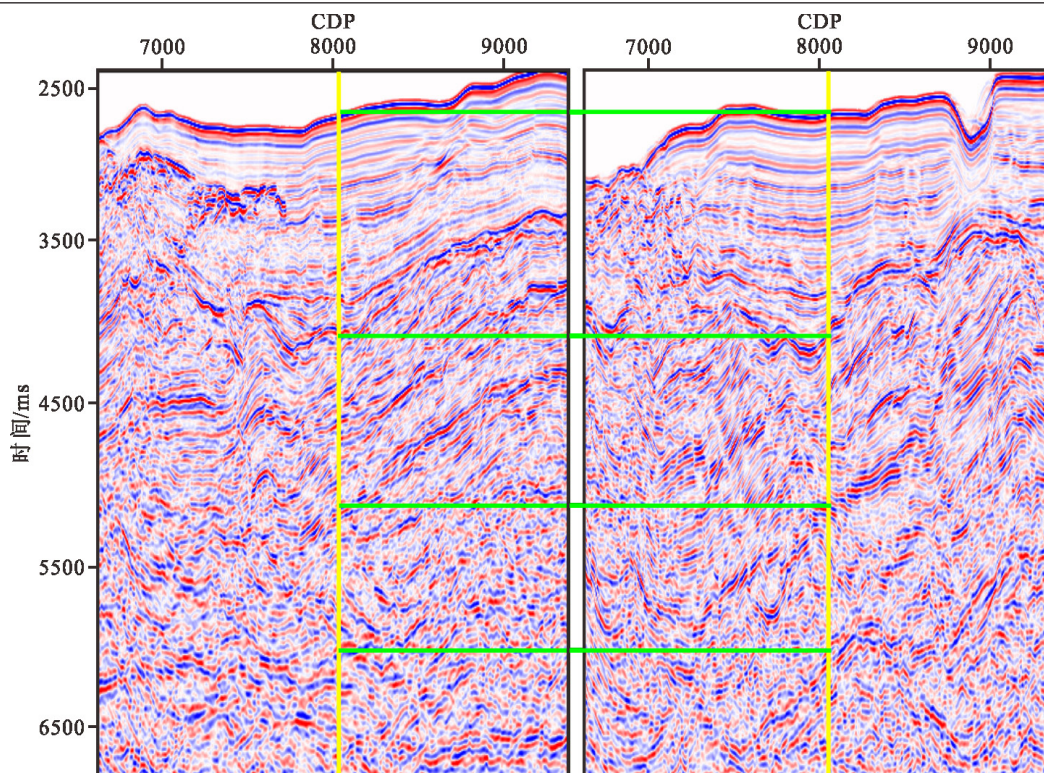


图 19 测线 2 与测线 6 交点闭合情况

Fig.19 The closure of intersection point of line 2 and line 6

参考文献

- [1] 龚旭东, 陈继宗, 庄祖银, 等. 深水地震资料处理关键技术浅析 [J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(5): 336-341, 358.
- [2] 邓盾, 裴健翔, 邓勇, 等. 南海深水盆地改善中深层地震成像关键技术研究 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 702-708.
- [3] 谢玉洪, 李列, 袁全社. 海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 430-435.
- [4] 刘春成, 刘志斌, 顾汉明. 利用上下缆合并算子确定海上上下缆采集的最优沉放深度组合 [J]. 石油物探, 2013, 52(6): 623-629.
- [5] 唐进, 杨凯, 顾汉明, 等. 海上变深度缆地震采集宽频机理分析 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2386-2392.
- [6] 王芳芳, 李景叶, 陈小宏. 基于逆散射级数法的鬼波压制方法 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1628-1636.
- [7] 李洪建, 韩立国, 巩向博, 等. 基于格林函数理论的波场预测和鬼波压制方法 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1113-1124.
- [8] 顾元, 文鹏飞, 张宝金, 等. 水平缆地震数据的鬼波压制方法及其应用 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1764-1772.
- [9] 王艳冬, 王建花, 王小六, 等. 一种基于 τ - p 域自适应的平缆鬼波压制方法 [J]. 中国海上油气, 2018, 30(6): 71-79.
- [10] Rickett, J.E., Van Manen, D.J., et al. Slanted-streamer data-adaptive deghosting with local plane waves[C]. EAGE, 2014, 572-576.
- [11] Rickett, J. Successes and challenges in 3D interpolation and deghosting of single-component marine-streamer[C]. SEG, 2014, 3599-3604.
- [12] 马继涛, Sen K. Mrinal, 陈小宏, 等. 海底电缆多次波压制方法研究 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2960-2966.
- [13] 张红. 地震数据一致性处理方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [14] 张旭东. 子波一致性校正方法在海洋地震资料处理中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(5): 599-603.