

李学林,张衡,陈万利,等.南海淹没碳酸盐台地地震成像技术分析——以甘泉海台为例[J].地震工程学报,2024,46(6):1428-1436.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230602003

LI Xuelin,ZHANG Heng,CHEN Wanli,et al.Seismic imaging analysis of submerged carbonate platforms in the South China Sea: a case study of the Ganquan platform[J].China Earthquake Engineering Journal,2024,46(6):1428-1436.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230602003

## 南海淹没碳酸盐台地地震成像技术分析 ——以甘泉海台为例

李学林<sup>1,2</sup>,张衡<sup>2</sup>,陈万利<sup>3</sup>,孙悦<sup>3</sup>,陈俊锦<sup>3</sup>

(1. 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所,海南 三亚 572025;

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东 广州 511458;

3. 中国科学院深海科学与工程研究所,海南 三亚 572000)

**摘要:** 淹没碳酸盐台地水深变化大且海底崎岖,地层结构复杂,导致二维反射地震资料发育大量多次波干扰,同时受采集环境影响,反射地震剖面广泛存在噪声干扰和大值干扰,给高分辨率成像带来挑战。甘泉海台作为南海北部典型的淹没碳酸盐台地,对其最新采集资料进行特征分析,采用低截滤波压制强涌浪噪声和异常振幅噪声衰减组合技术以及多步串联多次波压制技术,有效去除噪声干扰、大值干扰和复杂多次波,试验叠前时间偏移各项参数,最终大幅度提高甘泉海台地震剖面分辨率和信噪比,可为后续南海淹没碳酸盐台地二维地震资料处理提供借鉴。

**关键词:** 淹没碳酸盐台地; 二维反射地震; 涌浪噪声; 大值干扰; 复杂多次波

中图分类号: P319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1428-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20230602003

## Seismic imaging analysis of submerged carbonate platforms in the South China Sea: a case study of the Ganquan platform

LI Xuelin<sup>1,2</sup>, ZHANG Heng<sup>2</sup>, CHEN Wanli<sup>3</sup>, SUN Yue<sup>3</sup>, CHEN Junjin<sup>3</sup>

(1. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, Hainan, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, Guangdong, China;

3. Institute of Deep-Sea Science and Engineering, CAS, Sanya 572000, Hainan, China)

**Abstract:** The submerged carbonate platforms in the South China Sea are characterized by significant variations in water depth and a rugged seafloor. These factors create a complex subsurface structure and result in multiple wave interferences in two-dimensional (2D) seismic reflection data. Additionally, the data are often affected by environmental conditions, leading to noise interference and large amplitude interference. These challenges pose difficulties for accurate high-

收稿日期: 2023-06-02

基金项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目(420LH021); 2022年“崖州湾”菁英人才科技专项(SCKJ-JYRC-2022-36); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221725)

第一作者简介: 李学林(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事岛礁与地球物理研究。E-mail: geolx1214@163.com。

通信作者: 张衡(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事勘探地震学方面的研究工作。E-mail: 984516191@qq.com。

resolution imaging. The Ganquan platform was taken as an example of a typical submerged carbonate platform in the northern South China Sea. The characteristics of the latest collected data for the Ganquan platform were analyzed in this work. The noise, large-amplitude, and multiple wave interferences were removed using low-cut filtering to suppress strong swell noise, anomalous amplitude attenuation, and multistep serial multiple wave suppression technique. The resolution and signal-to-noise ratio of the Ganquan platform seismic profile were greatly improved in this work. These advancements can serve as a valuable reference for the subsequent processing of 2D seismic data from submerged carbonate platforms in the South China Sea.

**Keywords:** submerged carbonate platform; two-dimensional seismic reflection; swell noise; large-amplitude interference; complex multiple waves

## 0 引言

生物礁碳酸盐台地指珊瑚、藻类及其他造礁生物骨骼或碎屑堆积而成的大型碳酸盐岩建隆<sup>[1]</sup>,通常形成于热带或亚热带海域的浅水区域,温带地区规模较小<sup>[2]</sup>。南海大陆边缘生长了大量的生物礁碳酸盐台地,包括现代碳酸盐台地,如西沙群岛、南沙群岛等,以及淹没碳酸盐台地,如广乐台地、万安台地、甘泉海台等<sup>[3-4]</sup>。南海碳酸盐台地保存了大量的古沉积记录,可指示古海洋环境和古气候变化,研究南海碳酸盐台地对南海海平面变化、古海洋古气候变化有重要意义<sup>[5-7]</sup>。近年来,温室效应加剧,气候变暖等重大环境问题亟待解决,因此碳循环研究尤为重要,南海碳酸盐台地作为重要的碳储库,其研究是碳循环研究中重要的一环<sup>[8-11]</sup>。生物礁结构为油气的封存和储集提供了有利条件,有助于形成较高的储量和较好的储层性质,生物礁油气藏也具有勘探和开发成本较低的优势,因此,对南海生物礁碳酸盐台地的研究有利于优化我国能源战略<sup>[12-14]</sup>。

地震探测因其安全性和高分辨率性已广泛应用于生物礁碳酸盐台地地层结构研究,马尔代夫、巴哈马滩、澳大利亚西北部等地区的碳酸盐台地已布设大量地震监测台网,精细刻画了地层的内部结构<sup>[15-19]</sup>。我国对南海生物礁碳酸盐台地的研究主要聚焦于现代岛礁。前人利用井震联合的方式揭示了南海岛礁和现代碳酸盐台地的地层结构、演化模式及其控制因素,认为南海现代碳酸盐台地的发育主要受控于海平面变化和构造演变,具有南早北晚、东早西晚的发育规律<sup>[4-5,20-21]</sup>。近年来,基于小道距多道地震资料,对西沙宣德环礁地层演化开展了研究工作,认为宣德环礁自中新世开始沉积碳酸盐岩至今,共经历早中新世萌芽期、中中新世爆发期、晚中新世后退期、上新世淹没期和第四纪岛礁期,其发育

演化主要受海平面变化和构造沉降控制,也因冬季风加强和上升流导致台地后退<sup>[22-23]</sup>。然而,淹没碳酸盐台地水深变化大、海底崎岖、地层结构复杂,使地震成像分辨率较低,导致对南海淹没碳酸盐台地地层结构及演化过程认识不足。本文选取南海北部典型的深水区淹没碳酸盐台地——甘泉海台,基于新采集的 100 km 二维多道反射地震资料,梳理出 3 个生物礁碳酸盐台地处理难点,即海洋环境噪声、复杂多次波和中深层成像。针对这些难点,根据碳酸盐台地地震资料特征,研究测试了低截滤波压制强涌浪噪声、异常振幅噪声衰减(Attenuation of Abnormal Amplitude noise, AAA)技术、多步串联多次波压制、弯曲射线叠前时间偏移,获得了高信噪比和高分辨率的成果剖面,可为我国深水区淹没碳酸盐台地高分辨率地震成像提供借鉴,有助于生物礁碳酸盐台地沉积演化相关研究。

## 1 原始资料分析

本次数据采集完成于 2022 年 7 月,调查工作区位于南海北部甘泉海台[图 1(a)],图 1(b)为甘泉海台地形地貌。甘泉海台水深变化范围为 500 ~ 1 500 m,距离三亚市 214 km,距离桂山岛 674 km,共布设 3 条二维多道反射地震测线。采用单边放炮单边接收非零炮检距单缆观测系统进行采集,震源采用气枪震源。采集参数如表 1 所列。

分析原始资料频谱,获得地震资料的主频、频宽以及频率分布等信息,方便为后续的处理试验选取有针对性的参数。图 2 为 GQHT001A 测线的单炮频谱图。频谱分析结果表明,本次采集数据有效频宽可以达到 130 Hz 左右,主频约为 60 Hz。对各测线单炮分析结果表明,数据横向上能量变化比较稳定,纵向上随时间增大能量迅速衰减。

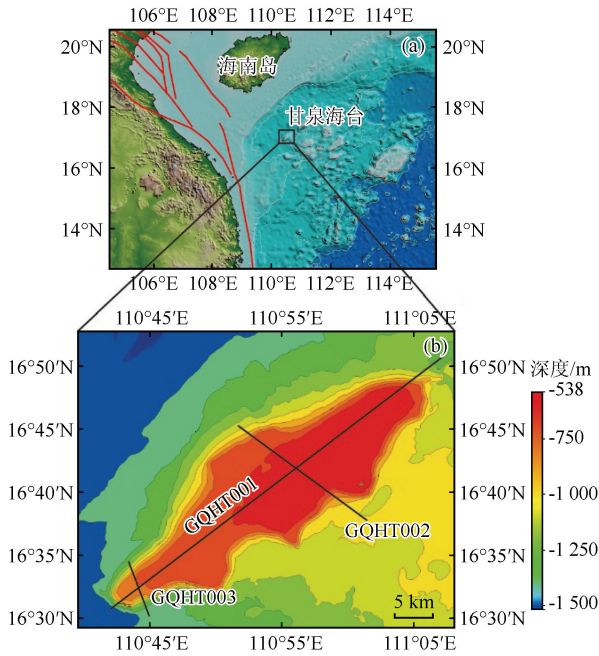


图1 甘泉海台地形地貌和地震测线位置图  
Fig.1 Topography and seismic profile location map of the Ganquan platform

表1 甘泉海台二维地震采集参数表

Table 1 Parameters for two-dimensional seismic acquisition in Ganquan platform

采集参数	数值
接收道数/道	720
道间距/m	6.25
电缆长度/m	4 500
炮间距/m	25
覆盖次数/次	90
最小偏移距/m	175
记录长度/s	7
采样率/ms	2
震源容量/cm <sup>3</sup>	71 529
震源压力/(Ib/cm <sup>2</sup> )	310
气枪沉放深度/m	5
电缆沉放深度/m	6
记录格式	SEG-D 8058
记录介质	IBM 3592 磁带

## 2 噪声特征

### 2.1 涌浪低频干扰、大值噪声干扰

涌浪干扰是由海浪引起的背景噪声。当检波器在海面上进行地震采集时，海面上的波浪会产生机械振动，进而被记录下来，形成涌浪干扰，涌浪干扰的幅度与海浪的高度、风速等因素有关<sup>[24-25]</sup>。大值噪声干扰表现为数据中出现非常明显的尖峰或波动，这些尖峰或波动的振幅往往比周围环境噪声大几倍甚至几十倍。其产生原因较复杂，可能与采集

环境的变化或地震波的传播有关，也可能由采集设备的误差、电磁干扰等造成<sup>[26]</sup>。

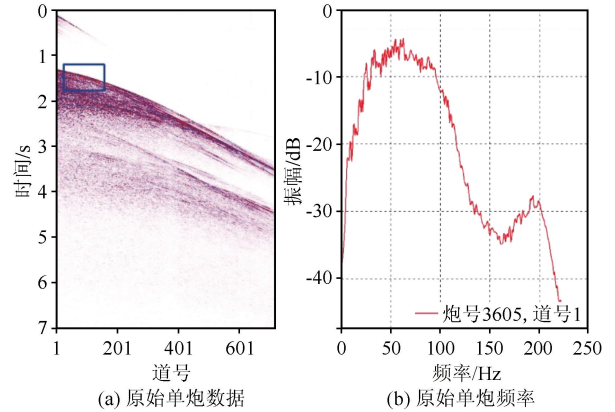


图2 甘泉海台原始单炮数据及其频谱  
Fig.2 Raw single-shot data and spectrum of Ganquan platform

甘泉海台地震资料的涌浪噪声具有能量强、分布范围广的特征，但频带范围窄、频率较低，一般在4 Hz以下[图3(a)]，且剖面上普遍存在强能量大值噪声干扰[图3(b)]。甘泉海台地震资料广泛存在的涌浪噪声和大值干扰大幅度降低了数据的信噪比，压制涌浪噪声和大值干扰是提高生物礁碳酸盐台地地震数据分辨率的关键问题之一。

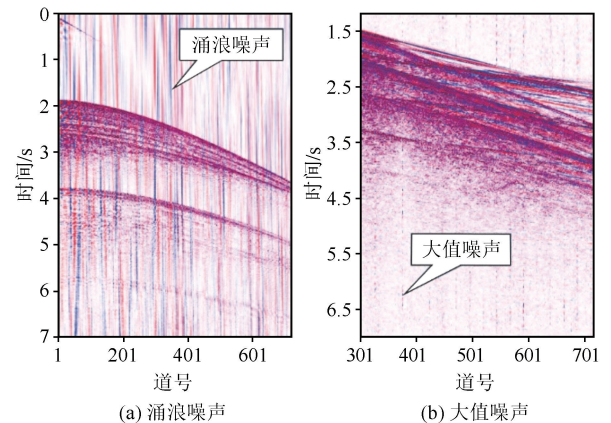


图3 甘泉海台涌浪噪声及大值噪声特征

Fig.3 Characteristics of swell noise and large-amplitude noise in Ganquan platform

### 2.2 复杂多次波干扰

多次波是地震波在地下不同介质之间反射、折射产生的次生波，其到达时间比主波延迟。由于多次波与主波到达时间存在差异，因此会产生干扰，影响对地震数据的准确分析<sup>[27]</sup>。

生物礁碳酸盐台地水深变化大且海底崎岖，造成多次波的波场复杂。甘泉海台地震采集资料中普遍发育多阶海底反射多次波和层间多次波，且多次波与

有效波混叠(图 4)。初叠加剖面上显示海底多次波很强,大幅度降低了地震资料信噪比,严重影响有效信号成像。对多次波进行精准识别和有效压制是提高生物礁碳酸盐台地反射地震资料分辨率的重点。

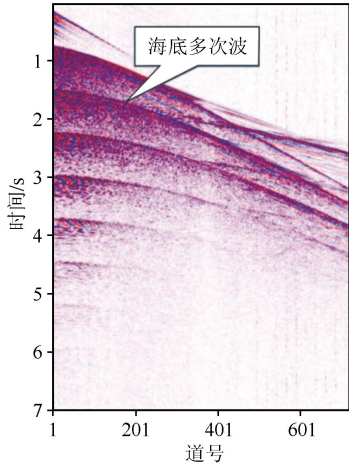


图 4 甘泉海台海底多次波特征

Fig.4 Characteristics of seafloor multiples in Ganquan platform

### 3 对策及效果

#### 3.1 自动化海底层位拾取和多次迭代速度分析

海底层位速度拾取广泛应用于多次波压制、叠前去噪等诸多环节。常规的方法是在初叠加剖面 and 单道剖面上进行两次人工拾取,该过程费时、费力。本次采用自动化海底层位拾取方法,能对海底层位实现自动拾取,仅需对自动拾取的海底进行检查,对部分有跳变的地方进行人工拾取修改,效率提升 4 倍以上。

速度分析是地震资料降噪处理的关键一环,很多的处理方法与流程均要求基于一个准确的速度分

析结果,其结果的好坏直接影响了多次波压制、偏移归位等主要处理过程。对甘泉海台二维反射地震资料降噪处理过程中,遵循速度谱能量团拾取准确、道集同轴轴拉平、与实际地层相匹配和成像聚焦效果好的原则,进行多次迭代的速度分析,选取合适的去多次波速度、叠加和偏移速度。处理中进行了 3 次速度分析迭代,初始速度分析每 2 km 做一个速度谱点分析,后面加密至每 1 km 做一个速度谱点分析。速度分析根据偏移成像的结果进行多次调整,不断更改细节以达到最佳的成像效果。如此反复不断改进,最终获得准确的速度。

#### 3.2 噪声压制

在施工中受到台风等天气的影响,产生严重的背景噪声,包括涌浪噪声、低频噪声和大值干扰。涌浪噪声和大值异常与正常的反射信号有很大的区别。甘泉海台内部地层反射界面的地震反射信号在叠前、叠后各种数据上的分布都是有规律可循的,在能量和频率上都符合地震波的传播规律,而涌浪噪声则不同,表现出低频、强能量、空间分布无规律的特征。它在 0~20 Hz 的频带范围内都有分布,但主要能量还是集中在 4 Hz 以下。通过低频噪声编辑,在噪声频带内压制低频噪声,结合 AAA 异常振幅噪声压制技术,基本消除炮集上的强低频噪声及大值干扰。

基于涌浪噪声和大值干扰在频率、能量、空间分布等方面的特点进行降噪处理。对于涌浪干扰直接采用低截滤波的方法压制,对原始资料低频背景涌浪噪声进行频谱分析,确定去除涌浪干扰的低截滤波为 2.5 Hz。图 5 是涌浪干扰压制前后的炮集对比图,处理后涌浪干扰基本得到衰减。大值干扰的能量比涌浪噪声更强,常常比相邻正常道振幅高 3 倍

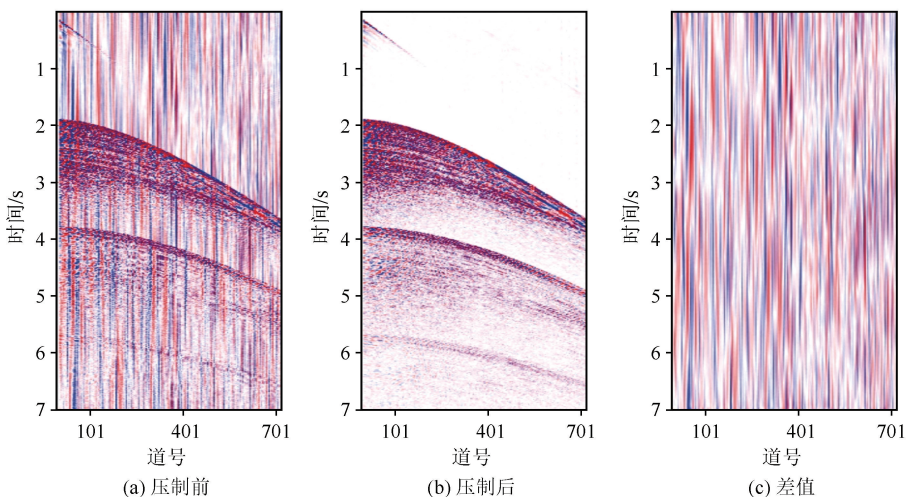


图 5 涌浪干扰压制前后的炮集对比(GQHT003)

Fig.5 Comparison between shot gather before and after swell interference suppression (GQHT003)

甚至 10 倍以上,且频带较宽,和有效波的频带部分重合。对于大值异常干扰则采用 AAA 衰减技术,在噪声出现的频带内识别和压制其能量,达到去除

干扰的目的。先后采用炮域 AAA 和共偏移距 AAA 技术,可有效去除大值干扰,资料的信噪比得以提高(图 6)。

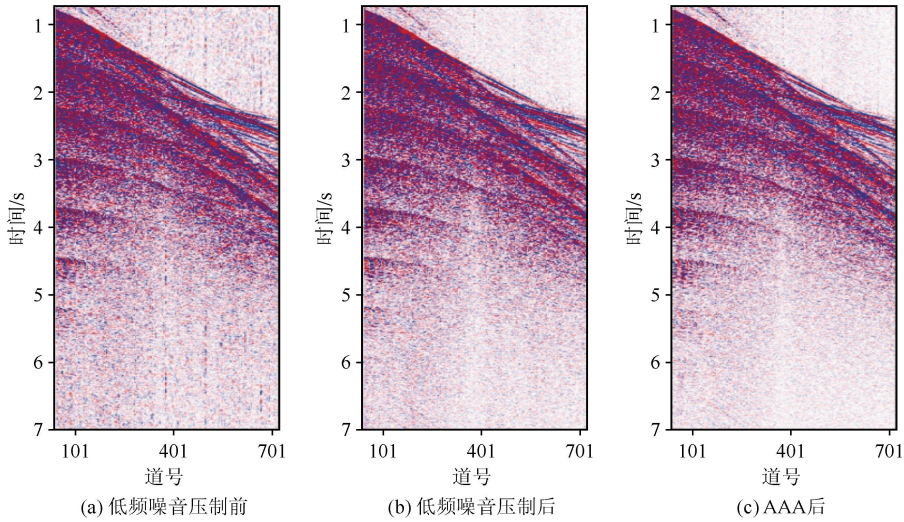


图 6 大值干扰压制前后的炮集对比(GQHT001)

Fig.6 Comparison between shot gather before and after large-amplitude interference suppression (GQHT001)

### 3.3 多次波压制

甘泉海台原始地震资料中广泛发育多组多次波,且类型多样,特征复杂。针对不同类型的多次波需使用不同的压制技术,使用多步串联多次波压制方法(SRME+Radon 变换+RES\_DEMUL)对原始资料中的多次波进行了有效压制,去除了多次波对剖面的影响,极大提高了剖面信噪比。

自由表面多次波衰减(Surface Related Multiple Elimination, SRME)首先使用特有算法对自身地震场数据进行卷积来预测所有自由表面多次波,然后对预测的多次波通过自适应相减从数据中去

除。与其他多次波衰减方法不同,SRME 不依赖于地下构造的假设或知识背景,也不使用事件属性来区分多次波和初至波,仅需要了解波形以及源和检波器的空间分布。由于地震采集时最小偏移距往往不符合 SRME 预测算法的要求,可采用数据插值的方法,使预测的自由表面多次波模型更准确。自适应相减去除所预测的多次波时,遵循时窗由大到小渐变的原则,根据经验,对预测多次波分多个时窗进行自适应相减可产生更好的效果<sup>[28-29]</sup>。甘泉海台区域为深水区,使用 SRME 可达到很好的去除海底相关多次波效果(图 7)。需要注意的是,SRME 虽然

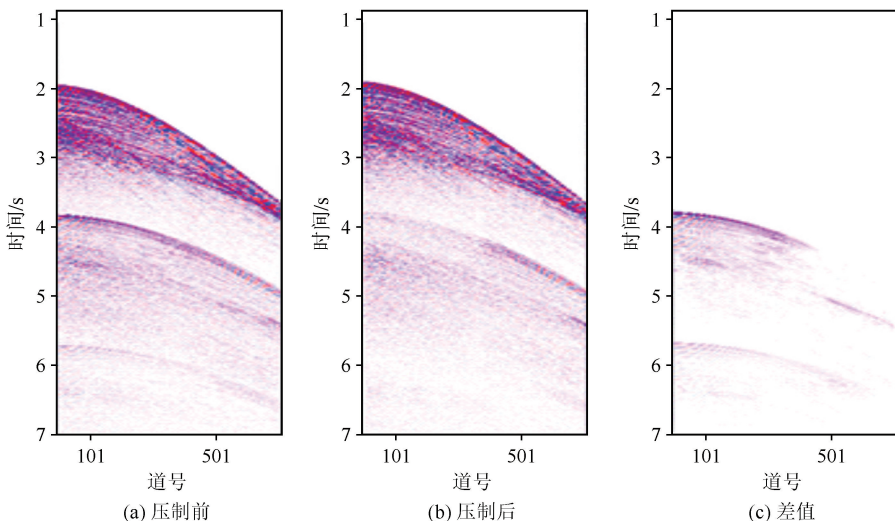


图 7 SRME 压制甘泉海台地震剖面多次波

Fig.7 Suppression of multiple waves in the seismic profile of Ganquan platform using SRME

在海底平坦区域对海底多次衰减效果比较理想,但对崎岖水底区域的水底多次衰减显得无能为力。

由于中远偏移距初至波和多次波存在明显动校时差差异,使用 SRME 后,地震资料中仍残留较强多次波。Radon 变换去多次波可以将数据从时间域转换到另一个域,例如  $\tau-p$  (延迟时间-水平偏移距)

域或  $\omega-\tau$  (角频率-延迟时间)域,这有助于更好地理解数据中的波形结构。因此,采用 Radon 变换将 SRME 后的甘泉海台反射地震数据投影到一组基函数上,提高多次波和主反射波之间的可分性,对多次波进行有效识别去除(图 8),从而有助于减少多次波的影响<sup>[30-31]</sup>。

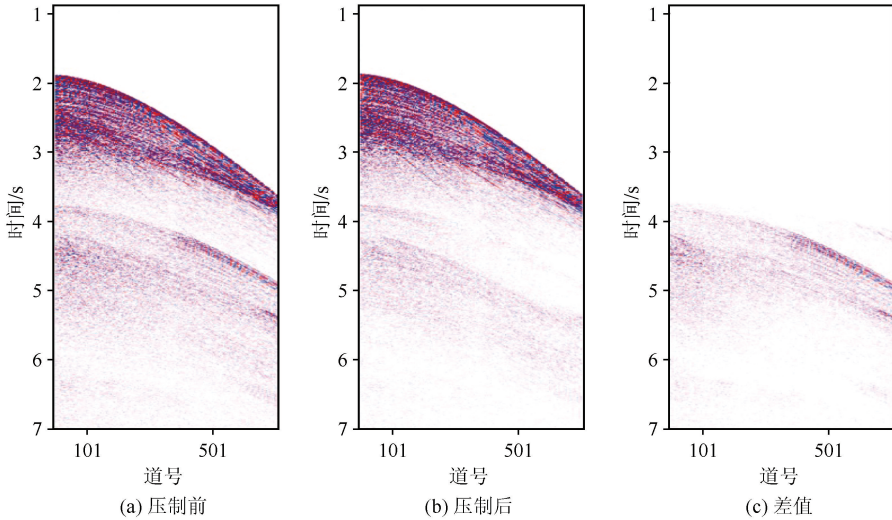


图 8 RADON 变换压制甘泉海台地震剖面多次波

Fig.8 Suppression of multiple waves in the seismic profile of Ganquan platform using RADON transformation

RES\_DEMUL 技术是自主研发的基于噪声能量加权的剩余多次波压制方法。该方法利用剩余多次波近道和远道的能量差异,进行自适应保幅压制

强能量残留多次波。Radon 变换后,反射地震资料中仍存在少量强能量多次波,利用该方法,这些多次波均可以有效去除(图 9)。

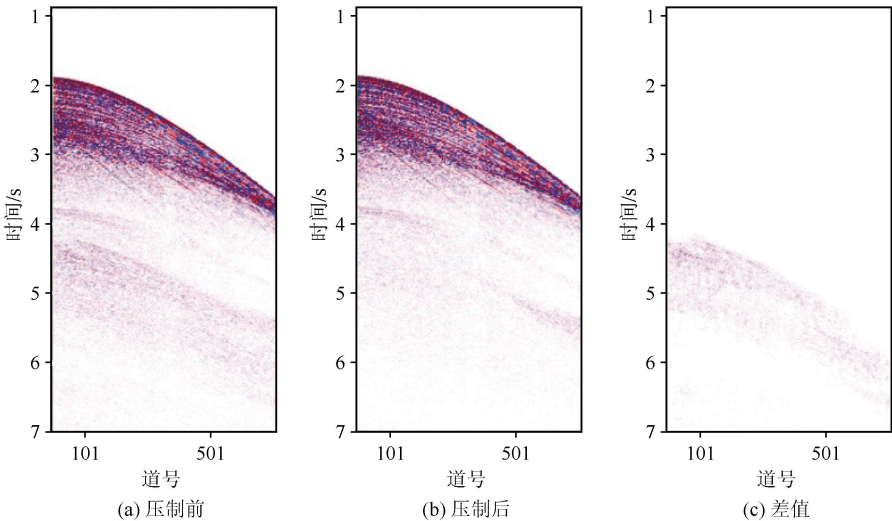


图 9 RES\_DEMUL 压制甘泉海台地震剖面多次波

Fig.9 Suppression of multiple waves in the seismic profile of Ganquan platform using RES\_DEMUL

### 3.4 叠前时间偏移

偏移归位将数据在水平方向上对齐,以便更好地反映地下结构,是地震资料处理过程中重要的一环。叠前时间偏移将不同偏移距和不同方位角度的

地震数据在时域上进行叠加,从而得到地下结构在双程反射时域上的分布情况。甘泉海台地震资料处理采用高精度真实的炮检位置信息,利用克希霍夫弯曲射线叠前时间偏移方法实现地层的准确归位。

对噪声去除和多次波压制处理后少数信噪比较低的测线进行叠前随机噪声压制和精细能量调整,以保证高品质的叠前数据基础。采用高精度偏移速度场,保证CRP道集拉平、偏移剖面归位合理。经过对比测试,弯曲射线偏移比直线偏移更耗费机时,但弯曲射线的成像效果明显好于直线。影响弯曲射线偏移效果的主要参数是偏移孔径、去假频滤波参数和偏移角度,为满足后续解释工作,需要通过分析试验选取合适的参数。通过不同偏移孔径测试的叠加结果分析,最大偏移距1倍的偏移孔径比较合适,既能对深部的构造进行清晰成像又不至于引入较多的偏移噪声。为使信噪比和分辨率均满足后续解释工作,选取1.0为合适的去假频滤波参数。甘泉海台地层横向变化较大,为保证去掉畸变能量的同时保留有效偏移能量,多次试验采用60°偏移角度。图10为偏

移处理效果图,可以看出偏移后绕射波收敛,目标地层和基底得到归位,有效反射能量得到聚焦,沉积层的反射波组特征清晰,有利于层序划分与解释。叠后对资料进行自适应反馈保真去噪、时变滤波去噪和径向滤波去噪,使剖面信噪比得到进一步提高。

3.5 处理效果分析

对比甘泉海台资料处理前后(图11):初叠剖面的信噪比较低,剖面上存在较强噪声和绕射波,反射同相轴成像比较模糊,有效反射被噪声和多次波覆盖,基底不清晰,波组特征不明确,断点断面不易识别,剖面的分辨率也较低;处理后的成果剖面噪声和多次波干扰被压制,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,成果剖面反映的地质构造及断层的地质现象清晰可靠,偏移剖面归位准确、断点清晰、画弧现象较少。

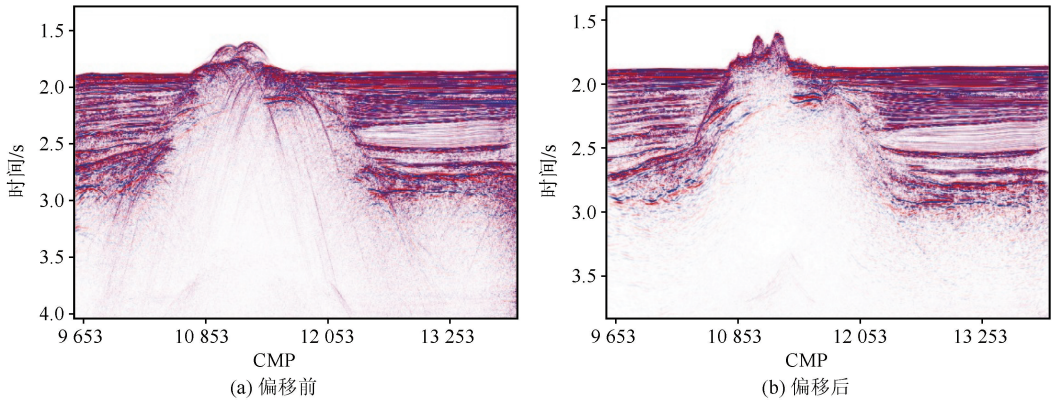


图10 叠前时间偏移前后叠加效果对比(GQHT003)

Fig.10 Comparison between stacking results before and after pre-stack time migration (GQHT003)

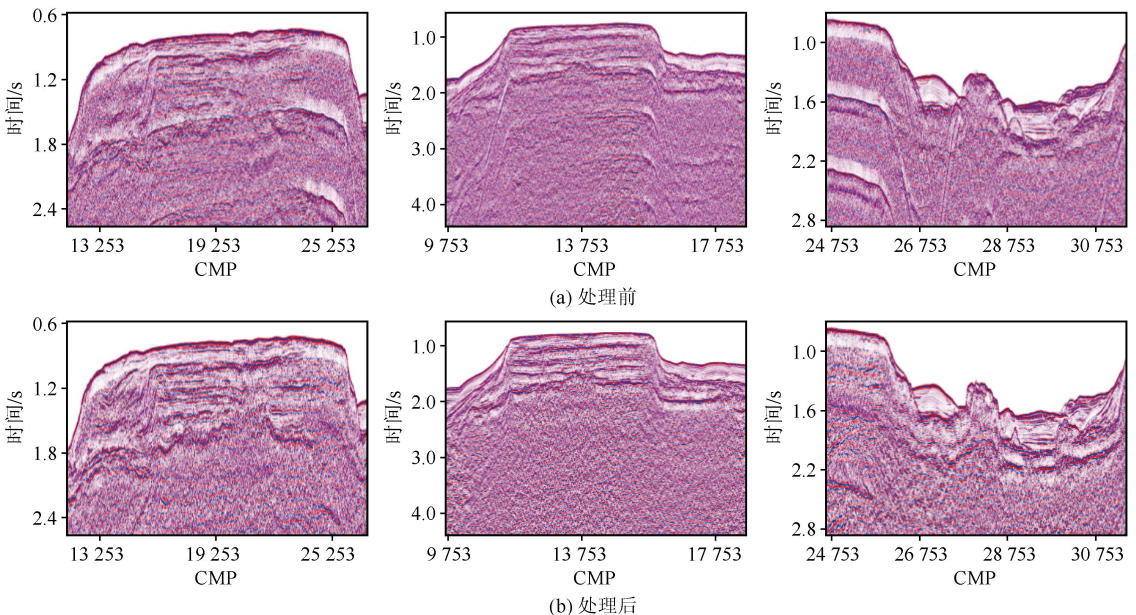


图11 甘泉海台地震资料处理前后效果对比

Fig.11 Comparison between seismic profiles of Ganquan platform before and after seismic data processing

## 4 结论

去海洋环境噪声、压制复杂多次波和中深层成像是南海淹没碳酸盐台地二维反射地震资料降噪处理、高分辨率成像的关键。选取典型南海淹没碳酸盐台地——甘泉海台,针对淹没台地地震资料特点,采用 4 项关键处理技术,去除了噪声干扰和大值干扰,压制了复杂多次波,提高了碳酸盐岩地层的信噪比,改善了剖面的分辨率,并得出以下结论:

(1) 低截滤波压制强涌浪噪声和 AAA 技术衰减异常振幅噪声组合可有效去除生物礁碳酸盐台地地震资料中的涌浪噪声和大值干扰。

(2) 多步串联多次波压制(SRME+RADON 变换+RES\_DEMUL)方法可较好地去除生物礁碳酸盐台地地震资料中的复杂多次波。

## 参考文献(References)

- [1] RIDING R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds; concepts and categories[J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 58(1): 163-231.
- [2] KLICPERA A, MICHEL J, WESTPHAL H. Facies patterns of a tropical heterozoan carbonate platform under eutrophic conditions; the Banc d'Arguin, Mauritania[J]. *Facies*, 2015, 61(1): 421.
- [3] 吴时国, 朱伟林, 马永生. 南海半封闭边缘海碳酸盐台地兴衰史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 1-17.  
WU Shiguo, ZHU Weilin, MA Yongsheng. Vicissitude of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea; sedimentation in semi-closed marginal seas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6): 1-17.
- [4] WU S G, ZHANG X Y, YANG Z, et al. Spatial and temporal evolution of Cenozoic carbonate platforms on the continental margins of the South China Sea; response to opening of the ocean basin[J]. *Interpretation*, 2016, 4(3): SP1-SP19.
- [5] 余克服, 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(8): 1160-1172.  
YU Kefu. Coral reefs in the South China Sea and their records and responses to Holocene environmental changes[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2012, 42(8): 1160-1172.
- [6] 张乔民, 余克服, 施祺, 等. 中国珊瑚礁分布和资源特点[C]//2006 中国科协年会论文集(下册). 北京: 中国科协, 2006: 5.  
ZHANG Qiaomin, YU Kefu, SHI Qi, et al. Distribution and characteristics of coral reefs in China[C]//2006 Proceedings of the Annual Conference of China Association for Science and Technology (Volume II). Beijing: China Association for Science and Technology, 2006: 5.
- [7] JAMES N P, COLLINS L B, BONE Y, et al. Subtropical car-

bonates in a temperate realm; modern sediments on the South-west Australian shelf[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(6): 1297-1321.

- [8] 张海洋, 赵美霞, 钟瑜, 等. 南海北部造礁石珊瑚共生体光合作用特征季节性监测[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(6): 84-91.  
ZHANG Haiyang, ZHAO Meixia, ZHONG Yu, et al. Seasonal monitoring of photosynthesis characteristics of scleractinian corals in the northern South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(6): 84-91.
- [9] WANG R, YU K F, JONES B, et al. Evolution and development of Miocene "island dolostones" on Xisha Islands, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 142-158.
- [10] BETZLER C, EBERLI G P. Miocene start of modern carbonate platforms[J]. *Geology*, 2019, 47(8): 771-775.
- [11] SHAO L, CUI Y C, QIAO P J, et al. Sea-level changes and carbonate platform evolution of the Xisha Islands (South China Sea) since the Early Miocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 504-516.
- [12] 朱伟林, 吴景富, 张功成, 等. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 88-101.  
ZHU Weilin, WU Jingfu, ZHANG Gongcheng, et al. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic Basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 88-101.
- [13] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区: 南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15-21.  
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area: the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.
- [14] 朱伟林, 张功成, 钟锴, 等. 中国南海油气资源前景[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(5): 46-50.  
ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, ZHONG Kai, et al. South China Sea: oil and gas outlook[J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(5): 46-50.
- [15] ZAMPETTI V, SCHLAGER W, VANKONIJENBURG J H, et al. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data; Luconia province, offshore Sarawak, Malaysia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(5): 517-534.
- [16] SATTLER U, IMMENHAUSER A, SCHLAGER W, et al. Drowning history of a Miocene carbonate platform (Zhujiang Formation, South China Sea)[J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 219(1-4): 318-331.
- [17] STEUER S, FRANKE D, MERESSE F, et al. Oligocene-Miocene carbonates and their role for constraining the rifting and collision history of the Dangerous Grounds, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 644-657.
- [18] EBERLI G P, GINSBURG R N. Cenozoic progradation of northwestern Great Bahama Bank, a record of lateral platform



- growth and sea-level fluctuations[M]//Controls on Carbonate Platforms and Basin Development.[S.l.]; SEPM (Society for Sedimentary Geology), 1989; 339-351.
- [19] BETZLER C, HÜBSCHER C, LINDHORST S, et al. Monsoon-induced partial carbonate platform drowning (Maldives, Indian Ocean)[J]. *Geology*, 2009, 37(10): 867-870.
- [20] WU S G, YANG Z, WANG D W, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2014, 350: 71-83.
- [21] 赵常升, 刘永, 肖雅元, 等. 南沙群岛重点岛礁潟湖微型浮游动物的群落结构与摄食[J]. *水产学报*, 2022, 46(6): 973-983.  
ZHAO Changsheng, LIU Yong, XIAO Yayuan, et al. Community structure and grazing of microzooplankton in the key islands and reefs of Nansha Islands[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 973-983.
- [22] LIU Y, WU S, LI X, et al. Seismic stratigraphy and development of a modern isolated carbonate platform (Xuande Atoll) in the South China Sea[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1042371.
- [23] 李学林, 张汉羽, 刘刚, 等. 西沙孤立碳酸盐台地的地震层序及演化模式: 以永乐环礁为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(5): 87-96.  
LI Xuelin, ZHANG Hanyu, LIU Gang, et al. Seismic sequence and evolution model of isolated carbonate platform: a case from Yongle Atoll, Xisha Islands[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(5): 87-96.
- [24] HARDAGE B A. An examination of tube wave noise in vertical seismic profiling data [J]. *GEOPHYSICS*, 1981, 46(6): 892-903.
- [25] ARDHUIN F, STUTZMANN E, SCHIMMEL M, et al. Ocean wave sources of seismic noise [J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 2011, 116(C9): C09004.
- [26] GUO J Y, LIN D C. High-amplitude noise attenuation [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003. Society of Exploration Geophysicists, 2003: 1893-1896.
- [27] HAUGE P S. Measurements of attenuation from vertical seismic profiles [J]. *GEOPHYSICS*, 1981, 46(11): 1548-1558.
- [28] MA C, FU Q, WEGLEIN A B. Comparison of the inverse scattering series free-surface multiple elimination (ISS FSME) algorithm with the industry-standard surface-related multiple elimination (SRME): defining the circumstances in which each method is the appropriate toolbox choice [J]. *GEOPHYSICS*, 2019, 84(5): S459-S478.
- [29] 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.
- [30] FOSTER D J, MOSHER CC. Suppression of multiple reflections using the Radon transform [J]. *GEOPHYSICS*, 1992, 57(3): 386-395.
- [31] MOON W, CARSWELL A, TANG R, et al. Radon transform wave field separation for vertical seismic profiling data [J]. *Geophysics*, 51(4): 940-947.

(本文编辑: 张向红)